

## RAPPORT FINAL

# COMPARAISON DE LA CULTURE ANNUELLE À LA CULTURE EN FIN DE SAISON D'ENGRAIS VERT DE LÉGUMINEUSES POUR AUGMENTER LA RÉSILIENCE DU SOL ET FOURNIR UN APPORT SUFFISANT DE N DANS UN CONTEXTE CLIMATIQUE DÉFAVORABLE

## PROJET IA116642

Responsables scientifiques : Aubert MICHAUD, chercheur  
Marc-Olivier GASSER, chercheur

Co-auteurs : Ariane BLAIS-GAGNON, professionnelle de recherche  
Marie-Ève TREMBLAY, professionnelle de recherche  
William Huertas, technicien agricole

Rapport présenté au Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation

Date : 30 janvier 2020

Projet IRDA # : 901182

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 de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) 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)

## PARTENAIRES

PROGRAMME

**INNOV'  
ACTION**

AGROALIMENTAIRE

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

**Canada**

**Québec**

Comparaison de la culture annuelle à la culture en fin de saison d'engrais vert de légumineuses pour augmenter la résilience du sol et fournir un apport suffisant de N dans un contexte climatique défavorable

Rapport final PROJET IA116642

Présenté à :

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation  
*Programme Innov'Action Agroalimentaire – Volet 2*

Préparé par :



Aubert Michaud, agr., Ph.D  
IRDA



Marc-Olivier Gasser, agr., Ph. D.  
IRDA

## LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :

Michaud, A., M.-O. Gasser, M.-E Tremblay, A. Blais-Gagnon et W. Huertas. 2020. Comparaison de la culture annuelle à la culture en fin de saison d'engrais vert de légumineuses pour augmenter la résilience du sol et fournir un apport suffisant de N dans un contexte climatique défavorable. Rapport final. IRDA. 76 pages plus Annexes  
© Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)

## RESPONSABLE DE L'ÉTABLISSEMENT

Stéphane P. Lemay, ing., P.Eng., agr., directeur de la recherche et du développement, IRDA

## ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

Responsables scientifique : Aubert Michaud, Ph.D, MAPAQ  
Marc-Olivier Gasser, agr., Ph. D., IRDA  
Co-auteurs : Marie-Eve Tremblay, agr., M. Sc., IRDA  
Ariane Blais-Gagnon, ing. Jr, M. Sc., IRDA  
William Huertas, technicien agricole, IRDA

## COLLABORATEURS

- Maryse Leblanc, agr., Ph.D., IRDA
- Michèle Grenier, biostatisticienne, IRDA
- Jacques Desjardins, technicien agricole, IRDA
- Pierre-Luc Hébert, ing. M.Sc., Responsable de site, IRDA.
- David Dugré, ing. Jr, M. Sc., IRDA
- François Landry, technicien en géomatique, IRDA
- Maxime Lefebvre, Ph.D., IRDA
- Mireille Pruneau, technicienne agricole, IRDA
- L'équipe des ouvriers agricoles de l'IRDA, Saint-Bruno

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

Aubert Michaud et Marc-Olivier Gasser  
Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)  
2700, rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8  
Téléphone : 418 643-2380, poste 690  
Courriel : [aubert.michaud@irda.qc.ca](mailto:aubert.michaud@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.

L'équipe de projet remercie Anne Weill, conseillère au CETAB, Sylvie Thibodeau, conseillère du Club agroenvironnemental du Bassin Laguerre et Thomas Dewavrin, producteur de grandes cultures en régie biologique, pour leurs précieux conseils dans la conduite de ce projet, notamment la conception des systèmes de culture et du choix des engrais verts de pleine saison ou associés à la culture de blé dans le cadre du projet.



## RÉSUMÉ

---

En production biologique de grandes cultures, l'apport d'azote aux cultures plus exigeantes est limité par la disponibilité des engrais de ferme et les contraintes liées à la saturation des sols en phosphore. Les engrais verts de légumineuses sont donc nécessaires. La disponibilité de l'azote des engrais de ferme et des engrais verts dépend toutefois des conditions climatiques favorisant la minéralisation des formes organiques. À l'inverse, les précipitations intensives et des températures froides en début de saison peuvent limiter la disponibilité de cet azote. Les sols sous prairie sont habituellement plus résilients face aux aléas climatiques. La prairie de légumineuses vivaces pourrait améliorer les conditions de sol et de minéralisation de l'azote, et augmenter l'apport d'azote à des cultures plus exigeantes comme le maïs. L'objectif du projet visait à comparer les fournitures en azote, l'amélioration du profil cultural et la rentabilité de systèmes avec engrais verts de légumineuses cultivés sur une pleine saison à ceux cultivés en association avec le blé précédent la culture de maïs-grain sous régime biologique. Un essai a été réalisé à la ferme expérimentale de l'IRDA à Saint-Bruno-de-Montarville pour comparer cinq scénarios d'interculture de légumineuses en grandes cultures: deux engrais verts (EV) de pleine saison (prairie de légumineuses et vesce velue), deux trèfles intercalaires dans le blé, enfouis à l'automne ou au printemps, un engrais vert de pois fourrager semé en fin de saison après le blé, ainsi qu'une parcelle témoin sans engrais verts. Les EV de légumineuses ont été cultivés en parcelles principales en 2017 et leurs effets ont été mesurés sur le maïs-grain en 2018 avec différentes doses d'*Acti-Sol* apportant 0, 75 et 150 kg/ha de N efficace en sous parcelles.

Dès l'installation des parcelles au printemps 2016, le retour d'une prairie de luzerne a produit un rendement de 9,7 tm/ha de maïs-grain sans azote supplémentaire, alors qu'un rendement maximal de 10,7 tm/ha a été obtenu à la dose optimale de N. Cette augmentation marginale du rendement a témoigné des bénéfices de la prairie de luzerne. Dans la culture de maïs-grain en 2018, le retour des EV de pleine saison (prairie de légumineuses et vesce velue) et de trèfles intercalaires (enfouis à l'automne ou au printemps) cultivés en 2017 ont produit des effets significatifs par rapport au Témoin, tant sur les rendements que sur la teneur en azote du grain. Sans apport supplémentaire d'engrais azoté, les EV de pleine saison ont généré des rendements de 6,2 tm/ha, significativement supérieurs aux 5,1 tm/ha mesurés sur retour de trèfles intercalaires et aux 2,3 tm/ha dans le témoin. Toutefois, avec des apports d'*Acti-Sol* de 75 et 150 kg/ha de N efficace, les EV de Pleine saison n'ont pas produit de rendements de maïs-grain significativement différents des EV de trèfles intercalaires. Les EV pleine saison ont toutefois généré des teneurs en N des grains significativement plus élevées et des ratios C/N du grain plus bas que les EV de trèfles intercalaires, et ce pour toutes les doses de N appliquées.

Sans EV de légumineuses, le maïs répond de façon linéaire aux apports d'*Acti-Sol*. Sur retour de légumineuses, les rendements de maïs évoluent de façon quadratique en réponse aux apports de N supplémentaires et tendent à plafonner plus rapidement en fonction des apports de N supplémentaires, tout en atteignant des rendements plus élevés. Les rendements maximaux sont ainsi de 6,5 tm/ha avec 150 kg N/ha sous forme d'*Acti-Sol* dans le Témoin, de 7,8 tm/ha avec 148 kg N/ha sous EV de trèfles intercalaires et de 8,6 tm/ha avec 144 kg N/ha sous EV de pleine saison.

Considérant un coefficient d'efficacité de 80 % de l'azote provenant de l'*Acti-Sol*, les équivalents fertilisants sont de 101 à 105 kg N/ha pour les traitements Trèfles intercalaires et de 140 à 141 kg N/ha pour les EV pleine saison. Ces équivalents fertilisants sont aussi plus élevés que les quantités de N retournées au sol avec la biomasse aérienne des EV de légumineuses et de pailles de blé en 2017, soit de 73 et 93 kg N/ha pour les traitements Trèfles intercalaires et EV pleine saison, respectivement.

Le suivi des concentrations de nitrates dans le sol réalisé au cours de la saison 2018 aux stades pré-semis, 6 feuilles du maïs (V6), sortie des soies (VT), stade pâteux (R4) et post-récolte reflète la réponse à l'azote et les rendements de maïs-grain obtenus. Les effets simples des traitements d'EV, des doses de N appliquées et des stades d'échantillonnage sur le stock de nitrates dans le sol (0-60 cm) sont tous très significatifs. Dès la période de pré-semis, les traitements d'EV de pleine saison et trèfles intercalaires ont contribué à l'enrichissement du sol en nitrates de façon significative par rapport au traitement Témoin. L'enrichissement du sol était par ailleurs significativement plus élevé sur un retour d'EV de pleine saison que sur un retour de Trèfles intercalaires. En post-lévé du maïs (stade V6), les concentrations de nitrates sont significativement plus élevées et supérieures au seuil critique de 20 mg/kg sur retour d'EV de pleine saison, par rapport au traitement Témoin ou sur retour de trèfles intercalaires. Malgré une tendance à la hausse, les concentrations de nitrates au stade V6 sous trèfles intercalaires n'étaient pas significativement différentes de celles sous Témoin. Des augmentations significatives de rendements de maïs ont pourtant été observées en réponse à la culture intercalaire de trèfles par rapport au Témoin, sans N supplémentaire. Cette différence de réponse pourrait résulter d'une mise en disponibilité de l'azote des trèfles intercalaires retardée par la paille de blé laissée au champ en 2017. En présence de résidus à C/N élevé, une attention particulière doit donc être apportée dans l'interprétation des teneurs en nitrates dans le sol en post-lévé comme indicateur de fertilisation azotée. L'incorporation des trèfles intercalaires au printemps plutôt qu'à l'automne permet toutefois d'augmenter d'environ 4 mg/kg les concentrations de nitrates mesurées de 0 à 30 cm de profondeur dans le sol au stade V6, peu importe les quantités de N supplémentaire apportées.

En post-récolte, les concentrations de nitrates résiduels dans le sol (NRS) n'étaient pas préoccupantes sur le plan environnemental dans les traitements avec EV de légumineuses aux plus faibles doses d'*Acti-Sol* (0 ou 75 kg N/ha). Toutefois, aux doses plus élevées d'*Acti-Sol* (150 kg N/ha), les EV de légumineuses ont généré des reliquats de fertilisation au-dessus du seuil environnemental (80 kg N/ha). Par rapport aux EV de trèfles intercalaires enfouis à l'automne et au sol Témoin travaillé au printemps seulement, les Trèfles intercalaires enfouis au printemps ont amélioré la condition physique du sol en diminuant la masse volumique apparente du sol mesurée après la récolte du maïs à l'automne. L'enfouissement du chaume de trèfle ainsi que de la paille résiduelle au printemps apportant à la fois du carbone et de l'azote dans un ratio C/N de 22 semble donc bénéfique pour le sol. À l'inverse, l'enfouissement au printemps de l'EV annuelle de vesce velue (T3) apportant très peu de carbone par rapport à la quantité d'azote retournée au sol dans une biomasse aérienne, avec un plus faible rapport C/N de 12,6 semble avoir détérioré la condition physique du sol.

Vu les coûts élevés des engrais organiques utilisés (500 \$/tm d'*Acti-Sol*) pour l'expérience, les doses optimales économiques d'*Acti-Sol* seraient de 47 kg N/ha sous EV de trèfles intercalaires et 36 kg N/ha sous EV de pleine saison, tandis que la pleine dose (150 kg N/ha) serait la plus économique dans le Témoin sans EV. Sous ces

scénarios, les EV de pleine saison offrent le meilleur profit brut (2 767\$/ha), dépassant les EV de trèfles intercalaires (2 687\$/ha), alors le Témoin produit un profit brut de 1 451\$ /ha. L'augmentation de profit en système EV de pleine saison, liée à la hausse du rendement de maïs et à la réduction du coût de la fertilisation azotée, surpasse ainsi la perte de revenu lié à l'abandon de la culture de blé (marge nette de 280\$/ha) et du coût d'installation d'une prairie de légumineuses (203\$/ha) plus élevé que celui de trèfles intercalaires (81\$/ha). À ces doses économiques optimales, les apports de phosphore (28-37 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) demeurent aussi inférieurs à la limite réglementaire imposée aux sols qui ont dépassé le seuil de saturation en P (45 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Le recours à un lisier de porc à plus faible concentration de P comme une phase liquide de lisier de porc (séparé par gratte en « V » sous les lattes au bâtiment), permettrait d'augmenter la dose de N à 144 kg N/ha sous EV de pleine saison et 148 kg N/ha sous EV de trèfles intercalaires avec un apport marginal de phosphore (30 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) et d'augmenter les profits bruts à 3 891 et 3 908 \$/ha respectivement, par rapport au Témoin à 3 326 \$/ha. Pour le secteur de la production de grains biologiques, la disponibilité d'engrais organiques « à teneur réduite en P » est particulièrement avantageuse à long terme en raison d'une utilisation continue d'engrais de ferme, susceptible de conduire à l'enrichissement excessif du sol en phosphore.

Les différents précédents culturaux d'engrais verts ont eu des effets marqués sur les rendements de maïs grain, l'évolution des taux de nitrates dans le sol, la condition physique des sols et la rentabilité du système cultural. Le recours aux EV de légumineuses de pleine saison est aussi rentable que les EV de trèfles intercalaires en production de maïs grain biologique, permet une fertilisation organique respectant les seuils environnementaux d'apports de N et d'enrichissement du sol en P, et s'avère bénéfique pour la condition physique du sol.

## TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ .....	5
1 Introduction.....	13
2 Objectifs de l'étude .....	18
3 Matériel et méthodes.....	19
3.1 Dispositif expérimental .....	19
3.2 Échantillonnage des sols .....	24
3.3 Suivi hydrométrique des flux aux drains et de la hauteur des nappes d'eau .....	24
3.4 Analyse économique.....	25
3.5 Analyses statistiques.....	26
4 Résultats .....	27
4.1 2016 – Maïs grain sur retour de Prairie de légumineuses .....	27
4.1.1 Suivi des rendements et des biomasses .....	27
4.1.2 Courbes de réponse à l'azote .....	29
4.1.3 Suivi des nitrates dans le sol .....	31
4.1.4 Suivi des propriétés du sol .....	32
4.2 2017 – Blé et Engrais vert .....	33
4.2.1 Suivi des rendements et des biomasses .....	33
4.2.2 Suivi des nitrates dans le sol .....	37
4.3 2018 – Maïs grain sur retour d'engrais verts de Légumineuses .....	38
4.3.1 Suivi des rendements.....	38
4.3.2 Suivi des nitrates dans le sol .....	45
4.3.3 Suivi des propriétés du sol .....	55
4.4 Suivi des hauteurs de nappe et flux de nitrates au drain .....	58
4.4.1 Suivis des hauteurs de nappe .....	58
4.4.2 Suivi des flux de nitrates aux collecteurs de drains .....	60
4.5 Analyse économique.....	63
5 Discussion et conclusions .....	69
6 Références.....	73
7 ANNEXES – Données Brutes .....	77



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Température moyenne mensuelle de l'air et précipitations totales mensuelles mesurées à la station climatique de l'aéroport de Saint-Hubert situé à moins de 8 km de l'essai. ....	19
Tableau 2 : Définition des traitements d'engrais vert de légumineuses.....	20
Tableau 3 : Cultures, cultivars et informations sur les semis pour les différents traitements au cours des 3 années du projet.....	21
Tableau 4 : Opérations culturales réalisées pour les différents traitements au cours des 3 années du projet. ....	22
Tableau 5 : Moyennes et coefficients de variation des paramètres mesurés sur les engrais organiques utilisés. 23	
Tableau 6 : Quantités d'éléments fertilisants apportés avec les engrais organiques.....	23
Tableau 7 : Effets des positions en ligne et en colonne dans les champs A200 et A300 sur le rendement à 15 % d'humidité et la teneur en eau du maïs-grain récolté en 2016. ....	28
Tableau 8 : Rendement en biomasse du mélange Luzerne-trèfles (T2) et du raygrass (T1, T3, T4, T5, T6) implantés le 5 juillet 2016.....	29
Tableau 9 : Propriétés physico-chimiques des parcelles témoin en juin 2016. ....	32
Tableau 10 : Rendements (tm/ha), teneur en eau et ratio C/N par traitement dans le grain et la paille le 12 septembre 2017. ....	33
Tableau 11 : Biomasses aériennes, teneurs en eau, ratio C/N et quantités de carbone et d'azote retournées au sol avec les engrais verts mesurées le 13 septembre et le 12 octobre 2017 sous chaque traitement....	35
Tableau 12 : Rendement de maïs-grain à 15 % d'humidité, teneur en eau, ratio C/N et teneurs en carbone et azote du grain en fonction des traitements d'engrais verts et des doses d'azote appliquées. ....	38
Tableau 13 : Probabilités de t associées aux contrastes entre la prairie de légumineuses (T2) et la vesce velue (T3) sur les variables de rendement du maïs-grain à différentes doses d'azote appliquées. ....	40
Tableau 14 : Effets linéaires et quadratiques des différentes doses d'azote appliquées (0, 75 et 150 N d'Acti-Sol) sur les variables de rendement du maïs-grain selon les différents traitements d'engrais verts.....	40
Tableau 15 : Effets des EV de pleine saison (T2-T3) et des EV Trèfles intercalaires (T4-T5) par rapport au traitement Témoin (T1-T6) sur les variables de rendement du maïs-grain aux différentes doses d'azote appliquées (0, 75 et 150 N d'Acti-Sol).....	41
Tableau 16 : Effets des traitements, des doses de N appliquées et des dates d'échantillonnage sur les concentrations moyennes de nitrates et d'ammonium pondérées de 0 à 60 cm de profondeur. ....	46
Tableau 17 : Effets des traitements EV sur les teneurs moyennes pondérées en nitrates (0-60 cm) par date et par dose de N appliquée avec l'Acti-Sol. ....	47
Tableau 18 : Contrastes entre les effets des traitements EV par date sur les teneurs moyennes pondérées en nitrates (0-60 cm) pour les périodes pré-semis, stade V6 et post-récolte. ....	48
Tableau 19 : Effets des EV, des doses d'Acti-Sol appliquées et de leur interaction sur les teneurs en nitrates de 0 à 30 cm de profondeur dans le sol au stade V6 en post-levée du maïs le 20 juin 2018.....	51

Tableau 20 : Effets des traitements EV et des doses d'Acti-Sol (0-75-150 N) sur les teneurs moyennes pondérées en nitrates de 0 à 60 cm de profondeur dans le sol en post-récolte du maïs le 8 novembre 2018. ....	53
Tableau 21 : Effets des traitements d'EV sur les propriétés physiques du sols mesurés à deux profondeurs (0-30 et 30-60 cm) dans le sol à la fin de l'étude (nov. 2018). ....	55
Tableau 22 : Comparaison entre les traitements Témoin (T1-T6), EV de pleine saison (T2-T3) et Trèfles intercalaires (T4-T5) sur les propriétés physiques du sols mesurées à deux profondeurs.....	56
Tableau 23 : Majoration des coûts associés aux systèmes avec engrais verts de légumineuses par rapport au système Témoin (sans EV). ....	64
Tableau 24 : Analyse de la rentabilité des systèmes de culture d'engrais verts de pleine saison et intercalaire comparés au système cultural sans engrais verts en fonction de trois sources d'engrais azoté utilisables en régie biologique et trois scénarios de fertilisation (Dose de N maximale, économiquement optimale et environnementale). ....	66
Tableau 25 : Concentrations en N-NH <sub>4</sub> mesurées à trois profondeurs (0-15, 15-30 et 30-60 cm) au cours de la saison 2018. ....	77
Tableau 26 : Concentrations en N-NO <sub>3</sub> mesurées à trois profondeurs (0-15, 15-30 et 30-60 cm) au cours de la saison 2018. ....	79
Tableau 27 : Propriétés physiques du sol mesurées à deux profondeurs (0-30 et 30-60 cm) à la fin de l'étude (nov. 2018). ....	82

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Plan du dispositif expérimental .....	20
Figure 2 : Rendement à 15 % d'humidité et teneur en eau mesurés dans chaque parcelle en maïs grain en 2016. Les douze colonnes reflètent les positions parallèles aux deux planches. ....	27
Figure 3 : Rendement à 15 % d'humidité et teneur en eau du maïs-grain récolté en 2016 selon sa position sur la planche dans les champs A200 et A300.....	28
Figure 4 : Courbe moyenne de réponse à la fertilisation azotée du maïs grain déterminées par les suivis des micro-parcelles (50, 100 et 150 kg/ha de N efficace en provenance de l'engrais organique <i>Écoplus</i> ) et des parcelles Témoin (0 N) en 2016 sur un retour de prairie de légumineuses. ....	30
Figure 5 : Teneurs en nitrates mesurées dans le sol en post-levée et en post-récolte du maïs grain en réponse à la fertilisation en 2016. ....	31
Figure 6 : Rendement à 15 % d'humidité et teneur en eau du grain et de la paille de blé de chaque parcelle en 2017, selon son emplacement dans le dispositif expérimental.....	34
Figure 7 : Rendement et teneur en eau du grain (a) et de la paille (b) de blé récoltés en 2017 en travers des planches A200 et A300 du dispositif expérimental. ....	35
Figure 8 : Comparaison des teneurs en nitrates dans le sol sous les traitements T1 et T2 en post-récolte du blé en 2017. ....	37
Figure 9 : Distribution spatiale du rendement et de la teneur en eau du maïs grain en 2018 sur le dispositif (a) et sur un axe perpendiculaire aux deux planches A200 et A300. ....	39
Figure 10 : Courbes de réponse du maïs grain aux apports d' <i>Acti-Sol</i> (0, 75 et 150 kg/ha de N efficace) (a) sous les traitements Témoin (T1-T6), EV pleine saison (T2-T3) et Trèfles intercalaires (T4-T5) et équivalents fertilisant à 0 N (b) et 150 N (c) des EV pleine saison et Trèfles intercalaires. ....	42
Figure 11 : Évolution des teneurs moyennes en nitrate (N-NO <sub>3</sub> ) dans le temps et en profondeur dans le sol selon le type d'engrais vert (Pleine saison vs intercalaire) et les trois doses d'azote (0, 75 et 150 N) apportées pour le maïs-grain. ....	45
Figure 12 : Séries chronologiques journalières des précipitations et des hauteurs des nappes des champs contrôlé (A200) et non contrôlé (A300) pour l'année 2018 (N= 12 puits d'observation). ....	59
Figure 13 : Séries chronologiques journalières des débits aux collecteurs des drains et des hauteurs des nappes des champs contrôlé (A200) et non contrôlé (A300) pour l'année 2018 (N= 12 puits d'observation). ..	59
Figure 14 : Évolution durant la saison de culture de 2018, des concentrations de nitrates dans l'eau observées aux collecteurs des champs sous dispositifs expérimentaux A200 et A300 et du champ Témoin en prairie A400. La hauteur d'eau journalière exportée du champ A300 (sous drainage libre) au moment des échantillonnages (manuels et automatiques) est également rapportée. ....	61

Figure 15 : Flux journaliers de nitrates (estimés) sous le champ A300 en période de recharge à l'automne 2018. .....	62
Figure 16 : Évolution des concentrations de N-NO <sub>3</sub> mesurées à trois profondeurs (0-15, 15-30 et 30-60 cm) au cours de la saison 2018 sous l'effet des traitements EV de légumineuse et de 3 doses d' <i>Acti-Sol</i> (0, 75 et 150 kg/ha de N efficace). .....	81

# 1 INTRODUCTION

---

En production biologique de grandes cultures, un apport suffisant d'azote aux cultures plus exigeantes s'avère complexe. La disponibilité des engrais de ferme, leur coût et la dissémination de semences de mauvaises herbes avec certains fumiers posent certaines contraintes, tandis que l'usage trop fréquent d'engrais de ferme conduit à la saturation des sols en phosphore (Giroux et al., 1996). Selon une enquête réalisée auprès de producteurs de grains biologiques du Québec, sur 17 répondants, 7 ont répondu sur une échelle de 1 à 5 que la contrainte de saturation de leurs sols en phosphore était très importante (niveau 5) (Coulibali et al., 2015). Sans être généralisée à l'ensemble des producteurs, cette contrainte peut pour certains producteurs rendre difficile le recours aux engrais de ferme. Si en agriculture conventionnelle ce manque d'azote peut être comblé par des engrais de synthèse, en production biologique, l'usage de légumineuses dans la rotation est pratiquement le seul moyen d'introduire de l'azote dans le système via la fixation de l'azote atmosphérique, et ce à un prix abordable et sans apport de phosphore excédentaire. L'azote fourni par les engrais de ferme et les engrais verts serait toutefois plus sensible aux aléas climatiques que celui des engrais de synthèse, particulièrement les températures froides en début de saison et les précipitations intensives. L'enquête précédemment citée et menée auprès des producteurs de grains biologiques du Québec, révèle que 10 producteurs sur 17 jugent que les carences en azote dans leurs cultures les plus exigeantes sont importantes sinon de plus en plus importantes (Coulibali et al., 2015).

La condition dégradée des sols engendrée par le contrôle mécanique des mauvaises herbes en régie biologique pourrait aussi jouer un rôle important sur la mise en disponibilité de cet azote. Pourtant, les systèmes agricoles biologiques sans intrants de synthèse devraient présenter une plus grande résilience face aux conditions climatiques extrêmes que les systèmes en agriculture conventionnelle (McMillan, 2012). En effet, les sols sous régie biologique présentent souvent une activité biologique plus intense qui va de pair avec l'emploi de cultures de couvertures et d'engrais vert (Sullivan et Andrews, 2012). Les engrais verts peuvent notamment améliorer les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols (Biederbeck et al. 1998; Abdallahi et N'Dayegamiye 2000). Ces derniers ont observé une augmentation de la stabilité des agrégats en lien avec la productivité des espèces d'engrais verts utilisés de même qu'une augmentation de l'activité microbienne. En l'absence de telles cultures, les performances des systèmes en régie biologique seraient très faibles en termes de productivité (McMillan, 2012).

La conception d'une rotation dépend cependant d'un grand nombre de facteurs, principalement d'ordre pédoclimatiques (cultures possibles, potentiel de rendement, possibilité d'interventions mécaniques...) et économiques (existence et pérennité des débouchés) (Fontaine et al. 2012). Dans cet ordre d'idée, 9 répondants sur 17 des producteurs de grain biologiques enquêtés ont indiqué comme une pratique importante à très importante, l'instauration d'une année de jachère pour produire et incorporer au sol un engrais vert, tandis que 4 répondants ont jugé cette pratique moins intéressante. Pour certains de ces producteurs, l'instauration d'une jachère pour améliorer les conditions de sol et réaliser un apport en azote au système par des cultures de légumineuses apparaît donc réalisable. Dans ces conditions, l'installation d'un engrais vert de pleine saison de légumineuses pourrait à la fois augmenter l'apport en azote au système et améliorer les conditions de sol par



rapport à un engrais verts de fin de saison. Les sols seraient ainsi plus résilients face aux aléas climatiques et capables d'augmenter la disponibilité de l'azote à des cultures plus exigeantes comme le maïs (Gaudin et al., 2013).

Plusieurs légumineuses cultivées sur une pleine saison peuvent produire une quantité substantielle d'azote et de biomasse comme engrais vert. Au Manitoba, un mélange de vesce velue et d'orge semé au printemps a produit une biomasse finale de 7,9 à 10,8 tm/ha en fin de saison. La vesce s'est d'ailleurs développée lorsque l'orge a atteint sa maturité et a cru jusqu'à la fin de l'automne, mais n'a pas survécu à l'hiver (Halde et Entz, 2014). Les légumineuses pérennes comme la luzerne ou le trèfle rouge, cultivées sur une pleine saison ont pu fournir sous les conditions de la région de Guelph en Ontario une contribution de 90 à 125 kg N/ha à la culture subséquente de maïs, équivalente à une disponibilité de 65 à 71 % de l'azote total retournée au sol en provenance de ces légumineuses (Bruuselma et Christie, 1987). Mais comme le mentionnent Hesterman et al. (1987) dans leur conclusion, la contribution en azote d'une culture annuelle de luzerne peut être parfois surestimée par rapport à une luzernière plus longuement établie ou si les fauches successives de la légumineuse sont exportées (Groya and Sheaffer, 1985). D'autres cultures annuelles de légumineuses comme le soya peuvent cependant démontrer de faibles retours en azote à la culture subséquente de maïs. Paré et al. (1992) avaient démontré, entre autres dans la région de Québec, un apport pratiquement nul de N par le soya à la culture de maïs fourrager, comparativement à une culture de féverole qui aurait fourni un équivalent de 40 à 150 kg N/ha selon le site.

Le retour en azote des légumineuses varie en fonction de leur productivité liée à leur acclimatation au sol et au climat, ainsi qu'à la pression des cultures associées et des adventices, mais la contribution en azote à la culture subséquente varie aussi fortement, en fonction des types de résidus retournés au sol et du travail de sol. Dans un essai récemment mené en Montérégie, N'Dayegamiye et al. (2014) ont observé des effets contrastants quant à l'impact de différents engrais verts de légumineuses sur le retour en N et le rendement du maïs. En effet, bien que des biomasses élevées aient été obtenues soit avec la vesce velue (3,6 t MS/ha) et le trèfle rouge en association avec l'orge (3,5 t MS/ha), de même que des productions comparables en azote de 88 et 84 kg N/ha respectivement, le rendement en maïs était toutefois de presque 3 tm/ha plus élevé sur le retour de la vesce velue. N'Dayegamiye et al. (2014) ont calculé des coefficients d'utilisation de l'azote des engrais verts par le maïs. La luzerne pure ainsi que le trèfle incarnat en mélange avec l'orge obtiennent les résultats les plus faibles, soit des coefficients de l'ordre de 20 %. Les mélanges d'orge avec le trèfle Ladino et avec le trèfle Ladino et trèfle rouge obtiennent des valeurs moyennes de 35 %. La vesce velue présente, quant à elle, un coefficient de 49 % d'utilisation. De tels coefficients vont dans le même sens que Sullivan et Andrews (2012), lorsqu'on prend en considération la concentration en azote dans la biomasse. Ceux-ci rapportent que moins de la moitié de l'azote fixé par un engrais vert est libéré au cours de la saison de culture suivant son enfouissement. Sullivan et Andrews (2012) mentionnent aussi que l'apport d'azote racinaire des cultures de couvertures est négligeable par rapport à la contribution de la partie aérienne. Ainsi, ils rapportent que l'azote mesuré dans la partie aérienne d'une culture de vesce velue était de l'ordre de 112 kg N/ha alors que la fraction racinaire contenait uniquement 11 kg N/ha lors d'un essai dans l'état de Washington.

Des résultats sensiblement similaires ont été obtenus lors d'un essai au Québec comparant différents engrais verts de légumineuses annuelles et autres crucifères et graminées (Envir-Eau-Sol, 2012). Bien que les concentrations de N soient plus élevées dans les racines et les tiges de légumineuses, par rapport aux autres engrais verts, la biomasse racinaire ne représentait pas plus de 10 % de la biomasse totale. Selon leur calcul basé sur un coefficient d'utilisation de 0,60, les engrais verts de pois fourrager, trèfle incarnat et vesce velue auraient apporté respectivement 81, 64 et 71 kg N/ha à la culture subséquente de maïs. Les ratios des biomasses aériennes/racinaires des cultures pérennes de légumineuses sont toutefois plus faibles que ceux des engrais verts de légumineuses annuelles. Bolinder et al. (2007) rapportent des ratios de 2,7 et 2,2 respectivement pour des légumineuses pérennes (luzerne, trèfle rouge, mélilot) en première année d'installation et en première année de récolte. De même, Gaudin et al. (2014) rapportent un ratio de 3 pour un trèfle rouge semé en intercalaire dans le blé d'automne et récolté en fin de saison. La biomasse racinaire de certaines légumineuses cultivées sur une pleine saison pourrait donc amener des contributions importantes à la fertilisation azotée des cultures subséquentes et ces biomasses devraient être mesurées.

Les engrais verts de légumineuses peuvent être cultivés en mélanges avec des graminées ou en association avec des céréales, ce qui accroît la production de biomasse, mais pas toujours la contribution en N à la culture subséquente. Un essai mené dans le nord de l'Allemagne a comparé la fixation de l'azote et l'impact sur une culture de blé subséquente à trois légumineuses de pleine saison (trèfle rouge, trèfle blanc, luzerne) en mélange avec différentes proportions de ray-grass (Loges et al. 1999). Les parcelles cultivées avec un mélange légumineuse – ray-grass avaient produit significativement plus de matière sèche au cours de la saison que les parcelles en culture pure. Le trèfle blanc (Ladino) produisait toujours moins que le trèfle rouge ou la luzerne, et le mélange trèfle rouge – ray-grass produisait le plus de matière sèche. Cependant, les rendements en blé ainsi que la qualité des grains étaient supérieurs lorsque la légumineuse semée en association était implantée en semis pur (Loges et al. 1999).

La contribution en azote des engrais verts à la culture subséquente dépend donc de plusieurs facteurs, dont la quantité d'azote apportée principalement sous forme organique par l'engrais vert, mais aussi des conditions de minéralisation qui doivent être synchronisées avec les périodes de prélèvements les plus intenses de la culture subséquente. Plusieurs méthodes d'estimation de cette contribution ont été proposées, basées habituellement sur les propriétés de l'engrais enfoui et de la période de mise en disponibilité. Jobin et Douville (1996) cité dans Duval et al., (2016) ont rapporté trois méthodes utilisées au Québec pour estimer cette contribution, soit :

1. Un coefficient de minéralisation fixe de 0,6, tel que proposé dans les guides du CRAAQ;
2. Un coefficient variant selon la concentration de N dans l'engrais vert, par exemple des coefficients de 0,4 et 0,8 pour des concentrations de N de 20 et 40 g/kg respectivement;
3. Une libération dans le temps en fonction de la concentration de N dans l'engrais vert
  - Libération très rapide pour la quantité de N associée à la concentration de plus 18 g/kg;
  - Libération en cours de saison pour N associé à la concentration entre 9 et 18 g N/kg;
  - Libération la saison suivante de N associé à la concentration inférieure à 9 g N/kg.

D'autres ont proposé des méthodes d'estimations basées sur le rapport C/N (qui est corrélé à la concentration en N) et des teneurs en lignine et autres composantes de l'engrais vert pour une meilleure estimation de la décomposition/minéralisation de l'engrais verts (Bruuselma et Christie, 1987). Par ailleurs, la contribution des engrais verts à la fertilisation azotée des cultures en systèmes biologiques est aussi tributaire des pratiques culturales dont l'intensité du travail de sol primaire et des opérations de sarclage subséquentes pour le contrôle des mauvaises herbes dans la culture principale. Dans des essais menés à l'Institut Rodale ciblés sur la réduction de l'intensité du travail de sol en régie biologique, la dynamique temporelle de l'azote provenant d'un engrais vert de vesce velue était largement déterminée par l'intensité du travail de sol et la façon de gérer le couvert de vesce avant le semis de maïs (Drinkwater et al., 2000). Les traitements avec travail primaire (labour et chisel) ont produit des niveaux très élevés d'azote minéral en début de saison et une plus grande production nette de N minéralisé que le traitement où la vesce était seulement fauchée, même si cette dernière produisait une biomasse et un apport en N égal ou supérieur aux traitements avec travail de sol.

La rapidité de la libération de l'azote fixée par les engrais verts est influencée par la température et l'humidité du sol en cours de saison (Sullivan et Andrews, 2012). Le climat du Québec ne favorise pas une minéralisation rapide des engrais verts au printemps. Ainsi, il peut être nécessaire de combler les besoins de la culture principale (blé ou maïs) par un apport en fumier ou compost (Petit et Jobin, 2005). L'apport de fumier à l'automne avant l'implantation d'un engrais vert de légumineuse peut parfois nuire à l'engrais vert, mais ceci n'a pas été le cas dans des essais menés avec du trèfle incarnat, du pois fourrager et la vesce commune (Envir-Eau-Sol, 2012). Toutefois, une augmentation du rendement de la culture principale a été démontrée (N'Dayegamiye et al, 2014). En effet, l'apport d'un fumier de bovin ou d'un compost *Biosol* ont amélioré les rendements en maïs l'année suivant la culture d'un engrais vert de légumineuse, dans l'ordre de 5 % et de 18 % respectivement. Cependant, compte tenu des coûts de ces produits, les marges de profits obtenues avec la récolte du maïs étaient plus faibles que celles obtenues sans fertilisation supplémentaire dans le cas du fumier alors qu'elles étaient clairement négatives dans le cas du compost. Donc avec certains amendements organiques, l'emploi d'une source de fertilisation azotée supplémentaire permet d'améliorer les rendements et serait nécessaire en conditions expérimentales pour vérifier si les cultures répondent toujours à l'azote lorsqu'on veut comparer différents engrais verts de légumineuses.

La minéralisation des engrais verts et des fumiers et la mise en disponibilité de N aux cultures annuelles exigeantes comme le maïs est aussi tributaire des conditions pédoclimatiques qui prévalent durant le printemps et l'été. Des excès d'eau au printemps ralentissent le réchauffement du sol et réduisent l'activité microbienne et la minéralisation des matières organique. Certains engrais verts améliorent la résilience des sols face à ces évènements (Gaudin et al. 2013). Les cultures pérennes de légumineuses offrent une meilleure alternative avec des systèmes racinaires plus profonds, de la biomasse plus ligneuse et moins facilement dégradables que des engrais verts jeunes de légumineuses annuelles. Le trèfle rouge cultivé en association avec une céréale offre également une solution intermédiaire intéressante en fournissant de l'azote dans des résidus relativement jeunes et un chaume de céréales comme substrat moins facilement dégradables. Les avantages de ces EV sont cependant tributaires des conditions climatiques qui prévalent en début de saison et qui sont imprévisibles. L'usage d'un système pour contrôler la hauteur de nappe dans les drains souterrains permettrait de simuler des conditions

contrastées de teneur en eau dans le profil du sol afin d'évaluer ces effets sur la minéralisation de l'azote des engrais verts de légumineuses et la capacité de certains engrais verts à améliorer les conditions physiques sol pour faire face à des conditions saturées en eau dans le profil. Les systèmes de contrôle de nappe, incluant l'irrigation souterraine, permettent entre autres de maintenir des hauteurs de nappes à l'exutoire de 15 à 75 cm de profondeur par rapport au niveau du sol et de réduire de 18 à 85 % les quantités d'eau drainées durant la saison de croissance ou subséquemment (Skaggs et al., 2012). La résultante sur la productivité des cultures dépendrait de la saison climatique. Il peut y avoir une augmentation de la quantité d'eau disponible à la plante en conditions sèches. Toutefois en conditions très sèches, il peut ne pas y avoir d'eau à conserver, en absence d'irrigation souterraine. Les meilleures conditions pour un drainage contrôlé seraient des alternances de périodes humides et sèches. Mais en général, la revue de Skaggs et al. (2012) rapporte peu d'augmentations significatives des rendements. Les gains seraient plutôt au niveau des réductions de pertes de nitrates et de phosphore aux drains (Skaggs et al. 2012; Drury et al., 2014; Zhou et col. 2000; Mejia et Madramootoo, 1998). Un maintien du niveau de la nappe au printemps après les semis pourrait toutefois s'accompagner d'une augmentation des conditions de saturation en eau des sols et éventuellement d'un réchauffement plus lent des sols (Drury et al., 2014). Ces conditions plus humides au niveau du sol devraient donc affecter les conditions de minéralisation de l'azote du sol et des engrais verts, et ainsi permettre d'éprouver et comparer les engrais verts constituant de meilleurs précédents pour rendre le sol résilient face à des conditions climatiques adverses.

## 2 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

---

L'objectif principal du projet consistait à évaluer les fournitures en azote et l'amélioration du profil cultural associés à cinq différents scénarios d'interculture de légumineuses pour un site en grandes cultures sous régime biologique.

Les objectifs spécifiques consistaient à :

- documenter les prélèvements en azote (N) des cultures principales et les effets sur les propriétés du sol en réponse aux différents types d'engrais verts (EV) implantés à différentes périodes;
- documenter dans le temps l'évolution des nitrates disponibles dans le sol, de même que l'exportation de nitrates en situations contrastées de hauteurs de nappe d'eau;
- mesurer les propriétés physiques du sol, de façon à évaluer l'influence des différents systèmes culturaux à base d'EV de légumineuses sur la qualité du profil cultural;
- évaluer la rentabilité économique de l'implantation des EV de pleine saison et intercalaires utilisés comme sources de fertilisation azotée du maïs grain.



## 3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 3.1 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le projet a été réalisé à la Plate-forme d'innovation en agriculture biologique de l'IRDA à Saint-Bruno-de-Montarville. Un dispositif en blocs aléatoires complets a été implanté sur deux champs contigus (A200 et A300). Au départ du projet, les champs étaient sous prairie de luzerne depuis trois ans. Ces champs drainés souterrainement présentaient une topographie plane et étaient relativement uniformes sur le plan des propriétés de sols, héritées des séries Sainte-Rosalie et Dujour en phase argileuse. Le sol est une argile lourde, la teneur en argile est de 62, 60 et 70 % respectivement de 0 à 15, 15 à 30 et 30 à 60 cm de profondeur dans le sol. Le taux de matière organique initial de 0 à 30 cm de profondeur dans le sol variait de 3,1 à 3,3 % dans les deux champs à l'étude, le pH variait de 7,2 à 7,4, tandis que les teneurs en P et K extrait Mehlich-3 variaient respectivement de 46 à 48 mg P/kg et de 265 à 266 mg K/kg de sol. L'indice de saturation en P (P/Al M-3) variait de 4,2 à 4,4 %. Les analyses du sol échantillonné en juin 2016 sont aussi présentées plus loin au Tableau 9. Pour les fins de l'étude, le collecteur des drains du champ A200 a été bloqué en 2018, en début de saison de culture de maïs, afin de générer des conditions contrastées d'humidité du sol par rapport au champ A300 maintenu en drainage libre.

Le climat était relativement similaire durant les saisons végétatives d'avril à novembre 2016 à 2018 en termes de température moyenne mensuelle sauf pour un mois de novembre plus chaud que la moyenne en 2016 et un mois d'octobre plus chaud en 2017 (Tableau 1). Toutefois, l'été 2018 a été relativement plus sec avec des précipitations totales de 211 mm du 1<sup>er</sup> mai au 1<sup>er</sup> septembre par rapport 323 et 317 mm en 2016 et 2017, respectivement. L'automne a aussi été plus sec en 2017 avec des précipitations totales de 192 mm du 1<sup>er</sup> septembre au 1<sup>er</sup> décembre par rapport 234 et 292 mm en 2016 et 2018 respectivement.

**Tableau 1 : Température moyenne mensuelle de l'air et précipitations totales mensuelles mesurées à la station climatique de l'aéroport de Saint-Hubert situé à moins de 8 km de l'essai.**

	Température moyenne de l'air (°C)			Précipitations totales (mm)		
	2016	2017	2018	2016	2017	2018
<b>Janvier</b>	-6.9	-6.0	-7.4	26	37	41
<b>Février</b>	-6.1	-1.6	-5.4	46	22	35
<b>Mars</b>	-0.1	-5.1	-0.7	63	30	18
<b>Avril</b>	3.5	7.6	3.6	82	117	109
<b>Mai</b>	13.9	11.7	13.8	37	82	54
<b>Juin</b>	18.2	18.0	18.2	55	120	80
<b>Juillet</b>	21.2	20.2	23.5	100	57	37
<b>Août</b>	21.6	19.2	22.6	130	58	40
<b>Septembre</b>	17.1	17.5	16.4	18	45	106
<b>Octobre</b>	9.3	12.2	6.3	165	82	83
<b>Novembre</b>	4.4	0.6	-1.0	51	64	103
<b>Décembre</b>	-4.7	-7.4	-5.8	63	20	95
<b>Moyenne - total</b>	<b>7.1</b>	<b>8.4</b>	<b>7.3</b>	<b>837</b>	<b>734</b>	<b>801</b>

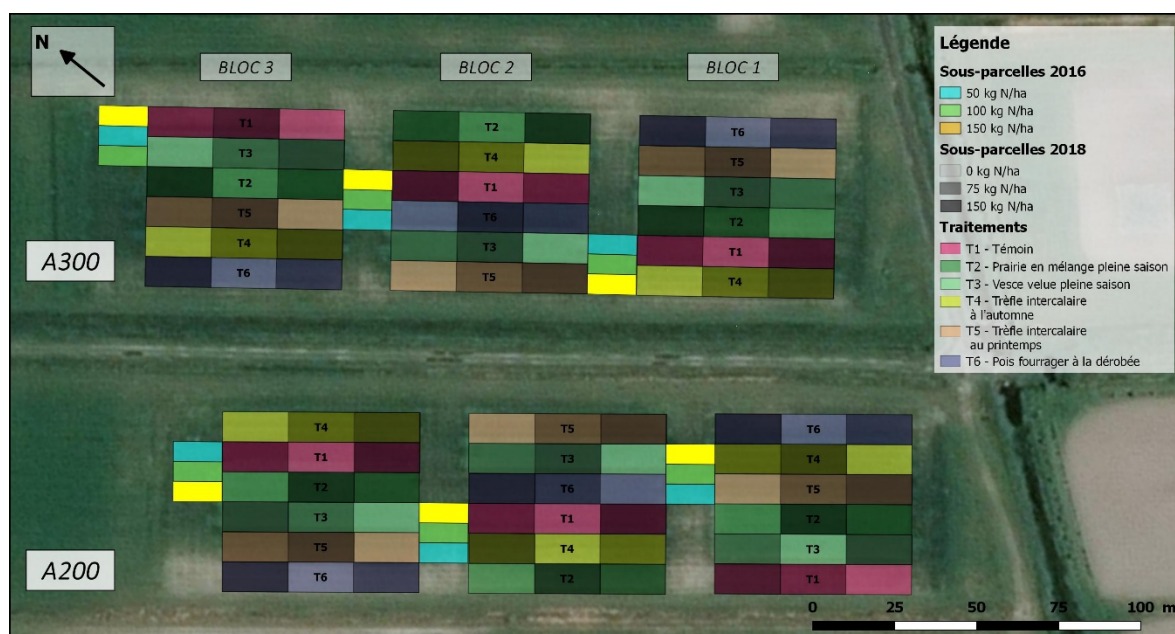
Le dispositif expérimental initial comprenait six traitements dont cinq avec engrais verts (EV) et un traitement témoin (sans EV), répétés trois fois dans les deux champs contigus, pour un total de 36 parcelles expérimentales (Tableau 2).

**Tableau 2 : Définition des traitements d'engrais vert de légumineuses**

Traitements d'engrais vert de légumineuses		2016	2017	2018
<b>T1</b>	Témoin	maïs-grain/RG	blé de printemps	maïs-grain
<b>T2</b>	Prairie de légumineuses (mélange de luzerne, trèfles rouge 1 coupe et Huia) implantée en intercalaire dans le maïs en 2016, pleine saison de croissance en 2017	maïs-grain/PL	Prairie de légumineuse	maïs-grain
<b>T3</b>	Vesce velue implantée au printemps 2017 et cultivée en pleine saison	maïs-grain/RG	Vesce velue	maïs-grain
<b>T4</b>	Mélange de trèfles rouge et Huia implanté en intercalaire dans le blé de printemps en 2017 et enfoui à l'automne 2017	maïs-grain/RG	blé de printemps/TI	maïs-grain
<b>T5</b>	Mélange de trèfles rouge et Huia implanté en intercalaire dans le blé de printemps en 2017 et enfoui au printemps 2018	maïs-grain/RG	blé de printemps/TI	maïs-grain
<b>T6</b>	Pois fourrager à la dérobée suivant la récolte de la céréale en 2017	maïs-grain/RG	blé de printemps/PF	maïs-grain

RG : raygrass; PL : prairie de légumineuses; TI : trèfles intercalaires

Les sections de champ ciblées pour l'établissement du dispositif totalisaient environ 3 ha, soit 36 parcelles (18 par champ) de 60 m de long par 9,14 m de large, équivalant à une largeur de 12 rangs de maïs. L'alignement des parcelles suivait le gradient de pente perpendiculaire au cours d'eau. La Figure 1 illustre la disposition des traitements à l'intérieur des deux champs. Le Tableau 3 regroupe les informations concernant les cultures implantées au cours du projet.



**Figure 1 : Plan du dispositif expérimental**

**Tableau 3 : Cultures, cultivars et informations sur les semis pour les différents traitements au cours des 3 années du projet.**

Année	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Culture	Cultivar	Date de semis	Semoir	Taux de semis
2016	X	X	X	X	X	X	Maïs grain	<i>Maizex MZ</i>	12 mai 2016	Planteur John Deere 4 rangs (conventionnel)	
	X		X	X	X	X	Raygrass	-	5 juillet 2016	Semoir Gandy monté sur herse étrille	
			X				Trèfle rouge Trèfle blanc Luzerne	<i>1 coupe</i> <i>Huia</i> -	5 juillet 2016	Semoir à jardin, manuel	7 kg/ha 3 kg/ha 10 kg/ha
2017	X			X	X	X	Blé de printemps	<i>Pasteur</i>	18 mai 2017	Semoir à semis direct John Deere	200 kg/ha
		X					Luzerne	-	18 mai 2017	Semoir à semis direct John Deere	10 kg/ha
			X				Seigle d'automne Vesce velue	-	18 mai 2017	Semoir à semis direct John Deere	80 kg/ha 30 kg/ha
				X	X		Trèfle rouge Trèfle blanc	<i>2 coupes</i> <i>Huia</i>	18 mai 2017	Semoir à semis direct John Deere	6 kg/ha 3 kg/ha
						X	Pois fourrager	-	20 sept. 2017	Semoir à semis direct John Deere	130 kg/ha
2018	X	X	X	X	X	X	Maïs grain	<i>De Dell 2202</i>	17 mai 2018	Planteur John Deere 4 rangs (conventionnel)	

En première année (2016), une culture de maïs a été implantée sur l'ensemble des champs, suivant un labour printanier d'une prairie de luzerne (Tableau 3 et Tableau 4). Pour estimer les besoins en N supplémentaires du maïs en 2016 avec des courbes de réponses, des sous-parcelles fertilisées selon trois niveaux d'apport d'azote (50, 100 et 150 kg/ha de N efficace) provenant de fientes de poules pondeuses granulées *Écoplus* (5-2-5) ont été implantées sur trois zones contigües aux blocs de chaque champ à l'étude, pour un total de 18 sous-parcelles. Les informations quant aux concentrations et aux doses appliquées se retrouvent aux Tableau 5 et Tableau 6. Se basant sur les résultats de Weill et al. 2014 et Duval et al 2015, le coefficient d'efficacité de N de ces fientes a été estimé à 0,80 de la quantité de N total appliquée.

À la suite des opérations printanières de désherbage mécanique, un semis intercalaire de raygrass a été réalisé sur l'ensemble des parcelles principales, à l'exception du traitement en prairie de légumineuses (T2) qui a plutôt profité d'un semis à même date du mélange de légumineuses fourragères (Tableau 3). Les rendements de maïs ont été mesurés en récoltant et pesant le poids du grain battu sur une longueur connue de rang au centre de chaque parcelle principale et des micro-parcelles avec une moissonneuse-batteuse pour parcelles expérimentales (Wintersteiger, Salt Lake City, UT) opérant sur une largeur de 1,52 m. Un échantillon de grain a été constitué pour évaluer la teneur en matière sèche du grain après séchage à l'étuve à 60°C et jusqu'à l'obtention d'un poids constant. Les champs n'ont pas été travaillés à l'automne afin de maintenir une couverture de résidus à la surface du sol.

Au printemps 2017, un passage de faucheuse à fléaux a d'abord été réalisé afin de hacher les résidus sur tous les traitements. Ensuite, pour préparer le lit de semence pour tous les traitements sauf le T2 en prairie de légumineuses/trèfles, deux passages d'herse à disque et un d'herse rotative ont été réalisés. Le blé a été semé avec un semoir à semis direct, en semis pur dans les traitements T1 et T6 et en association avec un mélange de trèfles rouges et Huia dans les traitements T4 et T5. De la vesce velue a été semée en mélange avec du seigle

d'automne dans le traitement T3. Le traitement T2 a également été sursemé en luzerne en 2017 pour améliorer l'implantation de la prairie.

**Tableau 4 : Opérations culturales réalisées pour les différents traitements au cours des 3 années du projet.**

Année	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Date	Opération	Équipement
2016	X	X	X	X	X	X	27 avril 2016	Labour	Charrue à versoirs
	X	X	X	X	X	X	10 mai 2016	Travail secondaire	Herse à disque
	X	X	X	X	X	X	12 mai 2016	Travail secondaire	Vibroculteur
	X	X	X	X	X	X	12 mai 2016	Épandage d'engrais	Semoir à semis direct John Deere (3 doses)
	X	X	X	X	X	X	15 juin 2016	Sarclage	Houe rotative
	X	X	X	X	X	X	4 juillet 2016	Sarclage	Sarcleur lourd
	X	X	X	X	X	X	3 novembre 2016	Récolte du grain	Batteuse Wintersteiger
2017	X	X	X	X	X	X	27 avril 2017	Fauche des tiges de maïs	Faucheuse à fléaux
	X	X	X	X	X	X	16 mai 2017	Travail secondaire	Herse à disque
	X	X	X	X	X	X	17 mai 2017	Travail secondaire	Herse à disque
	X	X	X	X	X	X	18 mai 2017	Travail secondaire	Herse rotative (Amazone)
	X	X	X	X	X	X	12 septembre 2017	Récolte du grain et de la paille	Batteuse Wintersteiger
	X	X	X	X	X	X	13 septembre 2017	Mesure de la biomasse	Mini-fourragère
	X	X	X	X	X	X	20 septembre 2017	Fauche de la biomasse	Faucheuse à fléaux
	X	X	X	X	X	X	12 octobre 2017	Mesure de la biomasse	Mini-fourragère
			X				13 octobre 2017	Enfouissement du trèfle	Herse à disque (2 passages)
2018	X	X	X	X	X	X	9 mai 2018	Déchaumage	Herse Kristall
	X	X	X	X	X	X	15-16 mai 2018	Épandage d'engrais	Épandeur pneumatique (3 doses)
	X	X	X	X	X	X	16 mai 2018	Incorporation de l'engrais	
	X	X	X	X	X	X	30 mai 2018	Sarclage	Houe rotative
	X	X	X	X	X	X	8 juin 2018	Sarclage	Sarcleur léger et Herse étrille
	X	X	X	X	X	X	12 juin 2018	Sarclage	Sarcleur léger et Herse étrille avec dents en S Disque déchausseur près des rangs
	X	X	X	X	X	X	27 juin 2018	Sarclage	Sarcleur léger avec dents en S sur l'entre rangs Sarcleurs à doigt sur le rang
	X	X	X	X	X	X	5 juillet 2018	Sarclage	Sarcleur lourd
	X	X	X	X	X	X	8 novembre 2018	Récolte du grain	Batteuse Wintersteiger

Les biomasses des différents EV ont été mesurées à la mi-septembre avec une fourragère automotrice pour parcelle expérimentale (Carter, Indiana) d'une largeur de 0,94 m alors que le rendement du blé a été mesuré avec la même batteuse expérimentale. Dans les parcelles T3, où la vesce velue était en pleine croissance, la fauche et la récolte de la biomasse ont été effectuées à la mi-octobre. À cette même date, un second passage avec la

fourragère automotrice a permis de mesurer la biomasse d'EV nouvellement poussée depuis le passage le mois précédent dans les parcelles T2, T4 et T5. Le grain, la paille et la biomasse humide ont été pesés et un échantillon a été prélevé pour déterminer la teneur en matière sèche après séchage à l'étuve à 60°C et jusqu'à l'obtention d'un poids constant, alors que les teneurs en C et N total ont été dosées par combustion sèche sur un appareil LECO. L'enfouissement du trèfle des parcelles T4 s'est fait avec la herse à disque. Le pois fourrager (T6) a été semé tardivement en raison de la récolte tardive du blé.

En troisième année (2018), le maïs a été réimplanté sur l'ensemble des parcelles après un déchaumage printanier superficiel avec une herse Kristall. Un engrais de ferme à base de fientes de poules pondeuses granulé et commercialisé sous le nom de d'*Acti-Sol* (5-3-2), a été appliqué à trois doses (0, 75, 150 kg/ha de N efficace) juste avant le semis dans trois sous-parcelles, afin d'évaluer la contribution du précédent d'EV de légumineuses à la nutrition azotée du maïs, en comparant les courbes de réponse à l'azote dérivées de l'effet des EV de légumineuses et du Témoin.

**Tableau 5 : Moyennes et coefficients de variation des paramètres mesurés sur les engrais organiques utilisés.**

	Unité	<i>Écoplus</i> 2016		<i>Acti-Sol</i> 2018	
<b>Matière sèche</b>	% b.h.	26,2	-	88,5	0,2 %
<b>Cendres</b>	% b.s.	84	-	25,6	6 %
<b>MO</b>	% b.s.	16	-	74,5	2 %
<b>N total</b>	g/kg b.h.	45,8	-	48,4	2 %
<b>NTK</b>	% b.s.	17,5	-	5,5	2 %
<b>N-NH<sub>4</sub></b>	g/kg b.h.	5,08	-	1,59	3 %
<b>N-NO<sub>3</sub></b>	mg/kg b.h.	0,82	-	5,00	29 %
<b>C/N</b>		0,46	-	6,81	4 %
<b>P</b>	g/kg b.h.	18,3	-	13,3	0,2 %
<b>K</b>	g/kg b.h.	22,1	-	20,9	1 %
<b>Ca</b>	g/kg b.h.	68,7	-	38,0	7 %
<b>Mg</b>	g/kg b.h.	5,6	-	4,8	0,4 %
<b>Na</b>	g/kg b.h.	4,6	-	4,5	0,4 %

**Tableau 6 : Quantités d'éléments fertilisants apportés avec les engrais organiques.**

Année	Dose kg/ha	MS kg/ha	C total kg/ha	N Total kg/ha	N dispo kg/ha	P kg/ha	K kg/ha	Ca kg/ha	Mg kg/ha	Na kg/ha
<b>2016</b>	1250	328	466	57	51	23	28	86	7	6
	2500	655	931	115	101	46	55	172	14	11
	3750	983	1397	172	152	69	83	257	21	17
<b>2018</b>	1875	1658	698	91	73	25	39	71	9	8
	3750	3317	1397	181	145	50	78	142	18	17



## 3.2 ÉCHANTILLONNAGE DES SOLS

En début de projet en 2016, une caractérisation des propriétés physico-chimiques des sols a été déterminée à trois profondeurs (0-15, 15-30 et 30-60 cm) dans les six blocs expérimentaux. Au laboratoire, la granulométrie a été déterminée par densimétrie à l'hydromètre de Bouyoucos selon des méthodes standards reconnues (CPVQ, 1993; CPVQ, 1988; Carter et Gregorich, 2007). Le pH à l'eau a été mesuré dans un ratio sol:eau de 1:5 avec une électrode. Les teneurs en C et N total ont été déterminées par combustion sèche sur un appareil LECO. Les teneurs en N minéral (N-NO<sub>3</sub> et N-NH<sub>4</sub>) ont été dosées par colorimétrie automatisée dans des extraits de sol:solution de KCl 2M dans un ratio 1:10. Les teneurs en P, K, Ca, Mg, Al, B, Cu, Fe, Mn, Zn, et Na ont été dosées par spectroscopie à l'ICP dans des extraits de sol:solution Mehlich 3 dans un ratio 1:5.

En 2016, les sols des six blocs ont été échantillonnés à trois profondeurs (0-15, 15-30 et 30-60 cm) et à 2 reprises, soit le 29 juin au stade 6 feuilles du maïs (V6), le 26 octobre en post-récolte pour suivre l'azote minéral dans les six blocs expérimentaux et sous l'effet de deux traitements (Témoin et 100 N). En 2017, le sol a été échantillonné le 7 novembre à trois profondeurs (0-15, 15-30 et 30-60 cm) dans les parcelles Témoin (T1) et d'EV de prairie de légumineuses (T2). En 2018, le sol a été échantillonné à trois profondeurs (0-15, 15-30 et 30-60 cm) dans les 108 sous-parcelles et à cinq reprises, soit le 9 mai en pré-semis avant les opérations culturales, le 20 juin au stade 6 feuilles du maïs (V6), le 26 juillet à la sortie des soies (VT), le 20 septembre au stade pâteux (R4) et le 8 novembre en post-récolte afin de documenter plus précisément le devenir de l'azote résultant des EV de légumineuses, de la fertilisation azotée, du prélèvement du maïs et des conditions climatiques. La teneur en N minéral (N-NO<sub>3</sub> et N-NH<sub>4</sub>) dans les sols a été dosée par colorimétrie automatisée dans des extraits de sol:solution de KCl 2M dans un ratio 1:10.

En fin de saison 2018, des cylindres de sol non dérangé ont été prélevés le 8 novembre dans le centre de chaque parcelle principale (sous-parcelle 2) à deux profondeurs (0-30 cm et 30-60 cm) pour évaluer l'effet des EV sur la qualité du profil cultural. La masse volumique apparente, la porosité totale, la macroporosité (à 100 cm de tension) et la conductivité hydraulique saturée ont été déterminées au laboratoire sur tables de tension et appareillage scientifique selon les méthodes reconnues (Carter et Gregorich 2007).

## 3.3 SUIVI HYDROMÉTRIQUE DES FLUX AUX DRAINS ET DE LA HAUTEUR DES NAPPES D'EAU

Afin de générer des conditions contrastées d'humidité des sols dans les deux champs à l'étude, une chambre de contrôle du drainage souterrain (OASIS) a été installée dans le champ A200. La trappe du collecteur du champ A200 a été fermée le 5 mai 2018, alors qu'un drainage libre a été maintenu dans le champ adjacent (A300). Les puits d'accès aménagés aux exutoires des collecteurs de drainage souterrain des champs à l'étude ont permis d'y mesurer les débits. Un puits additionnel été installée au collecteur sortant du champ A400, jouxtant le champ A300, compte tenu que les champs A300 et A400 partagent le même collecteur. Trois stations de mesures hydrométriques des drains ont ainsi été installées. La station installée sur le collecteur du champ A200 témoigne de conditions de drainage contrôlé. La mesure des flux spécifiques au champ A300 (site sans contrôle de nappe)

implique de déduire les flux mesurés sur le collecteur en amont, à la sortie du champ A400, des flux mesurés plus en aval, sur le même collecteur, à l'exutoire du champ A300.

Le suivi des débits au collecteur des drains du champ A200 a été supporté par la mesure de la hauteur d'eau par sondage de la pression (hauteur d'eau) au moyen de sondes *HOB0* (Onset U20I-04) doublées d'une sonde à effet doppler (ISCO 2100). Le collecteur au champ A300 a été équipé d'un échantillonneur automatique proportionnel au débit (ISCO, modèle 6712), intégrant une sonde de mesure de la pression. La section du collecteur du champ A-400 a été équipé d'une sonde *HOB0* (U20I-04), doublée d'un vélocimètre *AGRIFLOW*.

Les trois collecteurs de drainage ont profité de six campagnes d'échantillonnages manuels au cours de l'année 2018, réparties entre mai et novembre. Le collecteur du Champ A300 a également profité d'échantillonnages automatiques proportionnels au débit, permettant de caractériser la dynamique des flux de N au cours de toute la saison 2018. Les flux instantanés de N au drain ont été estimés sur la base du produit du débit et des concentrations observées en N minéral pondérées pour le débit.

Six piézomètres équipés de sondes à pression (*HOB0* U20L-04) ont également été installés dans les deux champs à l'étude afin de suivre l'évolution de la hauteur de la nappe d'eau tout au long des trois années du projet. Les tubes perforés de 2,0 m de longueur et 5,0 cm de diamètre, enrobés de géotextile, ont été enfouis au printemps 2016 et munis de sondes. Ces dernières étaient relevées après la récolte automnale. Les suivis de la position des nappes phréatiques des deux champs se sont poursuivis sans interruption au cours du projet. La trappe de la chambre de contrôle du drainage souterrain du champ A200 a été fermée immédiatement après le semis du maïs au printemps 2018, afin d'y ralentir la baisse du niveau de la nappe phréatique.

### 3.4 ANALYSE ÉCONOMIQUE

L'objectif principal du volet économique était d'évaluer la rentabilité économique des implantations d'EV de pleine saison et de Trèfles intercalaires précédant une culture de maïs-grain. L'analyse de rentabilité a comparé les scénarios de culture intégrant les EV Pleine saison et Trèfles intercalaires au scénario sans EV (Témoin) suivant une approche de budgétisation partielle, considérant les éléments d'amélioration et de détérioration de la rentabilité. Les paramètres considérés dans l'amélioration de la rentabilité des systèmes avec EV incluent les gains de rendement et de revenus associés aux systèmes de culture avec EV, de même que les coûts de fertilisation en moins. Les paramètres liés à la détérioration de la rentabilité incluent l'abandon des revenus de vente de la culture de blé en 2017 pour le système d'EV de pleine saison, de même que les coûts d'implantation des EV dans les systèmes de pleine saison et de Trèfles intercalaires.

Les doses optimales d'apports en azote ont été calculées avec les courbes de réponses du maïs obtenues sous les traitements Témoin (T1 et T6), EV de pleine saison (T2 et T3) et Trèfles intercalaires (4 et T5) et selon les prix du marché pour les différents intrants. L'évolution prévisible de la richesse du sol en phosphore a également été considérée dans un scénario additionnel pour calculer les doses optimales de N. Rappelons ici une des principales motivations du projet, soit d'assurer la fertilisation azotée du maïs grain sans contribuer à l'enrichissement du sol

en phosphore, résultant d'apports répétés d'engrais de ferme. Ainsi, il était pertinent de calculer quel taux d'apport de N provenant de l'engrais organique conduirait à un taux d'apport de P susceptible d'augmenter la saturation du sol en phosphore.

### 3.5 ANALYSES STATISTIQUES

Toutes les analyses de variance ont été réalisées à l'aide du logiciel SAS/STAT®, version 9.4 avec la procédure Proc Mixed. Un modèle linéaire mixte d'analyse de variance a été ajusté aux données afin d'intégrer les nombreux effets fixes et aléatoires. Les effets fixes provenaient des traitements d'engrais verts de légumineuses, des doses d'engrais organique (0, 75 et 150 N) et de l'interaction entre ces deux facteurs. Les effets aléatoires étaient liés aux champs, aux blocs dans les champs ainsi qu'aux parcelles (interaction Bloc × Traitement) et sous-parcelles.

Certaines variables ont été mesurées à trois profondeurs dans le sol et/ou plusieurs fois durant la saison, à cinq stades de croissance, de sorte que les facteurs *Profondeur* et *Stade* de même que des interactions supplémentaires ont dû être ajoutées au modèle d'analyse de variance. Les facteurs *Profondeur* et *Stade* ont été considérés comme des mesures répétées et une structure des corrélations entre ces mesures a été ajustée dans le modèle statistique. Quelques structures de variance-covariance ont aussi été testées (CS, AR(1), SP(EXP)), incluant la possibilité de variances hétérogènes. La meilleure structure était choisie en considérant le critère du plus bas AIC (Littell et al. 2006).

Lorsqu'un effet fixe était déclaré significatif selon le test de F, les niveaux de cet effet ont fait l'objet de tests de différences par paires au moyen d'un test de t. Des contrastes ont été utilisés pour différencier des traitements d'engrais verts de légumineuses ou les regrouper. Lorsqu'une interaction de deux facteurs (par exemple *Traitement* × *Dose*) était significative, des tests de F de l'effet du premier facteur (*Traitement*) étaient effectués par niveau du deuxième facteur (*Dose*). Dans ce cas, les contrastes entre les traitements d'EV étaient aussi effectués par niveau de *Dose*.

Une évaluation graphique des résidus mis à l'échelle a été réalisée pour chaque analyse de variance afin de s'assurer du respect des postulats de normalité et d'homogénéité des variances des erreurs du modèles.

Les courbes de réponses à l'azote découlant des essais en micro-parcelles en 2016 et des sous-parcelles en 2018 ont aussi été modélisées par régression non-linéaire. L'interprétation des réponses issues des différents traitements d'EV de légumineuses et Témoin visait principalement à établir les équivalents fertilisants en azote générés par les différents scénarios d'EV de légumineuses et à calculer les doses optimales économiques ou environnementalement acceptables sous différents scénarios d'enrichissement du sol en phosphore.

## 4 RÉSULTATS

### 4.1 2016 – MAÏS GRAIN SUR RETOUR DE PRAIRIE DE LÉGUMINEUSES

#### 4.1.1 Suivi des rendements et des biomasses

La Figure 2 illustre les rendements et la teneur en eau du maïs-grain mesurés en 2016 dans chaque parcelle sur les planches A200 et A300 du dispositif expérimental. Les rendements en maïs grain entre les deux champs à l'étude (A200 et A300) ne sont pas significativement différents, tant pour les rendements en grain que pour leur teneur en eau, sauf pour quelques rangées de maïs en bordure du champ A200 (colonne 6) semées avec un autre hybride de maïs (Figure 2).

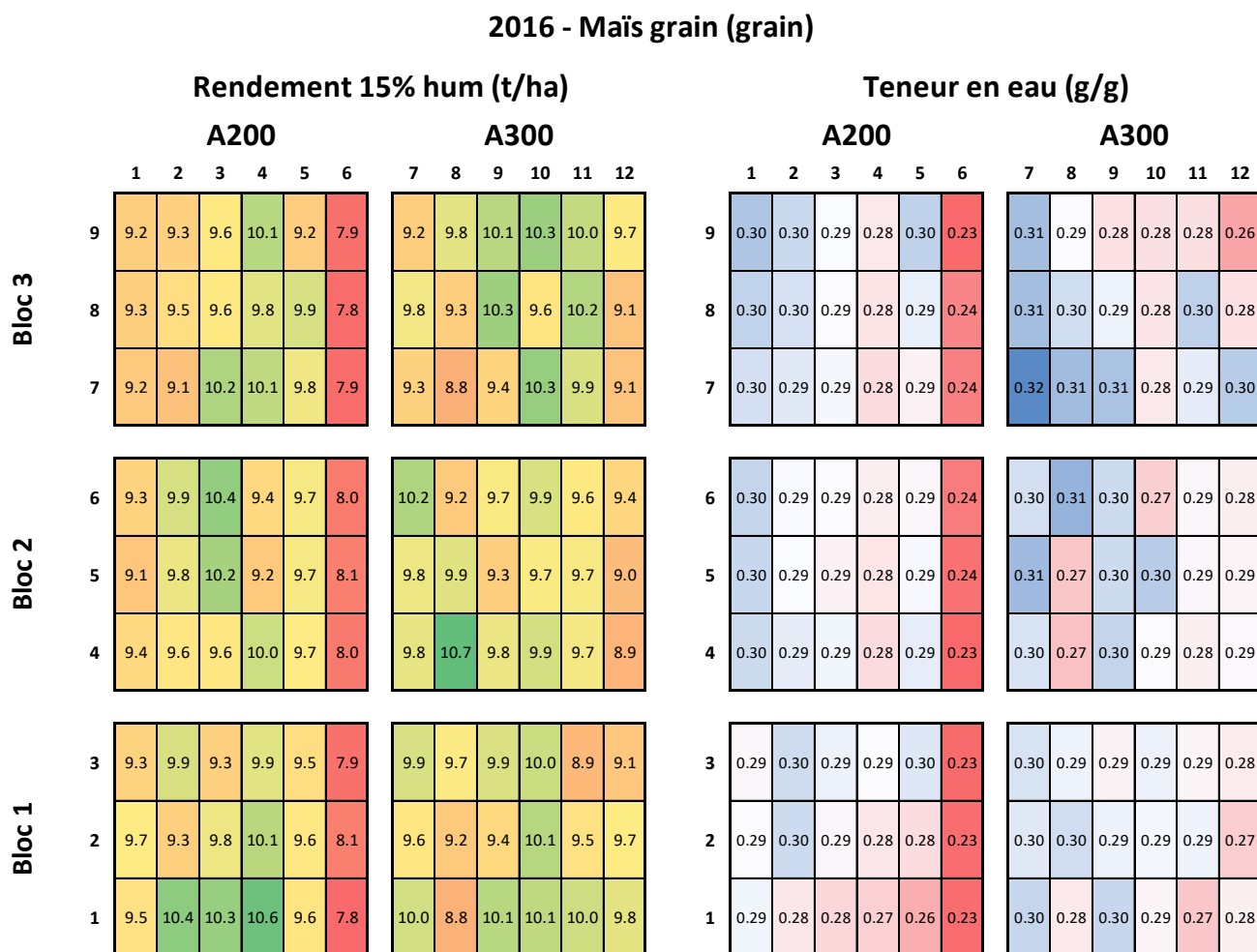


Figure 2 : Rendement à 15 % d'humidité et teneur en eau mesurés dans chaque parcelle en maïs grain en 2016. Les douze colonnes reflètent les positions parallèles aux deux planches.

Lorsque les effets spatiaux sont analysés sous forme de lignes et de colonnes dans une ANOVA, un effet spatial longitudinal (colonnes) ressort significatif. Il est attribué à cet effet d'hybride de maïs différent sur la colonne 6 et dans une moindre mesure à la formation des planches et au drainage de surface (Tableau 7).

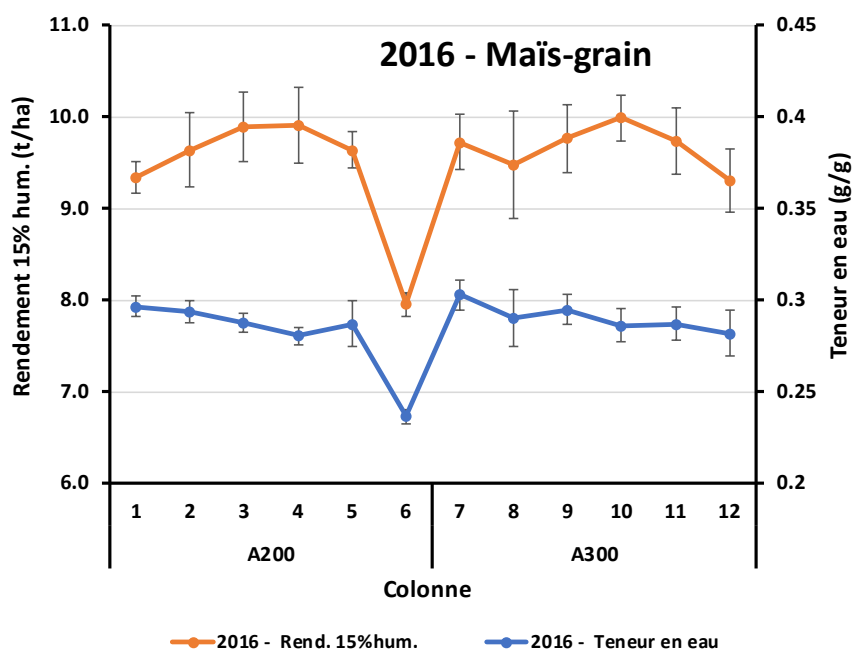
**Tableau 7 : Effets des positions en ligne et en colonne dans les champs A200 et A300 sur le rendement à 15 % d'humidité et la teneur en eau du maïs-grain récolté en 2016.**

	Rendement 15% hum. (tm/ha)		Teneur en eau (g/g)	
	Ligne	Colonne	Ligne	Colonne
Erreur type	0,1256	0,1441	0,0033	0,0038
Valeur de F	0,85	17,47	1,24	29,67
Probabilité de F	0,5737	< 0,0001 ***	0,3423	< 0,0001 ***

\*\*\* : Prob F. < 0,001; \*\* : Prob F. < 0,05; \* : Prob F. < 0,1

† La même lettre est attribuée aux traitements ne présentant pas de différence significative

La Figure 3 présente la distribution du rendement et de la teneur en eau du maïs-grain en travers des planches A200 et A300 (colonnes du dispositif expérimental). Cette projection des résultats révèle l'effet de l'aménagement des planches sur le rendement de la culture. Celui-ci est plus élevé sur le milieu des planches (colonnes 3,4 9, 10 et 11) par rapport aux bords des planches (colonnes 1, 6, 7 et 12). Les rendements significativement plus faibles de la colonne 6 sont expliqués en partie par l'utilisation d'un hybride de maïs différent.



**Figure 3 : Rendement à 15 % d'humidité et teneur en eau du maïs-grain récolté en 2016 selon sa position sur la planche dans les champs A200 et A300.**



En excluant ces rangées de maïs présent dans la colonne 6, des rendements relativement élevés (moyenne de 9,7 tm/ha) sans apport d'engrais supplémentaires témoignent de conditions pédo-climatiques particulièrement favorables liées au retour de la luzernière, à l'état du sol et aux précipitations bien réparties en 2016.

Les rendements en biomasse aérienne d'un mélange de légumineuses (luzerne et trèfles) (T2) et de raygrass (T1, T3, T4, T5, T6), implantés en intercalaire dans le maïs en 2016, sont rapportés au Tableau 8. En moyenne, le mélange trèfle-luzerne a généré une biomasse de 0,66 tm/ha ( $\pm 0,31$ ) et le raygrass de 0,38 tm/ha ( $\pm 0,19$ ). Ces biomasses sont relativement faibles et s'expliquent par la date de semis tardive des engrais verts, le 5 juillet après les opérations de sarclage, et la récolte tardive du maïs, le 3 novembre qui ne permet pas la croissance des engrais verts en post récolte.

**Tableau 8 : Rendement en biomasse du mélange Luzerne-trèfles (T2) et du raygrass (T1, T3, T4, T5, T6) implantés le 5 juillet 2016.**

		Recouvrement	Hauteur moyenne	Nb. Plants	Nb. Plants maïs	Biomasse aérienne
		%	cm	/ 0,25 m <sup>2</sup>	/ 4 m	tm/ha (m.s.)
<b>Luzerne et trèfles (3 nov. 2016)</b>						
<b>A200</b>	<b>Bloc 1</b>	50	7	214	24	0,61
	<b>Bloc 2</b>	50	8	216	24	0,41
	<b>Bloc 3</b>	40	8	164	23	0,42
<b>A300</b>	<b>Bloc 1</b>	50	12	171	23	0,85
	<b>Bloc 2</b>	30	10	133	25	0,46
	<b>Bloc 3</b>	75	15	170	25	1,18
<b>Raygrass (9 nov. 2016)</b>						
<b>A200</b>	<b>Bloc 1</b>	50	30	132	27	0,63
	<b>Bloc 2</b>	30	22	81	24	0,20
	<b>Bloc 3</b>	40	28	123	22	0,30
<b>A300</b>	<b>Bloc 1</b>	50	30	108	25	0,62
	<b>Bloc 2</b>	30	24	113	24	0,25
	<b>Bloc 3</b>	40	35	94	24	0,28

#### 4.1.2 Courbes de réponse à l'azote

Une analyse de la réponse du maïs-grain à l'engrais azoté a été réalisée en 2016 en bordure des parcelles principales pour évaluer l'effet du précédent de la prairie de légumineuses sur le maïs (Figure 4). Sans apport de N supplémentaire, le sol était capable de soutenir un rendement de 9,7 tm/ha et confirme une fourniture importante de la prairie de légumineuses retournée au sol au printemps 2016. Un rendement maximal de 10,7 tm/ha est obtenu avec 102 kg/ha de N efficace en provenance d'un engrais granulé à base de fumier de volailles composté (*Écoplus*), calculé avec un coefficient d'efficacité globale de 0,80 et une teneur en N total de 45,3 g/kg. Cependant, à un coût de 500 \$ la tonne métrique, l'apport de cet engrais n'aurait pas été rentable, quel que soit la dose. Pour obtenir ce rendement maximal à un coût économiquement rentable, il faudrait que cet engrais soit 10 fois moins dispendieux, soit moins de 50 \$ la tonne métrique ou 1,40 \$ le kg de N efficace.

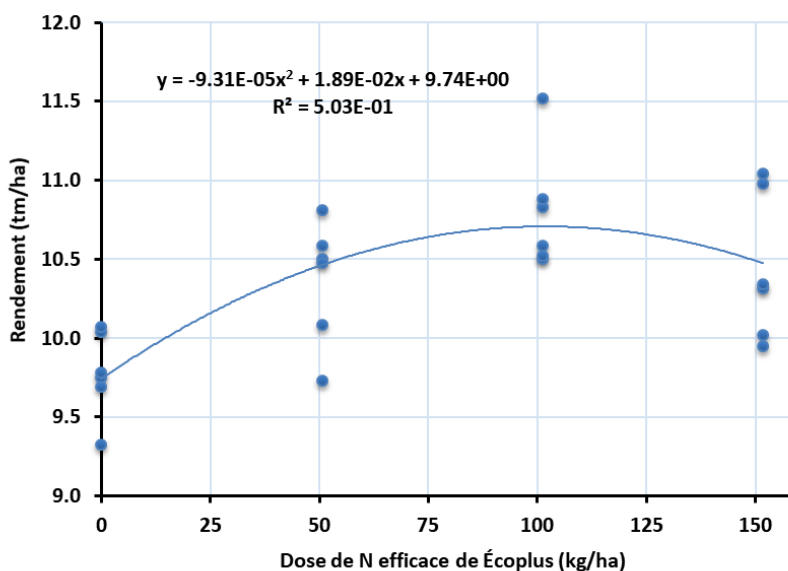
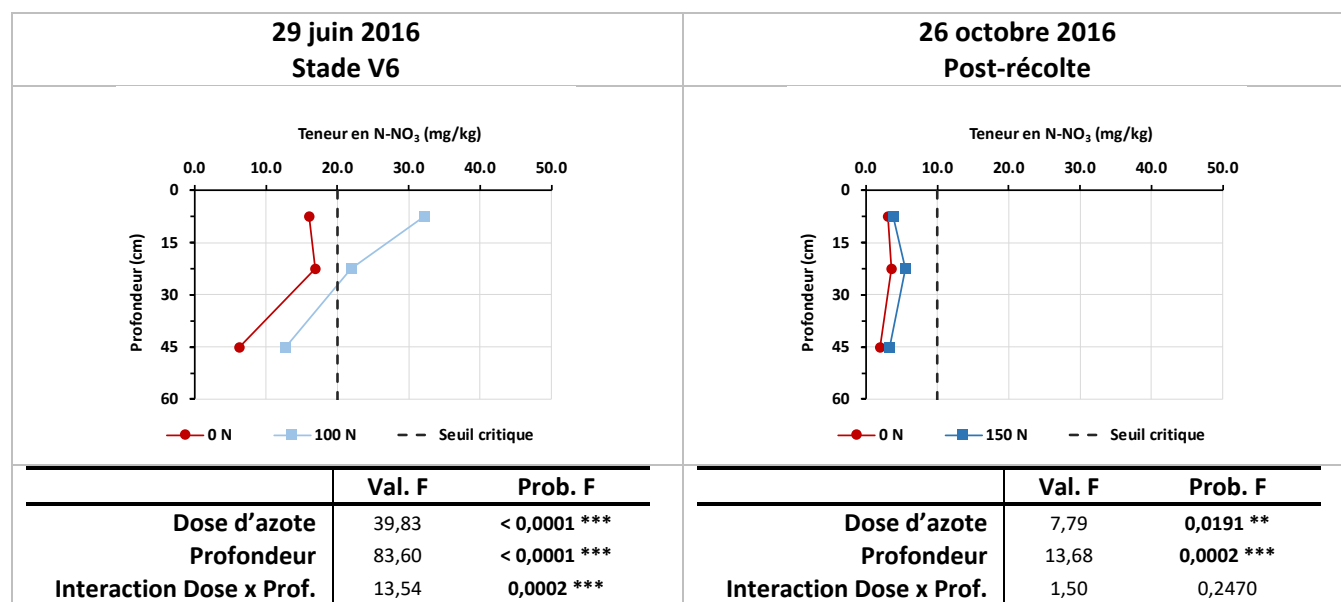


Figure 4 : Courbe moyenne de réponse à la fertilisation azotée du maïs grain déterminées par les suivis des micro-parcelles (50, 100 et 150 kg/ha de N efficace en provenance de l'engrais organique *Écoplus*) et des parcelles Témoin (0 N) en 2016 sur un retour de prairie de légumineuses.

### 4.1.3 Suivi des nitrates dans le sol

Le suivi des nitrates dans le sol témoigne d'une bonne fourniture du sol en azote en post-levée du maïs, le 26 juin 2016 (Figure 5), avec des teneurs moyennes de 16,1 et 16,9 mg/kg de N-NO<sub>3</sub>, respectivement à 0-15 et 15-30 cm de profondeur dans le sol. Ces teneurs de nitrates en post levée, près des seuils de suffisance généralement reconnus de 20 à 25 mg/kg de N-NO<sub>3</sub>, indiquent une importante contribution potentielle du sol et du retour de la luzernière à la fertilisation azotée du maïs, ainsi qu'une faible réponse anticipée à une fertilisation supplémentaire en azote. De fait, la réponse aux engrais azotés étaient faibles, permettant d'augmenter seulement d'une tonne à l'hectare le rendement en grain avec 100 kg N/ha.

Les teneurs ont toutefois presque doublé dans les micro-parcelles fertilisées avec l'engrais à base de fumier de volaille composté (*Écoplus*) à une dose équivalant à 100 kg/ha de N efficace ou 125 kg/ha de N total, atteignant 32,2 et 22,0 mg/kg de N respectivement à 0-15 et 15-30 cm de profondeur. L'effet de cette dose d'azote s'est avéré hautement significatif sur les teneurs en nitrates dans le sol, de même que l'effet de la profondeur et de l'interaction *Dose X Profondeur*.



**Figure 5 : Teneurs en nitrates mesurées dans le sol en post-levée et en post-récolte du maïs grain en réponse à la fertilisation en 2016.**

En post-récolte à la fin du mois d'octobre 2016, les teneurs en nitrates ont diminué à 3,1 et 3,5 mg/kg de N respectivement à 0-15 et 15-30 cm de profondeur dans le sol des parcelles Témoin. Dans le sol des micro-parcelles fertilisées à 150 kg N /ha, les taux observés sont de 3,9 à 5,6 mg/kg de N, respectivement à 0-15 et 15-30 cm de profondeur. Ces observations témoignent du prélèvement efficace de l'azote et du rendement soutenu du maïs grain en 2016. Bien que les teneurs en nitrates aient fortement diminué, les effets de la profondeur et de la dose de N sont cependant demeurés significatifs.

#### 4.1.4 Suivi des propriétés du sol

Les résultats analytiques du sol des deux champs à l'étude (Tableau 9) témoignent d'une variabilité spatiale relativement faible des propriétés physico-chimiques du sol. Celle-ci est reflétée par l'homogénéité des rendements en parcelle en 2016, de même que par les réponses significatives du rendement aux apports de N.

**Tableau 9 : Propriétés physico-chimiques des parcelles témoin en juin 2016.**

		pH eau	MO %	P	K	Ca	Mg	Al	P/Al	Texture
		----- mg/kg -----								
<b>0-15 cm</b>										
<b>A200</b>	<b>Bloc 1</b>	7,2	3,51	43,2	279	2992	557	1095	3,9%	Argile lourde
	<b>Bloc 2</b>	7,3	3,08	47,2	243	3164	424	1083	4,4%	Argile lourde
	<b>Bloc 3</b>	7,7	2,83	51,0	270	3352	436	1081	4,7%	Argile lourde
<b>A300</b>	<b>Bloc 1</b>	6,7	3,34	41,0	254	2691	466	1129	3,6%	Argile
	<b>Bloc 2</b>	7,6	3,26	79,9	312	3610	350	1097	7,3%	Argile lourde
	<b>Bloc 3</b>	6,9	4,40	44,7	256	3317	381	1055	4,2%	Argile
<b>15-30 cm</b>										
<b>A200</b>	<b>Bloc 1</b>	7,1	3,42	46,0	290	2932	551	1102	4,2%	Argile
	<b>Bloc 2</b>	7,3	2,99	43,4	254	3295	445	1092	4,0%	Argile lourde
	<b>Bloc 3</b>	7,8	2,65	42,5	258	3668	448	1064	4,0%	Argile lourde
<b>A300</b>	<b>Bloc 1</b>	6,9	2,76	32,8	230	2675	474	1124	2,9%	Argile
	<b>Bloc 2</b>	7,9	2,76	56,0	298	3656	405	1100	5,1%	Argile lourde
	<b>Bloc 3</b>	7,1	3,44	32,5	239	3284	418	1084	3,0%	Argile
<b>30-60 cm</b>										
<b>A200</b>	<b>Bloc 1</b>	7,6	2,16	18,4	231	2956	624	1096	1,7%	Argile lourde
	<b>Bloc 2</b>	8,0	1,68	9,3	223	3340	600	1108	0,8%	Argile lourde
	<b>Bloc 3</b>	7,9	1,92	19,4	255	3729	622	1036	1,9%	Argile lourde
<b>A300</b>	<b>Bloc 1</b>	7,8	1,49	7,2	255	3065	841	1096	0,7%	Argile lourde
	<b>Bloc 2</b>	8,0	1,63	8,2	335	3795	927	1043	0,8%	Argile lourde
	<b>Bloc 3</b>	7,7	1,62	7,2	262	3148	687	1129	0,6%	Argile lourde

## 4.2 2017 – BLÉ ET ENGRAIS VERT

### 4.2.1 Suivi des rendements et des biomasses

Le Tableau 10 présente les rendements, la teneur en eau et le ratio C/N du grain et de la paille de blé cultivé en 2017. Bien que les différents traitements d'engrais verts (EV) n'ont pas eu d'effets significatifs sur le rendement en grain de blé, un effet fortement significatif a été observé sur le rendement en paille. Retenons qu'en raison de la présence de trèfles dans les parcelles T4 et T5 en trèfles intercalaires, la paille a été récoltée plus haute, diminuant ainsi les rendements en pailles récoltées par la batteuse.

Les traitements d'engrais verts (EV) ont affecté les ratios C/N de la paille (Prob. F = 0,094) et du grain (Prob. F = 0,0347) (Tableau 10). L'effet des traitements EV sur la concentration en C du grain (Prob. F = 0,0107) et de la paille de blé (Prob. F < 0,0001) était aussi significatif (données non-présentées). En effet, le grain et la paille récoltés dans les parcelles T1 et T6 présentaient respectivement des concentrations moyennes de C de 42,6 et 41,8 % alors que le grain et la paille des parcelles T4 et T5 avait une concentration moyenne en C de 42,5 et 41,2 %. Les traitements EV n'ont pas eu d'effet significatif sur la concentration en N de la paille, mais ils en ont eu sur celle du grain de blé, avec une faible probabilité (Prob. F = 0,0687).

**Tableau 10 : Rendements (tm/ha), teneur en eau et ratio C/N par traitement dans le grain et la paille le 12 septembre 2017.**

	GRAIN			PAILLE		
	Rendement 15% hum. (tm/ha)	Teneur en eau (g/g)	Ratio C/N	Biomasse base sèche (tm/ha)	Teneur en eau (g/g)	Ratio C/N
<b>T1 – Témoin</b>	2,83	0,17	24,2 C	3,83 A	0,29	57,6 A
<b>T2 – Prairie pleine saison</b>	-	-	-	-	-	-
<b>T3 – Vesce velue pleine saison</b>	-	-	-	-	-	-
<b>T4 – Trèfles intercalaires à l'automne</b>	2,78	0,16	25,3 AB	2,46 B	0,28	55,7 AB
<b>T5 – Trèfles intercalaires au printemps</b>	2,82	0,16	25,5 A	2,33 B	0,29	52,1 B
<b>T6 – Pois fourrager</b>	2,57	0,16	24,4 BC	3,36 A	0,30	55,9 AB
<b>Erreur type</b>	0,21	0,01	0,6	1,25	0,04	4,9
<b>Valeur de F</b>	0,39	0,74	3,06	7,79	0,30	2,23
<b>Probabilité de F</b>	0,7593	0,5311	<b>0,0347 **</b>	<b>0,0002 ***</b>	0,8218	<b>0,0939 *</b>

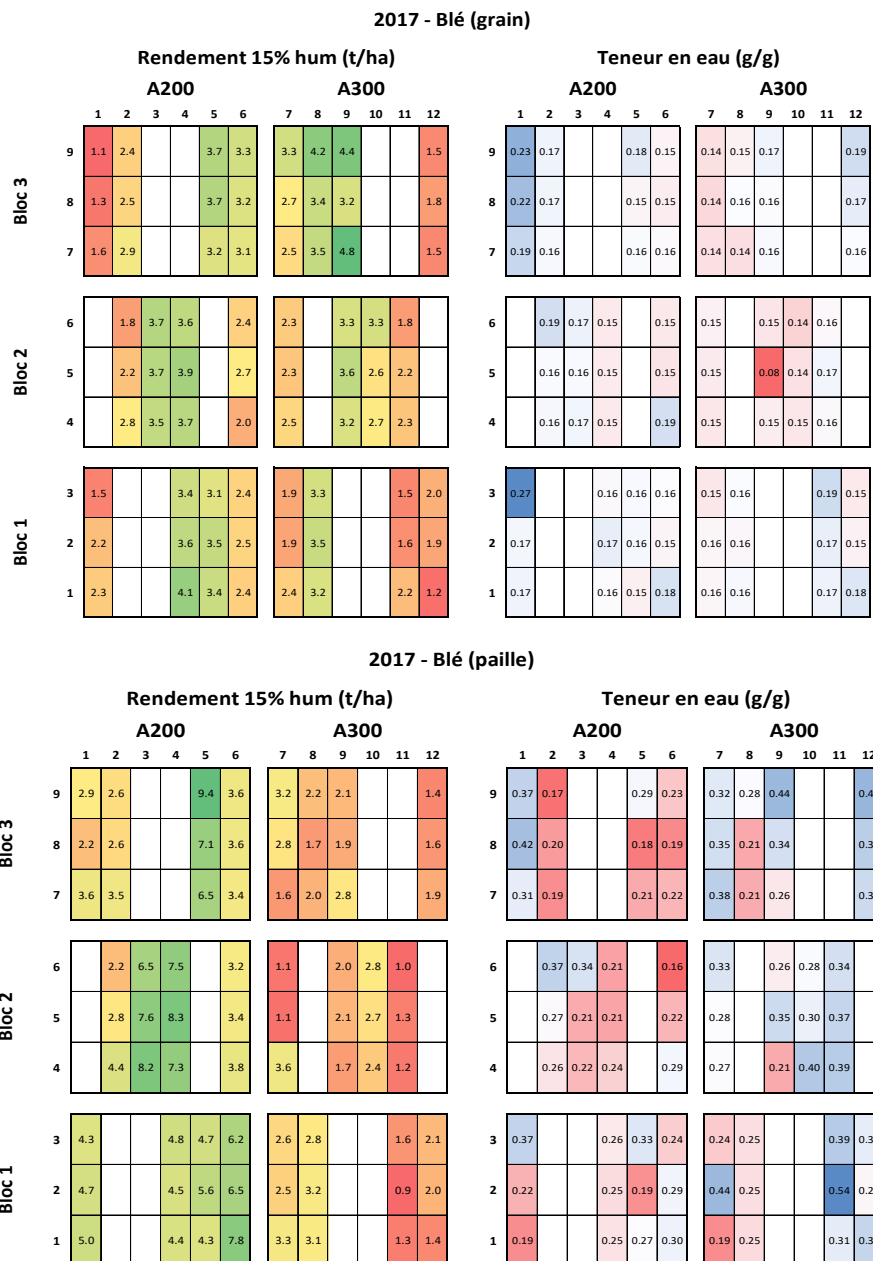
\*\*\* : Prob F. < 0,001; \*\* : Prob F. < 0,05; \* : Prob F. < 0,1

† La même lettre est attribuée aux traitements ne présentant pas de différence significative

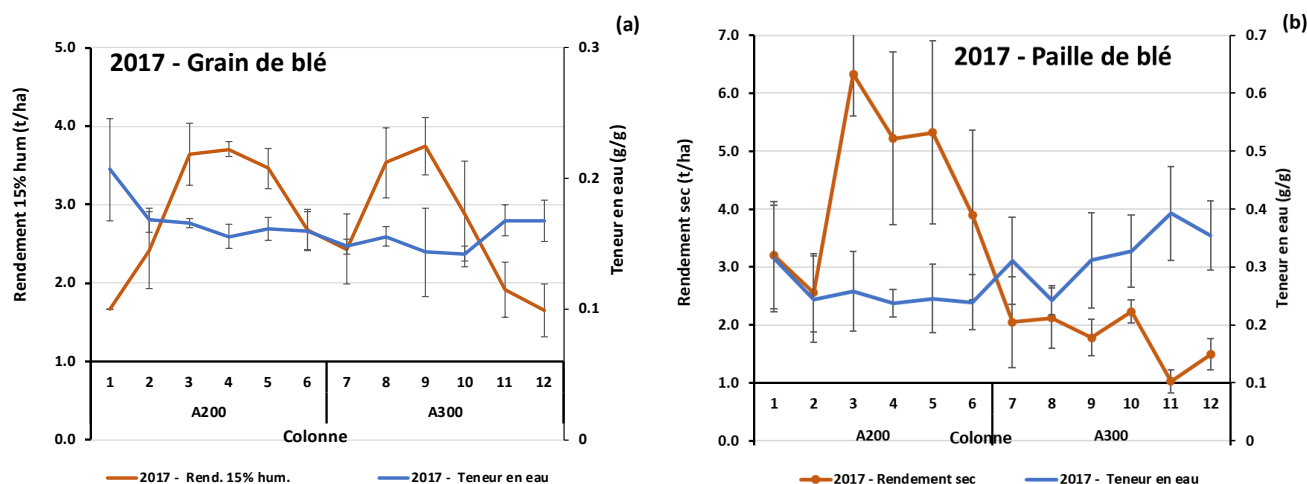
La Figure 6 présente les rendements en grain et paille de blé ainsi que leur teneur en eau mesurés sur chaque parcelle selon son emplacement sur le dispositif, alors que la Figure 7 présente le rendement moyen en grain et en paille ainsi que la teneur en eau moyenne le long des deux planches A200 et A300 distribuées ici dans l'axe des colonnes du dispositif (de la gauche vers la droite).

L'effet du terrain était très significatif dans le sens perpendiculaire aux planches A200 et A300 (axe des colonnes) (Prob. F < 0,0001), autant pour le rendement en blé que pour la teneur en eau dans le grain. Les teneurs en C et N du grain suivaient les mêmes tendances. Ces effets indiquent une forte influence des conditions de terrain (drainage de surface, profondeur du Ap, par exemple) sur la productivité des parcelles. Ainsi, les rendements

étaient plus élevés dans les colonnes 3, 4, 5, 8, 9, 10, comparativement aux bordures des planches (1, 2, 6, 7, 11, 12). La teneur en eau était par ailleurs plus élevée dans les grains récoltés sur les colonnes 1, 2, 3, 11 et 12. Les rendements en paille étaient, quant à eux, beaucoup plus élevés dans les colonnes 3, 4, 5 et 6.



**Figure 6 : Rendement à 15 % d'humidité et teneur en eau du grain et de la paille de blé de chaque parcelle en 2017, selon son emplacement dans le dispositif expérimental.**



**Figure 7 : Rendement et teneur en eau du grain (a) et de la paille (b) de blé récoltés en 2017 en travers des planches A200 et A300 du dispositif expérimental.**

En 2017, mise à part la récolte des grains de blé, toutes les biomasses aériennes d'engrais verts ou de paille de blé sont restées au sol. Ainsi, les quantités de pailles récoltées au moment du battage du grain et retournées au sol le 9 septembre sont présentées au Tableau 10. Au Tableau 11 on présente les quantités additionnelles de biomasses aériennes de pailles et d'engrais verts produites et retournées au sol par les différents traitements d'engrais verts, mesurées le 13 septembre et le 12 octobre 2017. Aucune biomasse de pois fourrager n'a toutefois été mesurée dans les parcelles T6, la biomasse étant absente. Le semis tardif le 20 septembre, le semoir à semis direct utilisé, ainsi que les conditions sèches qui ont prévalu en septembre 2017 ont été défavorables à la levée de l'EV. Le pois fourrager semé dans de meilleures conditions à la fin juillet -début août peut toutefois produire de 3,5 à 4,5 tm/ha de biomasses aérienne sur base de matière sèche (Bérubé et al., 2017).

**Tableau 11 : Biomasses aériennes, teneurs en eau, ratio C/N et quantités de carbone et d'azote retournées au sol avec les engrais verts mesurées le 13 septembre et le 12 octobre 2017 sous chaque traitement.**

	Biomasse aérienne sur base sèche (tm/ha)	Teneur en eau (g/g)	Ratio C/N	C total (kg/ha)	N total (kg/ha)
<b>T1 – Témoin</b>	-	-	-	-	-
<b>T2 – Prairie pleine saison</b>	3,41 B	0,79 B	13,42 B	1479 B	105,2 A
<b>T3 – Vesce velue pleine saison</b>	2,32 C	0,81 A	12,60 B	1017 C	80,8 B
<b>T4 – Trèfles intercalaires à l'automne</b>	3,53 B	0,71 C	21,18 A	1501 B	70,3 C
<b>T5 – Trèfles intercalaires au printemps</b>	3,92 A	0,72 D	22,16 A	1671 A	75,7 BC
<b>T6 – Pois fourrager</b>	-	-	-	-	-
<b>Erreur type</b>	0,28	0,01	0,63	121	6,3
<b>Valeur de F</b>	40,83	148,85	114,29	36,45	29,49
<b>Probabilité de F</b>	< 0,0001 ***	< 0,0001 ***	< 0,0001 ***	< 0,0001 ***	< 0,0001 ***

\*\*\* : Prob F. < 0,001; \*\* : Prob F. < 0,05, \* : Prob F. < 0,1

† La même lettre est attribuée aux traitements ne présentant pas de différence significative



L'ANOVA a révélé des effets des traitements EV très significatifs sur tous les paramètres mesurés dans la biomasse des engrais verts. Le traitement T5 (Trèfles intercalaires enfouis au printemps) a produit les plus importantes biomasses aériennes, suivis par T2 (Prairie pleine saison) et T4 (Trèfles intercalaires enfouis à l'automne) qui ont produit des biomasses équivalentes. La vesce velue a produit la plus faible biomasse (T3). Aucune raison apparente ne peut expliquer la différence de productivité entre les deux traitements T4 et T5 en culture intercalaire de trèfles, sinon que des conditions de terrain non uniformes.

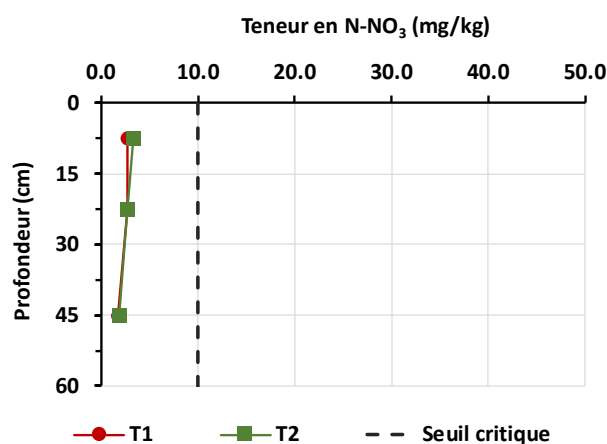
Les quantités de carbone retournées au sol proviennent à la fois de la biomasse aérienne retournée au sol avec les différents engrais verts de légumineuses et de la paille du blé de printemps, lorsque présente. En revanche, les quantités d'azote retournées au sol sont davantage influencées par le type de EV de légumineuses; la prairie de légumineuses (mélange de luzerne et trèfles) T2 apportant un retour de 105 kg N/ha, plus élevé que celui de la vesce velue T3 (81 kg N/ha) et des trèfles intercalaires enfouis au printemps T5 (76 kg N/ha). Les biomasses produites dans la prairie de légumineuses T2 et la vesce velue T3 présentaient aussi de plus faibles rapports C/N que celles des biomasses dans les traitements en trèfles intercalaires (T4 et T5). La présence de paille de blé dans les traitements T4 et T5 en trèfles intercalaires est en fait responsable des quantités plus importantes de biomasses produites, des teneurs en eau plus faibles et des rapports C/N plus élevés.

Dans les traitements témoin (T1 et T6), la biomasse de paille de blé retournée au sol représentait 3,4 à 3,8 t/ha de matière sèche (Tableau 10). Dans les traitements en trèfles intercalaires T4 et T5, la biomasse récoltée (trèfles + paille résiduelle) variait de 3,5 à 3,9 t/ha de matière sèche (Tableau 11), auquel il faut ajouter 2,3 à 2,5 t/ha de paille battue à la récolte (Tableau 10). Puisque les rendements en blé ne sont pas différents entre les différents traitements avec ou sans trèfles intercalaires, on peut supposer une production équivalente de paille sans compétition dans les parcelles de trèfles intercalaires. La biomasse de trèfles sans paille résiduelle serait donc estimée entre 2,2 et 2,4 tm/ha de matière sèche dans les traitements T4 et T5, soit du même ordre de grandeur que la biomasse de vesce velue T3 mesurée le 12 octobre (2,3 tm/ha). Ces biomasses sont équivalentes ou légèrement inférieures à ce que N'dayegamiye et al. (2015) ont mesuré à Saint-Mathieu-de-Beloeil et Saint-Lambert-de-Lauzon en 2011, soit respectivement à ces deux stations 3,0 et 2,9 tm/ha de trèfle rouge sous-ensemencé dans le blé et 2,8 et 3,5 tm/ha de vesce velue en semis pure. À noter que la production de biomasse de vesce velue sous-ensemencée dans le blé a atteint 5,8 et 5,9 tm/ha à ces deux stations.

Sur la même station que notre essai à Saint-Bruno-de-Montarville, Duval et al. (2014) rapportent en 2012 des rendements en biomasse de 3 à 3,5 tm/ha de trèfles intercalaires, de 3,5 tm/ha de vesce velue, de 2,5 tm/ha de luzerne et de 2,9 tm/ha de pois sec, tandis que N'dayegamiye et al. (2017) rapportent en 2<sup>e</sup> cycle d'essai sur le même site en 2014, des rendements inférieurs de 2,2 tm/ha de trèfles intercalaires, de 1,8 tm/ha de vesce velue, de 1,4 tm/ha de luzerne et pas de rendement de pois sec en raison de conditions de sécheresse défavorables. Les rendements de biomasses de légumineuses de notre essai de 2,3 à 3,4 tm/ha sont donc comparables à ceux d'autres essais réalisés dans la même région, sauf pour le pois fourrager qui lorsque semé plus tôt et sous de meilleures conditions climatiques peut produire de très bon rendement.

#### 4.2.2 Suivi des nitrates dans le sol

Les teneurs en nitrates dans le sol en post-récolte du blé en 2017 (Figure 8) indiquent peu de différences entre le traitement témoin (T1) et le traitement d'EV pleine saison (T2), si ce n'est que les teneurs en nitrates dans le T1 sont plus faibles dans les 15 premiers cm du sol. Dans l'ensemble, les teneurs en nitrates relativement basses en post-récolte du blé en 2017 témoignent d'un appauvrissement relatif en azote du sol comparativement à la même période en 2016 après une culture de maïs sur retour de luzerne. Ces teneurs relativement basses en nitrates dans l'ensemble des parcelles étaient souhaitables sur le plan expérimental, du moins dans le Témoin sans EV, pour pouvoir détecter les effets des EV sur la culture de maïs qui devait suivre en 2018.



**Figure 8 : Comparaison des teneurs en nitrates dans le sol sous les traitements T1 et T2 en post-récolte du blé en 2017.**

## 4.3 2018 – MAÏS GRAIN SUR RETOUR D'ENGRAIS VERTS DE LÉGUMINEUSES

### 4.3.1 Suivi des rendements

Le Tableau 12 rapporte les valeurs moyennes des traitements ainsi que les résultats de l'ANOVA pour les rendements, la teneur en eau, la concentration en carbone et en azote des grains de maïs récoltés en 2018. Les effets du traitement de l'EV et de la dose de N sur les rendements et la teneur en eau, sont fortement significatifs. Leur interaction est également significative, tant sur le rendement en grain (Prob.  $F < 0,10$ ) et sa teneur en eau (Prob.  $F < 0,001$ ).

**Tableau 12 : Rendement de maïs-grain à 15 % d'humidité, teneur en eau, ratio C/N et teneurs en carbone et azote du grain en fonction des traitements d'engrais verts et des doses d'azote appliquées.**

	Rendement 15% hum. (tm/ha)	Teneur en eau (g/g)	Ratio C/N	Carbone (%)	Azote (%)
<b>Effet des engrais verts</b>					
T1 – Témoin	4,21 B	0,22 A	38,64 A	42,95 BC	1,12 C
T2 – Prairie pleine saison	7,47 A	0,21 BC	34,84 B	43,09 A	1,25 B
T3 – Vesce velue pleine saison	7,73 A	0,21 BC	31,69 C	43,13 A	1,37 A
T4 – Trèfles intercalaires à l'automne	6,83 A	0,20 C	36,71 B	43,07 AB	1,19 B
T5 – Trèfles intercalaires au printemps	6,57 A	0,21 BC	36,03 B	43,02 ABC	1,21 B
T6 – Pois fourrager (2 <sup>e</sup> témoin)	4,61 B	0,22 AB	38,65 A	42,93 C	1,12 C
Erreur type	0,4729	0,5899	1,5740	0,0478	0,0555
Valeur de F	11,04	3,54	16,21	2,90	18,22
Probabilité de F	< 0,0001 ***	0,0148 **	< 0,0001 ***	0,0179 **	< 0,0001 ***
<b>Effet de la dose de N</b>					
0 N	4,59 C	0,23 A	39,04 A	42,98 B	1,11 C
75 N	6,47 B	0,21 B	36,31 B	43,01 B	1,20 B
150 N	7,65 A	0,21 B	32,93 C	43,11 A	1,32 A
Erreur type	0,2802	0,0051	1,4824	0,0338	0,0525
Valeur de F	76,84	51,26	85,04	4,01	90,43
Probabilité de F	< 0,0001 ***	< 0,0001 ***	< 0,0001 ***	0,0215 **	< 0,0001 ***
<b>Interaction Engrais verts X Dose</b>					
Erreur type	0,5899	0,0067	1,7082	0,0829	0,0598
Valeur de F	1,74	3,71	0,83	1,45	0,73
Probabilité de F	0,0924 *	0,0007 ***	0,6052	0,1702	0,6942

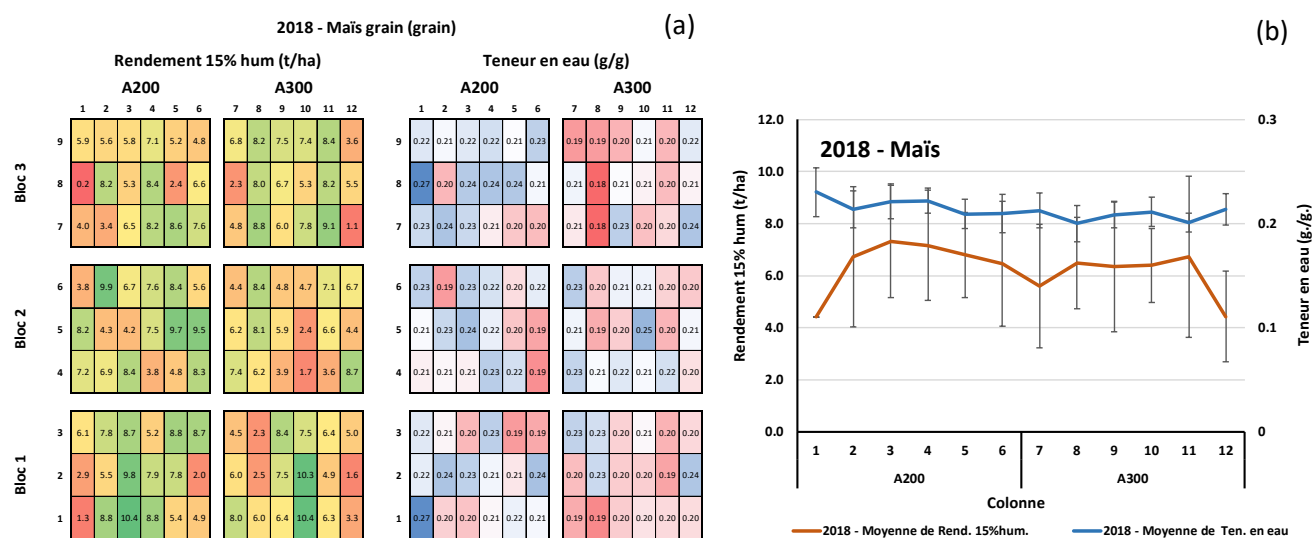
\*\*\* : Prob F. < 0,001; \*\* : Prob F. < 0,05; \* : Prob F. < 0,1

† La même lettre est attribuée aux traitements ne présentant pas de différence significative

À doses égales, aucune différence significative n'a été observée entre les traitements T1 et T6 (Témoins sans EV), de même qu'entre les traitements T2 et T3 (EV Pleine saison) ainsi que les traitements T4 et T5 (trèfles intercalaires) sur la plupart des variables de rendements rapportées. Il était normal de ne pas avoir de différence significative entre les traitements T1 et T6 en raison du pois fourrager qui ne s'était pas établi en 2017. Compte tenu des différences non significatives entre ces traitements, et afin d'augmenter la puissance des tests statistiques et d'en simplifier la présentation, les traitements ont été regroupés sous les appellations Témoin (T1-T6), EV pleine saison (T2-T3) et Trèfles intercalaires (T4-T5).

À pleine dose d'azote (150 N), les rendements moyens du maïs-grain (7,65 t/ha) ont été plus faibles en 2018 que ceux mesurés en 2016 (9,5 t/ha) sur un retour de prairie de luzerne labourée au printemps 2016. Cette baisse de rendement pourrait s'expliquer par l'arrière-effet estompé de la prairie de luzerne retournée au printemps 2016, un été relativement plus sec en 2018 combiné à l'effet des pratiques de travail réduit au printemps sur la compaction superficielle du profil et sur l'approvisionnement en eau des racines.

Tel qu'observé pour les rendements de blé en 2017, une portion de la réponse du maïs-grain aux traitements en 2018 est de nature spatiale ou liée à la position sur les planches. La Figure 9a présente les rendements et la teneur en eau du maïs-grain mesurés sur chaque parcelle selon son emplacement sur le dispositif, tandis que la Figure 9b présente ces mêmes variables sur un axe perpendiculaire aux deux planches A200 et A300. Les colonnes 1, 6, 7 et 12 sont représentatives des positions plus basses en bordure des planches. À l'étude des résultats du modèle statistique, l'effet des planches est significatif, mais il demeure largement inférieur aux effets des traitements d'EV. Les variations dans le drainage de surface et la profondeur de l'horizon Ap pourraient expliquer ces différences de rendements et de teneur en eau du maïs-grain.



**Figure 9 : Distribution spatiale du rendement et de la teneur en eau du maïs grain en 2018 sur le dispositif (a) et sur un axe perpendiculaire aux deux planches A200 et A300.**

En ce qui a trait aux teneurs en N et aux ratios C/N du grain, des différences significatives ont été détectées entre les deux EV de pleine saison T2 et T3 (Tableau 11). Les concentrations de N dans le grain de maïs se sont avérées en effet plus élevées sur retour de vesce velue (T3) qu'en retour de prairie de légumineuses (T2), indiquant vraisemblablement une fourniture en N de la vesce plus élevée que celle de la prairie de légumineuses (Prob. de  $t < 0,001$ ). La teneur en N du maïs-grain est d'ailleurs significativement plus faible dans les parcelles Témoin (T1 et T6) sans EV de légumineuses (1,12 g/kg) qu'avec EV de trèfles intercalaires (T4 et T5) ou de prairie de légumineuses (T2) (1,22 g/kg en moyenne) ou encore après EV de vesce velue (1,37 g/kg) (Tableau 12). Les EV de légumineuses permettent donc d'obtenir non seulement des rendements significativement plus élevés, mais aussi une meilleure qualité du grain en termes de teneur en protéine reflétée par une teneur en azote à la hausse. Par

ailleurs, les engrais verts de légumineuses se distinguent entre eux quant à leur effet sur la teneur en azote du maïs-grain en lien avec le rapport C/N de l'EV de légumineuse (Tableau 13). L'EV de vesce velue semble ainsi augmenter la teneur en azote du maïs-grain, par rapport à la prairie de trèfles et de luzerne ou l'EV de trèfles intercalaires.

**Tableau 13 : Probabilités de t associées aux contrastes entre la prairie de légumineuses (T2) et la vesce velue (T3) sur les variables de rendement du maïs-grain à différentes doses d'azote appliquées.**

Contraste	Rendement 15% hum. (tm/ha)	Teneur en eau (g/g)	Ratio C/N	Carbone (%)	Azote (%)
T2 VS T3	0,679	0,928	0,002	0,567	0,000
T2 VS T3 à 0 N	0,507	0,400	0,010	0,671	0,011
T2 VS T3 à 75 N	0,898	0,343	0,015	0,479	0,005
T2 VS T3 à 150 N	0,852	0,049	0,043	0,479	0,006

L'analyse des effets linéaires et quadratiques de la dose de N appliquée (0, 75 et 150 N d'Acti-Sol) révèle des effets linéaires significatifs sous tous les traitements d'engrais verts pour toutes les variables de rendement étudiées, à l'exception de la teneur en C sous certains traitements (Tableau 14). Des effets quadratiques de la dose sur le rendement et la teneur en eau du grain sont aussi détectés au seuil de 10 % (Prob de t < 0,10) pour les traitements d'EV de pleine saison et de Trèfles intercalaires.

**Tableau 14 : Effets linéaires et quadratiques des différentes doses d'azote appliquées (0, 75 et 150 N d'Acti-Sol) sur les variables de rendement du maïs-grain selon les différents traitements d'engrais verts.**

Contrastes	Rendement 15% hum. (tm/ha)	Teneur en eau (g/g)	Ratio C/N	Carbone (%)	Azote (%)
<b>Effet linéaire</b>					
Dose de N	< 0,0001 ***	< 0,0001 ***	< 0,0001 ***	0,0090 **	< 0,0001 ***
Témoin	< 0,0001 ***	< 0,0001 ***	< 0,0001 ***	0,0294 **	< 0,0001 ***
EV pleine saison	< 0,0001 ***	0,1734	< 0,0001 ***	0,2306	< 0,0001 ***
Trèfles intercalaires	< 0,0001 ***	< 0,0001 ***	< 0,0001 ***	0,2306	< 0,0001 ***
<b>Effet quadratique</b>					
Dose de N	0,1121	0,0001 ***	0,4173	0,3504	0,2275
Témoin	0,4739	0,0926	0,0444	0,0664 *	0,0425
EV pleine saison	0,0966 *	0,0311 **	0,7149	0,8168	0,8340
Trèfles intercalaires	0,0729 *	0,0021 **	0,7863	1,0000	0,8042

\*\*\* : Prob t. < 0,001; \*\* : Prob t. < 0,05; \* : Prob t. < 0,1

Sur la base des réponses moyennes aux trois doses de N, les engrais verts de pleine saison et les trèfles intercalaires ont eu des effets significatifs sur toutes les variables de rendement, en comparaison des parcelles

Témoin (Tableau 15). À chaque dose d'*Acti-Sol* appliquée (0, 75 ou 150 N), les deux types d'EV ont produit des rendements et des teneurs en N significativement différents du Témoin. Les EV de pleine saison (T2-T3) ont par ailleurs généré des rendements significativement supérieurs aux traitements Trèfles intercalaires (T4-T5) en absence d'apport de N (Prob de F < 0,064). À des doses d'*Acti-Sol* de 75 et 150 N, les EV de légumineuses produisent des rendements de maïs significativement plus élevés par rapport au traitement Témoin, mais les EV de pleine saison ne se distinguent plus significativement par rapport aux traitements Trèfles intercalaires, malgré des tendances de rendements plus élevés sous les EV de pleine saison. Ces derniers produisent toutefois des grains avec des teneurs en N plus élevées (ratio C/N du grain plus bas) que les traitements Trèfles intercalaires, et ce pour toutes les doses de N appliquées.

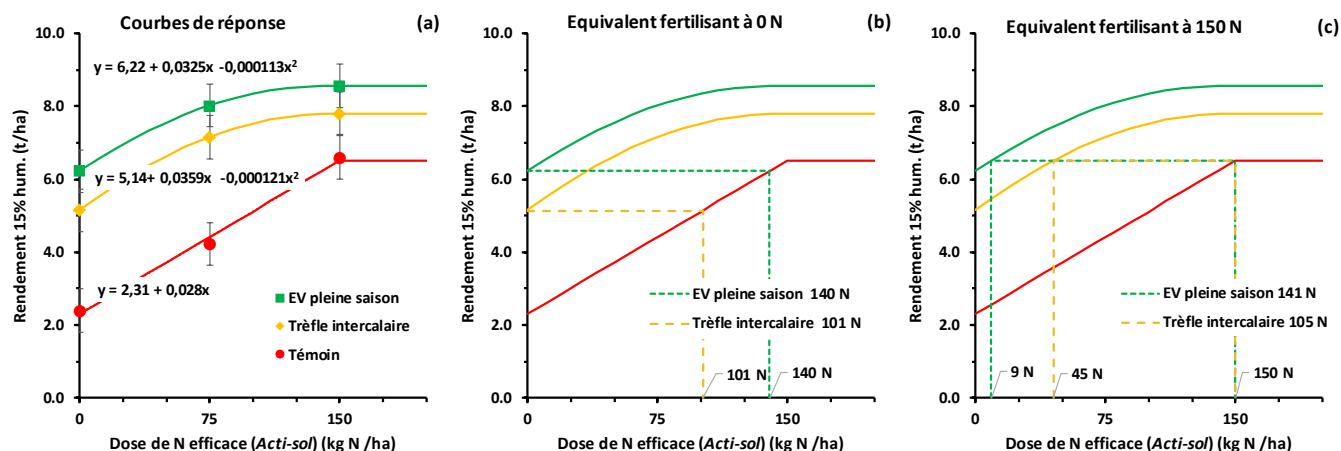
**Tableau 15 : Effets des EV de pleine saison (T2-T3) et des EV Trèfles intercalaires (T4-T5) par rapport au traitement Témoin (T1-T6) sur les variables de rendement du maïs-grain aux différentes doses d'azote appliquées (0, 75 et 150 N d'*Acti-Sol*).**

Contrastes	Rendement 15% hum. (tm/ha)	Teneur en eau (g/g)	Ratio C/N	Carbone (%)	Azote (%)
<b>Moyenne</b>					
Témoin vs EV pleine saison	< 0,0001 ***	0,0055 **	< 0,0001 ***	0,0004 ***	< 0,0001 ***
Témoin vs Trèfles intercalaires	< 0,0001 ***	0,0016 **	0,0016 **	0,0343 *	0,0016 **
EV pleine saison vs Trèfles intercalaires	0,0553 *	0,6169	< 0,0001 ***	0,1346	< 0,0001 ***
<b>0 N</b>					
Témoin vs EV pleine saison	< 0,0001 ***	< 0,0001 ***	< 0,0001 ***	0,0472	< 0,0001 ***
Témoin vs Trèfles intercalaires	< 0,0001 ***	0,0017 **	0,2585	0,2306	0,2907
EV pleine saison vs Trèfles intercalaires	0,0640 *	0,0730 *	< 0,0001 ***	0,4231	0,0002 ***
<b>75 N</b>					
Témoin vs EV pleine saison	< 0,0001 ***	0,0158 **	< 0,0001 ***	0,0013 **	< 0,0001 ***
Témoin vs Trèfles intercalaires	< 0,0001 ***	0,0014 **	0,0005 ***	0,0230 **	0,0012 **
EV pleine saison vs Trèfles intercalaires	0,1349	0,3967	0,0011 **	0,3172	0,0003 ***
<b>150 N</b>					
Témoin vs EV pleine saison	0,0011 **	0,3927	< 0,0001 ***	0,3172	< 0,0001 ***
Témoin vs Trèfles intercalaires	0,0376 **	0,2245	0,0117 **	0,8410	0,0052 **
EV pleine saison vs Trèfles intercalaires	0,1905	0,0408 **	0,0159 **	0,4231	0,0030 **

\*\*\* : Prob t. < 0,001; \*\* : Prob t. < 0,05; \* : Prob t. < 0,1

La Figure 10a illustre les variations de rendements obtenues avec les deux types d'EV de légumineuses (Pleine saison et Trèfles intercalaires) et les traitements Témoin en fonction de la dose d'azote apportée avec l'*Acti-Sol*. Les courbes de réponse aux engrais sont dérivées d'un modèle quadratique-plateau pour les engrais verts de pleine saison et les trèfles intercalaires, et d'un modèle linéaire-plateau pour les traitements Témoin dont le plateau a été forcé à 150 kg N/ha (dose maximale de N). Sans EV de légumineuses, le maïs répond de façon linéaire aux apports de N, tandis qu'avec des apports de N en provenance des EV de légumineuses, les rendements

évoluent de façon quadratique en réponse aux apports supplémentaires de N sous forme d'*Acti-Sol* et plafonnent à des niveaux supérieurs de rendement pour des quantités moindres de N. Les rendements plafonnent ainsi à 7,8 tm/ha avec 148 kg N/ha sous EV de trèfles intercalaires et à 8,6 tm/ha avec 144 kg N/ha sous EV de pleine saison, tandis que 6,5 tm/ha est obtenu avec 150 kg N/ha dans les traitements Témoin. Sans apport d'*Acti-Sol* (0N), les rendements sont plus de deux fois plus élevés après des EV de légumineuses que dans le traitement Témoin, soit respectivement de 2,3, 5,1 et 6,2 tm/ha pour les traitements Témoin, Trèfles intercalaires et EV pleine saison.



**Figure 10 : Courbes de réponse du maïs grain aux apports d'*Acti-Sol* (0, 75 et 150 kg/ha de N efficace) (a) sous les traitements Témoin (T1-T6), EV pleine saison (T2-T3) et Trèfles intercalaires (T4-T5) et équivalents fertilisant à 0 N (b) et 150 N (c) des EV pleine saison et Trèfles intercalaires.**

Dans une méta-analyse de plus de 80 articles et rapports scientifiques publiés en milieu tempéré, Charles et al. (2016) et Vanasse et al., (2017) rapportent en moyenne des rendements de 1,4 fois supérieurs à ceux des témoins après des retours d'EV de légumineuses sans apport de N supplémentaire. Dans la présente étude, les augmentations de rendements de 2,2 et 2,7 fois supérieurs au traitement Témoin, obtenus sans apport de N supplémentaire avec les traitements Trèfles intercalaires et EV de pleine saison, sont donc très importantes et dans les limites supérieures de ce qui est généralement rapporté. Faut-il toutefois souligner que les rendements de 2 à 6 tm/ha mesurés en 2018 dans nos essais sans apport d'engrais N supplémentaires étaient relativement faibles. Néanmoins, de telles augmentations de rendement avec des engrais de légumineuses, mais sans engrais N supplémentaires sont considérées par Vanasse et al. (2017) comme des cas plus rares (2 à 3 % des cas rapportés dans la littérature scientifique) correspondant à des réponses du maïs aux EV de type 3 (Figure 9 dans le rapport de Vanasse et al. 2017).

Pour produire le même rendement que les traitements Trèfles intercalaires sans apports de N supplémentaire, soit 5,1 tm/ha de maïs-grain, il faut apporter sans cet engrais vert de légumineuses, un équivalent fertilisant de 101 kg/ha de N efficace avec l'*Acti-Sol* et pour produire le même rendement que les traitements EV de pleine saison, soit 6,2 tm/ha de maïs-grain sans N supplémentaire, il faudrait un équivalent fertilisant de 140 kg N/ha d'*Acti-Sol* (Figure 10b). Dans la méta-analyse de Charles et al. (2017), les contributions moyennes des engrais verts de légumineuses ou de mélanges avec légumineuses calculées sans apports de N supplémentaire (Fertilizer



Equivalency) sont équivalentes respectivement à 87 et 57 kg N/ha d'engrais de synthèse. Les équivalents fertilisants des engrais verts de légumineuses obtenues à 0 N dans la présente étude étaient donc 1,2 à 1,6 fois supérieures à ceux rapportés en moyenne dans la littérature scientifique par Charles et al. (2017). Rappelons toutefois que les doses de N apportées avec l'*Acti-Sol* sont en fait calculées avec un coefficient d'efficacité de 80 % et donc les quantités totales de N apportées pour obtenir les mêmes rendements avec les traitements Trèfles intercalaires et EV pleine saison sont de 126 et 174 kg/ha de N total. Les contributions en azote des engrais verts de légumineuses dans le présent essai en régie biologique sont donc loin d'être négligeables, s'il faut les remplacer par d'autres engrais de ferme encore moins efficaces.

Pour obtenir un rendement équivalent à 6,5 tm/ha de maïs-grain à la dose maximale de 150 kg N/ha d'*Acti-Sol* dans le traitement Témoin, il faudrait apporter une dose supplémentaire de 45 et 9,1 kg N/ha (N efficace d'*Acti-Sol*) dans les traitements Trèfles intercalaires et EV de pleine saison (Figure 10c). Par différence avec cette dose de 150 kg N/ha d'*Acti-Sol*, les traitements Trèfles intercalaires et EV pleine saison présentent donc respectivement des crédits de 105 et 141 kg N/ha en équivalent fertilisant 150 N (Figure 10c). Charles et al. (2017) rapportent pour des groupes d'EV de légumineuses apportant 50 à 200 kg N/ha dans la biomasse retournée au sol des équivalents fertilisants à dose maximale (Inorganic N credit) variant de 81 à 122 kg N/ha. Peu importe qu'ils soient calculés à 0N ou 150 N d'*Acti-Sol*, les équivalents fertilisants pour les deux types d'EV de légumineuses à l'étude sont relativement similaires, soit 101 ou 105 kg N/ha pour les Trèfles intercalaires et 140 ou 141 kg N/ha pour les EV pleine saison. Ces équivalents fertilisants sont aussi relativement élevés par rapport aux quantités de N retournées au sol avec la biomasse aérienne des EV de légumineuses et de pailles de blé en 2017, soit 73 et 93 kg N/ha pour les traitements Trèfles intercalaires et EV pleine saison, respectivement (Tableau 11).

La méta-analyse de Vanasse et al. (2017) rapporte un lien très significatif de la quantité d'azote accumulée dans la biomasse aérienne (APA) des CC sur leur contribution azotée au maïs. En revanche elle ne rapporte pas de façon marquée des valeurs d'équivalents fertilisants supérieures aux retours de N provenant de la biomasse aérienne des légumineuses. Cet écart peu marqué peut résulter du calcul de valeurs moyennes sur un nombre plus considérable d'essais et de conditions pédoclimatiques qui a tendance à aplanir les effets des réponses plus marquées. Par exemple, Tremblay et Bérubé (2017) rapportent dans un essai avec pois fourrager et un autre avec pois autrichiens des Équivalents fertilisants (Équivalent minéral 0N) de 198 et 176 kg N/ha liés à des retours au sol de 92 et 75 kg N/ha dans leur biomasse aérienne respective. Vanasse et al. 2017 rapportent cet essai dans leur méta-analyse comme faisant partie des réponses à l'azote de type 3, comme le présent essai, soit des effets qui vont au-delà d'un effet fertilisant, en augmentant la productivité du système.

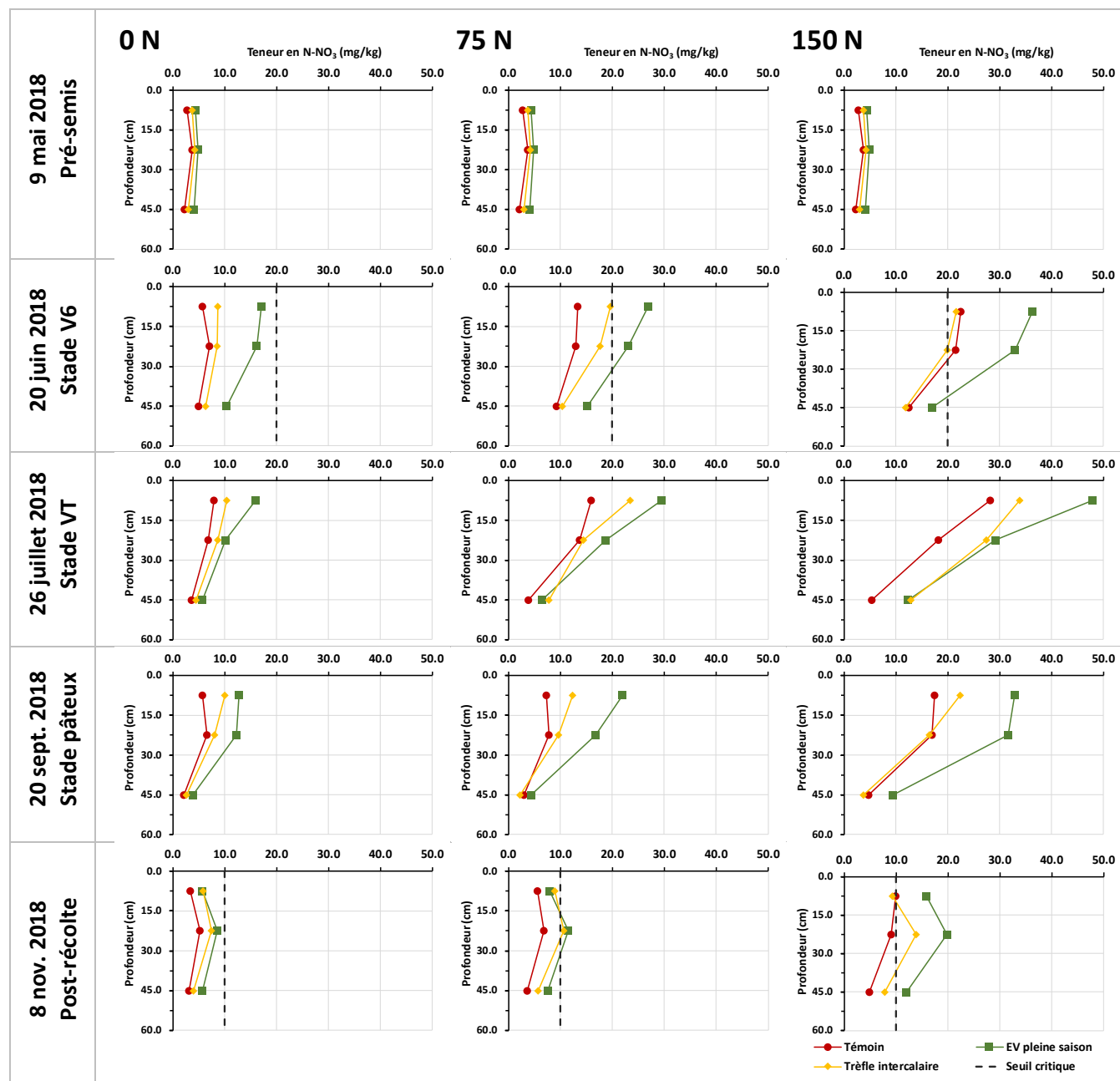
Plusieurs hypothèses peuvent être mises de l'avant pour expliquer l'effet équivalent fertilisant plus élevé que la quantité de N retournée au sol avec ces engrais verts légumineuses. Entre autres, les effets de la biomasse et de l'azote racinaire des légumineuses ne sont pas comptabilisés et peuvent avoir un effet 1- sur la condition physique du sol, comme l'agrégation, l'aération et la rétention en eau qui influencent directement la productivité des cultures; 2- sur les conditions de minéralisation de la matière organique et de l'azote du sol reliées à l'amélioration de ces conditions physiques et de l'activité microbienne; et finalement 3- sur les quantités de N véritablement retournées au sol par les racines, la rhizosphère des légumineuses et l'impact positif des légumineuses sur les

mycorhizes. L'azote retourné dans la biomasse aérienne des engrais verts et leur rapport C/N doivent cependant jouer un certain rôle puisque les rendements de maïs ont évolué proportionnellement à ces deux variables, alors qu'ils n'ont pas évolué de la même façon avec les quantités de biomasse ou de C retournées au sol avec les engrais verts et la paille de céréales (Tableau 11).

### 4.3.2 Suivi des nitrates dans le sol

#### *Analyse d'ensemble des effets des traitements, dose de N et date sur les nitrates*

L'évolution des teneurs en nitrates dans le sol a été documentée par un échantillonnage réalisé à trois profondeurs et à cinq dates réparties tout au long de la saison de production du maïs grain en 2018 (Figure 11).



**Figure 11 : Évolution des teneurs moyennes en nitrate (N-NO<sub>3</sub>) dans le temps et en profondeur dans le sol selon le type d'engrais vert (Pleine saison vs intercalaire) et les trois doses d'azote (0, 75 et 150 N) apportées pour le maïs-grain.**

Pour faciliter la représentation graphique des effets de traitements d'engrais verts, de dose de N et de profondeur dans le sol, les concentrations moyennes des traitements Témoin (T1-T6), EV de pleine saison (T2-T3) et Trèfles intercalaires (T4-T5) sont présentées. Dans les faits, ce regroupement est motivé sur le plan biostatistique, puisque les concentrations des deux traitements combinés ne se distinguent pas entre elles de façon significative (Prob. F > 0,05), ou faiblement (T2 vs T3 en pré-semis), pour l'ensemble des dates d'échantillonnage. La Figure 16, en annexe au présent rapport, illustre l'ensemble des moyennes de concentrations en nitrates pour les effets des traitements EV, des doses de N et de profondeur, pour les cinq périodes d'échantillonnage.

L'analyse de variance (ANOVA) présentée au Tableau 16 nous renseigne sur les effets des traitements d'EV, de la dose de N appliquée et de la date d'échantillonnage (Pré-semis, Stade V6, Stade VT (sortie des soies), Stade pâteux et Post-récolte) sur les concentrations moyennes d'azote ammoniacale (N-NH<sub>4</sub>) et nitrique (N-NO<sub>3</sub>) pondérées sur 0 à 60 cm de profondeur. En ce qui a trait à N-NH<sub>4</sub>, aucun effet significatif n'est attribué aux traitements d'EV ou de dose de N. Seul l'effet simple de la date et son interaction avec les traitements sont significatifs. En conséquence, l'analyse des effets des engrais verts et des apports d'azote portera uniquement sur les concentrations de N-NO<sub>3</sub> observées.

**Tableau 16 : Effets des traitements, des doses de N appliquées et des dates d'échantillonnage sur les concentrations moyennes de nitrates et d'ammonium pondérées de 0 à 60 cm de profondeur.**

	N-NH <sub>4</sub>		N-NO <sub>3</sub>	
	Val. F	Prob. F	Val. F	Prob. F
Traitements EV	0,37	0,8618	12,64	< 0,0001 ***
Dose d'Acti-Sol	1,87	0,1692	82,96	< 0,0001 ***
Date d'échantillonnage	90,10	< 0,0001 ***	83,84	< 0,0001 ***
Interaction Trait. x Dose	0,49	0,8848	1,14	0,3673
Interaction Date x Trait.	1,96	0,0084 **	2,19	0,0031 ***
Interaction Date x Dose	0,39	0,9237	11,43	< 0,0001 ***
Interaction Date x Trait. x Dose	0,39	0,9997	0,58	0,9786

\*\*\* : Prob F. < 0,001; \*\* : Prob F. < 0,05; \* : Prob F. < 0,1

Les résultats de l'ANOVA pour les teneurs moyennes en nitrates pondérées sur 0 à 60 cm de profondeur (Tableau 16), mettent en relief des effets simples très significatifs (Prob. F < 0,0001) des traitements d'EV, des doses de N appliquées et des dates d'échantillonnage. L'interaction Traitement x Dose de N et l'interaction triple Date x Traitement x Dose n'est cependant pas significative (Prob. F > 0,10). Il est donc conclu que l'effet de l'EV sur la concentration de nitrates dans le sol est indépendant de la dose de N appliquée. Réciproquement, l'apport de N à une dose donnée a le même effet sur l'augmentation de la concentration en nitrates, quel que soit l'effet de l'engrais vert. L'implication pratique de cette absence d'interaction est que les effets des EV et des doses d'azote sont cumulatifs, excluant un effet synergique de la présence de la légumineuse et du taux d'apport d'azote.

Sur le plan de l'interprétation statistique des résultats, l'absence d'interaction *Traitement x Dose* permet par ailleurs d'évaluer les effets des traitements par niveaux séparés de doses de N. Tel que présenté au Tableau 17, les résultats de l'ANOVA pour les teneurs moyennes pondérées en nitrates (0-60 cm) indiquent que les

traitements d'EV ont des effets très significatifs (Prob. F < 0,0001) sur la concentration en nitrates dans le sol pour chacun des trois niveaux d'apports de N (0, 75, 150 kg N/ha).

Les concentrations fluctuent également de façon significative dans le temps (Prob. F < 0,0001). Ce gradient temporel est cependant modulé par le traitement d'EV, tel qu'en témoigne l'interaction *Date x Traitement* significatif. La Figure 11 illustre bien l'influence des traitements d'EV et des doses de N sur l'évolution dans le temps des concentrations en nitrates, depuis la période du pré-semis (9 mai) au stade V6 (20 juin), à la sortie des soies (26 juillet), au stade pâteux (20 septembre) puis en post-récolte (8 novembre). La mobilité des nitrates dans le profil de sol est également illustrée par l'évolution des concentrations depuis les strates de profondeur 0-15 cm et 15-30 cm, vers la strate 0-60 cm. La Figure 16 annexée au présent rapport illustre ces gradients de façon plus détaillée pour chacun des traitements en EV.

**Tableau 17 : Effets des traitements EV sur les teneurs moyennes pondérées en nitrates (0-60 cm) par date et par dose de N appliquée avec l'Acti-Sol.**

	0 N		75 N		150 N	
	Val. F	Prob. F	Val. F	Prob. F	Val. F	Prob. F
<b>2018-05-09 (Pré-semis)</b>	10,21	< 0,0001 ***	9,54	< 0,0001 ***	9,50	< 0,0001 ***
<b>2018-06-20 (Stade V6)</b>	6,84	0,0002 ***	3,37	0,0157 **	3,14	0,0208 **
<b>2018-07-26 (Stade VT)</b>	1,92	0,1212	1,74	0,1559	1,27	0,3027
<b>2018-09-20 (Stade pâteux)</b>	1,98	0,1136	4,77	0,0025 **	1,99	0,1090
<b>2018-11-08 (Post-récolte)</b>	3,86	0,0073 **	2,56	0,0478 **	3,59	0,0111 **
<b>Date d'échantillonnage</b>	31,47	< 0,0001 ***	67,10	< 0,0001 ***	71,88	< 0,0001 ***
<b>Traitement</b>	7,55	0,0001 ***	7,58	< 0,0001 ***	4,59	0,0026 **
<b>Interaction Date x Trait.</b>	1,85	0,0297 **	1,91	0,0237 **	1,61	0,0787 *

\*\*\* : Prob F. < 0,001; \*\* : Prob F. < 0,05; \* : Prob F. < 0,1

Le Tableau 17 rapporte également les effets associés aux traitements d'EV, par date, sur la concentration en nitrates (0-60 cm) pondérée pour la profondeur, et ce pour les classes séparées d'apport de N. Ce tableau complète bien les profils de concentrations illustrés en Figure 11, en traduisant le caractère significatif, au plan biostatistique, des différences dans les stocks de N (0-60 cm) résultant des EV, et ce pour chacune des doses d'apport de N. Ainsi, en début de saison (stade pré-semis), les traitements d'EV ont des effets significatifs sur la concentration en nitrates du sol. Cette hausse de la concentration en nitrates témoigne du processus de minéralisation de l'azote apportée par les légumineuses, de même que la nitrification de l'azote de l'engrais de ferme apporté en pré-semis (stade V6), précédent le pic de prélèvement du maïs grain. Aux stades de la sortie des soies (VT) et au stade pâteux, l'effet des traitements EV sur la concentration en nitrates n'est plus significatif, quel que soit la dose d'apport de N (à l'exception du taux de 75 N au stade pâteux). Cette absence d'effet témoigne de la période de pointe du prélèvement d'azote par les plantes, alors que l'azote des EV et de l'engrais de ferme, fraîchement minéralisé, est aussitôt prélevé par les plantes.

En post-récolte, les effets des traitements d'EV redeviennent significatifs, pour toutes les doses d'apport de N de l'engrais de ferme, témoignant à la fois de la fin du prélèvement d'azote par les plantes, et du processus de minéralisation d'azote de l'EV et de l'engrais de ferme, pour sa part toujours actif. L'étude des gradients de concentration en nitrates de la Figure 11 indique par ailleurs un enrichissement sous la couche arable (30-60 cm), par rapport au stade pâteux précédent (20 septembre). L'enrichissement en profondeur est plus marqué suivant l'accroissement de la dose d'apport de N, ce qui témoigne de la mobilisation des reliquats de fertilisation (azote disponible non prélevé par la plante) depuis la couche arable vers le sous-sol.

*Analyse des contributions en nitrates des traitements d'EV, sans apport de N supplémentaire*

Le Tableau 18 présente les teneurs moyennes pondérées en nitrates (0-60 cm) et les contrastes de l'ANOVA entre les différents traitements d'EV sans apport supplémentaire d'azote (0 N). Seuls les résultats des périodes de pré-semis, V6 et post-récolte sont présentés, compte tenu des gradients non significatifs évoqués précédemment pour les Stades VT et pâteux.

**Tableau 18 : Contrastes entre les effets des traitements EV par date sur les teneurs moyennes pondérées en nitrates (0-60 cm) pour les périodes pré-semis, stade V6 et post-récolte.**

0 N	9 mai 2018 Pré-semis	20 juin 2018 Stade V6	8 nov. 2018 Post-récolte
	mg/kg N-NO <sub>3</sub>		
<b>Témoin</b>	<b>2,7</b>	<b>5,7</b>	<b>3,7</b>
T2 – Prairie pleine saison	3,3	15,5	6,0
T3 – Vesce velue pleine saison	5,4	11,6	6,9
<b>EV pleine saison</b>	<b>4,4</b>	<b>13,5</b>	<b>6,4</b>
T4 – Trèfles intercalaires à l'automne	3,9	6,3	5,2
T5 – Trèfles intercalaires au printemps	3,1	8,7	5,3
<b>Trèfles intercalaires</b>	<b>3,5</b>	<b>7,5</b>	<b>5,3</b>
	<b>Contrastes</b>		
<b>Témoin vs EV pleine saison</b>	<b>&lt; 0,0001 ***</b>	<b>&lt; 0,0001 ***</b>	<b>0,0002 ***</b>
<b>Témoin vs Trèfles intercalaires</b>	<b>0,0227 **</b>	0,2457	<b>0,0227 **</b>
<b>EV pleine saison vs Trèfles intercalaires</b>	<b>0,0129 **</b>	<b>0,0004 ***</b>	<b>0,0907 *</b>
<b>T2 vs T3</b>	<b>&lt; 0,0001 ***</b>	<b>0,0808 *</b>	0,3329
<b>T4 vs T5</b>	0,1075	0,2692	0,8894

\*\*\* : Prob t. < 0,001; \*\* : Prob t. < 0,05; \* : Prob t. < 0,1

Dès la période de pré-semis, au 9 mai, les traitements d'EV de pleine saison (T2-T3) et de Trèfles intercalaires (T4-T5) présentaient des teneurs en nitrates (0-60 cm) plus élevées (Prob. t < 0,0001) que les traitements Témoin (T1-T6). L'enrichissement du sol est aussi significativement plus élevé sur un retour d'EV de pleine saison que sur un retour de trèfles intercalaires (Prob. t < 0,05) et le contraste augmente au stade V6 (Prob. t < 0,001). Ces contrastes témoignent des niveaux importants d'azote fixé dans les parties aériennes des EV l'année précédente, de l'ordre

de 81 à 105 kg N/ha pour les EV de pleine saison, et de 70 à 76 Kg N/ha pour les Trèfles intercalaires (Tableau 11). Sous les trèfles intercalaires, une partie de l'azote présent dans le sol a aussi été immobilisé et exporté par la culture du blé en 2017.

En période de pré-semis, la concentration de nitrates dans le sol est par ailleurs plus élevée sous précédent de vesce velue (T3), de 2,2 mg/kg de N-NO<sub>3</sub> par rapport à la prairie de légumineuses (T2) (Prob.  $t < 0,001$ ). À l'inverse au stade V6 la teneur en nitrate est plus faible de 3,9 mg/kg de N-NO<sub>3</sub> sous vesce velue (Prob.  $t = 0,08$ ). Cette inversion de la disponibilité de l'azote peut être reliée aux quantités de N total et de C total retournées au sol et significativement différentes entre ces deux engrais verts, ainsi qu'à la différence entre les périodes de terminaison de croissance de ces engrais verts. Les quantités de N et C total retournées au sol avec la vesce velue (81 kg N/ha et 1020 kg C/ha) étaient relativement moindres qu'avec la prairie de légumineuses (105 kg N/ha et 1480 kg C/ha) à l'automne 2017 (Tableau 11). Les rapports C/N de ces biomasses n'étaient toutefois pas significativement différents (12,6 et 13,4) quoique apparaissant légèrement plus faible pour la vesce velue. La quantité de carbone fauchée et retournée au sol plus importante sous prairie de légumineuses a pu ralentir la minéralisation des résidus même si les rapports C/N de la biomasse aérienne de ces deux EV de pleine saison n'étaient pas significativement différents. Par ailleurs, la mortalité hivernale de la vesce velue par opposition au regain d'activité de la prairie de légumineuses au moment de l'échantillonnage des sols le 9 mai pourraient expliquer cette présence plus rapide et importante de nitrate dans le sol au printemps sous la vesce velue. Rappelons que le premier travail du sol a eu lieu le 9 mai après l'échantillonnage du sol. La composition biochimique et les composantes racinaires de ces EV (non investiguées ici) en interaction avec l'activité microbienne du sol, offrent aussi des hypothèses à vérifier.

La période d'enfouissement des trèfles intercalaires ne se traduit pas par des différences significatives de nitrates dans le profil (0 à 60 cm de profondeur), à part une légère augmentation non-significative (Prob.  $t = 0,11$ ) de 0,8 mg/kg de N-NO<sub>3</sub> sous enfouissement automnal (T4) par rapport à l'enfouissement printanier (T5).

Les contrastes les plus importants dans les concentrations de nitrates pondérées dans le sol (0-60 cm) sont observés en post-levée (stade V6). Les EV de pleine saison (T2-T3) augmentent significativement (Prob.  $t < 0,001$ ) ces concentrations de nitrates de 7,9 mg/kg par rapport aux traitements Témoin et de 6,0 mg/kg N par rapport aux Trèfles intercalaires (Prob.  $t < 0,001$ ). En fait, au stade V6, la concentration de nitrates pondérée pour la profondeur (0-60 cm) des traitements Trèfles intercalaires (T4-T5) ne se distingue pas des traitements Témoin (T1-T6). Ce n'est qu'en fin de saison que les concentrations de nitrates se distinguent à nouveau entre les traitements Témoin et Trèfles intercalaires. Ces contrastes traduisent une disponibilité relativement tardive du N contenu dans la biomasse des trèfles intercalaires par rapport aux EV de pleine saison. Ici, les rapports C/N contrastés des biomasses laissées au champ l'automne précédent expliqueraient cette dynamique de mobilisation du N. En effet, le rapport C/N des biomasses aériennes des traitements Trèfles intercalaires était significativement plus élevé (22,2) que celles des EV de pleine saison (12,6 à 13,4) en 2017, reflétant la présence de la paille de blé.

En post-récolte (8 novembre), les contrastes dans les concentrations de nitrates dans le sol découlant des effets des EV sont encore significatifs par rapport aux traitements Témoin, mais de plus faible amplitude que ceux



détectés plus tôt, en post-levée. La baisse de concentrations dans les traitements avec EV sans apport de N, par rapport aux stades de croissance précédents, témoigne d'un prélèvement efficace de l'azote des EV de légumineuses par la culture de maïs. Les concentrations de nitrates observées en cette fin de saison (8 novembre) indiquent aussi que les traitements d'EV ont conduit à un stockage de N significativement plus important (EV pleine saison : Prob.  $t < 0,001$ ; Trèfles intercalaires : Prob.  $t < 0,051$ ) que les traitements Témoin, sans apport de N. Les différences, variant entre 1,6 et 2,7 mg/kg de N-NO<sub>3</sub>, demeurent néanmoins marginales et témoignent d'un faible impact environnemental en termes de reliquats de fertilisation post-récolte à la dose 0 N d'*Acti-Sol*.

#### *Le dosage des nitrates dans le sol au stade V6 : l'indicateur de suffisance de fourniture en azote*

Le dosage des nitrates en post-levée de 0 à 30 cm de profondeur dans le sol est un indicateur agronomique de suffisance en azote dont la pertinence a été validée dans le cadre de diverses études en fertilité des sols au Québec, dont celles de N'Dayegamiye et al. (2014) et Michaud et al. (2014). Un seuil de 20 à 25 mg/kg de N-NO<sub>3</sub> est généralement retenu comme indicateur de suffisance en azote. Afin d'évaluer l'atteinte de ce seuil, les échantillons prélevés au stade V6 le 20 juin 2018, à 0-15 et 15-30 cm de profondeur ont été combinés.

Dans un premier temps, l'analyse de variance réservée aux seules données de la période de post-levée (V6) témoigne d'effets significatifs (Prob.  $F < 0,001$ ) des traitements d'EV et des doses d'apports d'azote d'engrais de ferme (Tableau 19). À l'instar de l'ANOVA appliquée aux données de l'ensemble des périodes d'échantillonnage, l'interaction *Traitement x Dose* n'est pas significative, témoignant de la nature cumulative des effets de deux sources d'azote sur le stock de nitrates disponible dans la couche arable du sol. Le Tableau 17 présente aussi les contrastes entre les traitements EV, en moyenne et par niveau d'apport en azote (0, 75 et 150 N). Pour toutes doses de N confondues, le contraste des concentrations de nitrates entre les traitements d'EV de pleine saison (T2-T3) et les Témoins (T1-T6) est significatif (Prob.  $t < 0,001$ ), alors que celui opposant les traitements Trèfles intercalaires (T4 vs T5) l'est moins (Prob.  $t = 0,08$ ).

L'absence de différence entre les concentrations de nitrates mesurées dans les parcelles Témoin et celles sous précédent de trèfles intercalaires surprend, dans la mesure où des augmentations significatives de rendements de maïs ont été observées en réponse aux traitements Trèfles intercalaires (Tableau 13). Cette apparente incohérence entre la réponse significative du rendement de maïs et le caractère non significatif du test de nitrates 0-30 cm au stade V6 tiendrait à une disponibilité décalée dans le temps de l'azote fournie par dans les Trèfles intercalaires. Tel qu'abordé précédemment, les pailles laissées au champ en 2017, résultant en un rapport C/N à la hausse, expliqueraient ce décalage de la disponibilité de l'azote par rapport aux EV de pleine saison. Une implication pratique de ces observations est qu'en présence de résidus de paille, une attention particulière doit être apportée dans l'interprétation de la fourniture du sol par le test de nitrates en post-levée. En bref, le test de nitrates au 20 juin a sous-estimé le potentiel de fourniture du sol en azote dans les parcelles en trèfles intercalaires qui s'est néanmoins manifesté par une réponse significative du rendement de la culture de maïs.

**Tableau 19 : Effets des EV, des doses d'Acti-Sol/ appliquées et de leur interaction sur les teneurs en nitrates de 0 à 30 cm de profondeur dans le sol au stade V6 en post-levée du maïs le 20 juin 2018.**

	Moyenne		0 N		75 N		150 N	
	N-NO3 (mg/kg)	LSD (P<0,05)	N-NO3 (mg/kg)	LSD (P<0,05)	N-NO3 (mg/kg)	LSD (P<0,05)	N-NO3 (mg/kg)	LSD (P<0,05)
<b>EV de légumineuses</b>								
<b>T1 – Témoin</b>	15,5	CD	5,6	J	15,0	EFGHI	26,1	BCD
<b>T2 – Prairie pleine saison</b>	28,3	A	19,7	CDEF	27,6	BC	37,6	A
<b>T3 – Vesce velue pleine saison</b>	22,6	B	13,7	FGHI	22,5	CDE	31,7	AB
<b>T4 – Trèfles intercalaires à l'automne</b>	14,0	CD	6,9	IJ	16,0	EFGH	19,0	DEFG
<b>T5 – Trèfles intercalaires au printemps</b>	18,1	BC	10,3	HIJ	21,4	CDEF	22,6	CDE
<b>T6 – Pois fourrager</b>	12,1	D	7,2	IJ	11,3	GHIJ	17,9	EFGH
<b>Erreur type</b>	2,85		3,73		3,73		3,73	
<b>Valeur de F</b>	13,68							
<b>Probabilité de F</b>	< 0,0001 ***							
<b>Dose d'Acti-Sol</b>								
<b>0 N</b>	10,5	C						
<b>75 N</b>	19,0	B						
<b>150 N</b>	25,8	A						
<b>Erreur type</b>	2,68							
<b>Valeur de F</b>	29,91							
<b>Probabilité de F</b>	< 0,0001 ***							
<b>Interaction (Traitement x Dose)</b>								
<b>Erreur type</b>	3,7258							
<b>Valeur de F</b>	0,78							
<b>Probabilité de F</b>	0,6506							
<b>Contrastes entre traitements EV</b>								
			<b>Prob. de t</b>					
<b>Témoin vs EV pleine saison</b>	< 0,0001 ***		0,0005 ***		< 0,0001 ***		< 0,0001 ***	
<b>Témoin vs Trèfles intercalaires</b>	0,1842		0,4300		0,056 *		0,6779	
<b>EV pleine saison vs Trèfles intercalaires</b>	< 0,0001 ***		0,006 **		0,027 **		< 0,0001 ***	
<b>T2 vs T3</b>	0,0167 **		0,1409		0,2078		0,1423	
<b>T4 vs T5</b>	0,0795 *		0,4088		0,1805		0,3727	

\*\*\* : Prob t. < 0,001; \*\* : Prob t. < 0,05; \* : Prob t. < 0,1

Le contraste T4 vs T5 témoigne par ailleurs d'un avantage de procéder à l'incorporation des trèfles intercalaires au printemps (T5) par rapport à l'enfouissement à l'automne précédent (T4). La différence est en effet significative (Prob. t < 0,10) de l'ordre de 4 mg/kg de N-NO<sub>3</sub>, à l'avantage de l'incorporation printanière (Tableau 19). Les traitements Trèfles intercalaires ont produit des quantités équivalentes de biomasses en date du 12 octobre 2017 avec un ratio C/N similaire. Toutefois, l'incorporation du trèfle au printemps permettrait un léger gain de croissance du trèfle à l'automne et au printemps qui pourrait expliquer ce gradient dans la disponibilité de l'azote au stade V6. À l'opposé, la perte d'azote au cours de la période de dormance pourrait aussi être plus importante

lorsque le trèfle est incorporé à l'automne plutôt qu'au printemps. L'incorporation automnale aurait ainsi favorisé une minéralisation et la nitrification hâtive de l'azote apportée par les trèfles, tandis que le maintien du trèfle vivant favoriserait une accumulation sinon des pertes hivernales moindres. Cette dynamique reflète les flux de nitrates généralement observés en micro-bassin versants au Québec (Michaud et al., 2009; 2012, 2018, 2019) en période hivernale et printanière, qui témoignent des processus de nitrification à l'œuvre durant cette période. L'absence de travail du sol automnal et le maintien en surface d'une couverture vivante de trèfles aurait ainsi favorisé un regain de croissance des trèfles au printemps, de même que ralentit les processus de transformation et d'exportation de l'azote par les voies souterraines sous labour d'automne.

Au stade V6, toutes doses d'*Acti-Sol* confondues, le contraste T2 vs T3 témoigne (Prob.  $t = 0,02$ ) d'une capacité plus rapide ou plus forte de la prairie de légumineuses T2 (28,3 mg/kg de N-NO<sub>3</sub>) à minéraliser de l'azote par rapport à l'EV de vesce velue de pleine saison T3 (22,6 mg/kg de N-NO<sub>3</sub>) (Tableau 22). Sans apport supplémentaire de N (0 N d'*Acti-Sol*) la prairie de légumineuse produit aussi les teneurs les plus élevées (19,7 mg/kg de N-NO<sub>3</sub>) et proches du seuil de suffisance de 20 mg/kg. Ces teneurs ne sont toutefois pas statistiquement différentes (Prob  $t = 0,14$ ) de celles de la vesce velue, qui occupe la deuxième place parmi tous les engrais verts avec une teneur moyenne de 13,7 mg/kg de N-NO<sub>3</sub>, sans contribution de l'engrais de ferme.

#### *Analyse environnementale : effets des traitements EV et doses d'Acti-Sol sur les reliquats automnaux de nitrates dans le sol*

Les nitrates résiduels dans le sol (NRS) observés en post-récolte sont prompts à migrer durant la période de dormance vers les eaux souterraines ou les eaux de surface via les drains agricoles et la résurgence de la nappe peu profonde au cours d'eau. Le seuil environnemental critique de teneur en nitrates de 80 kg N-NO<sub>3</sub>/ha en post-récolte de maïs grain (0-60 cm) proposé par Sarr et al. (2009) est appliqué dans le cadre de la présente étude. Ce seuil correspond à une concentration de 8,89 mg/kg de N-NO<sub>3</sub>, de 0 à 60 cm de profondeur dans le sol, considérant la masse volumique apparente moyenne de 1,50 g/cm<sup>3</sup> du sol à l'étude. Rappelons que le seuil proposé par Sarr et al. (2009) reflète des teneurs annuelles moyennes de nitrates résiduels variant de 18 à 83 kg N/ha, observées à la dose économique optimale de N et dérivées de 31 essais à la ferme. Michaud et al. (2014) ont observé pour leur part des teneurs en nitrates résiduels inférieures à 50 kg N/ha à la dose économique optimale de N dans 59 essais à la ferme réalisés en Montérégie.

Dans l'essai à Saint-Bruno-De-Montarville, les profils de concentrations de nitrates observés en post-récolte (Tableau 20) témoignent des effets cumulés des engrais verts et des apports d'engrais organique. Les effets des doses d'*Acti-Sol* de même que les effets de traitements EV sur les nitrates résiduels du sol (NRS) se sont clairement démarqués. Les contrastes entre les différents traitements EV sont aussi significatifs.

Sans apport de N en provenance de l'*Acti-Sol*, tous les traitements d'EV génèrent des concentrations en nitrates résiduels (NRS) dans le sol (0-60 cm) significativement supérieures au Témoin (Tableau 18). Les concentrations en NRS se situent entre 6,0 et 6,9 mg N-NO<sub>3</sub>/kg sous les EV de pleine saison de prairie de légumineuses (T2) et de vesce velue (T3), respectivement, et entre 5,20 et 5,33 mg N-NO<sub>3</sub>/kg sous les trèfles intercalaires enfoui

respectivement à l'automne (T4) et au printemps (T5). Les teneurs en NRS évoluent pour leur part entre 3,21 et 4,18 mg/kg sous les parcelles témoins T1 et T6. Les concentrations sous traitements d'EV de pleine saison ou de trèfles intercalaires, sans engrais de ferme, ne dépassent donc pas le seuil environnemental de 8,9 mg N-NO<sub>3</sub>/kg proposé par Sarr et al. (2009). Même aux doses économiques optimales d'*Acti-Sol*, soit 36 et 47 kg N/ha respectivement pour les EV de pleine saison et de trèfles intercalaires, le seuil critique ne serait pas dépassé.

**Tableau 20 : Effets des traitements EV et des doses d'*Acti-Sol* (0-75-150 N) sur les teneurs moyennes pondérées en nitrates de 0 à 60 cm de profondeur dans le sol en post-récolte du maïs le 8 novembre 2018.**

Traitement EV	0 N		75 N		150 N	
	N-NO <sub>3</sub> (mg/kg)	LSD (P<0,05)	N-NO <sub>3</sub> (mg/kg)	LSD (P<0,05)	N-NO <sub>3</sub> (mg/kg)	LSD (P<0,05)
<b>T1 – Témoin</b>	3,21	JKLMN	4,08	IJKLM	7,03	HIJK
<b>T2 – Prairie pleine saison</b>	5,96	DEFH	7,52	FGHI	13,73	DEFG
<b>T3 – Vesce velue pleine saison</b>	6,87	DG	9,76	DEF	16,10	DEF
<b>T4 – Trèfles intercalaires à l'automne</b>	5,20	EFGH	7,97	EFGH	8,70	GHI
<b>T5 – Trèfles intercalaires au printemps</b>	5,33	EFGHI	7,56	FGHI	10,74	FGH
<b>T6 – Pois fourrager</b>	4,18	HIJK	5,76	GHIJ	7,23	HIJ
<b>Erreur type</b>	0,66		1,22		1,94	
<b>Valeur de F</b>	3,86		2,56		3,59	
<b>Probabilité de F</b>	<b>0,007</b>		<b>0,048</b>		<b>0,011</b>	
<b>Différences en teneurs</b>	<b>N-NO<sub>3</sub> (mg/kg)</b>					
<b>Témoin vs EV pleine saison</b>	-2,72		-3,72		-7,78	
<b>Témoin vs Trèfles intercalaires</b>	-1,57		-2,85		-2,59	
<b>EV pleine saison vs Trèfles intercalaires</b>	1,15		0,88		5,20	
<b>T2 vs T3</b>	-0,13		0,42		-2,04	
<b>T4 vs T5</b>	-0,91		-2,24		-2,36	
<b>Contrastes entre traitements EV</b>	<b>Prob. de t</b>					
<b>Témoin vs EV pleine saison</b>	<b>&lt; 0,001***</b>		<b>0,005**</b>		<b>&lt; 0,001***</b>	
<b>Témoin vs Trèfles intercalaires</b>	<b>0,023**</b>		<b>0,027**</b>		0,193	
<b>EV pleine saison vs Trèfles intercalaires</b>	<b>0,091*</b>		0,479		<b>0,012**</b>	
<b>T2 vs T3</b>	0,333		0,206		0,464	
<b>T4 vs T5</b>	0,889		0,811		0,397	

Avec un apport d'*Acti-Sol* équivalent à 75 kg/ha de N efficace, les nitrates résiduels dans le sol (NRS) en fin de saison augmentent entre 4,1 et 5,8 mg N-NO<sub>3</sub>/kg dans les parcelles Témoin. Les traitements d'EV les augmentent aussi significativement par rapport au Témoin soit de l'ordre de 2,9 et 3,7 mg N-NO<sub>3</sub>/kg sous les trèfles intercalaires et les EV de pleine saison respectivement. Sous le traitement EV pleine saison de vesce velue (T3) la teneur en NRS atteint 9,8 mg N-NO<sub>3</sub>/kg, dépassant le seuil environnemental de 8,9 tandis qu'elle atteint 7,6 sous les trèfles intercalaires enfouis au printemps (T5).

Avec un apport de 150 N en provenance de l'*Acti-Sol*, les teneurs en NRS augmentent dans les parcelles Témoin, pour atteindre 7,0 et 7,2 mg N-NO<sub>3</sub>/kg. Les traitements d'EV de pleine saison augmentent encore significativement les teneurs en nitrates résiduels (NRS) par rapport au Témoin et même par rapport aux traitements de trèfles intercalaires. Les teneurs en NRS de l'ordre de 16,1 mg N-NO<sub>3</sub>/kg sous la vesce velue (T3) et de 13,8 mg N-NO<sub>3</sub>/kg sous la prairie de légumineuses (non significativement différentes au seuil de 10%) sont préoccupantes sur le plan environnemental, dépassant de presque deux fois le seuil critique de 8,9 mg N-NO<sub>3</sub>/kg. Les teneurs en NRS associés aux trèfles intercalaires sont plutôt de l'ordre de 8,7 (T4 enfoui à l'automne) à 10,8 mg N-NO<sub>3</sub>/kg (T5 enfoui au printemps) et ne sont pas significativement différentes.

Ces observations colligées en fin de saison indiquent donc que les traitements d'EV contribuent de façon significative aux reliquats de N dans le sol. En soi, cette seule contribution des EV aux reliquats de N n'est pas préoccupante sur le plan environnemental. Le cumul des contributions en N des cultures de couverture de légumineuses et des engrais organiques s'avère toutefois préoccupant. Les résultats de la présente étude témoignent en effet de l'atteinte du seuil de risque environnemental (8,9 mg N-NO<sub>3</sub>/kg) sur retour de vesce velue, lorsque l'équivalent de 75 kg/ha de N efficace est apporté avec un engrais organique. Avec un apport de 150 N efficace, tous les traitements EV de pleine saison, de même que les trèfles intercalaires enfouis au printemps, génèrent des reliquats de nitrate dans le sol au-dessus du seuil environnemental. Ces résultats témoignent de l'importance de bien comptabiliser la valeur fertilisante en azote des EV de légumineuses dans la perspective où des engrais organiques sont aussi mis à contribution.

### 4.3.3 Suivi des propriétés du sol

Les propriétés physiques mesurées dans le sol après la récolte du maïs en novembre 2018 ont été influencées par les différents traitements d'EV et quelque peu par la profondeur d'échantillonnage, mais aucune interaction entre les traitements et la profondeur n'est significative (Tableau 21). Seule la teneur en eau mesurée sur table de tension à 10 kPa n'apparaît pas influencée par les traitements ou la profondeur d'échantillonnage.

Les traitements Trèfles intercalaires (T4- T5) ont amélioré de façon significative la masse volumique apparente (MVA), la teneur en eau au champ et la porosité totale du sol par rapport au Témoin (T1-T6), cet effet étant principalement localisé à 30-60 cm de profondeur dans le sol (Tableau 22). La MVA était en moyenne de 1,47 g/cm<sup>3</sup> à 30-60 cm de profondeur dans les Trèfles intercalaires, alors qu'elle était de 1,51 g/cm<sup>3</sup> dans le Témoin (voir Tableau 25 en Annexe). À l'inverse, la porosité totale mesurée à saturation en laboratoire était plus élevée (0,46 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) dans les Trèfles intercalaires, alors qu'elle était de 0,44 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> dans le Témoin. Les EV de pleine saison (T2-T3) n'ont pas eu d'effet marqué sur les propriétés physiques des sols par rapport aux traitements Témoin ou Trèfles intercalaires.

**Tableau 21 : Effets des traitements d'EV sur les propriétés physiques des sols mesurés à deux profondeurs (0-30 et 30-60 cm) dans le sol à la fin de l'étude (nov. 2018).**

	MVA <sup>†</sup>	Teneur en eau au champ	Porosité totale	Teneur en eau à 10 kPa	Conductivité hydraulique saturée
Traitement EV	g/cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	cm/min
T1 – Témoin	1,51	25,66	0,45	0,387	0,047
T2 – Prairie pleine saison	1,47	26,58	0,46	0,394	0,027
T3 – Vesce velue pleine saison	1,52	24,63	0,44	0,377	0,012
T4 – Trèfles intercalaires à l'automne	1,49	26,19	0,45	0,387	0,022
T5 – Trèfles intercalaires au printemps	1,44	27,13	0,47	0,392	0,218
T6 – Pois fourrager	1,51	25,17	0,44	0,382	0,045
Erreur type	0,024	0,823	0,008	0,010	
Valeur de F	2,25	2,00	2,79	0,61	2,40
Probabilité de F	<b>0,075 *</b>	0,113	<b>0,035 **</b>	0,695	<b>0,061 *</b>
Profondeur					
0 - 30 cm	1,48	26,31	0,45	0,388	0,051
30 - 60 cm	1,50	25,48	0,45	0,385	0,074
Erreur type	0,024	0,826	0,008	0,010	
Valeur de F	3,78	2,96	1,05	0,34	1,76
Probabilité de F	<b>0,061 *</b>	<b>0,096 *</b>	0,314	0,563	0,195
Prof. x Trait.					
Erreur type	0,026	0,898	0,009	0,010	
Valeur de F	0,26	0,37	0,17	0,81	0,28
Probabilité de F	0,933	0,8623	0,972	0,551	0,919

<sup>†</sup> Masse volumique apparente.

\*\*\* : Prob F. < 0,001; \*\* : Prob F. < 0,05; \* : Prob F. < 0,1

La période d'enfouissement des Trèfles intercalaires semble avoir influencé les propriétés physiques du sol. Ainsi, l'enfouissement au printemps diminuerait de manière significative la masse volumique apparente (1,44 vs 1,49 g/cm<sup>3</sup>) en moyenne dans le profil et augmenterait significativement la conductivité hydraulique saturée du sol (0,218 vs 0,022 cm/min) par rapport à l'enfouissement à l'automne. La porosité totale a aussi tendance à augmenter (0,47 vs 0,44 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) avec l'enfouissement printanier. Ces effets seraient par ailleurs plus marqués de 0 à 30 cm de profondeur. L'EV de vesce velue (T3) a eu un effet négatif sur les propriétés physiques du sol, conduisant à des baisses significatives de la porosité totale (0,44 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) dans l'ensemble du profil par rapport à l'autre EV de pleine saison (0,46 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>), la prairie de légumineuses (T2).

**Tableau 22 : Comparaison entre les traitements Témoin (T1-T6), EV de pleine saison (T2-T3) et Trèfles intercalaires (T4-T5) sur les propriétés physiques du sols mesurées à deux profondeurs.**

Contrastes	MVA <sup>†</sup>	Teneur en eau au champ	Porosité totale	Teneur en eau à 10 kPa	Conductivité hydraulique saturée
<b>Moyenne (0-60 cm)</b>					
Témoin vs EV pleine saison	0,3573	0,7721	0,3593	0,8800	0,6373
Témoin vs Trèfles intercalaires	<b>0,0240 **</b>	<b>0,0677 *</b>	<b>0,0239 **</b>	0,5472	0,2071
EV pleine saison vs Trèfles intercalaires	0,1594	0,1185	0,1581	0,6512	<b>0,0858 *</b>
T2 vs T3	0,1180	<b>0,0445 **</b>	<b>0,0280 **</b>	0,1380	0,4476
T4 vs T5	0,1003	0,3188	0,1021	0,7076	<b>0,0116 **</b>
<b>0-30 cm</b>					
Témoin vs EV pleine saison	0,6755	0,7429	0,8338	0,7279	0,8635
Témoin vs Trèfles intercalaires	0,1112	0,5743	0,2110	0,6228	0,2441
EV pleine saison vs Trèfles intercalaires	0,2361	0,3748	0,2963	0,8852	0,1727
T2 vs T3	0,1898	<b>0,0716 *</b>	0,1037	0,1379	0,3191
T4 vs T5	<b>0,0596 *</b>	0,4669	0,1723	0,7917	<b>0,0205 **</b>
<b>30-60 cm</b>					
Témoin vs EV pleine saison	0,2901	0,4488	0,2397	0,5529	0,5618
Témoin vs Trèfles intercalaires	<b>0,0344 **</b>	<b>0,0279 **</b>	<b>0,0245 **</b>	0,1440	0,3976
EV pleine saison vs Trèfles intercalaires	0,2758	0,1401	0,2669	0,3791	0,1604
T2 vs T3	0,2217	0,2018	<b>0,0746 *</b>	0,3330	0,8328
T4 vs T5	0,4398	0,4431	0,2542	0,3825	<b>0,0685 *</b>

<sup>†</sup> Masse volumique apparente.

\*\*\* : Prob t. < 0,001; \*\* : Prob t. < 0,05; \* : Prob t. < 0,1

Le traitement Trèfles intercalaires enfoui à l'automne (T4) est le seul traitement à avoir reçu un travail de sol à l'automne 2017. L'enfouissement des Trèfles intercalaires au printemps semble non seulement améliorer la condition physique du sol par rapport à un enfouissement à l'automne, mais aussi par rapport au sol témoin qui a aussi bénéficié d'un travail seulement au printemps. L'enfouissement du chaume de trèfle ainsi que de la paille



résiduelle au printemps apportant à la fois du carbone et de l'azote dans un ratio C/N de 22 semble donc bénéfique pour le sol (Tableau 11). À l'inverse, l'enfouissement au printemps d'un engrais vert de vesce velue (T3) apportant très peu de carbone par rapport à la quantité d'azote retournée au sol dans une biomasse aérienne, avec un plus faible rapport C/N de 12,6 semble avoir détérioré la condition physique du sol. Ce qui semble un résultat surprenant par rapport à ce que d'autres ont observé avec la vesce velue sur la stabilité des agrégats, par exemple (N'Dayegamiye et al., 2017). Toutefois, la prairie de légumineuses dont la biomasse aérienne retournée au sol avait un C/N de 13,4, sans différence significative avec celui de la vesce velue, a eu effet bénéfique sur la porosité totale du sol. La quantité de carbone retournée au sol avec la vesce velue était toutefois plus faible (1017 kg/ha) par rapport à la prairie de légumineuses (1479 kg/ha) ou les Trèfles intercalaires enfouis à l'automne (1501 kg/ha) ou au printemps (1671 kg/ha). Ces effets sont marginaux, mais il est intéressant de souligner de tels effets des EV sur les propriétés physiques du sol en lien avec le type et la quantité de matériel retourné au sol, ainsi que sa période d'enfouissement.

## 4.4 SUIVI DES HAUTEURS DE NAPPE ET FLUX DE NITRATES AU DRAIN

### 4.4.1 Suivis des hauteurs de nappe

Afin de générer des conditions contrastées d'humidité des sols dans les deux champs à l'étude, la trappe de la chambre de contrôle du drainage souterrain du champ A200 a été fermée avant le semis de maïs. Le drainage libre a été maintenu dans le champ adjacent (A300). Les Figure 12 et Figure 13 illustrent les séries chronologiques journalières des précipitations, des hauteurs de nappes (moyennes des six puits par champ) et des débits aux collecteurs des champs A200 et A300 pour l'année 2018 (1<sup>er</sup> janvier au 15 novembre).

Pour toute la période hivernale et printanière hâtive, les mouvements des nappes et les débits aux collecteurs des drains des deux champs sont synchrones. A quatre reprises, les nappes remontent à la surface, témoignant de saturations complètes des sols et vraisemblablement d'émission de ruissellement de surface (non mesuré).

Suivant le blocage de la trappe du collecteur au champ A200 le 5 mai 2018, la profondeur des nappes se stabilisent aux profondeurs respectives de 1,31 m et 1.54 m, respectivement, pour les champs A200 et A300. Compte tenu des faibles précipitations en période estivale, aucune remontée significative des nappes vers la couche arable n'est observée. La plus importante fluctuation en saison de croissance est notée en réponse de la précipitation de 40.7 mm le 6 juin 2018, mais les nappes demeurent à plus d'un mètre de profondeur. Les débits au drain sont marginaux en saison de croissance, alors que les nappes demeurent généralement sous les drains. De faibles débits, n'excédant pas 4 mm par jour sont détectés, témoignent vraisemblablement de contributions de l'infiltration de l'eau depuis la couche arable. Les faibles débits détectés au collecteur du champ A200 indiquent que la trappe du collecteur n'était pas parfaitement étanche, une défectuosité fréquemment rapportée au Québec pour ce type de chambre de contrôle (OASIS).

En clair, les conditions sèches de la saison de croissance 2018 n'ont pas permis de générer des conditions contrastées dans les régimes hydriques des deux champs à l'étude. Les profondeurs des nappes observées indiquent que les conditions hydriques des deux champs sont demeurées à toutes fins pratiques semblables, et sans effet anticipé sur le développement des cultures ou la mobilisation de l'azote du sol. Ces observations motivent le pool des données de suivis des cultures et des propriétés du sol des champs A200 et A300 dans l'analyse des effets des systèmes de culture et des apports de N dans le cadre de la présente étude.

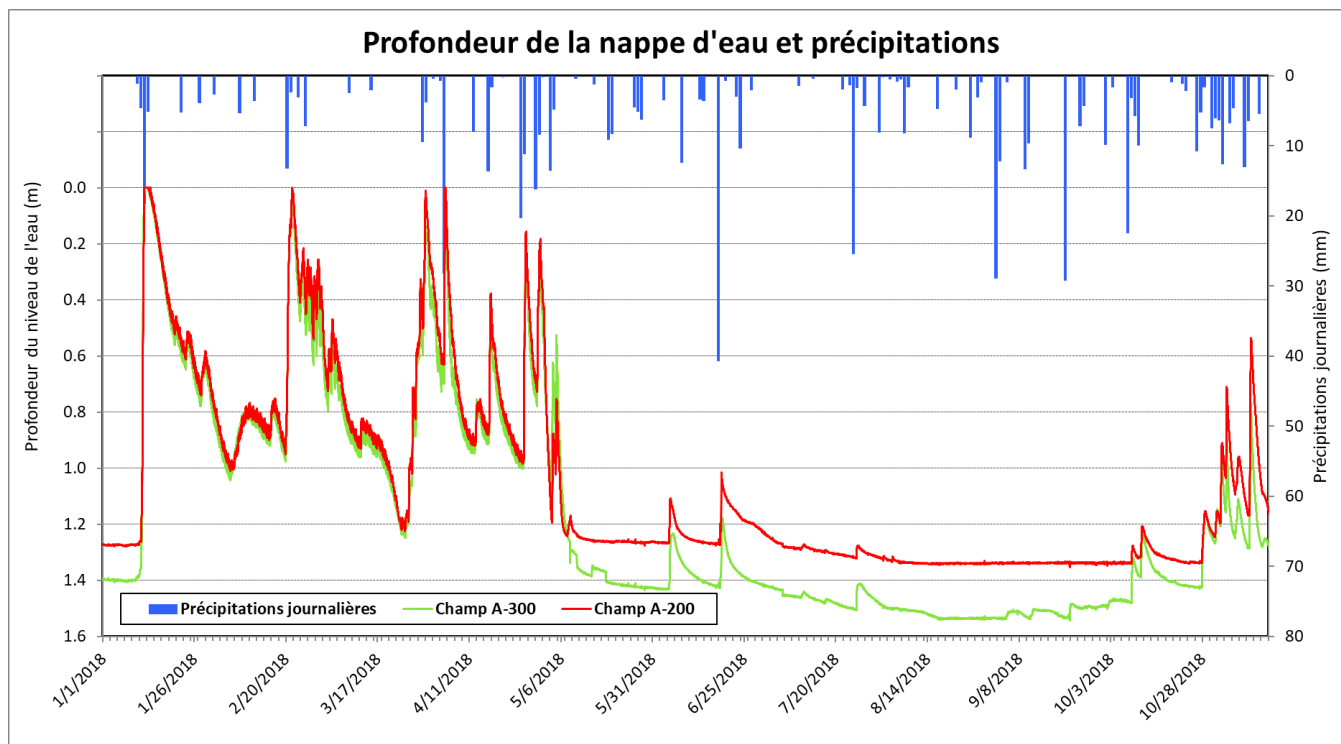


Figure 12 : Séries chronologiques journalières des précipitations et des hauteurs des nappes des champs contrôlé (A200) et non contrôlé (A300) pour l'année 2018 (N= 12 puits d'observation).

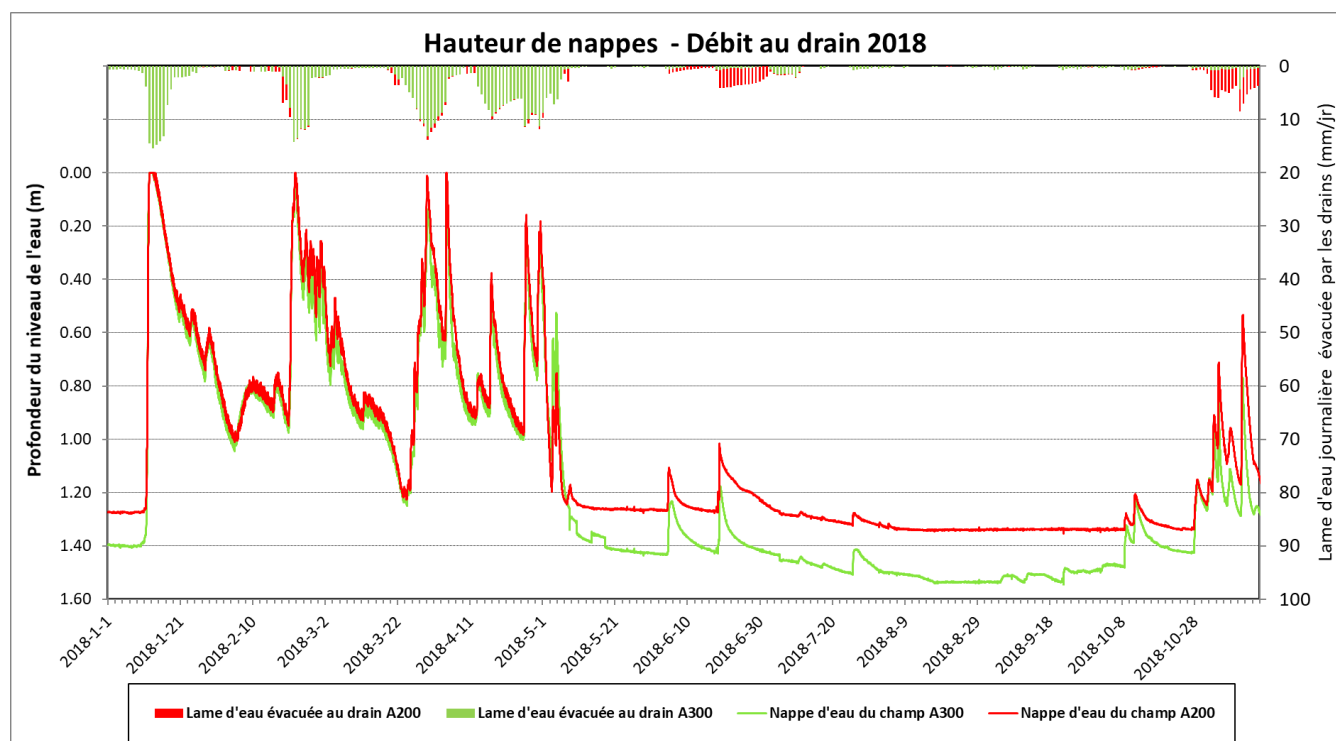


Figure 13 : Séries chronologiques journalières des débits aux collecteurs des drains et des hauteurs des nappes des champs contrôlé (A200) et non contrôlé (A300) pour l'année 2018 (N= 12 puits d'observation).

#### 4.4.2 Suivi des flux de nitrates aux collecteurs de drains

L'objectif principal du suivi des nitrates au collecteur des drains souterrains était de documenter la dynamique de la mobilisation des nitrates dans le profil de sols au cours de l'année 2018 et d'en estimer les pertes au drain. Le suivi des flux de nitrates au drain a impliqué la mesure des débits en continu aux trois points de mesure au cours de l'année 2018, de même que deux protocoles distincts de mesure de concentrations de nitrates observées au drain. Des campagnes de prélèvements d'échantillons d'eau ont été réalisées manuellement à six reprises dans trois collecteurs (champs A200, A300 et A400). En période de post-récolte, un échantillonnage automatique sur le collecteur du champ A300 (drainage libre) a également permis un suivi plus serré de l'évolution des concentrations de nitrates dans le temps et de générer une estimation plus précise des flux de nitrates.

La Figure 14 illustre la distribution dans le temps des concentrations de nitrates observées aux trois sites instrumentés et l'ensemble des échantillons issus des prélèvements manuels (A200 et A400) et automatiques (A300) en fonction de la date et du débit instantané mesuré à chaque collecteur de drains correspondant. Les valeurs observées sont rapportées en annexe au rapport. Dans l'ensemble, retenons que les concentrations en nitrates et les débits au drain ne sont pas corrélés. Les concentrations en nitrates reflètent plutôt une distribution temporelle déterminée par les dynamiques de minéralisation et de prélèvement qui se superposent au fil de la saison de croissance. Cette évolution dans le temps des concentrations observées au drain reflète par ailleurs les contrastes dans les concentrations de nitrates mesurées dans le sol à cinq périodes d'échantillonnage (voir la Section 4.3.2 de ce rapport).

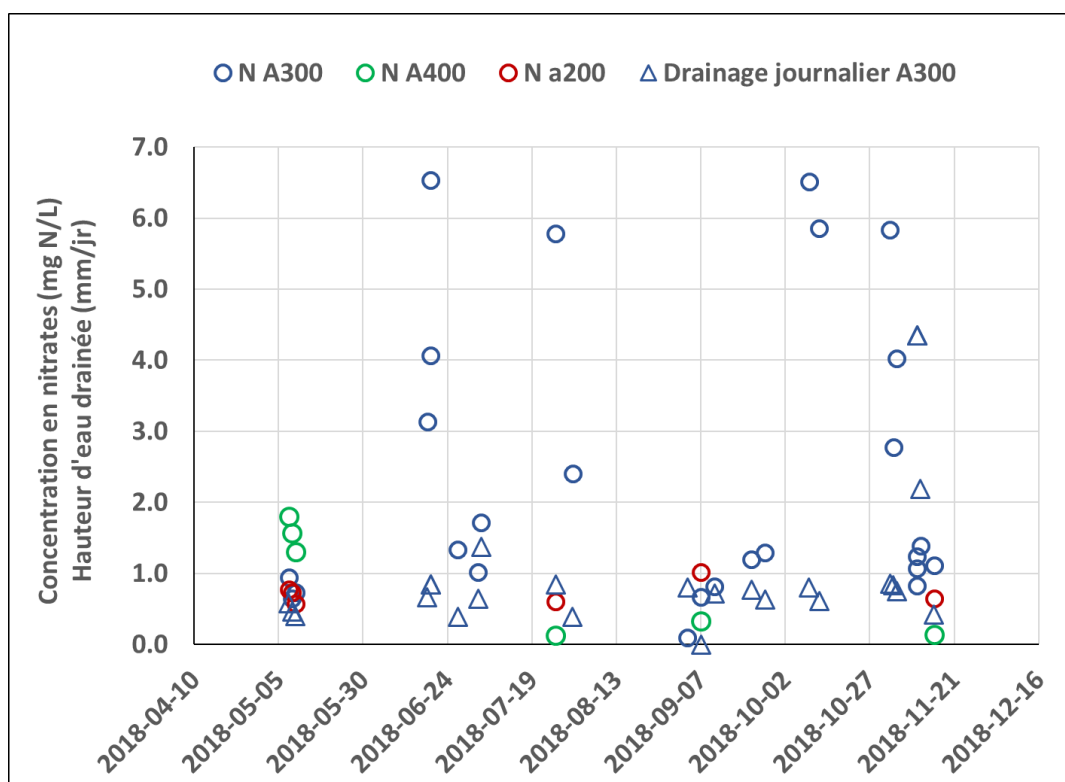
Rappelons que les concentrations de nitrates observées dans l'eau au collecteur des drains du champ A400 témoignent de la présence d'une prairie qui n'a pas reçu d'engrais en 2018. Les concentrations de nitrates y demeurent relativement faibles, sous la barre du 2 mg N/L tout au cours de la période de suivi.

Les concentrations de nitrates au site du champ A300 sous drainage libre reflètent pour leur part les effets de la culture annuelle, des engrais verts de légumineuses et principalement de la fertilisation azotée (*Acti-Sol*) sur le dispositif expérimental. Compte tenu des traitements appliqués (0, 75, 150N; 50 N en bordure du dispositif), le taux moyen d'apport de N sur les parcelles expérimentales est d'environ 70 kg/ha d'azote efficace. Dans l'ensemble, deux périodes de montées des concentrations en nitrates sont observées, reflétant l'évolution des concentrations observées dans les profils de sols (Figure 11) :

- En début de mai, en pré-semis, les concentrations de nitrates dans l'eau de drainage sont inférieures à 1 mg/L de N-NO<sub>3</sub>. Ces faibles concentrations résultent probablement d'une part importante de lessivage qui a eu cours à la fonte des neiges en mars et avril et à un faible taux de minéralisation de l'azote organique du sol sous des températures encore fraîches en début de mai.
- Après l'apport de N et le réchauffement du sol, des pics de concentration de nitrates sont observés à partir de la fin juin, voisinant les 6 à 7 mg /L de N-NO<sub>3</sub>. Ces concentrations relativement élevées témoignent de la mise en disponibilité de l'azote de l'engrais et de la minéralisation de l'azote des engrais

verts de légumineuses en dans une moindre mesure celui de la matière organique du sol (Figure 14), précèdent le pic de prélèvement de l'azote par la culture de maïs.

- En début de septembre, les concentrations observées reviennent sous la barre du 1,0 mg N/L, témoignant des prélèvements de la culture de maïs et d'un écoulement marginal de l'eau du sol vers les drains.
- À partir de la mi-octobre, une seconde vague de pics de concentrations de nitrates est observée, reflétant l'entraînement de reliquats de la fertilisation azotée vers les drains.
- À partir du 10 novembre, malgré la reprise bien sentie des écoulements au drain, les concentrations observées en nitrates sont redescendues au niveau de 1,25 mg N/L, indiquant un certain épuisement du stock de nitrates disponibles à l'entraînement vers les drains.



**Figure 14 : Évolution durant la saison de culture de 2018, des concentrations de nitrates dans l'eau observées aux collecteurs des champs sous dispositifs expérimentaux A200 et A300 et du champ Témoin en prairie A400. La hauteur d'eau journalière exportée du champ A300 (sous drainage libre) au moment des échantillonnages (manuels et automatiques) est également rapportée.**

La Figure 15 illustre pour sa part la série journalière de flux de nitrates en période de recharge (du 27 octobre au 15 novembre 2018) estimée pour le champ A300. En réponse aux précipitations cumulées de 87 mm au cours de la période, une lame d'eau de 16 mm est exportée au drain, entraînant une charge estimée de 0,5 kg N-NO<sub>3</sub>/ha. Comparativement aux charges habituellement mesurées, la charge de nitrates exportée durant cette période

n'est pas préoccupante sur le plan environnemental. Toutefois, compte tenu des teneurs en nitrates mesurés dans le sol au 15 novembre 2018 dans les parcelles expérimentales (Figure 11), des exportations additionnelles sont attendues au cours de la période de recharge hydraulique hivernale et printanière à venir. A titre d'exemple, pour le traitement Trèfles intercalaires enfoui au printemps et fertilisé à l'*Acti-Sol* avec 75 kg/ha de N efficace, la concentration moyenne pondérée pour la profondeur (0-60 cm) établie à 7,6 mg N/kg se traduit en un stock de 67 kg N/ha de nitrates. Une proportion indéterminée de ce stock de nitrates sera entraînée et exportée au cours de la période de recharge hivernale et printanière, sous l'influence d'une lame d'eau drainée de l'ordre de 200 mm. Si l'interruption du suivi hydrométrique en fin de projet ne permet pas de déterminer les flux totaux exportés, le stock de N disponible dans le sol à l'exportation est néanmoins significatif. L'introduction d'une culture intercalaire comme le raygrass ou le seigle dans le maïs prend ici tout son importance afin de prélever les nitrates résiduels du sol, au bénéfice de la culture de la prochaine saison et de la qualité de l'eau.

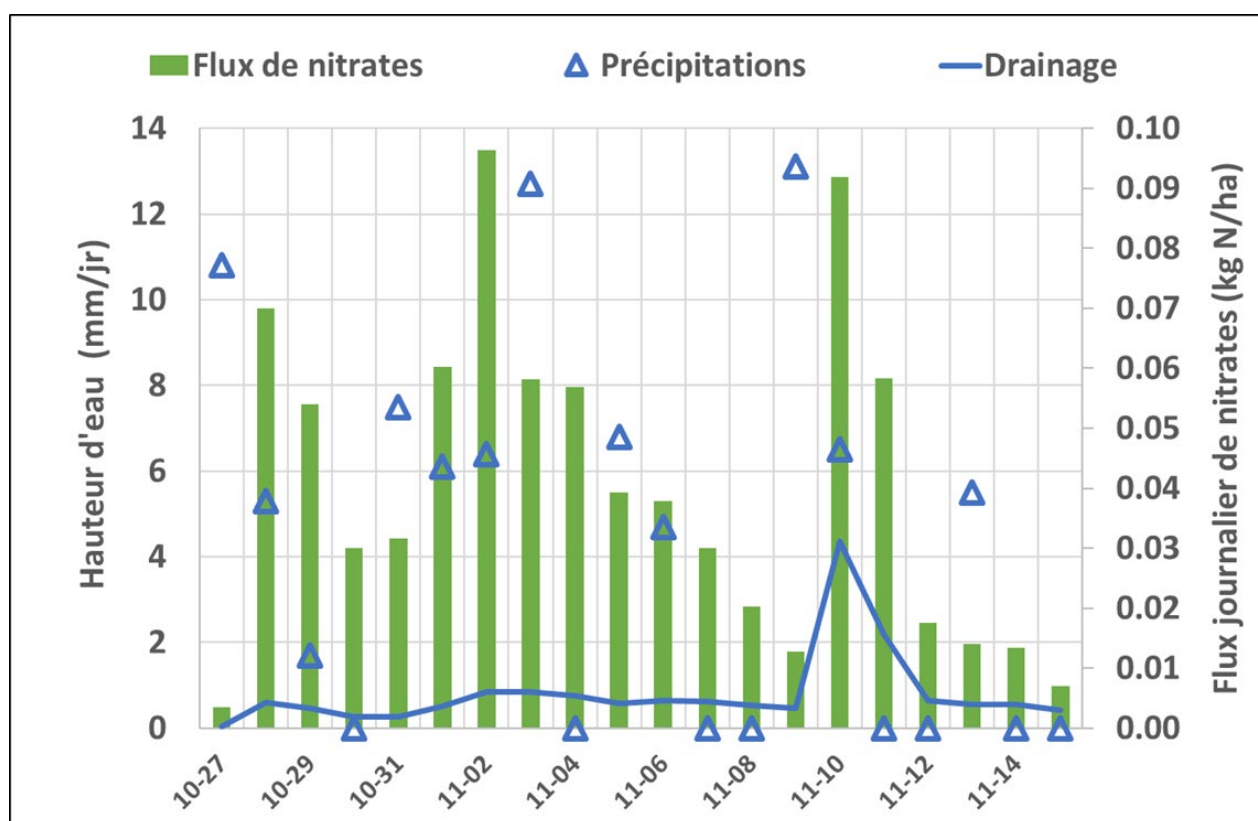


Figure 15 : Flux journaliers de nitrates (estimés) sous le champ A300 en période de recharge à l'automne 2018.

## 4.5 ANALYSE ÉCONOMIQUE

L'objectif principal du volet économique de la présente étude était d'évaluer la rentabilité économique de l'implantation des EV de pleine saison et intercalaires utilisés comme sources de fertilisation azotée du maïs grain. L'analyse de rentabilité a comparé les scénarios de culture intégrant les EV (Pleine saison et Intercalaire) au scénario sans EV (Témoin) suivant une approche de budgétisation partielle, considérant les éléments d'amélioration et de détérioration de la rentabilité.

Les paramètres considérés dans l'amélioration de la rentabilité des systèmes avec EV incluent les gains de rendement et de revenus associés aux systèmes de culture avec EV, de même que les coûts de fertilisation en moins. Les paramètres liés à la détérioration de la rentabilité incluent l'abandon des revenus de vente de la culture de blé en 2017 pour le système d'EV de pleine saison, de même que les coûts d'implantation des EV dans les systèmes de pleine saison et intercalaires.

Pour chaque système avec EV et le témoin, les doses d'engrais azotés ont été optimisées en utilisant les courbes de réponses du maïs générées dans le projet, le coût des engrais et le prix du marché pour le grain de maïs biologique. En complément de l'analyse économique basée sur le recours à l'*Acti-Sol* comme source d'azote, un lisier de porc et un lisier de porc séparé ont également été considérés, à titre indicatif, afin de projeter les implications économiques et environnementales de sources d'azote à faible coût.

En parallèle à l'optimisation de la dose d'engrais azoté, l'évolution prévisible de la richesse du sol en phosphore a également été estimée. Rappelons ici une des principales motivations du projet, soit d'assurer la fertilisation azotée du maïs grain, sans contribuer à l'enrichissement du sol en phosphore résultant d'apports répétés d'engrais de ferme.

### Détérioration du revenu

L'abandon de la culture de blé dans les scénarios d'EVs de pleine saison est associée à une perte de revenus de l'ordre de \$280/ha, soit la marge nette obtenue en production de blé biologique destiné à l'alimentation humaine CRAAQ (2017). Les coûts d'implantation des EV de trèfles intercalaires, d'une culture intercalaire de luzerne dans le maïs pour planter la prairie de légumineuses et de la vesce velue en pleine saison sont estimés respectivement à 81\$, \$203 et \$257 par hectare suivant les références du CRAAQ (2016). Le Tableau 23 rapporte la majoration des coûts associés aux différents systèmes avec EV par rapport au système Témoin (sans EV). Pour le système avec trèfles intercalaires, l'augmentation se limite au coût des semences de trèfles rouge et Huia. Les systèmes avec EV de pleine saison cumulent pour leur part la perte de revenus associée au blé de printemps (marge nette) qui n'a pas été produit en 2017, auxquels s'ajoutent les coûts d'implantation de EV pleine saison, pour des coûts totaux de \$483 et \$537, respectivement pour la prairie de légumineuses et l'EV de vesce velue.

**Tableau 23 : Majoration des coûts associés aux systèmes avec engrais verts de légumineuses par rapport au système Témoin (sans EV).**

Système de culture	Témoin sans engrais verts	Trèfles intercalaires	Prairie de légumineuses	Vesce velue pleine saison
<b>Perte de revenus du blé d'automne biologique (marge nette, \$/ha)<sup>1</sup></b>	-	-	280	280
<b>Coûts d'implantation des EV (\$/ha)<sup>2</sup></b>				
<b>Semences et semis</b>		81	203	257
<b>Total des coûts liés aux systèmes EV</b>	0	81	483	537

1 CRAAQ, 2017.

2 CRAAQ, 2016.

### Analyse de rentabilité

Le Tableau 24 résume l'effet des systèmes EV sur le profit brut projeté pour la culture de maïs grain biologique en 2018. Le profit brut est ici exprimé par le revenu brut du maïs grain (produit du rendement et du prix du grain), duquel est déduit le coût de la fertilisation (produit de la dose et du coût de l'azote disponible de l'engrais organique), auquel s'ajoutent les coûts d'abandon de culture du blé et d'implantation des EV.

Trois scénarios ont été considérés pour déterminer la dose d'engrais supplémentaire à appliquer dans l'analyse économique de la rentabilité des systèmes EV de pleine saison, EV Trèfles intercalaires et sans EV. Les trois scénarios mettent à profit les courbes de réponses du maïs à l'azote générées dans le cadre du projet, pour un prix du grain de maïs biologique établi à 511 \$/tm (PGQ, 2019) :

- **Le scénario de dose maximale d'apport de N**, résultant en rendement maximal de la culture de maïs, sans égard au coût de la fertilisation ou d'un excès de phosphore;
- **Le scénario de dose économique optimale d'apport de N** optimise la marge brute en fonction du coût de l'engrais azoté;
- **Le scénario de dose de N au seuil environnemental d'enrichissement du sol en P** limite l'apport de l'azote de façon à ne pas contribuer à l'augmentation du niveau de P assimilable. Un bilan de 15 kg P/ha (33 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) (Apports – Exportations) a ici été retenu comme balise environnementale. Sur la base d'observations colligées au Québec, Giroux et al. (2002) a démontré qu'un tel bilan de P supérieur à 15 kg P/ha enrichit les sols, sans égard à leur teneur initiale en P. Rappelons que l'Ordre des agronomes du Québec a établi un apport annuel maximal de 45 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha sur les sols dont l'indice de saturation en phosphore (P/Al) M-3 est égal ou supérieur à 7,6 % pour un sol ayant une teneur en argile égale ou supérieure à 30 %; ou supérieur à 13,1 % pour un sol ayant une teneur en argile égale ou inférieure à 30 % (OAQ, 2011).



Trois sources de fertilisation azotée ont également été considérées dans l'analyse, soit les granules de fientes de poules pondeuses (*Acti-Sol*) utilisés dans le cadre des essais au champ, et deux lisiers de porc, de façon à projeter les implications économiques de sources alternatives d'engrais azotés utilisées en régie biologique. Les propriétés de ces engrais organiques se présentent comme suit :

- L'*Acti-Sol*, au coût de 12,55 \$/kg N, a une efficacité globale de l'azote estimée à 80 %, résultant en un ratio  $N_{\text{efficace}}/P_2O_5$  de 1,27. Cet engrais organique a été utilisé dans la détermination expérimentale des courbes de réponses du maïs à l'azote dans le cadre de la présente étude.
- Les propriétés d'un **lisier de porc en croissance** avec trémies abreuvoirs a été substitué à l'*Acti-Sol* dans l'analyse de rentabilité. Pour les fins de l'exercice, un coût nul de cet engrais a été considéré. Suivant les caractérisations rapportées par Seydoux et al., (2006), des teneurs de 4,5 kg N/T et de 2,3 kg  $P_2O_5$ /T ont été retenues, de même qu'un coefficient d'efficacité globale de l'azote de 60%, résultant en un ratio  $N_{\text{efficace}}/P_2O_5$  de 1,17.
- La **fraction liquide d'un lisier de porc**, suivant un processus de séparation de phases solide-liquide par grappe en « V » sous les lattes au bâtiment a également été considérée. Ce scénario permet de projeter la rentabilité d'un engrais azoté à promouvoir en régie biologique, car il serait sans contrainte environnementale sur le plan de l'enrichissement du sol en phosphore. Suivant les observations colligées par Godbout et al.(2006), l'efficacité de séparation du phosphore dans la phase solide du lisier atteint 91%, pour une teneur finale de 4,9 kg N/tm et de 0,58 kg  $P_2O_5$ /tm. Le ratio  $N_{\text{efficace}}/P_2O_5$  est ainsi établi à 5.0, considérant une efficacité globale de l'azote à 60 %.

Le Tableau 24 résume l'analyse de la rentabilité des systèmes d'EV de pleine saison (scénario d'une prairie avec un mélange de légumineuses), d'EV de trèfles intercalaires et Témoin (sans EV) pour les trois scénarios de fertilisation azotée (maximale, optimale, environnementale) et les trois sources d'azote (*Acti-Sol*, lisier de porc, phase liquide de lisier de porc).

**Tableau 24 : Analyse de la rentabilité des systèmes de culture d'engrais verts de pleine saison et intercalaire comparés au système cultural sans engrais verts en fonction de trois sources d'engrais azoté utilisables en régie biologique et trois scénarios de fertilisation (Dose de N maximale, économiquement optimale et environnementale).**

Source d'azote		Acti-Sol			Lisier de porc			Lisier de porc, phase liquide <sup>1</sup>		
		12,5\$/kg N Ratio N efficace/P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> = 1,27			0\$/kg N Ratio N efficace/P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> = 1,17)			0\$/kg N N efficace/P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> = 11,4		
Système de culture		Témoin	EV Intercalaire	EV Pleine saison	Témoin	EV Intercalaire	EV Pleine saison	Témoin	EV Intercalaire	EV Pleine saison
<b>Dose N maximale</b>	kg N/ha	150	148*	144*	150	148*	144*	150	148*	144*
Rendement maximal	tm/ha	6.5	7.8	8.6	6.5	7.8	8.6	6.5	7.8	8.6
Profit brut <sup>2</sup>	\$/ha	1 451 \$	2 057 \$	2 088 \$	3 326 \$	3 908 \$	3 891 \$	3 326 \$	3 908 \$	3 891 \$
Prélèvement P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg)	kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	48	57	62	48	57	62	48	57	62
Apport de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg)	kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	118	116	113	128	127	123	30	30	29
Bilan en P (Apports-Prélèvements) <sup>3</sup>	kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	70	59	51	81	70	61	-18	-27	-34
<b>Dose N économique optimale</b>	kg N/ha	150	47	36	<i>Dose équivalente à la dose N maximale. Seuil d'enrichissement en P dépassé.</i>			<i>Dose équivalente à la dose N maximale. Seuil d'enrichissement en P respecté.</i>		
Rendement optimal	tm/ha	6.5	6.6	7.2						
Profit brut <sup>2</sup>	\$/ha	1 451 \$	2 687 \$	2 767 \$						
Prélèvement P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg)	kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	48	48	53						
Apport de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg)	kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	118	37	28						
Bilan en P (Apports-Prélèvements) <sup>3</sup>	kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	70	-11	-25						
<b>Dose N au seuil d'enrichissement en P</b>	kg N/ha	85	113	121*	76	103	111*	<i>Dose équivalente à la dose N maximale. Seuil d'enrichissement en P respecté.</i>		
Rendement optimal	tm/ha	4.7	Détérioration du profit.		4.4	7.6	8.4			
Profit brut <sup>2</sup>	\$/ha	1 334 \$			2 268 \$	3 782 \$	3 827 \$			
Prélèvement P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg)	kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	34			32	55	62			
Apport de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg)	kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	67			65	88	95			
Bilan en P (Apports-Prélèvements) <sup>3</sup>	kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	33			33	33	33			

1: Phase liquide du lisier séparée au bâtiment par une gratte en "V" (Godbout et al., 2006).

2: Profit brut= (rendement) x (prix du maïs) - (Dose de N) \* (Coût de N) auquel s'ajoutent les coûts de 483\$/ha pour la luzerne pleine saison (abandon de culture et coût des EV), ou 81\$/ha pour le trèfle intercalaire (coût des EV). Coût de l'Acti-Sol: 12,50\$/kg, nul pour les lisiers de porc non séparé et séparé (à titre indicatif).

3: Un bilan en P (Apports-Prélèvements) supérieur à 15 kg P/ha (33 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) contribue à l'enrichissement du sol (Giroux et al., 2002).

**Dose de N respectant le seuil d'enrichissement du sol en P.**

**Dose de N supérieure au seuil d'enrichissement du sol en P.**

\*Dose d'azote (EV + Engrais de ferme) générant un taux de nitrates résiduels du sol (post-récolte) au-dessus du seuil environnemental de 80 kg N/ha pour la couche de sol 0-60 cm (Sarr et al., 2009).

### **Scénario de dose de N maximale**

Le système EV de pleine saison se démarque significativement à la hausse en ce qui a trait aux rendements maximaux observés résultants de l'expérimentation au champ (8,56 tm/ha), tel que rapporté antérieurement à la section 4.3.1. L'augmentation considérable du rendement sous EV de pleine saison, par rapport au système Témoin sans EV (6,51 tm/ha), fait en sorte l'EV pleine saison génère un profit brut plus important que le système sans EV, malgré les coûts associés à l'abandon de la culture de blé, quel que soit la source d'azote (Tableau 24). Le système EV de trèfles intercalaires génère un profit brut comparable à l'EV de pleine saison, en raison des coûts de production moins élevés (sans abandon de la culture de blé et coûts d'implantation des EV de trèfles moins élevés) pour des rendements légèrement plus faibles.

Le taux d'apport de 150 N (efficace) résultant des applications de l'*Acti-Sol* ou du lisier de porc génère cependant des taux d'apports en phosphore qui résultent en bilans du phosphore P (Apports – Prélèvements) excèdent le seuil critique de 15 kg P/ha (33 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) proposé par Giroux et al. (2002). Le recours au lisier de porc séparé permet pour sa part de réduire considérablement l'apport de P, à un taux (30 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) favorisant la réduction de la richesse du sol en P du sol.

### **Scénario de dose économique optimale de N**

De façon générale, le recours à la dose optimale d'azote augmente considérablement la rentabilité des systèmes EV fertilisés avec l'*Acti-Sol*. Suivant l'analyse des courbes de réponses des rendements du maïs grain à la fertilisation azotée en 2018 commentées précédemment (section 4.3.1), les doses optimales d'azote de l'*Acti-Sol* pour les systèmes EV de pleine saison et les Trèfles intercalaires sont estimées respectivement à 36 et 47 kg N/ha. Pour les parcelles Témoin sans EV, la dose optimale demeure à 150 kg N/ha, parce qu'aucun plafond de réponse à l'*Acti-Sol* n'a été obtenu sans engrais verts de légumineuses. Considérant le coût élevé de l'*Acti-Sol* (\$12,50/kg N), le scénario EV de pleine saison offre le meilleur profit brut (2,767\$/ha), dépassant de 80 \$/ha le scénario Trèfles intercalaires (2,687\$/ha). L'augmentation du profit liée à la hausse du rendement de maïs, cumulée à la réduction du coût de la dose de N optimale du système EV de pleine saison, surpassent ainsi les coûts de l'abandon de la culture de blé (280\$/ha) et du coût d'implantation plus onéreux de l'EV de luzerne (203\$/ha) par rapport aux trèfles intercalaires (81\$/ha).

Le portrait de rentabilités des systèmes EV change cependant lorsqu'une source d'azote à coût nul est considérée. La dose économique d'apport de N devient équivalente à la dose permettant d'obtenir le rendement maximal, en raison du coût nul de l'engrais, et les profits bruts augmentent à 3,908 \$/ha en système avec Trèfles intercalaires, soit 17 \$/ha de plus qu'en EV de pleine saison, à 3,891\$/ha (Tableau 24).

Sur le plan environnemental, les systèmes EV fertilisés avec l'*Acti-Sol* au taux économique optimal (36-47 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) impliquent des apports de phosphore sous le seuil d'enrichissement du sol (82-86 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha), voire équivalente à la limite réglementaire (45 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha; OAQ, 2011) imposée aux sols qui ont dépassé leur seuil de saturation en P. Toutefois, le recours au lisier de porc à pleine dose sans contrainte économique dans les systèmes

EV, ou sans EV, génère un bilan de phosphore (Apports-Prélèvements) de l'ordre de 61 à 81 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha au-delà du seuil excédentaire de 33 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha (Giroux et al, 2002), contribuant assurément à l'accélération de la saturation du sol en P. L'utilisation de la phase liquide séparée du lisier de porc permet cependant de contourner efficacement la problématique d'apport de P, voire de réduire la saturation de sols excessivement riches avec un bilan de P déficitaire (-18 à -34 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). A titre indicatif, dans le cadre de dispositifs au champ, Giroux et Royer (2007) ont observé des taux annuels de réduction de la saturation en P de sols excessivement riches de l'ordre de 0,9 %, avec un apport annuel de 30 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha et un bilan annuel au sol moyen de -15 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. A ce rythme de rétroversion du P, le seuil réglementaire de saturation des sols excessivement riches en P était atteint en 10 à 12 ans.

### **Scénario de dose de N au seuil d'enrichissement en P**

La rentabilité des systèmes de culture a également été projetée pour des doses d'apport de P maximales respectant le seuil d'enrichissement du sol en P. Pour l'*Acti-Sol*, l'augmentation de la dose de N au-delà de la dose économique se traduit évidemment en détérioration du profit. L'analyse de rentabilité demeure cependant pertinente pour le lisier de porc. La réduction du taux d'apport de phosphore depuis la dose économique optimale (144-150 kg N/ha) au seuil d'enrichissement du sol en P (105 à 111 N/ha en P) ne se traduit pas en perte de profit aussi importante sous les systèmes EV (63 à 126 \$/ha) que sous le Témoin sans EV (1058 \$). Le système EV de pleine saison (luzerne) devient même légèrement avantageux (3 827 \$ de profit brut) par rapport au système EV intercalaire (3 782 \$ de profit brut). En revanche, le profit du système sans EV se détériore considérablement considérant un passage de la dose économique (3,326\$/ha) à la dose limitant l'enrichissement du sol en P (2,268\$/ha).

La principale implication pratique de ces projections de rentabilité en production de maïs biologique est que les systèmes EV de pleine saison et intercalaire augmentent non seulement les rendements de la culture, mais permettent également de réduire les doses d'engrais de ferme et de prévenir l'enrichissement à long terme de la saturation des sols en phosphore, tout en conservant les marges de profits à leur plus haut niveau. Considérant une source de P à efficacité et coût élevé telle que l'*Acti-Sol*, le système EV de pleine saison s'avère avantageux, compte tenu des effets marqués sur le rendement et la contribution en N symbiotique. Le système avec Trèfles intercalaires génère également un profit considérablement plus élevé que le système sans EV de légumineuse. Considérant une source d'azote à faible coût, à coût nul ou de moindre efficacité comme le lisier de porc, le profit projeté s'accroît, mais la dose économique d'apport de N implique alors un enrichissement significatif de la saturation des sols en P. Dans une situation où l'enrichissement du sol doit être contenue, un compromis doit alors être atteint, soit de limiter la dose de N au seuil d'enrichissement du sol en P. Le recours à un lisier séparé (phase liquide) pour éviter la saturation des sols en phosphore produirait des rendements plus élevés de maïs grain biologique et une augmentation de profits bruts de l'ordre de 63 à 126 \$/ha permettant de financer partiellement le système de séparation.

## 5 DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Les résultats d'ensemble de l'étude témoignent d'effets contrastés des différents traitements d'engrais verts sur les rendements de culture de maïs grain, l'évolution des taux de nitrates dans le sol, la condition physique des sols et la rentabilité du système cultural. En clair, le recours aux EV de pleine saison et intercalaire est rentable en production de maïs grain biologique, permet une fertilisation organique respectant les seuils environnementaux d'apports de N et d'enrichissement du sol en P, et s'avère bénéfique pour la condition physique du sol.

Les rendements observés de culture de maïs grain traduisent bien l'efficacité des apports d'azote provenant des légumineuses. Un premier constat est établi en 2016, alors qu'un rendement de 11,6 t/ha en maïs grain confirme une fourniture importante de la prairie de luzerne retournée au sol au printemps. Suivant les traitements en 2017 d'EV de pleine saison (prairie de légumineuses et vesce velue) et de trèfles intercalaires (enfouis à l'automne ou au printemps), le retour du maïs en 2018 témoigne d'effets significatifs des EV par rapport aux parcelles Témoin, tant sur les rendements en grain, que sur sa teneur en azote. À chaque dose de N appliquée, les deux types d'EV (Pleine saison et Intercalaire) ont produit des rendements et des teneurs en N significativement plus élevées que les parcelles Témoin. Les résultats de l'étude indiquent par ailleurs que les EV de pleine saison ont généré des rendements significativement supérieurs aux trèfles intercalaires en absence d'apport de N. Aux taux d'apports de 75 et 150 N, cependant, les effets des EV de pleine saison et intercalaire sur le rendement du maïs ne se distinguent plus significativement.

Les teneurs en N dans le grain de maïs se sont avérées plus élevées sur retour de vesce velue qu'en retour de prairie de légumineuses, indiquant vraisemblablement une fourniture en N de la vesce plus élevée que celle de la prairie de légumineuses. La teneur en N du maïs-grain est aussi significativement plus faible dans les parcelles Témoin sans EV de légumineuses. Par ailleurs, les engrais verts de légumineuses se distinguent entre eux quant à leur effet sur la teneur en azote du maïs-grain, comme c'est le cas ici de l'EV de vesce velue, par rapport à la prairie de trèfles et de luzerne ou l'EV de trèfles intercalaires. Les EV de légumineuses permettent donc d'obtenir non seulement des rendements significativement plus élevés, mais aussi une meilleure qualité du grain en termes de teneur en protéine reflétée généralement par une teneur en azote à la hausse.

Les résultats de l'étude mettent également en relief des courbes de réponse aux engrais contrastées entre les traitements. Sans EV de légumineuses, le maïs répond de façon linéaire aux apports de N en provenance de l'engrais de ferme *Acti-Sol*. Sur retour de EV de légumineuses, les rendements de maïs évoluent plutôt de façon quadratique en réponse aux apports supplémentaires de N. Ceux-ci tendent ainsi à plafonner plus rapidement en fonction des apports de N supplémentaires, et atteignent des niveaux de rendement plus élevés que les parcelles Témoin. Sans apports de N d'engrais de ferme, les rendements sont deux fois plus élevés avec un précédent de légumineuses comparativement au Témoins. À la dose maximale de N (150 kg N/ha), les rendements des parcelles EV Pleine Saison, EV Intercalaire et Témoin se distinguent significativement avec des rendements moyens de 8,53, 7,78 et 6,51 T/ha, respectivement. Au final, les doses économiques optimales d'*Acti-Sol* ont été estimées à 36 et

50 kg N/ha pour les EV de pleine saison et Trèfles intercalaires, pour des rendements correspondants à 7,26 et 6,67 tm/ha de maïs-grain.

Les résultats de rendements de maïs grain en 2018 et de réponse à l'azote sont reflétés par les suivis des taux de nitrates dans le sol au cours de la saison, depuis les stades pré-semis, 6 feuilles du maïs (V6), sortie des soies (VT), stade pâteux (R4) et post-récolte. Dans l'ensemble, les effets simples des traitements d'EV, des doses de N appliquées et des dates d'échantillonnage sont tous très significatifs sur le stock de nitrates dans le sol (0-60 cm). Représentant l'absence d'interactions Traitement x Dose de N et Date x Traitement x Dose, il est conclu que l'effet de l'EV sur la concentration de nitrates dans le sol est indépendant de la dose de N appliquée. Réciproquement, l'apport de N à une dose donnée a le même effet sur l'augmentation de la concentration en nitrates, quel que soit la couverture du sol. Une première implication pratique de cette absence d'interaction est que les effets des EV et des doses d'azote sur le stock de N du sol sont cumulatifs, excluant un effet synergique de la légumineuse et du taux d'apport d'azote. L'évolution du stock d'azote du sol n'aurait donc pas contribué à l'explication de l'interaction Traitement x Dose de N détectée sur le rendement de maïs, tel que rapporté plus tôt. Une seconde implication découlant de la mise en perspective des résultats de rendements et de N du sol, est que les traitements EV ont contribué à améliorer le rendement du maïs, en marge de leur contribution en N symbiotique. Un effet sur la condition physique du sol est notamment suggéré par les mesures de propriétés des sols au terme de l'étude.

Les effets des traitements d'EV sur la fourniture du sol en azote sont particulièrement bien mis en relief sur les parcelles qui n'ont bénéficié d'aucun apport d'azote supplémentaire (0 N). Dès la période de pré-semis, les traitements d'EV de pleine saison et intercalaires ont contribué à l'enrichissement du sol en nitrates de façon significative par rapport aux parcelles Témoin. L'enrichissement du sol est par ailleurs significativement plus important sur un retour d'EV de pleine saison que sur un retour de trèfles intercalaires. Les contrastes les plus importants dans les contributions des EV aux stocks de nitrates du sol (0 N) sont observés en post-levée (stade V6) dans la couche de sol 0-30 cm. Les stocks de nitrates dans les parcelles d'EV de pleine saison se distinguent à la hausse par rapport aux parcelles Témoin et en retour de trèfles intercalaires. Ces dernières, cependant, ne se distinguent pas des parcelles Témoin. Ce résultat surprend, dans la mesure où des augmentations significatives de rendements de maïs ont été observés en réponse aux traitements de trèfles intercalaires par rapport aux parcelles Témoin. Ce contraste dans les réponses du rendement de maïs et du test de nitrates 0-30 cm au stade V6 tiendrait à une disponibilité décalée dans le temps de l'azote fournie par les trèfles intercalaires. Les pailles laissées au champ en 2017, résultant en un rapport C/N à la hausse, expliqueraient ce décalage. Une implication pratique de ces observations est qu'en présence de résidus de paille, une attention particulière doit être apportée dans l'interprétation de la fourniture du sol par le test de nitrates en post-levée. Le test de nitrates au 20 juin aurait ainsi sous-estimé la fourniture du sol en azote au cours de la saison de croissance.

Les contrastes observés dans les stocks de N du sol des traitements intercalaires témoignent par ailleurs d'un avantage de procéder à l'incorporation printanier de l'EV par rapport à l'enfouissement l'automne précédent. Puisque les traitements d'EV intercalaires se sont traduits en quantités équivalentes de biomasses apportées au sol, suivant un ratio similaire de C/N, seule la période d'incorporation expliquerait ce gradient dans la disponibilité de l'azote au stade V6. Deux facteurs pourraient contribuer à expliquer l'avantage de l'incorporation printanière.

D'une part, la croissance printanière du trèfle aurait contribué au stock de N du sol. D'autre part, le fait de ne pas retourner au sol la couverture végétale à l'automne aurait contribué à ralentir les processus de transformation et d'exportation de l'azote par les voies souterraines.

En post-récolte, les concentrations en nitrates observés dans les profils de sol témoignent des contributions des EV. Les seules contributions des EV, sans apport d'engrais de ferme, ne sont cependant pas préoccupantes sur le plan environnemental. Cependant, le cumul des contributions en N des cultures de couverture de légumineuses et des engrais organiques impliquent l'atteinte du seuil de risque environnemental établi à 80 kg N/ha (8.89 mg N/kg) pour la couche 0-60 cm. Sur retour d'EV de vesce velue, par exemple, le seuil est dépassé (9,76 mg N/kg) au taux d'apport de 75 N apporté par l'engrais organique. Au taux d'apport de N de 150, tous les traitements EV, à l'exception des trèfles intercalaires enfoui à l'automne, génèrent des reliquats de fertilisation au-dessus du seuil environnemental. Une implication pratique de ces observations est tout l'intérêt de bien comptabiliser la valeur fertilisation azotée des EV dans la perspective où des engrais organiques sont aussi mis à contribution dans la fertilisation des cultures.

Les traitements d'EV ont eu des effets significatifs sur les propriétés physiques du sol qui se distinguent selon l'EV retourné au sol et sa période d'enfouissement. Les Trèfles intercalaires ont ainsi amélioré de façon significative la masse volumique apparente (MVA), la teneur en eau au champ et la porosité totale du sol par rapport au traitement Témoin, principalement dans la couche 30-60 cm. Ces effets se distinguent cependant en fonction de la période d'enfouissement des Trèfles intercalaires. Ainsi, l'enfouissement au printemps a diminué de manière significative la masse volumique apparente du profil de sol et a augmenté significativement la conductivité hydraulique saturée du sol. Ces effets seraient par ailleurs plus marqués de 0 à 30 cm de profondeur. Notons ici que le traitement Trèfles intercalaires enfoui à l'automne est le seul traitement à avoir reçu un travail de sol automnal. L'enfouissement des trèfles intercalaires au printemps a donc non seulement amélioré la condition physique du sol par rapport à un enfouissement à l'automne, mais aussi par rapport au sol témoin, qui a aussi bénéficié d'un travail seulement au printemps. Ces résultats indiquent que l'enfouissement du chaume de trèfle et de la paille résiduelle au printemps, apportant à la fois du carbone et de l'azote dans un ratio C/N de 22, contribue à une bonne condition physique du sol. Les EV de pleine saison n'ont cependant pas eu d'effet marqué sur les propriétés physiques des sols par rapport aux traitements Témoin ou Trèfles intercalaires. Cependant, les effets de la vesce velue et de la prairie de légumineuses se distinguent, à l'avantage de la prairie. La quantité de carbone retournée au sol des différents traitements EV offre l'explication la plus plausible aux effets contrastés des EV sur les indicateurs documentés de la condition physique du sol au terme de l'étude.

La principale implication pratique de l'analyse de la rentabilité des systèmes de production de maïs grain biologique est que les systèmes EV de pleine saison et intercalaire augmentent non seulement les rendements de la culture, mais permettent également de réduire les doses d'engrais de ferme et de prévenir l'enrichissement à long terme de la saturation des sols en phosphore, tout en conservant les marges de profits à leur plus haut niveau. Considérant une source de P à efficacité et coût élevé telle que l'*Acti-Sol*, le système EV de pleine saison s'avère avantageux, compte tenu des effets marqués sur le rendement et la contribution en N symbiotique. Le système avec Trèfles intercalaires génère également un profit considérablement plus élevé que le système sans



EV de légumineuse. Considérant une source d'azote à faible coût, à coût nul ou de moindre efficacité comme le lisier de porc, le profit projeté s'accroît, mais la dose économique d'apport de N implique alors un enrichissement significatif de la saturation des sols en P. Dans une situation où l'enrichissement du sol doit être contenue, un compromis doit alors être atteint, soit de limiter la dose de N au seuil d'enrichissement du sol en P. Le recours à un lisier séparé (phase liquide) pour éviter la saturation des sols en phosphore produirait des rendements plus élevés de maïs grain biologique et une augmentation de profits bruts de l'ordre de 63 à 126 \$/ha permettant de financer partiellement le système de séparation. Pour le secteur de la production de grains biologiques particulièrement, la production d'engrais organiques « à teneur réduite en P » est avantageuse à long terme en raison d'une utilisation continue d'engrais de ferme, susceptible de conduire à l'enrichissement excessif du sol en phosphore.

Rappelons en terminant que la régie des différents systèmes de culture sous EV culture au cours de l'étude a permis d'assurer une protection antiérosive du sol en période de critique de vulnérabilité à l'érosion (novembre à avril). Aucun travail du sol n'a été effectué à l'automne, à l'exception du traitement Trèfles intercalaires enfoui à l'automne pour les fins de l'étude. L'absence de labour d'automne a permis aux couvertures végétales (prairie en 2015-2016, raygrass ou EV pleine saison en 2016-2017 et EV en 2017-2018) d'assurer pleinement leur rôle de protection du sol contre l'érosion. Tel qu'indiqué par la comparaison des effets de l'enfouissement des trèfles à l'automne et au printemps, les bénéfices d'un retour printanier au sol des EV s'inscrit donc en double, en accroissant la fourniture du sol en azote et en protégeant la parcelle de l'érosion par ruissellement.



## 6 RÉFÉRENCES

- Abdallahi, M. M. et N'Dayegamiye, A. 2000. Effects of green manures on soil physical and biological properties and on wheat yields and N uptake. *Can. J. Soil Sci.* 80: 8189.
- Bolinder, M.A., H.H. Janzen, E.G. Gregorich, D.A. Angers, A.J. et VandenBygaart. 2007. An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agric., Ecosys. and Envir.* 118:29–42
- Brozyna, M.A., S.O. Petersen, N. Chirinda & J.E. Olesen. 2013. Effects of grass-clover management and cover crops on nitrogen cycling and nitrous oxide emissions in a stockless organic crop rotation. *Agriculture, Ecosystems and Environment.* 181 : 115-126.
- Bruulsema, T.W. et B.R. Christie. 1987. Nitrogen contribution to succeeding corn from alfalfa and red clover. *Agronomy Journal.* 79 : 96-100.
- Biederbeck, V. O., Bouman, O. T., Looman, J., Slinkard, A. E., Bailey, L. D., Rice, W. A. et Janzen, H. H. 1993. Productivity of four annual legumes as green manure in dryland cropping systems. *Agron. J.* 85: 1035-1043.
- Carter, M.R., et E.G. Gregorich. 2007. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. 2<sup>ième</sup> édition. CRC Press. 1262 p.
- Charles, A., Vanasse, A., Van Eerd, L.L., Tremblay, N., Bourgeois, G., et Lynch, D.H. 2017. Meta-Analysis of Cover Cropping Systems: The Effects of Cover Crops on Subsequent Cash Crop Yields and Nitrogen Contribution. Poster: The 2017 ASA, CSSA and SSSA International Annual Meetings.
- CRAAQ, 2016. Engrais verts semés à la dérobé et en intercalaire, Coûts d'implantation. Références économiques. AGDEX 537/821b.  
[https://www.craaq.qc.ca/Publications-du-CRAAQ/engrais-verts-co%C3%BBts-d\\_implantation-2016-agdex-537821b/p/PREF0393](https://www.craaq.qc.ca/Publications-du-CRAAQ/engrais-verts-co%C3%BBts-d_implantation-2016-agdex-537821b/p/PREF0393)
- CRAAQ, 2017. Données économiques et techniques en production de maïs grain biologiques au Québec.  
<https://www.craaq.qc.ca/Publications-du-CRAAQ/donnees-economiques-et-techniques-en-production-de-grains-biologiques-au-quebec-resume/p/PABI0017-PDF>
- Duval, J. Weill, A., N'Dayegamiye, A., 2015. Contribution en azote en provenance des engrais verts de légumineuses. CETAB. 6 pages.
- Envir-Eau-Sol. (2012). Évaluation de différents engrais verts comme précédent cultural à la production de maïs-grain biologique. Projet 09-INNO1-01. 16 pages.
- Fontaine, L., L. Fourrié, J.F. Garnier, M. Mangin, B. Colomb, M. Carof, A. Aveline, L. Prieur, T. Quirin, B. Chareyron, R. Maurice, C. Glachant et J.P. Gouraud. 2012. Connaître, caractériser et évaluer les rotations en systèmes de grandes cultures biologiques. *Innovations Agronomiques* 25 : 27-40.
- CPVQ. 1993. Méthodes d'analyse des sols, des fumiers et des tissus végétaux. Conseil des productions végétales du Québec. Agdex 533.
- Coulibali, Z., Gasser, M.-O. Tremblay, G. 2015. Enquête menée auprès des producteurs de grain biologique dans le cadre du projet ad Hoc de l'action bio du MAPAQ : Extrêmes climatiques et fertilisation organique en production de grains biologique.

- Drinkwater, L.E., R.R. Janke, et L. Rossoni-Longnecker. 2000. Effects of tillage intensity on nitrogen dynamics and productivity in legume-based grain systems. *Plant Soil* 227: 99–113.
- Drury, C. C.S. Tan, T.W. Welacky, W.D. Reynolds, T.Q. Zhang, T.O. Oloya, N.B. McLaughlin, et J.D. Gaynor. 2014. Reducing nitrate loss in tile drainage water with cover crops and water-table management systems. *J. Environ. Qual.* 43: 587-598.
- Duval, J., Weill, A. et N'Dayegamiye, A. 2014. Contribution en azote en provenance des engrais verts de légumineuses. Fiche synthèse. CETAB+, 6p.
- Gaudin, A.C., S. Westra, C.E. Loucks, K. Janovicek, R.C. Martin, et W. Deen, 2013. Improving resilience of northern field crop systems using inter-seeded red clover. *Agronomy* 3 : 148–180.
- Gaudin, A.C., K. Janovicek, R.C. Martin, et W. Deen, 2014. Approaches to optimizing nitrogen fertilization in a winter wheat–redclover (*Trifolium pratense* L.) relay cropping system. *Field Crops Research* 155: 192–201
- Giroux, M., D. Carrier et P. Beaudet, 1996. Problématique et méthode de gestion des charges de phosphore appliquées aux sols agricoles en provenance des engrais de ferme. *Agrosol* 9 (1) : 36-45.
- Giroux, M., J. Cantin, R. Rivest et G. Tremblay. 2002. Évaluation des teneurs en phosphore dans les sols selon la fertilisation, la richesse en P et les types de sols. *Compte-rendu du colloque sur le phosphore OAQ-APAQ.* « Une gestion éclairée », 19 p.
- Giroux, M. et R. Royer. 2007. Effets à long terme des applications de phosphore sur les rendements, l'évolution des teneurs, de la saturation et de la solubilité du P dans deux sols très riches. *Agrosolutions* 18 :1 pp. 17-24.
- Godbout et al. 2006. Système de séparation liquide/solide des déjections à la source dans un bâtiment porcin et les impacts sur l'environnement  
[https://www.irda.qc.ca/assets/documents/Publications/documents/godbout-et-al-2006\\_rapport\\_separation\\_sous\\_lattes.pdf](https://www.irda.qc.ca/assets/documents/Publications/documents/godbout-et-al-2006_rapport_separation_sous_lattes.pdf)
- Groya, F.L. et C.C. Sheaffer. 1985. Nitrogen from Forage Legumes: Harvest and Tillage Effects. *Agron. J.* 77: 105-109.
- Halde, C., and M.H. Entz. 2014. Flax (*Linum usitatissimum* L.) production system performance under organic rotational no-till and two organic tilled systems in a cool subhumid continental climate. *Soil Tillage Res.* 143: 145–154.
- Hesterman, O. B., Russelle, M. P., Sheaffer, C. C. et Heichel G. H. 1987. Nitrogen utilization from fertilizer and legume residues in legume-corn rotations. *Agron. J.* 79: 726–731.
- Jobin, P. et Y. Douville. 1996. Engrais verts et cultures intercalaires. Centre de développement d'agrobiologie. 22 p.
- Littell, R.C., G.A. Milliken, W.W. Stroup et R.D. Wolfinger. 2006. Schabenberger, Oliver. *SAS <sup>®</sup> for Mixed Models*, Second Edition. Cary. NC : SAS Institute Inc.
- Loges, R., A. Kaske et F. Taube. 1999. Dinitrogen fixation and residue nitrogen of different managed legumes and nitrogen uptake of subsequent winter wheat. p. 181-190. In *Designing and testing crop rotations form organic farming. Proceeding from an International workshop.* Danish research centre for organic farming.
- Mejia, M. et C. Madramootoo, 1998. Improved Water Quality through Water Table Management in Eastern Canada. *J. Irrig. Drain Eng.*, 124: 116–122.

- McMillan, S. 2012. Crop rotation : the 19-year Glenlea study. The Canadian Organic Grower. Summer 2012. 22-25.
- MELCC, 2017. Critères de qualité de l'eau de surface  
[http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/criteres\\_eau/details.asp?code=S0049](http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/criteres_eau/details.asp?code=S0049)
- Michaud, A.R., J. Deslandes, J. Desjardins et M. Grenier. 2009a. Réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles. Rapport final de projet. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), MAPAQ, Club du bassin La Guerre, Dura-Club, Club de fertilisation de la Beauce, Fonds d'action québécois pour le développement durable, Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec et Programme d'aide technique de Couverture végétale du Canada. Québec, Québec, 155 p.
- Michaud, A.R., J. Desjardins, M. Grenier et R. Lauzier. 2009b. Suivi de la qualité de l'eau des bassins versants expérimentaux Ewing et au Castor – Dans le cadre du projet Lisière verte. Rapport final de projet. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Coopérative de solidarité du bassin versant de la rivière aux Brochets, AAC (PASCAA) et MAPAQ, Québec, Québec, 27 p.  
[https://irda.blob.core.windows.net/media/2337/michaud-et-al-2009\\_rapport\\_suivi\\_lisiere\\_verte\\_ewing\\_castors.pdf](https://irda.blob.core.windows.net/media/2337/michaud-et-al-2009_rapport_suivi_lisiere_verte_ewing_castors.pdf)
- Michaud, A.R., J. Desjardins, N. Coté, I. Beaudin, A. Drouin, S. Seydoux et I. Saint-Laurent. 2012. Rapport de l'Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles. Rapport sommaire pour la période de référence 2009-2011. Rapport réalisé dans le cadre du projet Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). Québec, Canada. 87 pages et annexes.  
<http://www.irda.qc.ca/resultats/publications/197.html>
- Michaud, A.R., A. Drouin, I. Beaudin, L. Belzile, M.-O. Gasser, J. Desjardins et N. Côté. 2014. REZOTAGE : Réalisation de Zones Technico-économiques Agricoles de Gestion. Rapport final. Projet réalisé dans le cadre du Programme canadien d'adaptation agricole (PCAA) en collaboration avec le Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Québec, Canada. 180 p.  
[https://irda.blob.core.windows.net/media/2341/michaud-et-al-2014\\_rapport\\_final\\_rezotage.pdf](https://irda.blob.core.windows.net/media/2341/michaud-et-al-2014_rapport_final_rezotage.pdf)
- Michaud, A.R. J. Desjardins, M. Dubuc, A. Drouin, M. Grenier. 2017. Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles réseau Champlain, Mauricie. Rapport scientifique de projet. 81 pages.  
[https://irda.blob.core.windows.net/media/4810/michaud\\_et\\_al-2017-observatoire\\_de\\_la-qualite\\_de-leau\\_de\\_surface\\_mauriciepdf.pdf](https://irda.blob.core.windows.net/media/4810/michaud_et_al-2017-observatoire_de_la-qualite_de-leau_de_surface_mauriciepdf.pdf)
- Michaud, A.R., M. Niang, A. Blais-Gagnon, W. Huertas, Z. Ipiña et M. Landry. 2018. Suivi hydrométrique et modélisation hydrologique des sédiments et des nutriments du bassin versant du Lac Boivin à Granby. Rapport scientifique final. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), OBV- Yamaska. 79 pages plus annexes.
- N'Dayegamiye, A., Whalen, J.K., Tremblay, G.F., Tremblay, G., Nyiraneza, J., Grenier, M., Drapeau, A., et Bipfubusa, M. 2015. The benefits of legume crops on corn and wheat yield, nitrogen nutrition, and soil properties improvement. *Agronomy J.* 107(5) : 1653-1665. doi : 10.2134/agronj14.0416

- N'Dayegamiye, A., M. Grenier, A. Weill, A. Drapeau & P. Deschênes. 2014. Gestion efficace et intégrée des rotations, du travail du sol, des fumiers et des composts pour une rentabilité accrue en agriculture biologique. Rapport de recherche. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). 20 pages.
- Ordre des agronomes du Québec. 2011. Stratégies de fertilisation relatives à l'indice de saturation en phosphore des sols.
- Petit, J. et P. Jobin. 2005. La fertilisation organique des cultures : Les bases. Fédération d'agriculture biologique du Québec. Longueuil, Québec. 50 pages.
- Producteurs de grains du Québec. 2019. Évolution du prix du maïs-grain biologique. <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>
- Sarr, J.B., M. Giroux et A. N'Dayegamiye. 2009. Effet des doses d'azote sur les teneurs en nitrates résiduels en post-récolte des sols cultivés en maïs grain. Agrosolutions 20 :1 Pp. 23 -34.
- Skaggs, R. W., N. R. Fausey et R. O. Evans. 2012. Drainage water management. J. Soil Water Conserv. 67 : 167A-172A.
- Sullivan, D.M. et N.D. Andrews. 2012. Estimating plant-available nitrogen release from cover crops. Pacific Northwest extension publication. PNW 636.
- Tremblay, J. et C. Bérubé. 2017 Implantation en dérobée de légumineuses annuelles et réponse du maïs. Présentation orale. Consulté sur Agri-réseau le 18 oct. 2019.
- Vanasse, A. A. Charles et N. Tremblay. 2017 Contribution des cultures de couverture aux rendements des grandes cultures, à la dynamique de l'azote et à la qualité des sols. Rapport de recherche. Projet Innov'Action IA214152. MAPAQ. 68 pages.
- Zhou, X., C. Madramootoo, A. MacKenzie, J. Kaluli, et D. Smith. 2000. Corn yield and fertilizer N recovery in water-table-controlled corn-rye-grass systems. European Journal of Agronomy, 12: 83-92.

## 7 ANNEXES – DONNÉES BRUTES

Tableau 25 : Concentrations en N-NH<sub>4</sub> mesurées à trois profondeurs (0-15, 15-30 et 30-60 cm) au cours de la saison 2018.

	9 mai 2018 Pré-semis			20 juin 2018 Stade V6			26 juillet 2018 Stade VT			20 sept. 2018 Stade pâteux			8 nov. 2018 Post-récolte		
	0 N	75 N	150 N	0 N	75 N	150 N	0 N	75 N	150 N	0 N	75 N	150 N	0 N	75 N	150 N
<b>Moyenne pondérée (0 - 60 cm)</b>															
T1 – Témoin	3,25	3,25	3,25	3,29	3,53	3,63	3,20	3,91	3,46	5,24	5,70	5,42	4,03	4,42	4,42
T6 – Pois fourrager	3,21	3,21	3,21	2,78	3,11	3,31	3,62	3,97	4,07	5,08	5,03	5,06	5,14	5,00	5,02
<b>Témoin</b>	<b>3,23</b>	<b>3,23</b>	<b>3,23</b>	<b>3,04</b>	<b>3,32</b>	<b>3,47</b>	<b>3,41</b>	<b>3,94</b>	<b>3,77</b>	<b>5,16</b>	<b>5,37</b>	<b>5,24</b>	<b>4,59</b>	<b>4,71</b>	<b>4,72</b>
T2 – Prairie pleine saison	2,90	2,90	2,90	3,10	3,62	3,64	3,52	3,99	3,78	5,50	5,18	5,50	4,43	4,53	4,48
T3 – Vesce velue pleine saison	3,25	3,25	3,25	3,65	4,56	3,45	3,97	3,33	3,53	4,56	4,70	4,90	4,11	4,24	4,31
<b>EV pleine saison</b>	<b>3,07</b>	<b>3,07</b>	<b>3,07</b>	<b>3,38</b>	<b>4,09</b>	<b>3,55</b>	<b>3,74</b>	<b>3,66</b>	<b>3,66</b>	<b>5,03</b>	<b>4,94</b>	<b>5,20</b>	<b>4,27</b>	<b>4,39</b>	<b>4,39</b>
T4 – Trèfles intercalaires à l'automne	3,54	3,54	3,54	3,19	3,29	3,67	3,76	3,35	4,85	5,29	5,33	5,59	3,87	4,06	4,06
T5 – Trèfles intercalaires au printemps	3,25	3,25	3,25	3,58	3,45	3,70	3,73	3,68	4,01	5,62	5,37	5,53	4,62	5,03	4,88
<b>Trèfles intercalaires</b>	<b>3,39</b>	<b>3,39</b>	<b>3,39</b>	<b>3,38</b>	<b>3,37</b>	<b>3,68</b>	<b>3,74</b>	<b>3,51</b>	<b>4,43</b>	<b>5,46</b>	<b>5,35</b>	<b>5,56</b>	<b>4,25</b>	<b>4,54</b>	<b>4,47</b>
<b>0-15 cm</b>															
T1 – Témoin	2,50	2,50	2,50	3,14	3,34	3,46	3,01	3,32	3,33	4,22	4,31	4,75	3,54	4,07	4,63
T6 – Pois fourrager	2,68	2,68	2,68	2,61	3,04	3,09	3,35	3,86	4,38	4,21	4,82	4,22	4,28	4,91	4,89
<b>Témoin</b>	<b>2,59</b>	<b>2,59</b>	<b>2,59</b>	<b>2,87</b>	<b>3,19</b>	<b>3,27</b>	<b>3,18</b>	<b>3,59</b>	<b>3,85</b>	<b>4,21</b>	<b>4,56</b>	<b>4,48</b>	<b>3,91</b>	<b>4,49</b>	<b>4,76</b>
T2 – Prairie pleine saison	2,28	2,28	2,28	3,17	3,18	3,34	3,26	3,74	3,43	4,11	3,99	4,25	4,03	4,14	4,43
T3 – Vesce velue pleine saison	2,46	2,46	2,46	3,47	3,02	3,30	3,21	3,04	3,54	3,68	3,62	4,33	3,51	4,05	3,73
<b>EV pleine saison</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>3,32</b>	<b>3,10</b>	<b>3,32</b>	<b>3,24</b>	<b>3,39</b>	<b>3,48</b>	<b>3,90</b>	<b>3,81</b>	<b>4,29</b>	<b>3,77</b>	<b>4,10</b>	<b>4,08</b>
T4 – Trèfles intercalaires à l'automne	3,87	3,87	3,87	3,25	3,73	3,04	4,31	3,50	3,47	3,87	4,61	4,33	3,67	3,56	4,02
T5 – Trèfles intercalaires au printemps	3,03	3,03	3,03	3,27	3,35	3,90	3,19	3,63	3,68	3,78	3,85	4,38	4,03	4,83	5,28
<b>Trèfles intercalaires</b>	<b>3,45</b>	<b>3,45</b>	<b>3,45</b>	<b>3,26</b>	<b>3,54</b>	<b>3,47</b>	<b>3,75</b>	<b>3,56</b>	<b>3,57</b>	<b>3,83</b>	<b>4,23</b>	<b>4,35</b>	<b>3,85</b>	<b>4,20</b>	<b>4,65</b>

	9 mai 2018 Pré-semis			20 juin 2018 Stade V6			26 juillet 2018 Stade VT			20 sept. 2018 Stade pâteux			8 nov. 2018 Post-récolte		
	0 N	75 N	150 N	0 N	75 N	150 N	0 N	75 N	150 N	0 N	75 N	150 N	0 N	75 N	150 N
<b>15-30 cm</b>															
T1 – Témoin	3,22	3,22	3,22	3,07	3,35	3,82	3,24	5,28	3,27	4,55	4,98	5,20	3,99	4,19	4,12
T6 – Pois fourrager	2,94	2,94	2,94	2,52	2,84	3,44	3,56	4,26	3,77	4,77	4,65	4,52	5,38	5,05	4,99
<b>Témoin</b>	<b>3,08</b>	<b>3,08</b>	<b>3,08</b>	<b>2,80</b>	<b>3,09</b>	<b>3,63</b>	<b>3,40</b>	<b>4,77</b>	<b>3,52</b>	<b>4,66</b>	<b>4,81</b>	<b>4,86</b>	<b>4,68</b>	<b>4,62</b>	<b>4,56</b>
T2 – Prairie pleine saison	2,62	2,62	2,62	3,18	3,85	3,62	3,60	4,24	3,83	5,04	4,38	4,87	4,28	4,21	4,23
T3 – Vesce velue pleine saison	3,37	3,37	3,37	3,43	4,43	3,15	3,68	3,30	3,24	4,26	4,30	4,26	4,09	3,97	3,75
<b>EV pleine saison</b>	<b>2,99</b>	<b>2,99</b>	<b>2,99</b>	<b>3,31</b>	<b>4,14</b>	<b>3,38</b>	<b>3,64</b>	<b>3,77</b>	<b>3,54</b>	<b>4,65</b>	<b>4,34</b>	<b>4,57</b>	<b>4,19</b>	<b>4,09</b>	<b>3,99</b>
T4 – Trèfles intercalaires à l'automne	3,22	3,22	3,22	2,93	3,19	3,84	3,22	3,23	8,04	4,45	4,81	4,90	3,55	4,16	3,93
T5 – Trèfles intercalaires au printemps	2,82	2,82	2,82	3,29	3,49	3,94	3,81	3,50	3,79	4,31	4,84	5,44	4,77	5,07	4,88
<b>Trèfles intercalaires</b>	<b>3,02</b>	<b>3,02</b>	<b>3,02</b>	<b>3,11</b>	<b>3,34</b>	<b>3,89</b>	<b>3,51</b>	<b>3,36</b>	<b>5,92</b>	<b>4,38</b>	<b>4,82</b>	<b>5,17</b>	<b>4,16</b>	<b>4,61</b>	<b>4,41</b>
<b>30-60 cm</b>															
T1 – Témoin	3,64	3,64	3,64	3,48	3,71	3,63	3,27	3,51	3,63	6,10	6,76	5,87	4,30	4,71	4,46
T6 – Pois fourrager	3,62	3,62	3,62	2,99	3,28	3,35	3,78	3,88	4,08	5,68	5,33	5,75	5,46	5,01	5,09
<b>Témoin</b>	<b>3,63</b>	<b>3,63</b>	<b>3,63</b>	<b>3,24</b>	<b>3,50</b>	<b>3,49</b>	<b>3,53</b>	<b>3,70</b>	<b>3,85</b>	<b>5,89</b>	<b>6,04</b>	<b>5,81</b>	<b>4,88</b>	<b>4,86</b>	<b>4,78</b>
T2 – Prairie pleine saison	3,35	3,35	3,35	3,03	3,73	3,81	3,60	3,99	3,93	6,42	6,18	6,45	4,71	4,90	4,63
T3 – Vesce velue pleine saison	3,58	3,58	3,58	3,86	5,40	3,68	4,49	3,49	3,68	5,14	5,43	5,50	4,43	4,48	4,88
<b>EV pleine saison</b>	<b>3,46</b>	<b>3,46</b>	<b>3,46</b>	<b>3,44</b>	<b>4,56</b>	<b>3,75</b>	<b>4,04</b>	<b>3,74</b>	<b>3,80</b>	<b>5,78</b>	<b>5,80</b>	<b>5,98</b>	<b>4,57</b>	<b>4,69</b>	<b>4,75</b>
T4 – Trèfles intercalaires à l'automne	3,53	3,53	3,53	3,29	3,12	3,90	3,75	3,33	3,94	6,43	5,95	6,58	4,14	4,26	4,15
T5 – Trèfles intercalaires au printemps	3,58	3,58	3,58	3,87	3,49	3,48	3,96	3,79	4,28	7,20	6,40	6,14	4,85	5,10	4,68
<b>Trèfles intercalaires</b>	<b>3,55</b>	<b>3,55</b>	<b>3,55</b>	<b>3,58</b>	<b>3,30</b>	<b>3,69</b>	<b>3,85</b>	<b>3,56</b>	<b>4,11</b>	<b>6,81</b>	<b>6,18</b>	<b>6,36</b>	<b>4,49</b>	<b>4,68</b>	<b>4,41</b>

Tableau 26 : Concentrations en N-NO<sub>3</sub> mesurées à trois profondeurs (0-15, 15-30 et 30-60 cm) au cours de la saison 2018.

	9 mai 2018 Pré-semis			20 juin 2018 Stade V6			26 juillet 2018 Stade VT			20 sept. 2018 Stade pâteux			8 nov. 2018 Post-récolte		
	0 N	75 N	150 N	0 N	75 N	150 N	0 N	75 N	150 N	0 N	75 N	150 N	0 N	75 N	150 N
<b>Moyenne pondérée (0 - 60 cm)</b>															
T1 – Témoin	2,61	2,61	2,61	4,98	12,62	20,25	4,93	10,63	16,40	3,79	4,91	13,14	3,21	4,08	7,03
T6 – Pois fourrager	2,78	2,78	2,78	6,35	9,86	14,22	6,06	8,13	12,15	4,47	5,64	8,85	4,18	5,76	7,23
<b>Témoin</b>	<b>2,69</b>	<b>2,69</b>	<b>2,69</b>	<b>5,66</b>	<b>11,24</b>	<b>17,24</b>	<b>5,50</b>	<b>9,38</b>	<b>14,27</b>	<b>4,13</b>	<b>5,28</b>	<b>10,99</b>	<b>3,70</b>	<b>4,92</b>	<b>7,13</b>
T2 – Prairie pleine saison	3,27	3,27	3,27	15,47	22,18	27,48	8,65	17,97	28,24	8,42	11,65	20,46	5,96	7,52	13,73
T3 – Vesce velue pleine saison	5,43	5,43	5,43	11,58	18,14	24,15	10,14	12,67	22,66	7,99	12,07	21,22	6,87	9,76	16,10
<b>EV pleine saison</b>	<b>4,35</b>	<b>4,35</b>	<b>4,35</b>	<b>13,52</b>	<b>20,16</b>	<b>25,82</b>	<b>9,40</b>	<b>15,32</b>	<b>25,45</b>	<b>8,20</b>	<b>11,86</b>	<b>20,84</b>	<b>6,42</b>	<b>8,64</b>	<b>14,92</b>
T4 – Trèfles intercalaires à l'automne	3,87	3,87	3,87	6,25	13,06	15,55	7,43	13,00	22,10	5,49	5,65	14,80	5,20	7,97	8,70
T5 – Trèfles intercalaires au printemps	3,10	3,10	3,10	8,68	16,00	17,20	6,62	13,76	21,44	6,08	7,70	8,37	5,33	7,56	10,74
<b>Trèfles intercalaires</b>	<b>3,48</b>	<b>3,48</b>	<b>3,48</b>	<b>7,47</b>	<b>14,53</b>	<b>16,38</b>	<b>7,02</b>	<b>13,38</b>	<b>21,77</b>	<b>5,79</b>	<b>6,68</b>	<b>11,59</b>	<b>5,27</b>	<b>7,77</b>	<b>9,72</b>
<b>0-15 cm</b>															
T1 – Témoin	2,46	2,46	2,46	5,34	15,08	26,78	7,39	19,93	34,62	5,12	6,00	23,27	3,07	4,53	8,37
T6 – Pois fourrager	2,95	2,95	2,95	5,98	11,64	18,28	8,35	12,08	21,67	6,29	8,69	11,70	3,58	6,73	11,34
<b>Témoin</b>	<b>2,70</b>	<b>2,70</b>	<b>2,70</b>	<b>5,66</b>	<b>13,36</b>	<b>22,53</b>	<b>7,87</b>	<b>16,00</b>	<b>28,14</b>	<b>5,71</b>	<b>7,35</b>	<b>17,48</b>	<b>3,32</b>	<b>5,63</b>	<b>9,85</b>
T2 – Prairie pleine saison	3,79	3,79	3,79	20,83	29,47	38,38	14,89	41,38	54,42	14,12	23,74	37,93	5,08	7,30	15,99
T3 – Vesce velue pleine saison	4,99	4,99	4,99	13,40	24,48	34,18	17,03	17,67	41,52	11,47	20,28	27,95	6,35	8,45	15,70
<b>EV pleine saison</b>	<b>4,39</b>	<b>4,39</b>	<b>4,39</b>	<b>17,12</b>	<b>26,98</b>	<b>36,28</b>	<b>15,96</b>	<b>29,53</b>	<b>47,97</b>	<b>12,79</b>	<b>22,01</b>	<b>32,94</b>	<b>5,71</b>	<b>7,87</b>	<b>15,85</b>
T4 – Trèfles intercalaires à l'automne	4,04	4,04	4,04	6,63	18,66	19,66	11,90	21,90	34,10	9,09	9,77	29,57	5,95	10,06	8,57
T5 – Trèfles intercalaires au printemps	3,43	3,43	3,43	10,62	20,63	23,73	8,90	25,00	33,58	10,96	15,09	15,24	5,66	7,70	10,13
<b>Trèfles intercalaires</b>	<b>3,74</b>	<b>3,74</b>	<b>3,74</b>	<b>8,62</b>	<b>19,65</b>	<b>21,70</b>	<b>10,40</b>	<b>23,45</b>	<b>33,84</b>	<b>10,03</b>	<b>12,43</b>	<b>22,40</b>	<b>5,80</b>	<b>8,88</b>	<b>9,35</b>

	9 mai 2018 Pré-semis			20 juin 2018 Stade V6			26 juillet 2018 Stade VT			20 sept. 2018 Stade pâteux			8 nov. 2018 Post-récolte		
	0 N	75 N	150 N	0 N	75 N	150 N	0 N	75 N	150 N	0 N	75 N	150 N	0 N	75 N	150 N
<b>15-30 cm</b>															
T1 – Témoin	3,79	3,79	3,79	5,82	14,91	25,37	6,23	15,86	19,35	6,12	8,58	19,18	4,61	5,70	9,70
T6 – Pois fourrager	3,57	3,57	3,57	8,32	10,96	17,61	7,53	11,60	16,96	7,05	6,95	14,71	5,73	7,96	8,36
<b>Témoin</b>	<b>3,68</b>	<b>3,68</b>	<b>3,68</b>	<b>7,07</b>	<b>12,93</b>	<b>21,49</b>	<b>6,88</b>	<b>13,73</b>	<b>18,15</b>	<b>6,58</b>	<b>7,76</b>	<b>16,94</b>	<b>5,17</b>	<b>6,83</b>	<b>9,03</b>
T2 – Prairie pleine saison	4,17	4,17	4,17	18,47	25,75	36,90	9,39	17,60	38,97	12,07	15,63	29,77	7,88	10,21	19,75
T3 – Vesce velue pleine saison	5,58	5,58	5,58	13,97	20,55	29,22	10,86	20,02	19,33	12,47	18,05	33,60	9,30	12,84	19,78
<b>EV pleine saison</b>	<b>4,88</b>	<b>4,88</b>	<b>4,88</b>	<b>16,22</b>	<b>23,15</b>	<b>33,06</b>	<b>10,12</b>	<b>18,81</b>	<b>29,15</b>	<b>12,27</b>	<b>16,84</b>	<b>31,69</b>	<b>8,59</b>	<b>11,53</b>	<b>19,77</b>
T4 – Trèfles intercalaires à l'automne	4,48	4,48	4,48	7,27	13,24	18,40	8,53	14,73	26,31	7,41	8,70	20,63	6,68	10,64	11,94
T5 – Trèfles intercalaires au printemps	4,07	4,07	4,07	9,93	22,10	21,52	8,80	14,20	28,67	8,59	10,71	12,21	8,10	10,76	15,77
<b>Trèfles intercalaires</b>	<b>4,27</b>	<b>4,27</b>	<b>4,27</b>	<b>8,60</b>	<b>17,67</b>	<b>19,96</b>	<b>8,67</b>	<b>14,47</b>	<b>27,49</b>	<b>8,00</b>	<b>9,70</b>	<b>16,42</b>	<b>7,39</b>	<b>10,70</b>	<b>13,85</b>
<b>30-60 cm</b>															
T1 – Témoin	2,09	2,09	2,09	4,38	10,25	14,42	3,06	3,37	5,81	1,97	2,53	5,06	2,59	3,04	5,02
T6 – Pois fourrager	2,31	2,31	2,31	5,55	8,41	10,51	4,19	4,43	4,99	2,27	3,47	4,49	3,70	4,18	4,62
<b>Témoin</b>	<b>2,20</b>	<b>2,20</b>	<b>2,20</b>	<b>4,96</b>	<b>9,33</b>	<b>12,46</b>	<b>3,62</b>	<b>3,90</b>	<b>5,40</b>	<b>2,12</b>	<b>3,00</b>	<b>4,78</b>	<b>3,14</b>	<b>3,61</b>	<b>4,82</b>
T2 – Prairie pleine saison	2,56	2,56	2,56	11,28	16,76	17,32	5,16	6,45	9,78	3,74	3,62	7,06	5,44	6,30	9,60
T3 – Vesce velue pleine saison	5,58	5,58	5,58	9,47	13,77	16,60	6,34	6,49	14,89	4,02	4,98	11,66	5,92	8,87	14,45
<b>EV pleine saison</b>	<b>4,07</b>	<b>4,07</b>	<b>4,07</b>	<b>10,37</b>	<b>15,27</b>	<b>16,96</b>	<b>5,75</b>	<b>6,47</b>	<b>12,34</b>	<b>3,88</b>	<b>4,30</b>	<b>9,36</b>	<b>5,68</b>	<b>7,58</b>	<b>12,02</b>
T4 – Trèfles intercalaires à l'automne	3,47	3,47	3,47	5,56	10,17	12,07	4,64	7,68	14,00	2,73	2,06	4,50	4,10	5,60	7,15
T5 – Trèfles intercalaires au printemps	2,45	2,45	2,45	7,08	10,64	11,78	4,38	7,91	11,77	2,39	2,51	3,03	3,79	5,89	8,52
<b>Trèfles intercalaires</b>	<b>2,96</b>	<b>2,96</b>	<b>2,96</b>	<b>6,32</b>	<b>10,40</b>	<b>11,93</b>	<b>4,51</b>	<b>7,80</b>	<b>12,88</b>	<b>2,56</b>	<b>2,29</b>	<b>3,77</b>	<b>3,94</b>	<b>5,74</b>	<b>7,83</b>



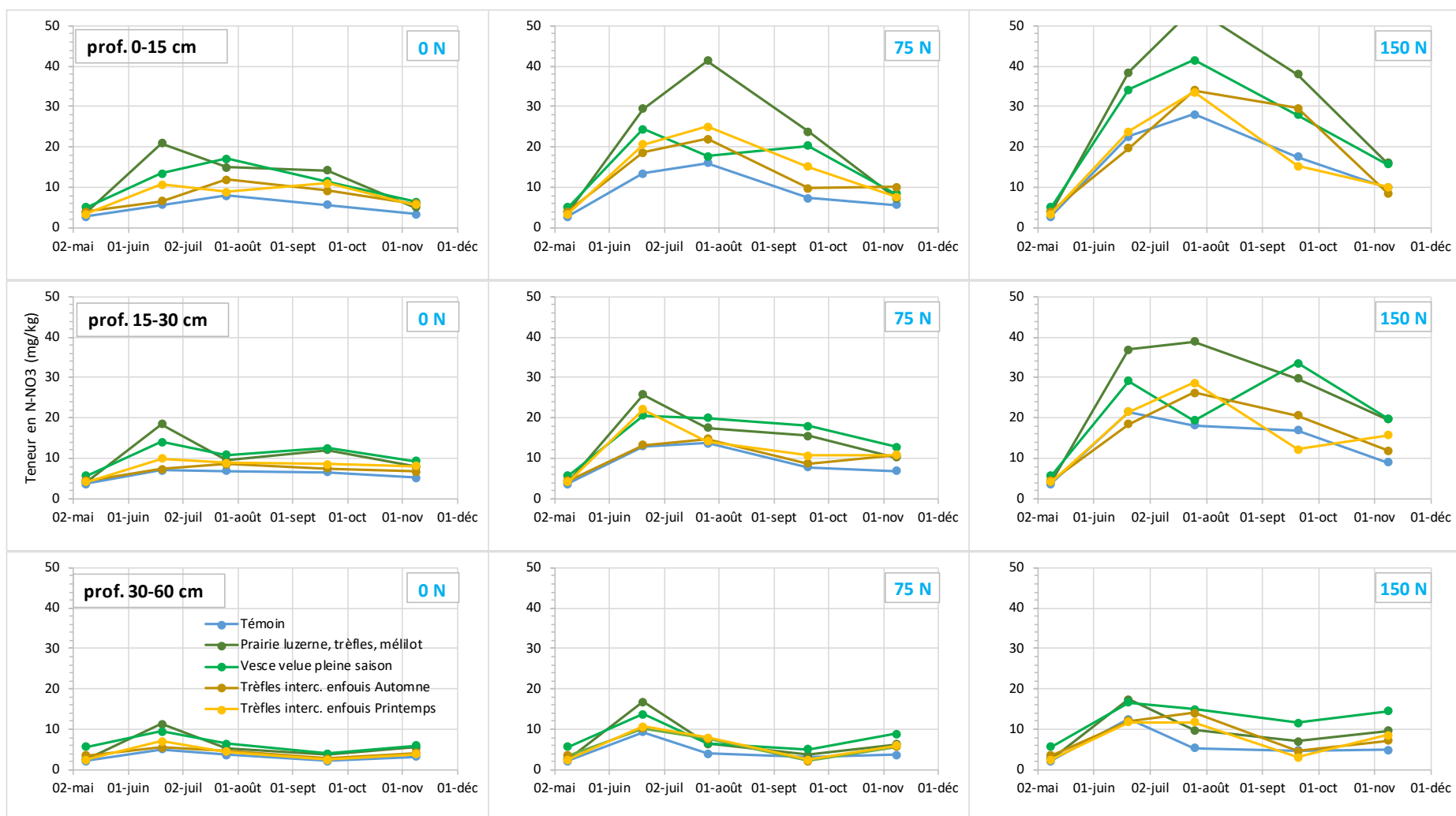


Figure 16 : Évolution des concentrations de N-NO<sub>3</sub> mesurées à trois profondeurs (0-15, 15-30 et 30-60 cm) au cours de la saison 2018 sous l'effet des traitements EV de légumineuse et de 3 doses d'Acti-Sol (0, 75 et 150 kg/ha de N efficace).

**Tableau 27 : Propriétés physiques du sol mesurées à deux profondeurs (0-30 et 30-60 cm) à la fin de l'étude (nov. 2018).**

	MVA <sup>†</sup>	Teneur en eau au champ	Porosité totale	Teneur en eau à 10 kPa	Conductivité hydraulique saturée
<b>Moyenne pondérée (0 - 60 cm)</b>	g/cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	cm/min
T1 – Témoin	1,51	25,66	0,45	0,39	0,047
T6 – Pois fourrager	1,51	25,17	0,44	0,38	0,045
<b>Témoin</b>	<b>1,51</b>	<b>25,41</b>	<b>0,44</b>	<b>0,38</b>	<b>0,046</b>
T2 – Prairie pleine saison	1,47	26,58	0,46	0,39	0,027
T3 – Vesce velue pleine saison	1,52	24,63	0,44	0,38	0,012
<b>EV pleine saison</b>	<b>1,49</b>	<b>25,60</b>	<b>0,45</b>	<b>0,39</b>	<b>0,019</b>
T4 – Trèfles intercalaires à l'automne	1,49	26,19	0,45	0,39	0,022
T5 – Trèfles intercalaires au printemps	1,44	27,13	0,47	0,39	0,218
<b>Trèfles intercalaires</b>	<b>1,46</b>	<b>26,66</b>	<b>0,46</b>	<b>0,39</b>	<b>0,124</b>
<b>0-30 cm</b>					
T1 – Témoin	1,49	26,60	0,45	0,39	0,017
T6 – Pois fourrager	1,50	25,88	0,45	0,39	0,064
<b>Témoin</b>	<b>1,49</b>	<b>26,24</b>	<b>0,45</b>	<b>0,39</b>	<b>0,038</b>
T2 – Prairie pleine saison	1,46	27,10	0,46	0,40	0,033
T3 – Vesce velue pleine saison	1,51	24,80	0,44	0,38	0,013
<b>EV pleine saison</b>	<b>1,48</b>	<b>25,95</b>	<b>0,45</b>	<b>0,39</b>	<b>0,023</b>
T4 – Trèfles intercalaires à l'automne	1,49	26,28	0,45	0,39	0,010
T5 – Trèfles intercalaires au printemps	1,42	27,20	0,47	0,38	0,169
<b>Trèfles intercalaires</b>	<b>1,45</b>	<b>26,74</b>	<b>0,46</b>	<b>0,39</b>	<b>0,090</b>
<b>30-60 cm</b>					
T1 – Témoin	1,53	24,72	0,44	0,38	0,077
T6 – Pois fourrager	1,53	24,45	0,44	0,38	0,029
<b>Témoin</b>	<b>1,53</b>	<b>24,58</b>	<b>0,44</b>	<b>0,38</b>	<b>0,053</b>
T2 – Prairie pleine saison	1,48	26,07	0,46	0,39	0,021
T3 – Vesce velue pleine saison	1,52	24,45	0,44	0,38	0,011
<b>EV pleine saison</b>	<b>1,50</b>	<b>25,26</b>	<b>0,45</b>	<b>0,38</b>	<b>0,016</b>
T4 – Trèfles intercalaires à l'automne	1,49	26,10	0,45	0,39	0,036
T5 – Trèfles intercalaires au printemps	1,46	27,07	0,47	0,40	0,266
<b>Trèfles intercalaires</b>	<b>1,47</b>	<b>26,58</b>	<b>0,46</b>	<b>0,39</b>	<b>0,161</b>