

RAPPORT FINAL IA 216694

DÉTERMINATION TERRAIN DU COEFFICIENT D'EFFICACITÉ AZOTÉ ET DU DÉLAI DE LIBÉRATION DU N DES FIENTES GRANULÉES DE POULES PONDEUSES DANS LES CULTURES DU MAÏS-GRAIN ET DE L'AVOINE.



Auteur et responsable scientifique : Christine Landry, agr., biologiste PhD

Co-auteurs : Mylène Marchand-Roy, J. Mainguy et M. Paradis,

Rapport présenté à : Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire, Cultivons l'avenir2,
AAC-MAPAQ

Date : 27 mars 2019

Projet IRDA # : 400005

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

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

Notre mission

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

Notre vision

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

Pour en savoir plus

www.irda.qc.ca

PARTENAIRES



Détermination terrain du coefficient d'efficacité azoté et du délai de libération du N des fientes granulées de poules pondeuses dans les cultures du maïs-grain et de l'avoine.

Rapport final IA 216694, 2017-2018.

Présenté à : **Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire, Cultivons l'avenir 2, AAC – MAPAQ.**

Préparé par :

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

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

Julie Mainguy, agr.
Professionnelle de recherche, IRDA

Mélissa Paradis, biol. M.Sc.
Professionnelle de recherche, IRDA

LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :

Landry, C., M. Marchand-Roy, J. Mainguy et M. Paradis. 2019. Détermination terrain du coefficient d'efficacité azoté et du délai de libération du N des fientes granulées de poules pondeuses dans les cultures de maïs-grain et avoine. Rapport final IA 216694. IRDA. 50 pages.

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

ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

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

ÉQUIPE DE RÉDACTION DU RAPPORT

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

COLLABORATEURS

- Bayazid Adda agr., Club Agroenvironnemental de la Rive-Nord
- Mélanie Dionne agr. Club Agroenvironnemental de la Rive-Nord
- Félix Lavoie-Lochet, technicien agricole, IRDA
- Jérémie Vallée, B. Sc., IRDA
- Antoine Lamontagne, technicien agricole, IRDA

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

Christine Landry

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

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

Téléphone : 418 643-2380, poste 640

Courriel : christine.landry@irda.qc.ca

REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire, un programme issu de l'accord du cadre Cultivons l'avenir conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et Agriculture et Agroalimentaire Canada. Les auteurs remercient également les nombreuses autres personnes qui ont contribué au succès du projet; technicien agricole, ouvriers des fermes expérimentales de l'IRDA à Saint-Lambert-de-Lauzon et Deschambault, personnel technique des différents laboratoires d'analyse de l'IRDA, ainsi que les étudiants d'été.

RÉSUMÉ

Les fientes de poules en granulés (FPG) utilisées comme source de fertilisant azote (N) doivent être apportées selon un coefficient d'efficacité azoté (CEN) adéquat pour éviter des baisses de rendements (sous-fertilisation, excès de N) ou une hausse des risques de pollution diffuse. Considérer un CEN trop faible entraîne en effet l'épandage d'une quantité plus grande que nécessaire de N, mais aussi de phosphore (P). La difficulté réside ainsi dans le choix du CEN juste puisqu'il n'en existe pas de spécifique aux FPG. La 1^{ère} éd. du Guide de référence en fertilisation (GREF) (CRAAQ 2003) conférait au lisier de volailles un CEN élevé (75-85 %). Cependant, la 2^e éd. (CRAAQ 2010) mène au calcul de CEN beaucoup plus bas (cultures nitrophiles : CE à 60-70 %, autres : CE à 50-60 %; C/N=8). Ceci ne correspond pas à la performance des FPG observée en contexte de production commerciale ou de recherche. Des essais ont donc été réalisés à la Station de recherche de Deschambault de l'IRDA à l'été 2017 et 2018 afin de caractériser chimiquement les FPG, de déterminer leur impact sur les flux du nitrate (NO_3) du sol en saison, la nutrition N et le rendement des cultures et d'établir leur CEN pour une culture nitrophile (maïs-grain) et une culture non exigeante en N (avoine). Il en ressort que les FPG sont constituées à 75 % de C facilement minéralisable (ISB=13), dont 16 % de C labile (C_{eau}), et que leur contenu en N_{total} est à 96 % organique (N_o). Cette combinaison permet une minéralisation rapide du N_o et un relâchement hâtif de nitrate (NO_3), tel que le corroborent le suivi *in situ* des flux de NO_3 sur toute la saison pour les deux cultures. De même, les FPG ont été efficaces à nourrir les cultures en N, en plus de stimuler l'activité biologique du sol aux doses appliquées pour le maïs-grain. Leur efficacité fertilisante azotée a d'ailleurs été élevée. Il n'a pas été possible de statuer sur un CEN spécifique, mais les intervalles suggérés sont tous plus élevés que les CEN du GREF (2010). D'une part, l'engrais de synthèse (ECV) a entraîné un prélèvement de luxe. Ceci vient artificiellement abaisser les CEN calculés selon ce paramètre (avoine : CEN = 60-64 %, maïs : CEN=74-90 %). Ces derniers se sont donc avérés plus bas que les CEN identifiés selon les rendements (avoine : CEN=80 %, maïs : CEN=90-110 %). D'autre part, comme il n'a pas été possible d'obtenir de courbe de réponse complète des rendements, dû à l'efficacité plus grande que prévue des FPG, ce paramètre ne permet pas non plus de statuer sur le CEN maximal. Dans l'attente d'essais supplémentaires, un CEN plus élevé pourrait toutefois être utilisé dans les cultures non-nitrophiles, sans dépasser 80 %. Une valeur moyenne de ≈ 70 % pourrait être proposée. Dans le cas du maïs-grain, un CEN entre 85-90 % semble sécuritaire. Il ressort également que le CEN est plus élevé lorsque les FPG sont utilisés pour fertiliser le maïs-grain que l'avoine. Le caractère nitrophile de la culture, couplé au mode d'application en bande et fractionnée, contribuent probablement à cette meilleure efficacité. Les FPG ont tout de même été performantes dans la culture de l'avoine, mais l'application à la volée tendait à induire un délai suivant l'application de l'engrais en comparaison de l'ECV. Enfin, l'emploi des FPG, mêmes aux doses les plus grandes testées, n'entraîne pas de hausse du NO_3 ou du P soluble (P_{eau}) résiduels, ni de la fourniture en N du sol en post-récolte et ils présentent un des meilleurs ratio $N_{\text{eff}}/P_{\text{total}}$, contribuant à diminuer les apports de P excédentaires.

TABLE DES MATIÈRES

1	Description du projet.....	5
1.1	Introduction.....	5
1.2	Objectifs.....	7
2	Matériel et méthodes.....	8
2.1	Mise en place de l'expérience.....	8
2.2	Traitements.....	11
2.3	Dispositif expérimental et analyses statistiques.....	13
2.4	Suivi in situ des MEI.....	14
2.5	Collecte des données.....	16
2.5.1	Analyses physiques, chimiques et biologiques du sol et des FPG.....	16
2.5.2	Analyse des MEI.....	17
2.5.3	Développement et nutrition des plants et rendements.....	18
2.5.4	Calcul des CE.....	18
3	Résultats et discussion.....	19
3.1	Conditions climatiques.....	19
3.2	Dynamique de fourniture en N minéral des FPG.....	20
3.2.1	Flux de nutriments sur les MEI.....	20
3.2.2	Caractérisation physico-chimique des granules de fientes de poules.....	24
3.2.3	Indicateurs de l'activité microbiologique en saison.....	26
3.3	Nutrition et productivité de la culture.....	29
3.4	Coefficient d'efficacité azoté des fientes de poule en granulés.....	36
3.5	Azote et phosphore résiduel post-récolte.....	38
4	Conclusion.....	41
	Références.....	42
5	Annexe 1.....	45
5.1	Tableaux des apports de nutriments.....	45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques du sol avant l'implantation des dispositifs au printemps.	9
Tableau 2. Calendrier des principales opérations culturales dans le dispositif expérimental en avoine, 2017 et 2018.	9
Tableau 3. Calendrier des principales opérations culturales dans le dispositif expérimental en maïs-grain, 2017 et 2018.	9
Tableau 4. Régies de fertilisation comparées dans les cultures d'avoine et de maïs-grain, 2017 et 2018.	12
Tableau 5. Résumé des traitements de fertilisation comparés selon les divers CEN testés et du N_{total} apporté par les engrais à la culture d'avoine en 2017 et 2018.	12
Tableau 6. Résumé des traitements de fertilisation comparés selon les divers CEN testés et du N_{total} apporté par les engrais à la culture du maïs en 2017 et 2018.	12
Tableau 7. Périodes de pose-retrait des membranes pour les cultures d'avoine et du maïs-grain en 2017 et 2018.	15
Tableau 8. Caractéristiques des fientes de poules en granulés (FPG) en 2017 et 2018.	25
Tableau 9. Caractéristiques chimiques d'engrais verts et d'engrais de ferme.	25
Tableau 10. Valeurs de différents indicateurs d'activité microbiologique du sol en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture de l'avoine avant épiaison (13 juillet 2017).	26
Tableau 11. Valeurs de différents indicateurs d'activité microbiologique du sol en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture de l'avoine avant épiaison (9 juillet 2018).	27
Tableau 12. Valeurs de différents indicateurs d'activité microbiologique du sol en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture du maïs au stade soies (9 août 2017).	28
Tableau 13. Valeurs de différents indicateurs d'activité microbiologique du sol en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture du maïs au stade soies (9 août 2018).	28
Tableau 14. Taux d'utilisation apparent (TUA) du N des engrais et coefficient d'efficacité azoté (CEN) en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG pour la culture de l'avoine, en 2017 et 2018.	37
Tableau 15. Taux d'utilisation apparent (TUA) du N des engrais et coefficient d'efficacité azoté (CEN) en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG pour la culture du maïs-grain, en 2017 et 2018.	38
Tableau 16. Potentiel de minéralisation de l'azote et N et P solubles résiduels du sol en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture de l'avoine, le 12 septembre 2017.	39
Tableau 17. Potentiel de minéralisation de l'azote et N et P solubles résiduels du sol en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture de l'avoine, le 27 août 2018.	39
Tableau 18. Potentiel de minéralisation de l'azote et N et P solubles résiduels du sol en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture du maïs-grain, le 13 novembre 2017.	40
Tableau 19. Potentiel de minéralisation de l'azote et N et P solubles résiduels du sol en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture du maïs-grain, le 25 octobre 2018.	40

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Dispositifs en avoine et maïs-grain, 28 juin 2017, Deschambault.....	8
Figure 2. Mise en place de l'engrais minéral et des FPG dans les parcelles du dispositif en avoine, 22 mai 2018.	10
Figure 3. Application manuelle des FPG dans le sillon, dispositif en maïs-grain, 24 mai 2018.....	11
Figure 4. Dispositif expérimental - avoine.....	14
Figure 5. Dispositif expérimental – maïs-grain.....	14
Figure 6. Membrane d'échange ionique prête à être installée au champ, dispositif maïs-grain, saison 2018.	15
Figure 7. Données climatiques aux sites d'essais pour la saison de croissance 2017.....	25
Figure 8. Données climatiques aux sites d'essais pour la saison de croissance 2018.....	20
Figure 9. Flux de nitrate dans les sols fertilisés avec de l'engrais de synthèse ou les fientes granulées de poules (CEN à 0,60) pendant la saison de croissance de l'avoine en 2017.....	21
Figure 10. Flux de nitrate dans les sols fertilisés avec de l'engrais de synthèse ou les fientes granulées de poules (CEN à 0,91) pendant la saison de croissance de l'avoine en 2018.....	22
Figure 11. Flux de nitrate dans les sols fertilisés avec de l'engrais de synthèse ou les fientes granulées de poules (CEN à 0,70) pendant la saison de croissance du maïs en 2017.....	23
Figure 12. Flux de nitrate dans les sols fertilisés avec de l'engrais de synthèse ou les fientes granulées de poules (CEN à 0,90) pendant la saison de croissance du maïs en 2018.....	23
Figure 13. Rendements en grains en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture de l'avoine, en 2017 et 2018.	30
Figure 14. Contenu en azote des feuilles d'avoine au stade avant épisaison, en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture de l'avoine, le 13 juillet 2017 et le 9 juillet 2018..	31
Figure 15. Prélèvements en N par la biomasse aérienne des plants en saison, en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture de l'avoine, en 2017 et 2018.....	36
Figure 16. Rendements en grains de maïs en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG, en 2017 et 2018.....	34
Figure 17. Contenu en azote des feuilles d'avoine au stade avant épisaison, en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture de l'avoine, le 9 août en 2017 et en 2018.	35
Figure 18. Prélèvements en N par la biomasse aérienne des plants en saison, en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture de l'avoine, en 2017 et 2018.	36

1 DESCRIPTION DU PROJET

1.1 INTRODUCTION

Les fientes de poules séchées et granulées (FPG) sont une méthode efficace de gestion des fumiers pour les producteurs de volailles afin d'en réduire le volume et d'en faciliter la vente comme fertilisants sur le marché. Depuis 2004, la production d'œufs au Québec ne cesse de s'accroître. En parallèle, plusieurs compagnies spécialisées dans la granulation et l'ensachage des FPG se sont développées (ex : Acti-Sol, COOP). Les FPG sont ainsi devenues une source populaire d'azote (N), tant pour les producteurs biologiques que conventionnels. D'une part, le fait qu'il s'agit d'un produit sec et offert sous forme granulée facilite sa manutention et son entreposage. De plus, cette forme permet son application avec la machinerie conventionnelle, en bande et fractionnée. D'autre part, ses caractéristiques chimiques en font un engrais azoté intéressant. Il présente, entre autres, un ratio $N_{\text{efficace}}/P_{\text{total}}$ très avantageux, ce qui permet des apports moindres de P pour une même valeur cible de N disponible à fournir. Ensuite, il a un contenu en carbone labile élevé, couplé à un N organique (N_o) facilement minéralisable (Landry et coll. 2019). Les FPG vont donc fournir rapidement du N minéral aux cultures suivant leur incorporation au sol (Landry et coll. 2019). Toutefois, plusieurs questions importantes demeurent en suspens sur la dynamique de fourniture en N minéral du produit.

Sur le marché des engrais, le Règlement sur les engrais (Canada 2019) stipule que l'étiquetage doit indiquer la quantité minimale de N_{total} du produit. Ceci peut induire l'acheteur d'engrais organiques (EO) en erreur puisque dans le cas des engrais minéraux, la formulation exprime le contenu en N minéral soluble (nitrate (NO_3) ou ammonium (NH_4)) étant garanti 100 % disponible i.e. efficace. L'information est donc toute autre avec le N_{total} inscrit pour les EO puisque celui-ci est composé souvent à plus de 90 % de N_o ne fournissant du N disponible qu'une fois minéralisé par les microorganismes du sol (Knaum 2005). Un coefficient d'efficacité du N (CEN) doit donc être appliqué pour prendre en compte ce délai de minéralisation du N_o . Pour les engrais de ferme utilisés depuis des décennies, des CEN sont disponibles depuis longtemps et les doses à employer mieux connues. Cependant, pour les produits commerciaux dont la présentation est similaire aux engrais minéraux, l'usage à grande échelle est relativement récent, les CEN n'ont pas été testés au champ et la valeur de N_{total} de l'analyse garantie est souvent interprétée à tort en contenu de N efficace (N_{eff}).

L'emploi d'un CEN adéquat est toutefois primordial pour éviter des baisses de rendement en cas de sous-fertilisation. À l'inverse, considérer un CEN trop faible entraîne l'épandage d'une quantité plus grande que nécessaire d'EO, ce qui hausse inutilement les coûts et les risques de pollution diffuse (ex. lessivage du nitrate, enrichissement en phosphore (P)) ou les pertes de rendement par excès de N pour la culture (ex: risques de verse des céréales). Par ailleurs, puisque les apports de P sont réglementés au Québec par le REA (Québec 2019), les quantités applicables d'EO diminuent rapidement avec la hausse des teneurs en P du sol. En cas de sol à forte teneur en P, un faible CEN entraîne donc l'apport supplémentaire de N additionnel d'une autre source et il devient difficile de satisfaire aux besoins azotés des cultures, surtout les plus nitrophiles. Il s'agit d'ailleurs d'une contrainte importante dans certaines régions, telle la Montérégie, où une majorité des sols sont saturés en P (Beaudet et coll. 2003).

Le cœur du problème réside ainsi dans le choix du bon CEN puisqu'il n'en existe pas d'officiel pour les FPG. La 1^{ère} édition du Guide de référence en fertilisation (GREF) (CRAAQ 2003) conférait au lisier de volailles un CEN élevé (75-85 %). Cependant, la 2^e édition (CRAAQ 2010) mène au calcul de CEN beaucoup plus bas (cultures nitrophiles CE à 60-70 % (C/N de 8); moins exigeantes CE à 50-60 % (C/N de 8)). Toutefois, ceci ne correspond pas à la performance des FPG observée en contexte de production commerciale ou de recherche. Par exemple, il a été démontré que le N des FPG pouvait soutenir une production en fraises à jour neutre similaire à celle d'engrais minéraux (Landry et Boivin 2012). Plusieurs travaux en agriculture biologique ont aussi montré leur grande efficacité en comparaison d'EO plus traditionnels (Landry et coll. 2018, 2019). En fait, dans le GREF (CRAAQ 2010) (Tableau 10.4, 7), le CEN des fumiers solides se calcule avec les mêmes équations (selon les cultures) puisque les EO ont été regroupés selon qu'ils soient solides ou liquides. Aucune des références utilisées (N'Dayegamiye et coll. 2004, Gales et coll. 2006) pour établir ces CEN ne portent cependant sur les FPG, mais plutôt sur les fumiers de poulets de chair, divers fumiers frais de bovins ou des boues de papetières. Ces produits présentent toutefois une nature du carbone (C) et du N bien différente des FPG. Tout d'abord, contrairement aux fumiers, les FPG ne sont pas mélangées à des litières riches en C stable. Elles sont granulées pures. À cela s'ajoute qu'elles sont en soi constituées principalement de C labile, i.e. très facilement minéralisable, principale source d'énergie des microorganismes bénéfiques (MOB) du sol (McGill et coll. 1986). Ceci conduit à une plus grande disponibilité du N pour les cultures puisque la minéralisation du N_o est activée par l'énergie fournie aux MOB. Ce haut contenu en C labile confère aussi aux FPG un très faible indice de stabilité biologique (ISB). Un ISB faible se traduit par un taux élevé de minéralisation du C et du N_o et donc de libération de NO₃ par de l'EO lorsqu' incorporé au sol. Selon cet indice, l'ISB des FPG (ISB=13) est donc beaucoup plus près de celui des boues brutes de lisier de porc que de ceux des fumiers bruts de bovin (ISB=47) ou des composts de boues de papetières (ISB=65), ce qui laisse présager d'un relâchement beaucoup plus intense et rapide de NO₃ que ces autres produits.

À ce propos, le délai de libération du NO₃ des FPG une fois au sol est un autre paramètre de gestion des apports méconnu et important, d'autant plus que si la FPG est destinée à être appliquée en bandes et fractionnée. Un des principaux défis en fertilisation organique est en effet d'arriver à synchroniser la fourniture en N disponible avec les périodes de besoins des cultures, un décalage ayant un effet néfaste sur les rendements, la qualité ou la conservation des récoltes. Des incubations de sols en laboratoire suggèrent que ce délai pourrait être très court avec les FPG (Riuz-Diaz 2007). Quelques expériences récentes en champ avec le maïs et la pomme de terre ont aussi démontré que les FPG libèrent du N rapide au printemps (Landry et coll. 2018, 2019). Toutefois, ce délai n'est toujours pas connu en comparaison du délai d'action des engrais de synthèse. Ceci complique la planification des doses et des moments d'application (ex: fractionnement) (Nguyen 2010).

Globalement, les incertitudes qui persistent sur le CEN et le temps de libération du N des FPG compliquent leur usage (SPGBQ-FABQ, 2015; comm. pers) et entraînent des risques économiques et environnementaux réels. La montée de l'agriculture biologique, dont l'expansion est freinée par le manque de source de N efficace et qui se tourne de plus en plus vers les FPG, justifie aussi le besoin d'avoir ces informations. Il s'avère donc pressant d'établir concrètement ces paramètres avec une culture exigeante en N et une moins exigeante, soient le maïs-grain et l'avoine qui sont parmi les plus cultivées au Québec.

1.2 OBJECTIFS

Globalement, ce projet vise à fournir les informations nécessaires à l'établissement d'une régie de fertilisation adéquate et performante valorisant les FPG.

De façon plus détaillée, ce projet a été conçu afin de :

- 1) Établir concrètement les CE du N (CEN) des FPG pour l'avoine et le maïs-grain en comparaison du N des engrais minéraux;
- 2) Déterminer les délais de libération du N et P des FPG;
- 3) Comparer les dynamiques de N et P disponibles sur la saison selon les traitements et;
- 4) Vérifier l'impact des doses de FPG sur le NO_3 et le PO_4 solubles résiduels du sol au moment de la récolte, ainsi que sur le potentiel toujours présent de relâchement de NO_3 par minéralisation en post-récolte.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 MISE EN PLACE DE L'EXPÉRIENCE

Le projet s'est déroulé à la Station de recherche expérimentale de l'IRDA à Deschambault (Québec) pendant les saisons de croissances 2017 et 2018 (Figure 1). Les essais ont été tenus dans des sols de type loam/loam limoneux dont les caractéristiques sont présentées au Tableau 1. Deux dispositifs ont été réalisés; un en avoine, soit une culture non-nitrophile et l'autre en maïs-grain soit une culture nitrophile. Cette approche a été choisie étant donné que le tableau 10.4 de calcul des CEN du GREF (CRAAQ 2010) présente des équations distinctes pour les cultures nitrophiles et celles moins exigeantes en N. Le cultivar d'avoine (variété SYNEXTRA certifiée #1 non-traitée) et l'hybride de maïs-grain (variété DEKALB 3007-AR, 2350 UTM) ont été sélectionnés selon les recommandations du Guide Réseau Grande Cultures du Québec (CEROM 2016). L'avoine a été semée aux taux de 148 kg ha^{-1} (375 gr m^{-2}) par un semoir de marque International 510 porté. Le maïs-grain a été semé à l'aide d'un semoir deux rangs dont l'espacement entre les rangs était de 0,78 m et l'espacement entre les grains de 6,5 pouces, pour un taux théorique de $77\ 650 \text{ grains ha}^{-1}$. Les dates des principales opérations culturales figurent aux Tableaux 2 et 3.



Figure 1. Dispositifs en avoine et maïs-grain, 28 juin 2017, Deschambault.

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques du sol avant l'implantation des dispositifs au printemps.

Paramètres	2017		2018	
	Avoine	Maïs	Avoine	Maïs
pH _{eau}	6,14	6,31	5,63	6,07
Matière organique (%)	4,0	4,3	4,8	4,2
C _{total} (%)	1,74	1,81	2,05	1,81
N _{total} (%)	0,13	0,13	0,15	0,13
N-NO ₃ (kg ha ⁻¹ b.s.)	18,7	16,7	29,5	20,0
N-NH ₄ (kg ha ⁻¹ b.s.)	6,6	5,1	4,5	4,7
C/N	13,1	13,4	14,1	14,1
Texture	Loam limoneux	Loam	Loam limoneux	Loam
Densité apparente (g cm ⁻³)	1,22	1,17	1,19	1,14
Éléments majeurs Mehlich-3 (kg ha ⁻¹ b.s.)				
P	237	229	145	159
K	183	188	123	91
Ca	2809	2967	1375	2027
Mg	94	75	32	53
Al (mg kg ⁻¹)	1665	1656	1755	1728
P/Al (%)	6,3	6,2	3,7	4,1

Tableau 2. Calendrier des principales opérations culturales dans le dispositif d'avoine, 2017 et 2018.

Opérations dispositif Avoine	2017		2018	
	DATE	JAS	DATE	JAS
Piquetage, caractérisation du sol et densité apparente	29 mai	0	22 mai	0
Semis	29 mai	0	22 mai	0
Application de l'engrais organique (EO) et de synthèse (ECV)	29 mai	0	22 mai	0
Stade tallage : prélèvements de plants	28 juin	30	29 juin	38
Stade avant épiaison: prise de sols, plants et feuilles	13 juil.	45	9 juil.	48
Récolte: grains et pailles	12 sept.	106	24 août	94
Récolte: sol et densité apparente	12 sept.	106	27 août	97

Tableau 3. Calendrier des principales opérations culturales dans le dispositif en maïs-grain, 2017 et 2018.

Opérations dispositif Maïs-grain	2017		2018	
	DATE	JAS	DATE	JAS
Piquetage, caractérisation du sol et densité apparente	29 mai	-2	22 mai	-1
Semis	31 mai	0	23 mai	0
Application de l'engrais de démarrage (ECV, EO)	2 juin	2	24 mai	1
Stade 7-8 feuilles: prélèvements de plants	10 juil.	40	11 juil.	49
Fractionnement d'engrais (ECV, EO)	10 juil.	40	11 juil.	49
Stade soies: prélèvement de sol, plants et feuilles	9 août	70	9 août	78
Récolte: grains, biomasses et sol	13 nov.	166	25 oct.	155

Dans le dispositif en culture d'avoine, les besoins en N ont été établis à 60 kg N ha^{-1} (CRAAQ 2010). Les besoins en P et potassium (K) ont été fixés en fonction de l'analyse de sol (Mehlich-3), à chacune des années, selon les recommandations du GREF (CRAAQ 2010) pour la culture de l'avoine. Dans les traitements fertilisés au moyen des FPG, aucune application supplémentaire de P et K n'a été nécessaire en 2017, les besoins de la culture étant couverts par les apports de FPG (Annexe 1). En 2018, un apport supplémentaire de K sous forme d'engrais de synthèse (ECV) a toutefois été nécessaire (Annexe 1). Les deux années, les engrais de synthèse NPK et les FPG ont été appliqués en totalité en pré-semis à la volée, à la main, en ayant préalablement délimité les parcelles (Figure 2). Les engrais ont par la suite été incorporés sur 3-4 pouces de profondeur par un passage de vibroculteur.



Figure 2. Application de l'engrais de synthèse et des FPG à la volée, dispositif en avoine, 22 mai 2018.

Dans le dispositif en maïs-grain, les besoins en N ont été établis à 160 kg N ha^{-1} (CRAAQ 2010). Les besoins en P et K ont été fixés selon l'analyse de sol du champ (Mehlich-3), à chacune des années, selon les recommandations du GREF pour la culture du maïs-grain (CRAAQ 2010). Dans les traitements fertilisés au moyen des FPG, aucune application supplémentaire de P et K n'a été nécessaire en 2017, les besoins de la culture étant couverts par les FPG (Annexe 1). En 2018, un apport supplémentaire de K sous forme d'ECV a toutefois été nécessaire dans le traitement T6 (Annexe 1). Les deux années, l'ECV et les FPG ont été appliqués en bande, à la main, à raison de $50 \text{ kg N}_{\text{eff}} \text{ ha}^{-1}$ à la plantation, dans un sillon de 5 cm de profondeur situé à 7 cm des semences (Figure 3). La totalité des engrais P et K de synthèse a également été apportée à ce moment. Les sillons ont été refermés manuellement par la suite. Une seconde application d'engrais a été effectuée au stade 6-7 feuilles du maïs-grain, permettant alors de combler les $110 \text{ kg N}_{\text{eff}} \text{ ha}^{-1}$ manquants. La dose fractionnée a aussi été apportée en bande, à la main, 50 % de chaque côté des plants et incorporée au sarcler par la suite. Dans les deux cultures, les engrais de synthèse qui ont été utilisés sont le nitrate d'ammonium calcique (27-0-0), le superphosphate triple (0-46-0) et le sulpoMag (0-0-22-11%Mg) pour les apports en azote (N) phosphore (P_2O_5) et potassium (K_2O), respectivement. Les FPG provenaient de la compagnie Acti-sol.



Figure 3. Application de l'engrais de synthèse et des FPG dans le sillon, dispositif en maïs-grain, 24 mai 2018.

Outre la fertilisation, la régie de production était similaire à celle des producteurs d'avoine et de maïs-grain de la région. La régie de protection et de développement des cultures a été faite selon les recommandations des agronomes du Club Agroenvironnemental de la Rive-Nord (CARN) qui ont suivi de façon hebdomadaire les cultures lors des saisons 2017 et 2018. Les avertissements du Réseau d'avertissement phytosanitaires (RAP) ont également été consultés.

2.2 TRAITEMENTS

Chaque dispositif expérimental contenait six traitements, incluant un témoin sans N (ON) permettant de connaître la fourniture naturelle en N du sol (T1), un traitement en régie conventionnelle (ECV) fertilisé avec des engrais de synthèse selon les recommandations du GREF (CRAAQ 2010) pour les cultures d'avoine ou de maïs-grain (T2) et quatre doses croissantes de FPG déterminées selon les CEN sélectionnés *a priori* (T3 à T6) (Tableau 4). En 2017, le choix des CEN s'est effectué en prenant un CEN inférieur, un CEN équivalent et deux CEN supérieurs à celui calculé avec les équations du GREF (CRAAQ 2010) afin d'obtenir une courbe de réponse permettant un plafonnement des rendements. Suivant les résultats de l'an 1, les CEN de 2018 ont été haussés de 20 % vu que le plateau n'avait pas été atteint avec les CEN de 2017 (Section 3.4) dû à une efficacité plus grande que prévue du N des FPG. En 2017, les doses d'apport de FPG ont pu être calculées sur la caractérisation des granules disponibles avant le début des tests au champ. Par contre, en 2018, en attente des résultats de caractérisation, les doses ont été calculées selon la valeur de N_{total} de 2017. Étant donné que le contenu en N_{total} de 2018 s'est finalement avéré plus bas que pour les granules de 2017 (47,4 kg N T⁻¹ au lieu de 54,1 kg T⁻¹), les CEN réellement testés dans l'avoine diffèrent légèrement de ce qui avaient été prévu. Dans le cas du maïs-grain, il a été possible de rajuster les apports au fractionnement. Les CEN sont donc ceux qui avaient été prévus. Les CEN des deux cultures et des deux années sont résumés au Tableau 4. Les doses d'apports de FPG (t ha⁻¹), et incidemment de N_{total} , sont quant à eux résumés aux tableaux 5 et 6.

Tableau 4. Régies de fertilisation comparées dans les cultures d'avoine et de maïs-grain, 2017 et 2018.

Description des régies	Traitement	AVOINE		MAÏS-GRAIN	
		2017	2018	2017	2018
Témoin sans engrais N (ON)	T1	ON-PK	ON-PK	ON-PK	ON-PK
Régie conventionnelle NPK	T2	NPK	NPK	NPK	NPK
Régie FPG	T3	CEN 0,50	CEN 0,80 (70%) ¹	CEN 0,60	CEN 0,80
	T4	CEN 0,60	CEN 0,91 (80%)	CEN 0,70	CEN 0,90
	T5	CEN 0,70	CEN 1,02 (90%)	CEN 0,80	CEN 1,00 ²
	T6	CEN 0,80	CEN 1,14 % (100%)	CEN 0,90	CEN 1,10

¹ Entre parenthèse, CEN visé *a priori* avant dosage en laboratoire du contenu réel en N_{total} des granules.

² Un CEN de 1,00 (100 %) signifie des apports de N_{total} égaux sous forme de FPG ou d'ECV.

Tableau 5. Résumé des traitements de fertilisation comparés selon les divers CEN testés et du N_{total} apporté par les engrais à la culture d'avoine en 2017 et 2018.

Traitements Dispositif Avoine	2017			2018		
	CEN (%)	Dose FPG t ha ⁻¹	N _{total} kg ha ⁻¹	CEN (%)	Dose FPG kg ha ⁻¹	N _{total} kg ha ⁻¹
T1 : Témoin sans engrais N - ON	-	0	0	-	0	0
T2 : Régie conventionnelle avec engrais de synthèse (ECV)	100	0	60	100	0	60
T3 : Dose 1 de fientes de poules en granulés (FPG)	50	2,22	120	80	1,58	75
T4 : Dose 2 de FPG	60	1,85	100	91	1,39	66
T5 : Dose 3 de FPG	70	1,58	86	103	1,23	58
T6 : Dose 4 de FPG	80	1,39	75	114	1,11	53

Tableau 6. Résumé des traitements de fertilisation comparés selon les divers CEN testés et du N_{total} apporté par les engrais à la culture du maïs-grain en 2017 et 2018.

Traitements Dispositif Maïs-grain	2017			2018		
	CEN (%)	Dose FPG t ha ⁻¹	N _{total} kg ha ⁻¹	CEN (%)	Dose FPG kg ha ⁻¹	N _{total} kg ha ⁻¹
T1 : Témoin sans engrais N - ON	-	0	0	-	0	0
T2 : Régie conventionnelle avec engrais de synthèse	100	0	160	100	0	160
T3 : Dose 1 de fientes de poules en granulés (FPG)	60	4,93	267	80	4,22	200
T4 : Dose 2 de FPG	70	4,22	229	90	3,75	178
T5 : Dose 3 de FPG	80	3,70	200	100	3,38	160
T6 : Dose 4 de FPG	90	3,29	178	110	3,07	145

Afin de suivre la température du sol et son humidité, variables majeures impliquées dans le processus de minéralisation du N_o et dans la diffusion des ions NO₃ et PO₄, des capteurs de températures (TX-80 Hortau) et des sondes d'humidité (tensiomètres TX3 d'Hortau et sondes TDR) ont été installés dans les parcelles T2 et T4 de deux des trois blocs. La température et l'humidité étaient suivies au niveau des racines (6 po). Aucune irrigation n'a eu cours pendant l'essai. L'eau apportée aux cultures provenait uniquement des précipitations. Celles-ci ont été enregistrées en continu par un pluviomètre (Onset modèle RG3-M) installé aux sites d'essais. Les conditions de température de l'air (°C Max et °C Min) ont été enregistrées à la station météorologique de Deschambault SM (CMVH) (Latitude : 46.676783; Longitude : -71.924858) située tout près du site d'essai.

2.3 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ET ANALYSES STATISTIQUES

Les six traitements à l'étude étaient répétés trois fois, selon un plan en blocs complets aléatoires, pour un total de 18 parcelles par dispositif (Figures 4 et 5). Les deux dispositifs ont été répétés pendant deux années consécutives sur des sites différents pour éviter un effet résiduel des engrais. Les parcelles d'avoine mesuraient 4 m de large par 9 m de longueur, pour une superficie totale de 650 m², alors que les parcelles de maïs-grain étaient composées de 8 rangs de 10 m de longueur, pour une superficie totale d'essai de 1 125 m². Un plan d'échantillonnage a été élaboré pour chacune des cultures, prédéterminant les zones de prélèvements de sol et de plants afin qu'aucune mesure ne soit effectuée dans les zones de mesure du rendement ou du suivi *in situ* des flux de N et P.

Toutes les analyses statistiques du projet ont été effectuées avec le logiciel SAS, version 9.4. Une analyse de la variance a été réalisée pour chacune des variables à l'étude afin d'étudier les effets des traitements de fertilisation sur ces variables. Un modèle mixte normal a été ajusté avec la procédure PROC MIXED de SAS (Littell et coll. 2006). L'effet fixe du modèle était le traitement et les effets aléatoires étaient les blocs et l'erreur résiduelle. Les degrés de liberté ont été calculés avec l'approximation de Kenward-Roger. Dans tous les cas, une analyse graphique des résidus a servi à vérifier les hypothèses sous-jacentes à la validité du modèle. Lorsque l'effet d'un facteur ou d'une interaction était déclaré significatif par le test de F, les différences entre les moyennes ont été explorées au moyen de tests de t. Ces analyses ont été effectuées par année et par période, sauf pour les membranes d'échange ionique (MEI) (voir section 2.4). Dans cas de l'analyse des MEI, les effets fixes de la période et de l'interaction traitement X période ont été ajoutés à l'effet des traitements. De plus, l'effet période est considéré comme un effet de mesures répétées. Une structure de corrélations est modélisée afin de tenir compte des corrélations entre ces mesures.

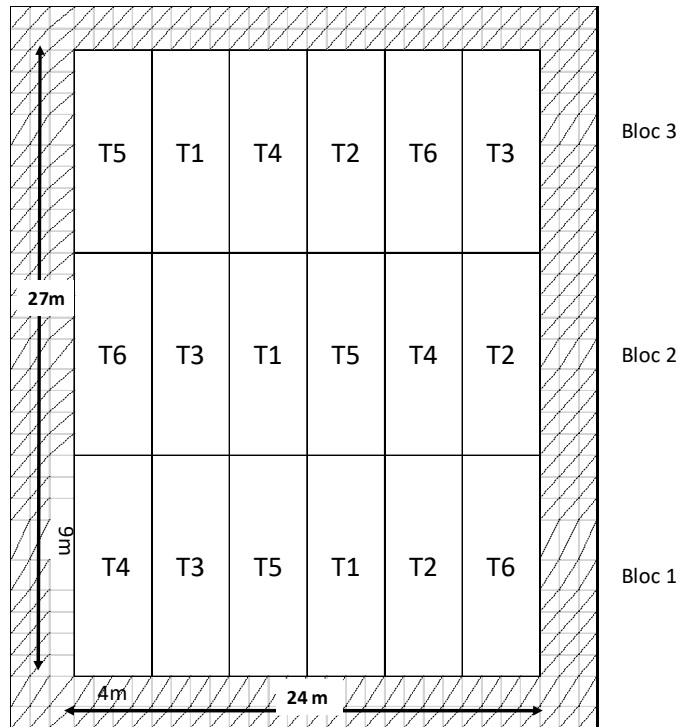


Figure 4. Dispositif expérimental – avoine

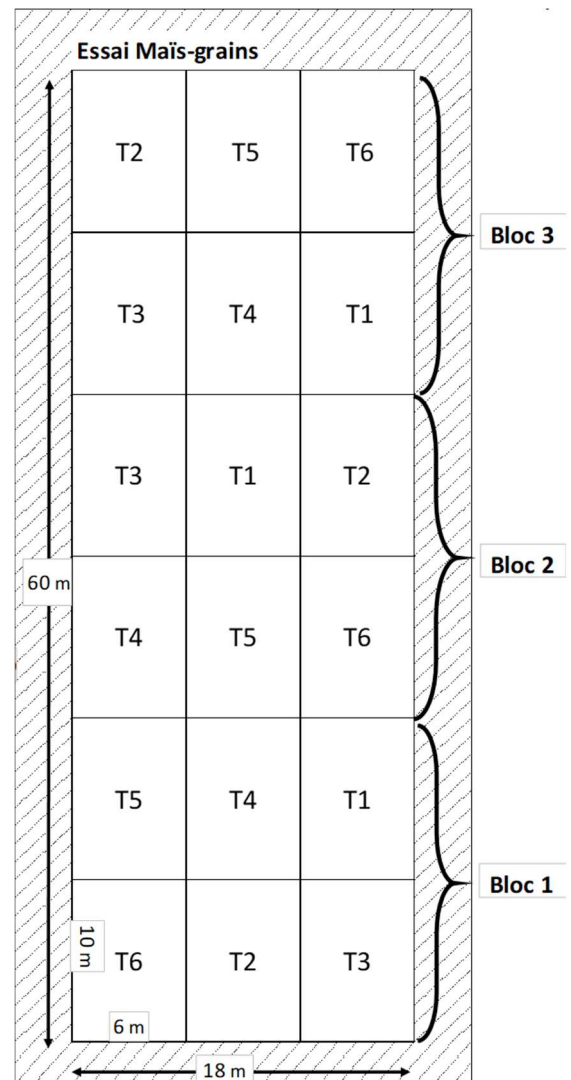


Figure 5. Dispositif expérimental – maïs-grain

2.4 SUIVI IN SITU DES MEI

Une fois les semis effectués et l'engrais apporté, trois paires de MEI ont été installées dans les trois parcelles du traitement T2 (régie conventionnelle NPK) et T4 (CEN du GREF) (Figure 6). Chacune des paires de MEI était constituée d'une membrane anionique pour capter le $N-NO_3$ et le $P-PO_4$ (AR204-SZRA, Ionics Inc., Watertown, MA) et d'une membrane cationique pour capter le $N-NH_4$ (CR67-HMR, Ionics Inc., Watertown, MA). Les MEI sont de petites plaquettes de 5,4 x 2,4 cm, faites de vinyle qui contiennent des groupements chargés, saturés d'un contre-ion. Ce contre-ion est relâché dans le sol en échange des ions cibles pour lesquels les groupements possèdent une affinité beaucoup plus grande. Ceci assure la sorption *in situ*, en continu, des ions ciblés par l'étude

et leur retenue sur les MEI jusqu'à ce que celles-ci soient récupérées au champ et que les ions soient extraits au laboratoire. Les MEI ont été insérées verticalement dans la couche utile de sol de façon à couvrir du 8-10^e au 13-15^e cm de profondeur. Dans le maïs-grain, elles étaient positionnées à environ 10 cm des plants. Dans l'avoine, elles étaient positionnées entre deux rangs. Dans les deux cultures, les paires de MEI étaient placées à trois endroits distincts de la parcelle, en dehors des zones de mesure du rendement et d'échantillonnage de sol et de plants. Les MEI étaient laissées au champ pour une période variant de 24 h à deux semaines (Tableau 7) et par la suite échangées pour de nouvelles et ce, de la plantation à la récolte.



Figure 6. Membrane d'échange ionique prête à être installée au champ, dispositif maïs-grain, saison 2018.

Tableau 7. Périodes de pose-retrait des membranes pour les cultures d'avoine et du maïs-grain en 2017 et 2018.

Avoine 2017			Avoine 2018		
Pose MEI	Retrait MEI	Nb. de jours de la période	Pose MEI	Retrait MEI	Nb. de jours de la période
05/30	05/31	1	05/23	05/24	1
05/31	06/02	2	05/24	05/26	2
06/02	06/06	4	05/26	05/30	4
06/06	06/13	7	05/30	06/06	7
06/13	06/27	14	06/06	06/20	14
06/27	07/11	14	06/20	07/04	14
07/11	07/25	14	07/04	07/11	7
07/25	08/08	14	07/11	07/25	14
08/08	08/22	14	07/25	08/08	14
08/22	09/05	14	08/08	08/22	14

Maïs-grain 2017			Maïs-grain 2018		
Pose MEI	Retrait MEI	Nb. de jours de la période	Pose MEI	Retrait MEI	Nb. de jours de la période
06/03	06/04	1	05/24	05/25	1
06/04	06/06	2	05/25	05/27	2
06/06	06/09	3	05/27	05/31	4
06/09	06/16	7	05/31	06/07	7
06/16	06/30	14	06/07	06/20	13
06/30	07/10	10	06/20	07/04	14
07/10	07/25	15	07/04	07/11	7
07/25	08/08	14	07/11	07/25	14
08/08	08/22	14	07/25	08/08	14
08/22	09/05	14	08/08	08/22	14
09/05	09/19	14	08/22	09/05	14
09/19	10/03	14	09/05	09/20	15
10/03	10/17	14	09/20	10/04	14

2.5 COLLECTE DES DONNÉES

2.5.1 Analyses physiques, chimiques et biologiques du sol et des FPG

Au printemps de chaque année, une caractérisation physico-chimique du sol a été effectuée par bloc dans chacun des dispositifs. En saison, les analyses de sol ont ensuite été réalisées sur des échantillons composites de 8 sous-échantillons par parcelle au stade cible de la culture (avoine : avant épiaison; maïs : soies) et à la récolte. Au stade cible, le nitrate a été dosé et l'activité biologique du sol mesurée par la mesure de l'activité enzymatique uréase et par la mesure du dégagement de CO₂ (respiration microbienne). Le carbone labile (C_{eau}) et le phosphore soluble à l'eau (P_{eau}) ont également été mesurés. À la récolte, le nitrate a été mesuré afin d'évaluer les reliquats d'N au sol. Le sol a également été mis en incubation afin de mesurer le pouvoir de minéralisation (mesure de l'azote minéral (nitrates et ammonium) transformé lors d'une incubation de sol à température pièce). Tous les sols ont été prélevés sur une profondeur de 30 cm.

Les sols ont toujours été placés dans une glacière et conservés à 4 °C jusqu'à leur préparation. Le pH_{eau} a été mesuré dans un rapport sol/eau 1:1 (Conseil des productions végétales du Québec, 1988). La matière organique (MO) a été obtenue par perte au feu. Les contenus en C et N totaux ont été mesurés par combustion au LECO. Les N-NO₃ et N-NH₄ ont été extraits au KCl 2M (Isaac et Johnson, 1976) et déterminés par colorimétrie avec un auto-analyseur Technicon. Dans l'échantillon prélevé au printemps, le P et les éléments mineurs ont été extraits dans une solution Mehlich-3 (Tran et coll, 1992) et dosés à l'ICP optique. La granulométrie a été déterminée par la méthode de l'hydromètre en six points suivi d'un tamisage des sables (Gee et Bauder, 1986). Le P_{eau} a été déterminé conformément à la méthode Sissingh (1971) et le C_{eau} selon celle proposée par Garcia et coll. (1990). En 2018 dans le dispositif de maïs, à titre comparatif le C actif a aussi été mesuré par la méthode de l'oxydation au permanganate (POXC) (Weil et coll. 2003). La mesure du dégagement de CO₂ a été réalisée lors d'une

incubation à température contrôlée dans un contenant fermé. Dès le début du processus d'incubation, une éprouvette contenant 10 ml d'une solution de NaOH 1N est placée dans le contenant pour 10 jours. La solution de NaOH capte le CO₂ dégagé par la respiration microbienne. Le CO₂ est capté par la solution de NaOH sous la forme de Na₂CO₃. La consommation de NaOH est ensuite déterminée par titration acidimétrique à l'aide une solution de HCl 1N. Ceci permet d'estimer la quantité de CO₂ dégagée par les microorganismes pendant l'incubation. L'activité de l'enzyme uréase a aussi été dosée par incubation, cette fois à 37°C pendant deux heures. Le N-NH₃ libéré a ensuite été extrait avec une solution de KCl 1N et de HCl 0.01M. Le tout a été dosé par colorimétrie au Technicon.

Les FPG ont été caractérisées au niveau physico-chimique les deux années (Section 3.2.2; Tableau 8) pour le pH_{eau}, le taux de matières sèches à 105 °C (MS) et de MO (Recommended Methods of Manure Analysis, Peters 2003). Le carbone organique total (C_{total}) a été calculé avec la méthode des cendres selon la formule '100-cendres' pour obtenir la quantité de MO, elle-même ensuite divisée par le facteur 2,0 pour avoir le C (Giroux et Audesse 2004). LE N-NO₃ et le N-NH₄ ont été extraits au KCl 2M (Isaac et Johnson 1976), puis déterminées par colorimétrie automatisée. Le N_{total} a été extrait selon la méthode NTK. Comme le NTK ne mesure pas le nitrate, le N-NO₃ a été ajouté au N_{NTK} pour avoir le N_{total}. Le carbone labile a été dosé par le C_{eau} (Garcia et coll. 1990). Le P labile a été évalué par le P_{eau} (Sissingh 1971). Le P_{total} a été mesuré par digestion à l'acide sulfurique (voie humide) (Isaac et Johnson 1976), suivie d'une détermination par spectrométrie d'émission au plasma. Le P minéral résistant a été extrait au HCl 2,5N (P_{HCl}) (Salomons et Gerriste 1981), puis déterminé par colorimétrie automatisée. Les contenus en potassium (K), calcium (Ca) et magnésium (Mg) ont été mesurés par digestion à l'acide sulfurique. L'indice de stabilité biologique (ISB) a été mesurée selon la méthode décrite dans Landry et coll. (2011) adaptée de L.E. Parent de la méthode originale AFNOR (XP U44-162) (2005) utilisant un digesteur de fibre (ANKOM 200) de la compagnie ANKOM Technology.

2.5.2 Analyse des MEI

Avant leur emploi au champ, les MEI anioniques et cationiques étaient nettoyées par agitation dans une solution de HCl 0,5N en séquences de 30 minutes. Elles ont ensuite été rincées trois fois à l'eau déminéralisée, avec un brassage de 30 secondes entre chaque rinçage, pour enlever toute trace d'acide. Puis elles ont été saturées par agitation dans une solution de NaHCO₃ 0,5M, changée aux heures pour une période de 5 heures. Les MEI ont ensuite été à nouveau rincées à l'eau déminéralisée trois fois, avec un brassage de 30 secondes entre chaque rinçage, puis conservées dans l'eau à 4°C jusqu'à leur utilisation. Lors de leur récupération au champ, les 3 paires de MEI ont été déterrées, puis nettoyées à l'eau déminéralisée et placées ensemble dans un tube d'extraction contenant 40 ml d'une solution de KCl 2M. De retour au laboratoire, les tubes ont été agités 30 minutes, puis le N-NH₄, N-NO₃ et PO₄ de cette solution étaient dosés au Technicon AA3. Pour chacun des éléments, les données représentent la valeur moyenne des trois MEI de même charge utilisées par parcelle. Les flux sont exprimés par unité de surface de MEI et par jour, i.e. que le contenu total en ions désorbés (NO₃, PO₄ et NH₄) est divisé par la surface de MEI (recto-verso) et le nombre de jours de la période de suivi. Les unités sont donc en µg cm⁻² jour⁻¹.

2.5.3 Développement et nutrition des plants et rendements

Le statut nutritionnel azoté des cultures a été évalué une fois en saison suivant un prélèvement foliaire au stade avant épiaison pour l'avoine et au stade soies pour le maïs-grain. Les échantillons de végétaux ont été conservés dans une glacière à 4 °C jusqu'à leur réception au laboratoire. Des biomasses de plants ont aussi été prélevées à deux reprises en saison pour chacune des cultures (avoine : fin tallage et avant épiaison; maïs : 6 feuilles et soies) afin de mesurer le taux en matière sèche (% MS) et leur teneur en N_{total} .

Dans la culture de l'avoine, les rendements ont été effectués mécaniquement au moyen d'une mini-batteuse sur une superficie de 11 m² / parcelle. Les pailles et les grains ont été pesés séparément et un sous-échantillon de chacune des parties de la plante a été soumise à l'analyse afin de connaître leur teneur en N_{total} . Dans la culture du maïs-grain, les rendements ont été mesurés manuellement en cassant les épis et la biomasse en taillant les tiges à la faucille sur deux rangs de large par 7 m de longueur (2017) et 4 m de longueur (2018). Les tiges et les grains étaient pesés séparément et ont été envoyés à l'analyse pour le dosage du N_{total} . Tous les échantillons de plants (tiges, feuilles et grains) ont été séchés à 65 °C et broyés à 100 mesh avant analyse. Le N_{total} a été dosé par combustion LECO. Tant en saison qu'à la récolte, le N_{total} a été multiplié par la MS des plants afin de calculer les prélèvements en N_{total} à ces stades cibles. Les exportations en N par les grains d'avoine ou de maïs ont été calculés en multipliant les rendements (b.s) par la teneur en N_{total} des grains. Les prélèvements totaux (PVL_{tot}) à la récolte par la culture ont ainsi pu être calculées en additionnant les prélèvements de la biomasse avec celui des grains. Ces paramètres ont été calculés comme suit :

- Prélèvement N biomasse en saison et à la récolte = (MS biomasse * concentration en N_{total})
- Exportations de N = (Rendements b.s grains * concentration en N des grains b.s) récolte totale
- PVL totaux N = PVL N biomasse à la récolte + Exportations en N grains récolte

2.5.4 Calcul des CE

Le coefficient d'efficacité azoté (CEN) d'un engrais organique se calcule en comparant son taux d'utilisation apparent (TUA) du N à celui de l'engrais de synthèse (ECV), en dictant par défaut que celui de l'ECV représente une efficacité de 100 %. Le TUA se calcul en comparant les prélèvements en N des plants fertilisés et non fertilisés (Témoin ON). Par soustraction, la quantité de N prélevé en plus par les plants fertilisés est considérée comme provenant apparemment des engrais. Pour avoir un TU réel, il faut utiliser de l' N^{15} qui permet hors de tout de savoir la part de N prélevé qui vient de l'engrais. Cette méthode est cependant coûteuse et la plupart des CEN établis au Québec sont calculé sur le TUA selon les équations suivantes (Giroux et coll. 2007) :

$$(1) \text{ TUA engrais minéral (\%)} = \frac{\text{PVL}_{tot} \text{ N traitement ECV} - \text{PVL}_{tot} \text{ N témoin non-fertilisé ON}}{\text{Dose de } N_{total} \text{ apportée en engrais de synthèse}}$$

$$(2) \text{ TUA FPG (\%)} = \frac{\text{PVL}_{tot} \text{ N traitement FPG} - \text{PVL}_{tot} \text{ N témoin non-fertilisé ON}}{\text{Dose de } N_{total} \text{ apportée par les FPG}}$$

$$(3) \text{ CE (\%)} = \frac{\text{TUA FPG}}{\text{TUA engrais de synthèse}}$$

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 CONDITIONS CLIMATIQUES

La température et la disponibilité en eau ayant une influence sur l'activité biologique des sols, la température de l'air et du sol, et les précipitations ont été suivies aux sites d'essai les deux années. Les Figures 7 et 8 rapportent les conditions de température de l'air (°C Max et °C Min) et la pluviométrie, enregistrées en 2017 et 2018 sur toute la période d'essai. En 2017, les conditions climatiques ont été défavorables pour les semis en mai, ce qui a retardé d'une semaine l'implantation des dispositifs. Par la suite, malgré des températures parfois sous les normales saisonnières, les conditions climatiques ont été favorables à l'avancement des récoltes. En 2018, la saison a été beaucoup plus chaude que l'année 2017. Il y a eu un excès de chaleur et un manque d'eau sur l'ensemble du territoire. Le mois de juillet, entre autres, a été caractérisé par des températures supérieures à la normale et des précipitations inférieures à la normale (FADQ, 2019). La période du 3 au 16 juillet a été particulièrement touchée, avec des précipitations en grande partie inférieures à la normale, ce qui a pu nuire à la minéralisation des FPG, mais aussi à la diffusion de l'ECV. À ce qui a trait aux températures du sol, en 2017, celles-ci se sont rapidement réchauffées à partir du 6 juin dans les deux cultures, avec une température avoisinant les 17,5 °C. Elles ont ensuite atteint une température stable environ 10 jours plus tard, avoisinant les 20,0 °C (données non montrées). À partir du début août, elles ont commencé à s'abaisser pour revenir vers les 18,5 °C en fin août. Cependant, la température a été légèrement plus chaude en juillet dans le maïs, avec un pic à 21°C. En 2018, des problématiques de fonctionnement avec les sondes n'ont pas permis d'enregistrer de valeurs fiables avant le début juillet. Les mesures prises par la suite corroborent, mais les conditions de grandes chaleurs qui ont prévalu (données non montrées). La température du sol a en effet atteint un pic de 23 et 24 °C, dans l'avoine et le maïs respectivement. Elles ont aussi débuté à s'abaisser vers le début août, pour revenir vers les 20,0 °C en fin août.

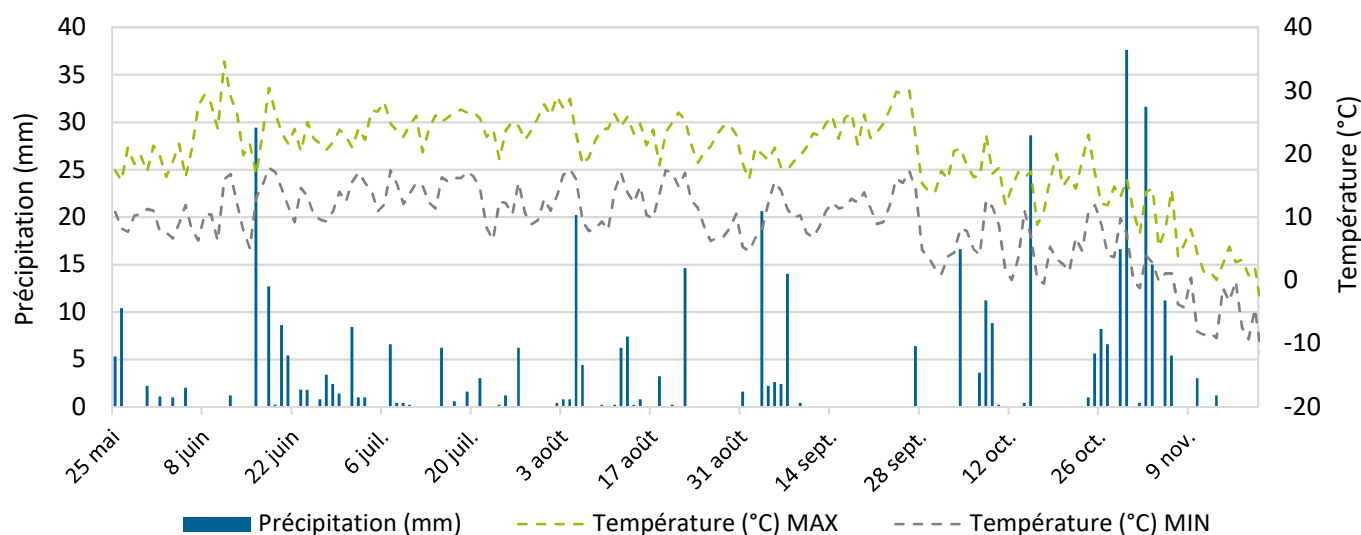


Figure 7. Données climatiques aux sites d'essais pour la saison de croissance 2017.

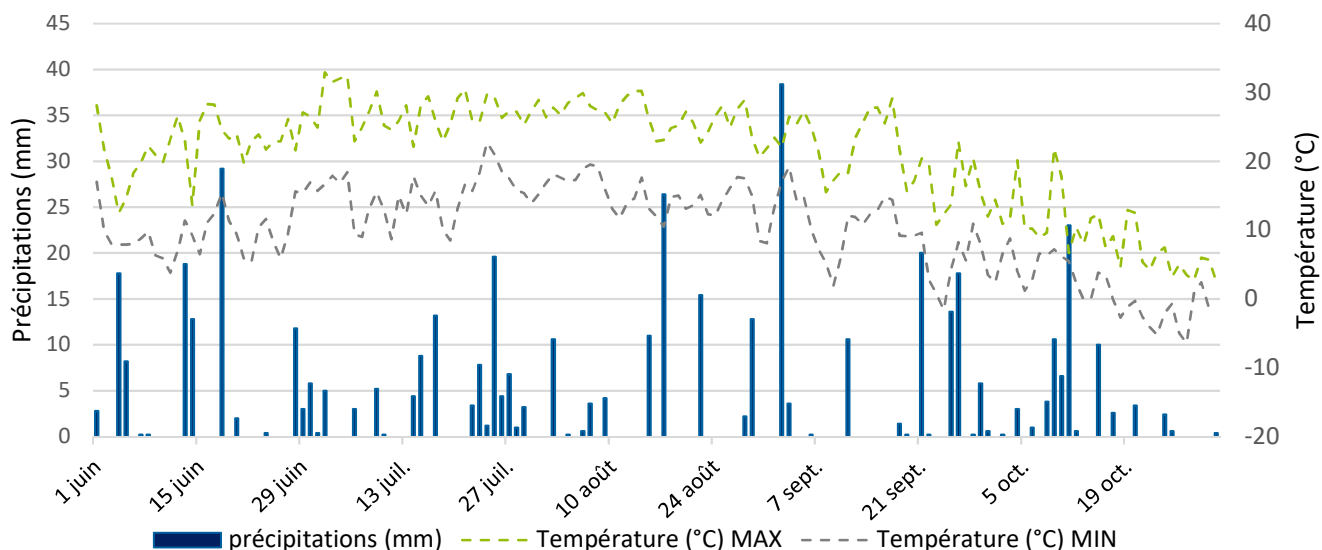


Figure 8. Données climatiques aux sites d'essais pour la saison de croissance 2018.

3.2 DYNAMIQUE DE FOURNITURE EN N MINÉRAL DES FPG

3.2.1 Flux de nutriments sur les MEI

Globalement, en regard des deux saisons et des deux types de cultures, le suivi *in situ* des flux de N minéral avec les MEI a montré que les FPG libèrent très rapidement et intensément du NO_3 . En fait, la libération apparaît presque aussi rapide qu'avec l'ECV. De plus, selon le CE testé, les intensités des flux de FPG peuvent aussi être très similaires à ceux de l'ECV, même lorsque des quantités de N_{total} sont presque équivalentes, ce qui suppose une efficacité élevée des FPG. Toutefois, les données suggèrent que le mode d'apport a un impact sur les flux mesurés. En effet, dans le maïs-grain où les engrais ont été appliqués en bande, les flux de NO_3 des deux engrais sont très similaires, tandis que dans l'avoine, l'application à la volée semble avoir désavantagé les FPG en comparaison de l'ECV.

Avoine – Culture non-nitrophile – Application à la volée

Au printemps, les deux années, un certain délai semblait s'observer en tout début de saison suivant l'application des engrais pour les flux de NO_3 des FPG en comparaison de l'ECV. Toutefois, selon l'analyse statistique, la différence ne serait significative que pour 2018 (Figure 9: Effet traitement $P = \text{n.s.}$; Figure 10 : Effet traitement $P = 0,0103$). Si l'on tient compte de la tendance à $P = 0,1615$ pour l'interaction Traitement x Date en 2018, les flux de NO_3 de l'ECV sont le double de ceux des FPG au 26 mai ($P = 0,0534$). Cette période de délai ne représente toutefois qu'un léger retard dans une période (les premiers jours suivant le semis) où les besoins de prélèvement en N sont très faibles voir nuls selon la culture. Dans le cas de l'avoine, il est reconnu que la plante ne prélève que très peu de N avant le tallage et que le prélèvement actif (> 70%) se situe entre le tallage et l'épiaison (CDFA 2019). Dans le cas de cultures où les apports sont fractionnés, ce délai pourrait être pris en compte dans le choix du moment

d'épandage. Dans tous les systèmes, ce délai pourrait même être vu plutôt comme un avantage puisque le NO_3 libéré trop tôt est à risque de lessivage en cas de printemps pluvieux.

En 2017, les apports de FPG ($100 \text{ kg N}_{\text{total}} \text{ ha}^{-1}$) et d'ECV ($60 \text{ kg N}_{\text{total}} \text{ ha}^{-1}$) ont donné des intensités équivalentes (Effet traitement $P = \text{n.s.}$) sur la saison. En 2018, les flux de NO_3 de l'ECV ont été supérieurs à ceux des FPG sur pratiquement tout le début de saison, jusqu'au début juillet ($P = 0,0448 - 0,1008$). Toutefois, il est important de rappeler que le CEN testé pour le FPG en 2018 était beaucoup plus élevé que celui de 2017. Ainsi, des quantités presque égales de N_{total} ont été apportées avec les deux produits (ECV : $60 \text{ kg N}_{\text{total}}/\text{ha}$, FPG : $66 \text{ kg N}_{\text{total}}/\text{ha}$). Ceci explique probablement en grande partie cette différence des flux. Dans un second temps, les périodes de manque d'eau (section 3.1) ont peut-être aussi pu nuire à la minéralisation des FPG. Cette diminution des flux des FPG s'est traduite par une baisse de prélèvements en N par la culture et des rendements significativement inférieurs à ceux obtenus avec l'ECV (voir section 3.3).

Par ailleurs, les deux années, le pic de libération a été mesuré de fin mai-début juin à la mi-juillet. Par la suite, les flux de NO_3 étaient près de zéro pour les deux types d'engrais et ce, pour le reste de la saison. Ainsi, quel que soit l'engrais, l'effet fertilisant perdure sur en moyenne 45 jours après semis. L'effet des FPG sur les flux de NO_3 ne perdure donc pas plus longtemps que celui de l'ECV. Cette période de fin du pic de libération correspond au stade avant épiaison les deux années. Ainsi, les flux sont à leur maximum au moment du tallage avec les deux produits, alors que débute le prélèvement actif ($> 70\%$) en N de l'avoine, et se termine à l'épiaison avec la fin de cette période. Ce prélèvement actif contribue d'ailleurs probablement à la baisse des flux.

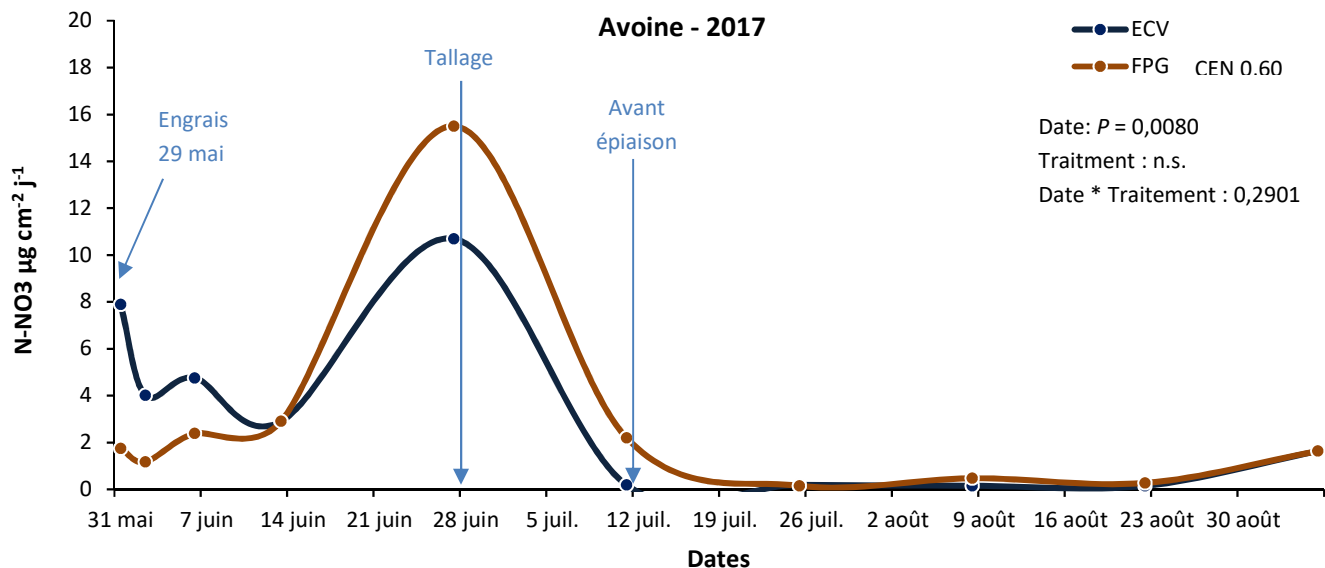


Figure 9. Flux de nitrate dans les sols fertilisés avec de l'engrais de synthèse ou les fientes granulées de poules (CEN à 0,60) pendant la saison de croissance de l'avoine en 2017. À chacune des dates, un astérisque (*) indique que les valeurs sont distinctes significativement au seuil $P \leq 0,1$.

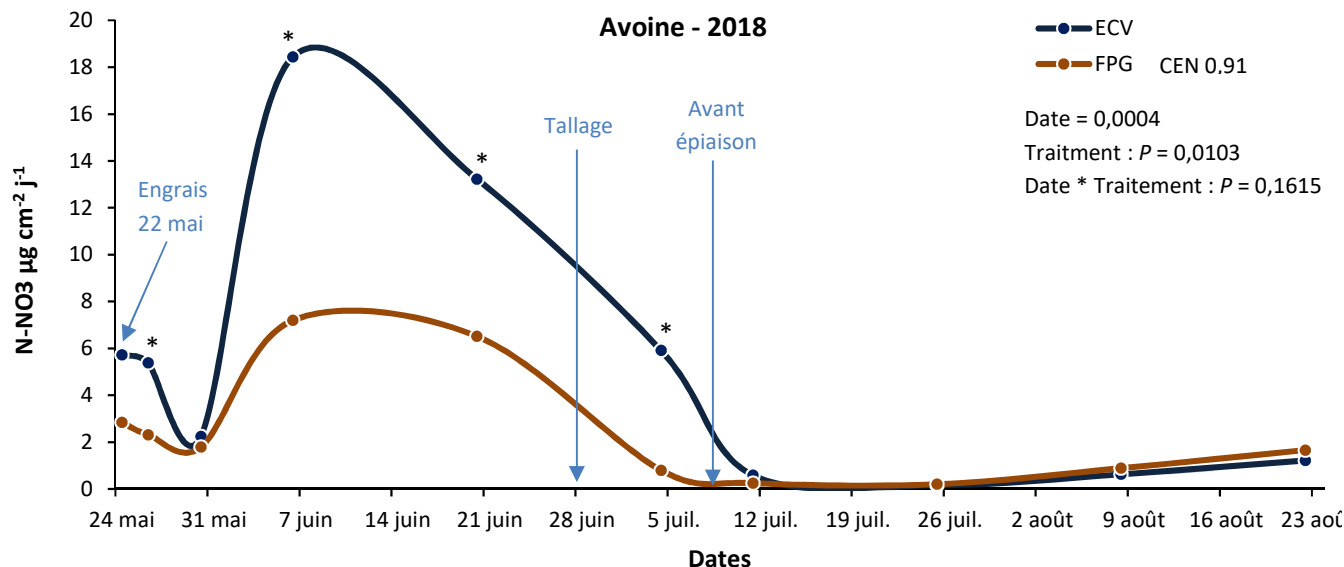


Figure 10. Flux de nitrate dans les sols fertilisés avec de l'engrais de synthèse ou les fientes granulées de poules (CEN à 0,91) pendant la saison de croissance de l'avoine en 2018. À chacune des dates, un astérisque (*) indique que les valeurs sont distinctes significativement au seuil $P \leq 0,1$.

Mais-grain – Culture nitrophile – Application en rang fractionnée

Dans le maïs, où les engrais ont été apportés en bande tout près de la zone racinaire des plants, au même niveau que les MEI, le délai de libération du NO_3 observé dans l'avoine au printemps n'a pas été observé ici (Figure 11 et 12). Pourtant, les quantités de N apportées ($50 \text{ kg N}_{\text{eff}} \text{ ha}^{-1}$) étaient inférieures à celles appliquées dans l'avoine. De plus, en 2018, des quantités presque équivalentes de N_{total} ont été apportées avec les deux produits (ECV : $160 \text{ kg N}_{\text{total}} \text{ ha}^{-1}$, FPG : $178 \text{ kg N}_{\text{total}} \text{ ha}^{-1}$). Par la suite, les deux années, une montée des flux de NO_3 se produit sur environ 1 mois, quel que soit l'engrais. En 2018, les flux de FPG semblent plus bas durant cette période que ceux de l'ECV, mais la différence est non significative pour toutes les mesures du mois ($P = 0,2823-0,5924$) (Figure 12).

Suivant l'apport fractionné d'engrais (2017 : 10 juillet, 2018 : 11 juillet), les flux de NO_3 remontent les deux années (Figure 11 et 12). En 2017, ceux des FPG et de l'ECV suivent une ascension similaire. En 2018, la minéralisation des FPG n'a toutefois pas permis des intensités en NO_3 de l'ampleur de celles de l'ECV. Ainsi, sur un mois environ, les flux de NO_3 des FPG sont de 1,3 à 2,5 fois moindres que ceux de l'ECV ($P = 0,0037-0,0614$). Cela explique certainement la baisse de rendements mesurée avec ce traitement (CEN 0,90) (voir section 3.3) puisque la période entre le 60^e et 90^e jour après semis est celle du prélèvement actif du N par le maïs (OMAFRA, 2018). Cette baisse des flux ne semble toutefois pas due à la dose testée car la dose d'apport de FPG juste en dessous (CEN 1,00; $160 \text{ kg N}_{\text{total}} \text{ ha}^{-1}$) et juste au-dessus (CEN 0,80 ; $200 \text{ kg N}_{\text{total}} \text{ ha}^{-1}$) de celle du traitement CEN 0,90 ont produit des rendements en grains équivalent à l'ECV. De plus, la plus faible dose de FPG (CEN 1,10; $145 \text{ kg N}_{\text{total}} \text{ ha}^{-1}$) a un rendement supérieur à l'ECV malgré un apport de N_{total} moindre ($P = 0,0717$). Le traitement CEN 0,90 en 2018 semble donc avoir eu un problème spécifique qui n'est pas nécessairement en lien avec le produit testé. Par la suite, suivant la fin août, les différences de flux sont non-significatives entre les deux produits (Figure 12).

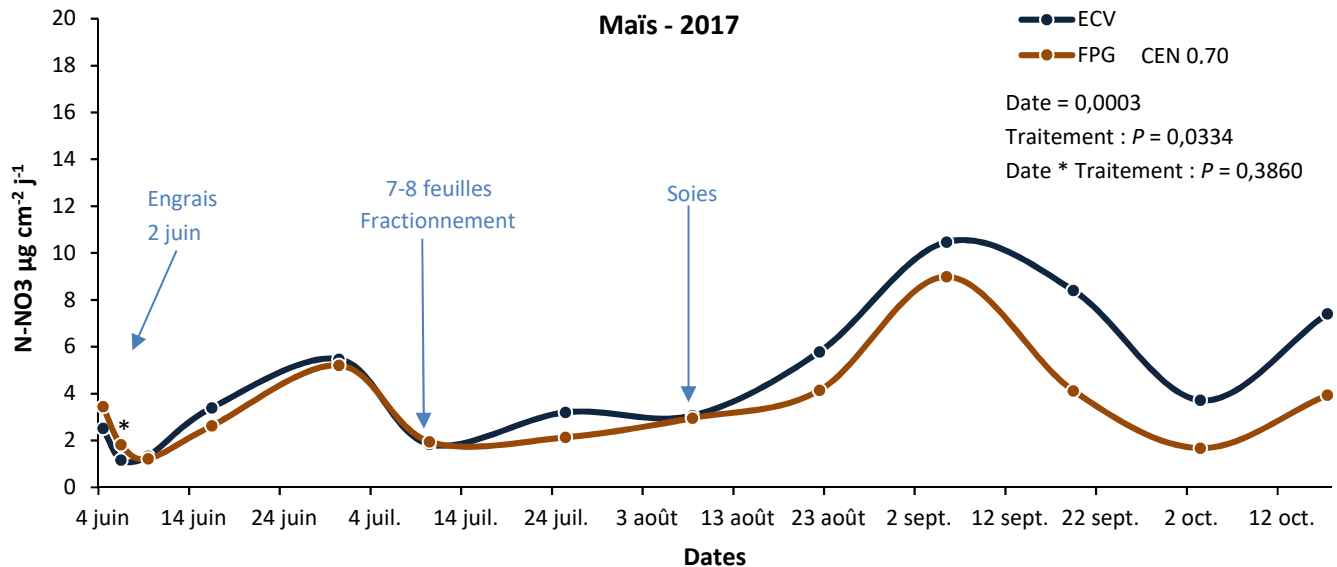


Figure 11. Flux de nitrate dans les sols fertilisés avec de l'engrais de synthèse ou les fientes granulées de poules (CEN à 0,70) pendant la saison de croissance du maïs en 2017. À chacune des dates, un astérisque (*) indique que les valeurs sont distinctes significativement au seuil $P \leq 0,1$.

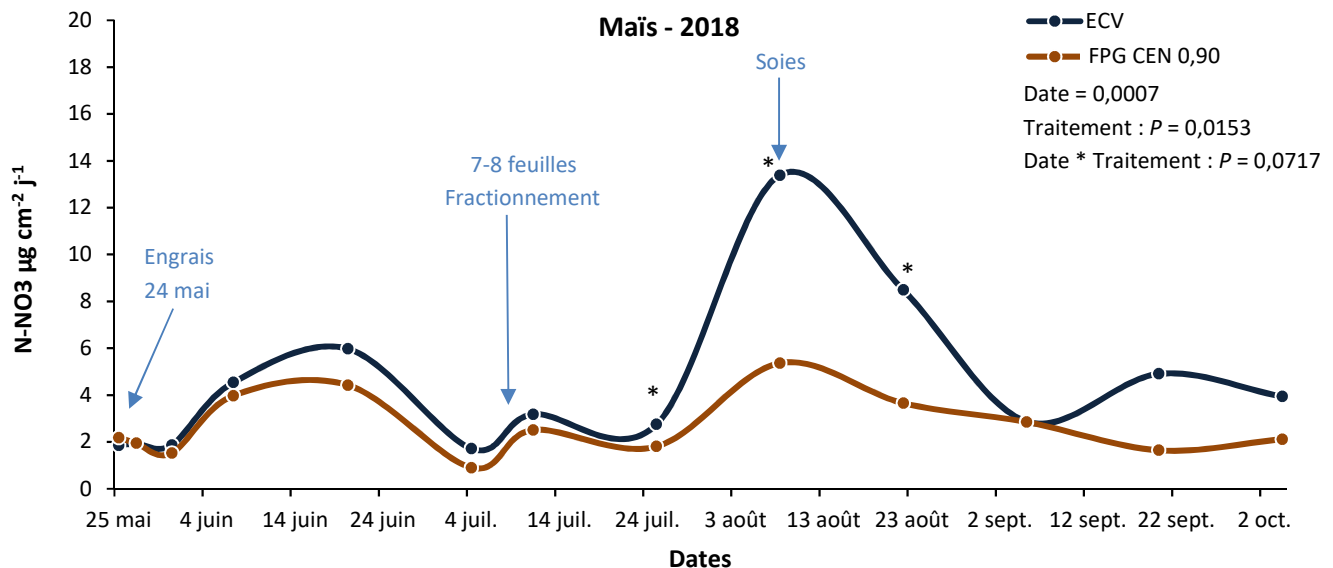


Figure 12. Flux de nitrate dans les sols fertilisés avec de l'engrais de synthèse ou les fientes granulées de poules (CEN à 0,90) pendant la saison de croissance du maïs en 2018. À chacune des dates, un astérisque (*) indique que les valeurs sont distinctes significativement au seuil $P \leq 0,1$.

Avoine et maïs-grain – Phosphate et ammonium

En 2017, les flux de PO_4 et NH_4 ont également été suivis avec les MEI. Toutefois, les valeurs ne sont pas illustrées car celles-ci ont été extrêmement faibles sur l'ensemble de la saison en 2017 (Avoine : $\text{PO}_4 \sim 0,06 \mu\text{g cm}^{-2} \text{jr}^{-1}$ et $\text{NH}_4 \sim 0,4 \mu\text{g cm}^{-2} \text{jr}^{-1}$ / Maïs : $\text{PO}_4 \sim 0,06 \mu\text{g cm}^{-2} \text{jr}^{-1}$ et $\text{NH}_4 \sim 0,12 \mu\text{g cm}^{-2} \text{jr}^{-1}$). Un tel résultat ayant déjà été observé dans un précédent projet (Landry et coll. 2019), il a été décidé de ne pas suivre ces ions en 2018.

3.2.2 Caractérisation physico-chimique des granules de fientes de poules

La caractérisation physico-chimique des granules démontre que ceux-ci contiennent en moyenne $50 \text{ kg N}_{\text{total}} \text{ T}^{-1}$ sur base humide tel qu'utilisés ($\approx 90 \%$ MS) (Tableau 8). De cette quantité, 96 % est sous forme organique. Les FPG ne contiennent ainsi pratiquement pas de N minéral (NO_3 , NH_4). Le N des FPG n'est donc pas lessivable sous sa forme première et sera rendu disponible graduellement. Le contenu en N organique devra en effet être minéralisé pour fournir du NO_3 assimilable par la culture. Le fort contenu en C labile des FPG, principale source d'énergie des microorganismes du sol (McGill et coll. 1986), indique toutefois que cette minéralisation sera favorisée. En fait, plusieurs indicateurs suggèrent que les FPG sont propices à la minéralisation intense et rapide. Le ratio $C_{\text{eau}}/C_{\text{org. total}}$ de 16 % est élevé et indique que 16 % du C est labile et donc facilement attaquable. La mesure de l'ISB, indiquant que seulement 13 % du C total est résistant à la minéralisation va dans le même sens. En décortiquant les différents pools de C qui composent l'indice ISB global, il ressort qu'en moyenne 75 % du C se retrouve dans le premier pool, le pool soluble, ce qui explique un ISB aussi bas. De plus, le rapport C/N de 6 est faible et indique qu'il y aura relâchement de N.

Par ailleurs, le ratio $N_{\text{total}}/P_{\text{total}} = 3$ indique qu'il y aura un kg de P d'apporté pour chaque 3 kg de N_{total} d'appliqué. Ce ratio est inférieur à celui du prélèvement N/P de la plupart des cultures qui varie de 4 à 8 (Mazzarino et coll. 1998). Il s'éloigne aussi du ratio N/P minimal de 7 suggéré pour les sols riches en P afin d'éviter l'enrichissement du sol en P Mehlich-3 (Ritter 2000). Toutefois, il faut mentionner que de par leur nature, l'ensemble des fumiers couramment utilisés comme engrais organiques au Québec sont peu appropriés pour une utilisation en sol riche en P. En fait, les FPG présentent une des meilleures options si l'on considère le ratio N_{eff} et non total sur son contenu en P total puisque son CE du N est un des plus élevés parmi les fumiers (Tableau 9). Seuls les engrais verts présentent des ratios $N_{\text{eff}}/P_{\text{total}}$ plus élevés de 10 et plus.

En ce qui a trait au P comme tel, environ 10 % du P est soluble à l'eau et donc hautement disponible et en moyenne 63 % est considéré résistant. Ainsi, environ 27 % du P est moyennement disponible. L'ensemble de ces résultats corrobore ceux d'études précédentes présentant des caractérisations des FPG (Landry et coll. 2019).

Tableau 8. Caractéristiques des fientes de poules en granulés (FPG) en 2017 et 2018.

Paramètres ¹	FPG -2017	FPG-2018
pH	7,2	7,1
Matière Sèche (%) b.s.	91	87
Matière organique (%) b.s.	71	72
C _{org.} total (%) b.s.	33	32
C _{org.} soluble à l'eau (kg/T)	49,2	41,9
C _{eau} /C _{total}	16,6	15,2
ISB global	11,3	15,1
Fraction soluble (%)	79	70
N _{Total} Kejdhal (kg/T)	52,7	47,4
N-NO ₃ (KCl) (kg/T)	0,044	0,004
N-NH ₄ (KCl) (kg/T)	2,12	2,28
N _{min} /N _{total} (%)	4,1	4,8
C/N	6,1	6,3
P _{total} (kg/T)	15,8	15,7
P _{eau} (kg/T)	1,63	1,35
P _{HCl} (kg/T)	9,88	9,59
P _{eau} /P _{total} (%)	10,3	8,6
P _{HCl} /P _{total} (%)	63	61
N _{total} /P _{total}	3,3	3,0
Autres éléments totaux (kg/T)		
K	23,6	20,7
Ca	48,7	56,5
Mg	5,1	5,2
Al	0,349	0,510
P/Al	0,45	0,31
K/(Ca+Mg)	0,43	0,34

¹ Tous les paramètres sont exprimés en base tel que reçu, sauf la MS, la MO le C.O., exprimés en base sèche.

Tableau 9. Caractéristiques chimiques d'engrais verts et d'engrais de ferme comparées.

Engrais organiques ¹	C	N _{total}	N _{dispo} ^{2,3}
	N	P _{total}	P _{total}
FPG	6	3,2 ⁴	2,8
Trèfle couverture ³	9	9,7	8,7
Pois post-récolte	9	12,1	11,1
Fumier poulet grillé	13	2,7	1,3
Fumier de bovin	20	2,7	0,67
Compost fumier de bovin	15	2,7	0,85
Lisier bovin pré-semis	7	2,6	2,2
Lisier de porc	6	5,0	2,8

¹ Côté et coll. 2018; Landry et coll. 2019 et Landry et coll. IA 116643 2017-2019.

² Engrais verts: Jobin et Douville (1996) dans Duval et coll. (2014)

³ Engrais de ferme: CRAAQ (2010)

⁴ À un CEN moyen de 90 %.

3.2.3 Indicateurs de l'activité microbologique en saison

Avoine

Les analyses d'activité biologique du sol en plein pic de production de la culture, juste avant épiaison, démontrent que les apports de FPG n'ont pas modifié l'activité biologique (uréase, respiration microbienne) ni en 2017 et ni en 2018. Un effet était toutefois attendu vu l'apport de C labile au sol et la nature organique du produit, en comparaison de l'ECV. À noter que l'ECV ne stimule pas non plus l'activité biologique. Les valeurs sont donc similaires avec ou sans apport d'engrais en comparaison du sol non fertilisé (Tableaux 10 et 11). En ce qui a trait au contenu en N minéral assimilable, il est intéressant de constater que le N disponible est le même avec l'ECV qu'avec toutes les doses de FPG testées en 2017 et 2018, sauf un léger effet significatif pour la dose de FPG CEN 1,02 en 2018. Mais cette différence n'est de l'ordre que de 1 kg N-NO₃ ha⁻¹ de moins, ce qui est négligeable. Ces mesures appuient celles des flux de NO₃ qui sont identiques entre les engrais ECV et FPG à ces dates (Figures 9 et 10). Il est probable que des effets plus marqués sur les indicateurs microbiens auraient pu être détectés plus tôt après l'application des FPG. Selon les flux, c'est en effet autour de la mi-juillet que l'effet des FPG semble s'atténuer. Dans le cas du P assimilable (P_{eau} : phosphates en solution), aucune différence ne ressort non plus, bien que les FPG apportent des composés carbonés et du P organique pouvant compétitionner pour les sites de fixation des ions phosphates, faisant en sorte qu'une plus grande quantité demeure en solution. Pour l'ensemble des paramètres vérifiés, l'application à la volée et les doses plus faibles appliquées dans l'avoine ont pu contribuer à cette absence d'effet des FPG sur l'activité biologique et le N et P disponibles. D'ailleurs, dans le maïs qui a bénéficié d'un apport beaucoup plus élevé, fractionné et concentré en bande, plusieurs différences significatives ressortent (Tableaux 12 et 13).

Tableau 10. Valeurs de différents indicateurs d'activité microbologique du sol en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture de l'avoine avant épiaison (13 juillet 2017).

2017	N-NO ₃ kg/ha b.s.	N-NH ₄ kg/ha b.s.	P _{eau} mg/kg	Uréase ¹ µg N-NH ₄ /g	CO ₂ 0-10 jrs ² mg CO ₂ /g	C _{eau} mg/kg b.s.
ON	6,56	5,07	4,44	32,10	0,202	91,8
ECV	9,90	5,38	6,11	31,75	0,184	100,4
CEN 0,8	8,49	6,22	4,40	30,41	0,184	87,5
CEN 0,7	7,74	5,26	4,79	31,51	0,200	104,4
CEN 0,6	10,02	7,63	4,61	31,42	0,214	101,2
CEN 0,5	9,94	6,04	3,03	29,45	0,202	83,2
Valeurs de P	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

¹ Enzyme uréase produisant le NO₃ à partir du N_{org}.

² Respiration microbienne (CO₂) sur 10 jours.

Tableau 11. Valeurs de différents indicateurs d'activité microbiologique du sol en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture de l'avoine avant épiaison (9 juillet 2018).

2018	N-NO ₃ kg/ha b.s.	N-NH ₄ kg/ha b.s.	P _{eau} mg/kg	Uréase ¹ µg N-NH ₄ /g	CO ₂ 0-10 jrs ² mg CO ₂ /g	C _{eau} mg/kg b.s.
ON	6,84 a	7,99	1,45	32,99	0,231	71,97
ECV	8,89 c	8,83	1,48	38,70	0,257	66,96
CE 1,14	8,09 bc	9,62	1,31	39,85	0,256	62,31
CE 1,02	7,40 ab	8,21	1,59	36,85	0,262	77,04
CE 0,91	7,98 bc	9,33	1,50	37,23	0,239	66,12
CE 0,80	8,02 bc	9,15	1,69	38,94	0,258	70,61
Valeurs de P	0,0762	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

¹ Enzyme uréase produisant le NO₃ à partir du N_{org}.

² Respiration microbienne (CO₂) sur 10 jours.

Maïs-grain

Dans le cas du maïs, les indicateurs d'activité microbiologique ont été évalués 30 jours après le dernier apport d'engrais (fractionnement au 10 juillet 2017 et 11 juillet 2018), au stade soies (9 août 2017 et 2018), soit une période plus courte de 15 jours en comparaison des mesures dans la culture d'avoine. Des effets significatifs ont été mesurés pour la plupart des indicateurs testés (Tableaux 12 et 13). Selon les flux de NO₃, les FPG étaient d'ailleurs encore actives à ce moment (Figures 11 et 12). Les deux années, la respiration microbienne était davantage importante avec l'accroissement des doses de FPG, de même que l'activité uréase, une année sur deux. En 2018, cette différence n'était pas présente, peut-être en partie à cause des doses moindres de FPG testées. En revanche, il s'avère que l'activité uréase et la respiration microbienne du sol ayant reçu l'ECV n'étaient pas statistiquement différentes de celles du sol Témoin (ON), les deux années (Tableaux 12 et 13). Par contre, les sols avec ECV avaient des charges en N-NO₃ et N-NH₄ plus élevées que celles des sols avec FPG, présentant en moyenne 50 % moins de N minéral. Enfin, ni l'ECV, ni les FPG n'ont eu d'impact sur les contenus en P soluble à ce stade de croissance, autant en 2017 qu'en 2018.

Par rapport aux contenus en C labile du sol, deux méthodes de laboratoire ont été utilisées en 2018. De plus en plus de laboratoires commerciaux offrent désormais l'analyse du C labile par oxydation au permanganate (C actif ou POXC). Il s'avérerait donc pertinent de comparer cette méthode avec celle plus fréquemment employée en R&D, soit l'extraction à l'eau (C_{eau}). L'extraction à l'eau est beaucoup moins forte que celle au permanganate. Le POXC contient donc une portion de C moins labile que le C_{eau}. À ce jour, il n'est toutefois pas connu laquelle de ces méthodes donne l'information la plus pertinente quant à la variabilité des contenus en C labile dans le sol pour la fonctionnalité de la biomasse microbienne suivant l'apport de matières organiques. Nos résultats démontrent, tout d'abord, que le POXC extrait effectivement plus de C, soit en moyenne trois fois plus (Tableau 13). Cette importante différence explique probablement que le POXC est moins sensible que le C_{eau} à l'impact des traitements. Aucune différence n'a en effet été détectée selon les traitements avec le POXC, contrairement au C_{eau} qui présentent un effet significatif. La méthode du C_{eau} démontre clairement que l'apport d'ECV réduit la disponibilité de C labile dans le sol. Les microorganismes utilisant conjointement le C labile et le N pour leur

fonctions métaboliques, sans remplacement du C labile et en présence de beaucoup de N assimilable, il y a une déperdition accrue de C labile du sol. L'apport de N sous forme organique, surtout via des matières riches en C labile comme les FPG, contribue alors au maintien, voire à la restitution de C labile au sol. Les résultats montrent d'ailleurs que les ajouts de FPG ont permis de maintenir ou même d'accroître les contenus en C_{eau} du sol, en comparaison de celui du témoin n'ayant pas reçu d'engrais, et ce à chacune des années (Tableaux 12 et 13). Sur la base des mesures de N minéral et d'activité biologique du sol, il apparaît donc que la bonne performance des FPG dans l'atteinte de rendements équivalents à ceux de l'ECV, avec des doses d'apports de N_{total} (CEN 0,90-1,0) tout près, égales ou même moindres (CEN 1,10) que celle de l'ECV, ne repose pas sur une disponibilité accrue en NO_3 du sol, mais plutôt sur une stimulation de sa productivité. Le contenu en N- NO_3 du sol pendant une période importante de nutrition du maïs (9 août) n'est en effet que de 40 - 60 % de celui des sols ECV, les prélèvements en saison et totaux en N sont ou tendent à être moindres (voir section 3.3 et 3.4), mais le C_{eau} et la respiration sont supérieures.

Tableau 12. Valeurs de différents indicateurs d'activité microbiologique du sol en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture du maïs au stade soies (9 août 2017).

2017 Stade soies	N- NO_3 kg/ha b.s.	N- NH_4 kg/ha b.s.	P Soluble mg/kg	Uréase ¹ ug N- NH_4 /g	CO ₂ 0-10 jrs ² mg CO ₂ /g	C_{eau} mg/kg b.s.
ON	8,61 a	6,19 a	4,74	31,24 a	0,252 a	111,36 b
ECV	87,49 c	52,08 c	4,81	37,77 ab	0,242 a	97,93 a
CEN 0,90	40,86 b	17,09 ab	4,73	34,59 a	0,288 ab	115,25 b
CEN 0,80	40,25 b	16,15 ab	6,41	32,57 a	0,264 a	120,14 b
CEN 0,70	50,75 b	28,95 b	6,42	50,84 c	0,349 bc	123,88 b
CEN 0,60	53,34 b	27,09 b	5,90	43,93 bc	0,382 c	111,98 b
Valeurs de P	0,0152	0,0192	n.s.	0,0823	0,0588	0,0721

¹ Enzyme uréase produisant le NO_3 à partir du N_{org} .

² Respiration microbienne (CO₂) sur 10 jours.

Tableau 13. Valeurs de différents indicateurs d'activité microbiologique du sol en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture du maïs au stade soies (9 août 2018).

2018 Stade soies	N- NO_3 kg/ha b.s.	N- NH_4 kg/ha b.s.	P Soluble mg/kg	Uréase ¹ ug N- NH_4 /g	CO ₂ 0-10 jrs ² mg CO ₂ /g	C_{eau} mg/kg b.s.	C actif ³ mg/kg b.s.
ON	5,71 a	6,19 a	2,27	25,68	0,232 ab	119,23 bc	334,33
ECV	191,31 d	40,84 b	2,65	31,54	0,204 a	90,12 a	343,67
CEN 1,10	57,98 b	10,89 a	2,54	31,11	0,273 bc	129,68 bc	317,00
CEN 1,00	96,28 c	20,95 a	1,82	34,29	0,269 bc	107,28 ab	344,33
CEN 0,90	83,02 bc	13,51 a	1,95	30,67	0,236 ab	130,36 c	358,33
CEN 0,80	107,61 c	11,63 a	2,93	32,07	0,286 c	119,80 bc	347,33
Valeurs de P	<0,0001	0,0274	n.s.	n.s.	0,1038	0,0654	n.s.

¹ Enzyme uréase produisant le NO_3 à partir du N_{org} .

² Respiration microbienne (CO₂) sur 10 jours.

³ Carbone labile extrait au permanganate : C actif ou POXC.

3.3 NUTRITION ET PRODUCTIVITÉ DE LA CULTURE

Avoine

À chaque année, les rendements en grains (rapportés à 14 % humidité) ont été fortement accrus par l'apport de N (Figure 13), ce qui signifie que les sites répondaient à la fertilisation azotée. En 2017, un rendement égal moyen de 3 093 kg/ha de grains a été produit avec l'ECV et toutes les doses de FPG (Figure 13). Les FPG se sont donc avérées plus efficaces que prévue comme fertilisant azoté. Puisqu'aucune courbe de réponse n'a été produite sur la base du CEN recommandé par le tableau 10.4 du GREF (2010), il n'était pas possible de statuer sur la dose donnant un rendement équivalent à l'ECV, ce qui indiquerait le bon CEN à utiliser. Devant ce constat, les CEN testés *a priori* en 2018 ont été haussés fortement (80-114 % au lieu de 50-80 %). Des rendements croissants ont donc pu être obtenus. Toutefois, un plateau n'a pas été atteint, ce qui aurait permis de s'assurer qu'un meilleur rendement n'aurait pas été obtenu avec une dose supérieure de FPG (CEN moindre). Cependant, les deux années, la dose CEN 0,80 a donné des rendements équivalents à ceux obtenus avec l'ECV. De plus, en 2018, les trois doses d'apports inférieures de N, donc les CEN > 0,80, ont toutes donné un rendement inférieur (moins 12 %) à l'ECV. Ainsi, sur la base des rendements, l'application d'un CEN de 80 % aux doses de N_{total} apportées par les FPG semble fiable puisqu'elle permet d'atteindre des rendements comparables à ceux obtenus avec l'ECV les deux années. D'autant plus que ces rendements sont de l'ordre de ceux rapportés pour la région en 2017 et 2018 (ISQ 2019). Toutefois, étant donné la difficulté de prévoir la variabilité des contenus en N_{total} des FPG, un CEN plus conservateur de 5 - 10 % inférieur pourrait être envisagé. De plus, selon les mesures de prélèvement total de N à la récolte (paille + grains), le CEN maximum calculé sur la base de la nutrition et non des rendements tournerait plutôt autour d'un CEN de 60-64 %. Les CEN calculés par les prélèvements ont toutefois été abaissés par le phénomène de prélèvement de luxe (voir section 3.4 pour discussion).

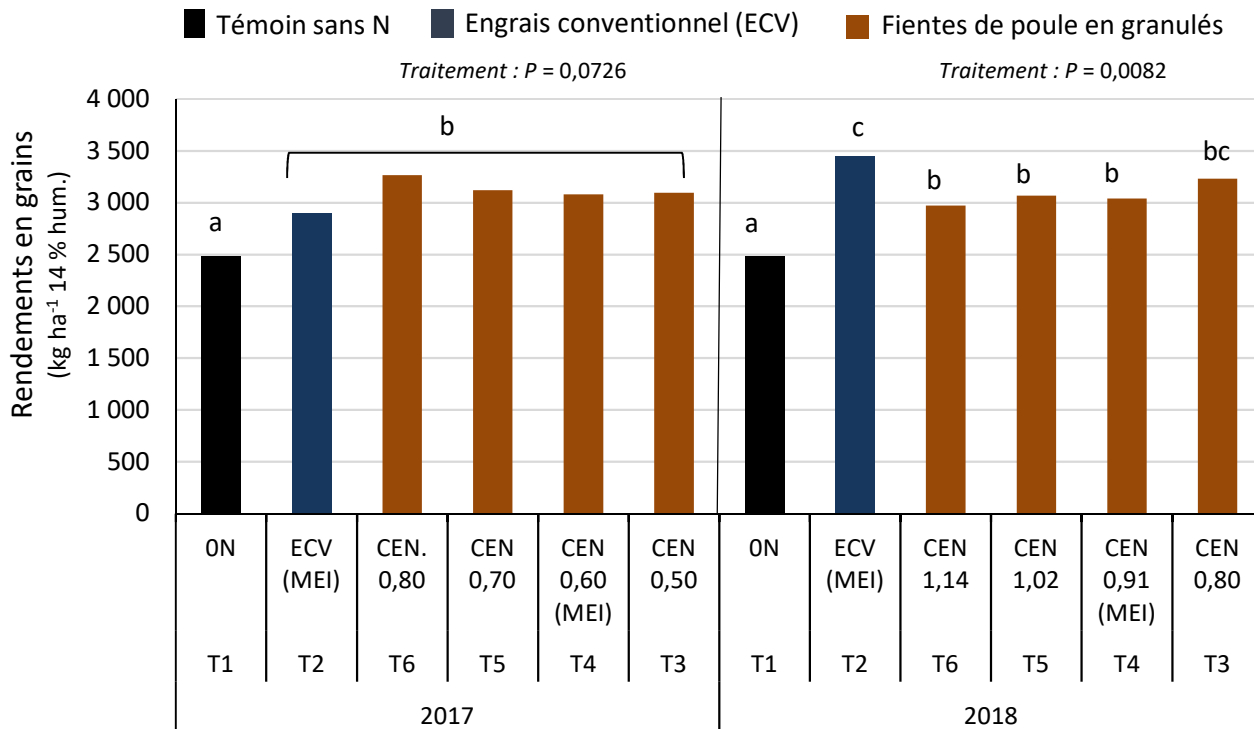


Figure 13. Rendements en grains en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture de l'avoine, en 2017 et 2018. Pour chaque graphique, les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil $P \leq 0,1$.

La bonne performance des FPG à produire des rendements semble donc impliquer un facteur autre que l'apport et le prélèvement de N, tel que le suggèrent également les résultats de la section précédente. Le contenu en N des feuilles (Figure 14), indicateur de nutrition azotée, montre aussi qu'en 2017 les concentrations sont statistiquement équivalentes avec l'ECV et toutes les doses de FPG, à l'image des rendements. En 2018, l'ECV a même permis une plus grande assimilation de N que les FPG. La baisse de rendement observée avec les trois plus faibles doses de FPG, en comparaison de l'ECV, pourrait donc peut-être s'expliquer par une baisse de la nutrition azotée. Toutefois, selon les valeurs minimale et maximale critique de contenu en N (%) des feuilles de 2,0 et 2,7 pour l'avoine (CRAAQ 2010), respectivement, la teneur en N des feuilles est adéquate pour tous les traitements.

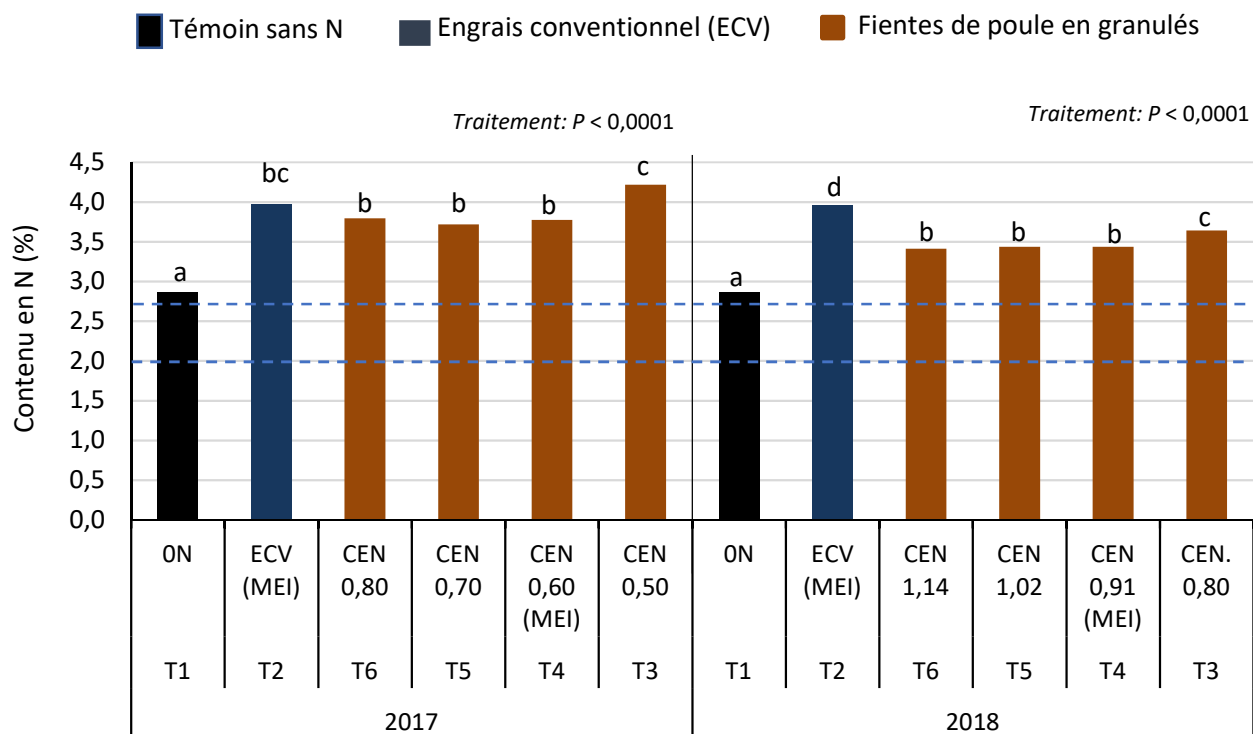


Figure 14. Contenu en azote des feuilles d'avoine au stade avant épiaison, en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture de l'avoine, le 13 juillet 2017 et le 9 juillet 2018. Les lignes pointillées représentent la valeur minimale critique et la valeur critique d'excès de la teneur en N des feuilles pour l'avoine. Pour chaque graphique, les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil $P \leq 0,1$.

En saison, les prélèvements en N par les parties aériennes des plants (tiges) (Figure 15) montre que dès le stade tallage (2017 : 28 juin, 2018 : 29 juin), soit en moyenne 34 jours après les semis, les plants fertilisés ont réalisé environ 70 % du prélèvement total en N qui sera mesuré à la récolte (paille + grains), les deux années. Les prélèvements se situaient entre 42 et 55 kg N ha⁻¹ en 2017 et entre 48 et 65 kg N ha⁻¹ en 2018. Ces valeurs sont déjà très près de la dose recommandée d'apport de N de 60 kg N ha⁻¹ (CRAAQ 2010). Dans le cas des plants non fertilisés, ceux-ci ont quand même prélevé 22 et 36 kg N ha⁻¹, soit environ 40 et 60 % du prélèvement des plants ECV, en 2017 et 2018, respectivement. Cette fourniture n'est pas suffisante pour atteindre un plein rendement (Figure 13), mais démontre que le sol seul peut fournir une quantité significative de N. Par ailleurs, il ressort qu'exception faite de la plus faible dose d'apport de FPG (CE = 0,80) en 2017, toutes les fertilisations avec FPG ont permis des prélèvements en N statistiquement équivalents à ceux de l'ECV, même si ce dernier est le seul dont la totalité du N est immédiatement disponible à l'application. Avec l'utilisation de la dose du CEN de 80 %, les prélèvements étaient inférieurs ($P = 0,0832$) de 24 % à ceux atteints avec l'ECV (42 kg N ha⁻¹ vs. 55 kg N ha⁻¹).

Plus tard en saison, juste avant l'épiaison (2017 : 13 juillet, 2018 : 9 juillet) (46 jours en moyenne après semis), seules les deux doses de FPG les plus élevées en 2017 (CEN 0,5 et CEN 0,6) et aucune des doses de FPG en 2018, n'ont permis des prélèvements aussi élevés que ceux des plants ECV (Figure 15). À ce stade, pour les plants

fertilisés, les prélèvements en N des tiges (2017 : 63-120 kg N ha⁻¹, 2018 : 63-95 kg N ha⁻¹) sont équivalents ou même dépassent les prélèvements totaux (tiges et grains) (voir section 3.4) qui seront mesurés à la récolte.

Enfin, il est intéressant de noter que les prélèvements en N des plants au stade tallage sont corrélé à 70 et 79 % avec les rendements en grains produits en 2017 et 2018, respectivement. La nutrition à ce stade semble donc très importante pour le rendement. La rapidité de libération du NO₃ des FPG pourrait sur ce point expliquer leur bonne performance observée sur le terrain lors de leur emploi comme fertilisant par les producteurs. Par contre, si l'on compare les prélèvements des traitements où il y avait des MEI, il ressort que la forte hausse des flux de NO₃ générée par l'ECV en 2018 (de 2 à 7 fois en comparaison des FPG) n'est pas proportionnelle aux différences de nutrition (N foliaire; Figure 14), ni de prélèvements de N en saison (tallage : écart de 9%, épiaison : écart de 22 % ; Figure 15), ni de rendements (écart de 12 %; Figure 13). Une telle libération représente donc un risque de lessivage accru mais ne se reflète pas dans la productivité des plants.

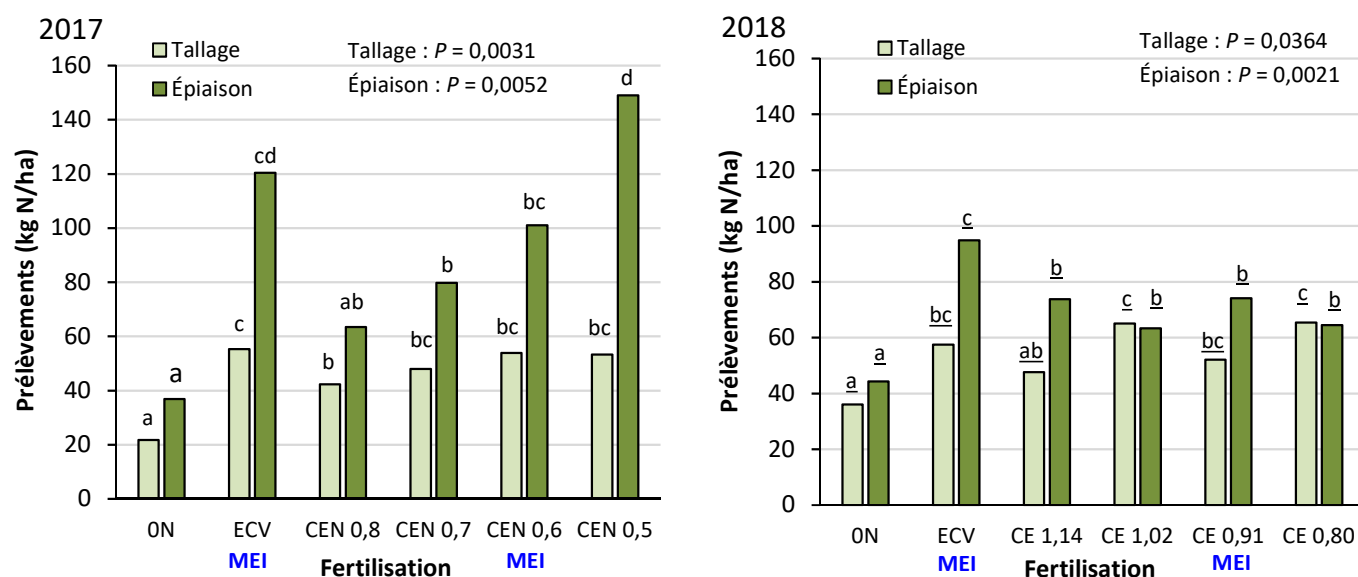


Figure 15. Prélèvements en N par la biomasse aérienne des plants en saison, en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture de l'avoine, en 2017 et 2018. Les valeurs de chaque graphique avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil $P \leq 0,1$.

Maïs-grain

Avec la culture nitrophile du maïs-grain, tel qu'attendu, à chaque année les rendements en grains (rapportés sur 15 % d'humidité) ont été significativement accrus par l'application d'azote. Ainsi, le rendement du témoin ON n'est que de 65 % en moyenne de celui du traitement ECV, les deux années. Ceci indique que les sites répondaient fortement aux apports d'azote (Figure 16). La forte différence entre les rendements des témoins ON et ceux des plants fertilisés avec l'ECV expliquent d'ailleurs principalement l'effet très significatif de la fertilisation à $P = 0,0036$ et $P < 0,0001$ mesuré en 2017 et 2018, respectivement. En effet, en 2017, il n'y a aucune différence de rendements

entre le traitement ECV et toutes les doses de FPG. Seul le rendement du ON est inférieur à tous les autres. En fait, une tendance à un rendement supérieur de 1 T ha⁻¹ avec les deux doses les plus élevées de FPG, en comparaison de l'ECV, est aussi présente ($P = 0,1680$). En 2018, les rendements obtenus avec les doses de FPG sont aussi statistiquement équivalents ou supérieurs à celui obtenu avec l'apport de 160 kg N ha⁻¹ sous la forme d'ECV, sauf avec la 3^e dose de FPG du CEN 0,90. Ainsi, la plus faible dose de FPG (CEN 1,10), apportant 145 kg N_{total} ha⁻¹ (15 kg N ha⁻¹ de moins que l'ECV), a donné un rendement supérieur de 6 % ($P = 0,0717$) au traitement ECV, tandis que la dose CEN 1,00, apportant également 160 kg N_{total} ha⁻¹, a donné un rendement équivalent à celui de l'ECV. L'efficacité fertilisante des FPG, lorsqu'une culture est nitrophile et que les granules sont appliqués en bande et les apports fractionnés, semble donc particulièrement élevée.

Dans ce contexte, la contre-performance du traitement CEN 0,90 en 2018 est difficilement explicable puisque les deux doses en-dessous (CEN 1,00 et CEN 1,10) et celle juste au-dessus (CEN 0,80) ont donné un rendement équivalent ou supérieur. Il est à noter que la saison 2018 n'a pas été bonne pour la croissance du maïs-grain. Des périodes d'excès de chaleur et de manque d'eau au mois de juillet ont nui au développement et à la production des rendements (FADQ 2019) qui ont été faibles même avec les apports recommandés d'ECV, avec 7,5 T ha⁻¹ (moyenne 2015-2017: 10,2 T ha⁻¹ vs 9,4 T ha⁻¹ en 2018). Des effets de sites, autres que la disponibilité en N dans le sol, peuvent donc avoir affecté la croissance du maïs. Une partie des parcelles CEN 0,90 était peut-être dans des zones de sol plus sèche. Autre possibilité, la présence de blessures sur le feuillage en post-levé avait été remarquée dans l'ensemble du dispositif dont les plants exprimaient un retard de croissance. Ces dommages ont été attribués à des larves de calandre. Il se peut que les dommages aient été plus grands dans une ou des parcelles du CEN 0,90. À cet égard, une attention particulière a tout de même été apportée pour réaliser les échantillonnages sur des plants sains. Quoi qu'il en soit, cette contre-performance du CEN 0,90 coïncide avec les flux de NO₃ inférieurs mesurés entre la fin juillet et la fin août, période reconnue de prélèvement actif du N par le maïs (60 % du N de la saison entre le 60^e et 90^e jour après semis, OMAFRA 2018), en comparaison de ceux des parcelles ECV (Figure 12). Les flux entre les FPG et l'ECV auraient peut-être été plus similaires sur toute la saison, tel que mesuré en 2017, si les MEI n'avaient pas été placées dans les parcelles CEN 0,90 par défaut.

Comme dans le cas de l'avoine, les CEN testés *a priori* de 2018 avaient été haussés étant donné l'efficacité plus grande que prévue selon le GREF (CRAAQ 2010) des FPG en 2017. Il n'a toutefois pas été possible d'atteindre un plateau lors de la 2^e saison d'expérience. Ceci pose une problématique en regard de la détermination du CEN adéquat puisqu'on ne peut présumer qu'un CEN plus élevé que ce qui a été testé ne devrait pas être attribué. Sur la base des rendements mesurés à ces sites, l'application d'un CEN entre 90 - 95 % aux doses de N total apportées par les FPG semblerait prudent puisque les CEN de 90 %, 100 % et 110 % ont permis d'atteindre des rendements comparables à ceux obtenus avec l'engrais minéral. D'autant plus qu'un CEN maximal de 90 % a aussi été calculé sur la base des prélèvements totaux en N (voir section 3.4). Cet intervalle tiendrait compte de la difficulté de prévoir la variabilité des contenus en N_{total} de l'engrais organique d'une année à l'autre. Il vaut mieux également être prudent considérant que les conditions de 2018 n'ont pas permis à la culture de tirer le maximum des engrais et ont occasionné des rendements inférieurs à la moyenne de référence pour la région (moyenne 2015-2017 de 9,2 T ha⁻¹ pour Capitale-Nationale-Mauricie, ISQ 2019). Toutefois, il est intéressant de constater que les conditions

plus difficiles n'ont pas nui davantage à l'efficacité des FPG qu'à celle de l'ECV. En conditions plus sèches (voir section 3.1), un effet négatif sur la minéralisation du N_{total} des FPG était pourtant attendu.

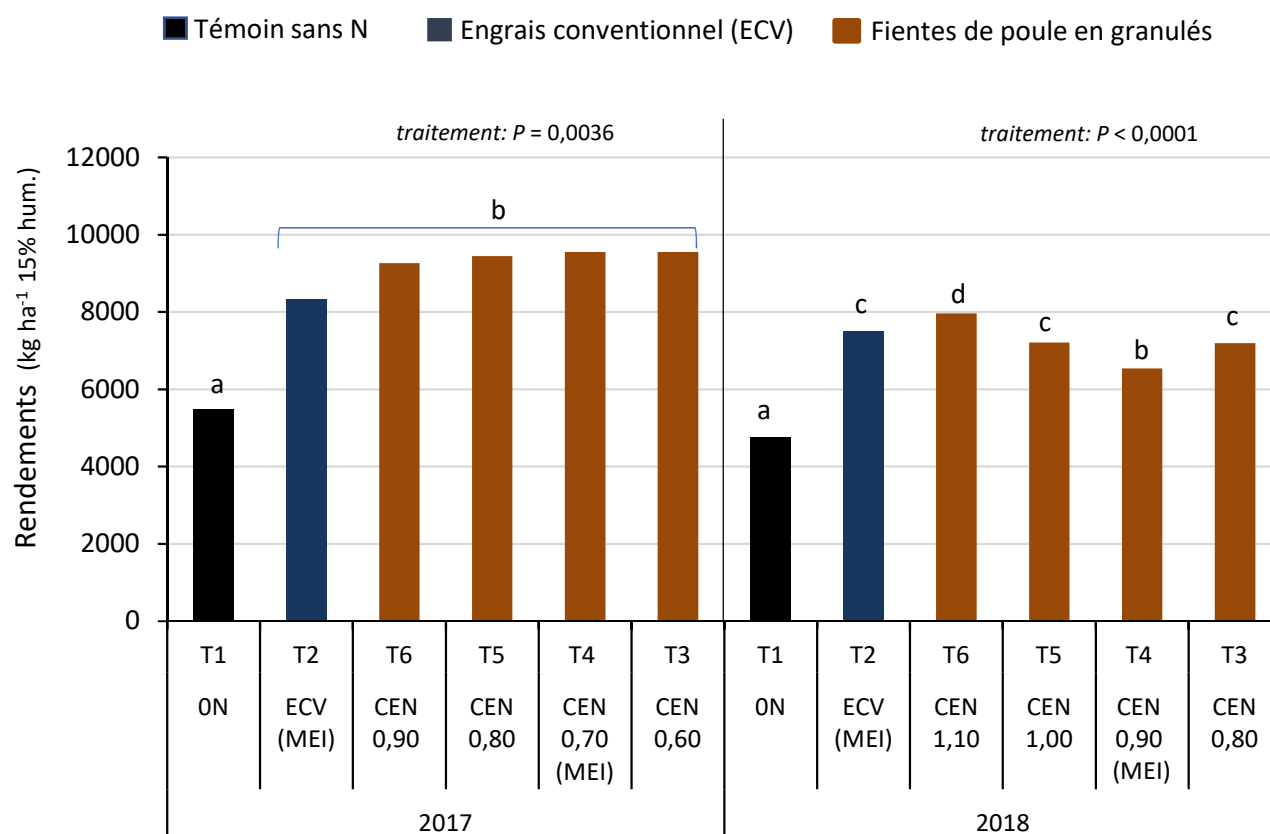


Figure 16. Rendements en grains de maïs en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG, en 2017 et 2018. Les valeurs de chaque graphique avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil $P \leq 0,1$.

Au niveau des indicateurs nutritionnels, les teneurs en N (%) des feuilles (Figure 17) montrent que la nutrition azotée de la culture a été accrue de façon similaire peu importe l'engrais utilisé (ECV ou FPG) et le CEN du FPG testé. Seule la dose CEN 0,80 de la saison 2017 présente une teneur en N légèrement inférieure (12 %) à celle des plants ECV. Cependant, tous les plants fertilisés présentent des concentrations dépassant la valeur minimale critique de 2,5 % (CRAAQ 2010).

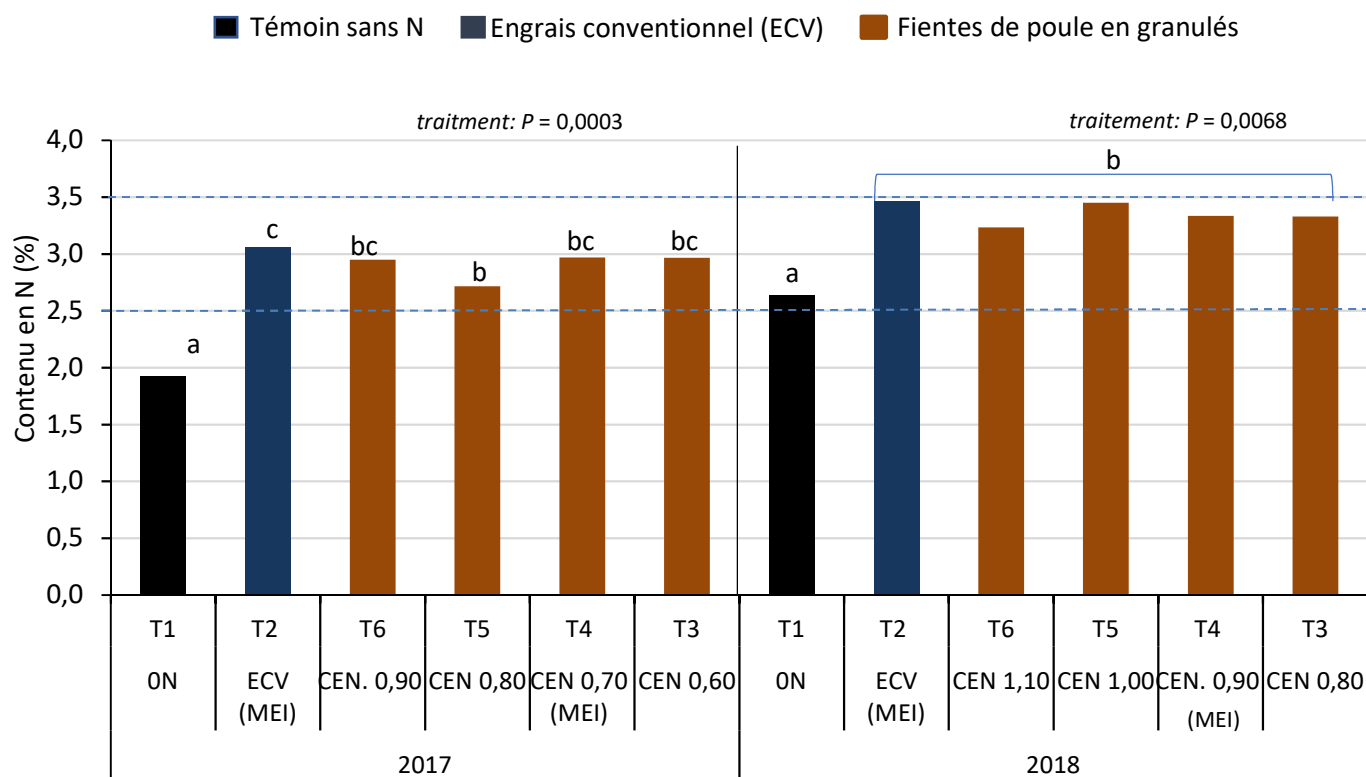


Figure 17. Contenu en azote des feuilles d'avoine au stade avant épiaison, en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture de l'avoine, le 9 août en 2017 et en 2018. Les lignes pointillées représentent la valeur minimale critique et la valeur critique d'excès de la teneur en N des feuilles pour l'avoine. Les valeurs de chaque graphique avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil $P \leq 0,1$.

En saison, la courbe des prélèvements en N par les parties aériennes des plants (tiges) (Figure 18) montre qu'en date du fractionnement (40 jours (2017) et 49 jours (2018) après les semis), les plants fertilisés n'ont réalisé environ que 5 % du prélèvement total en N qui sera mesuré à la récolte (tiges + grains), les deux années. Les prélèvements se situaient entre 8 et 13 kg N ha⁻¹ en 2017 et entre 5 et 10 kg N ha⁻¹ en 2018. Ces valeurs démontrent toute l'importance de fractionner la fertilisation azotée dans le maïs. Aucun lien (coefficient de corrélation de Pearson) ne ressort d'ailleurs entre le prélèvement à ce stade et le rendement en grains final. Autrement, l'analyse statistique indique que les traitements de fertilisation n'ont eu aucun effet significatif ($P = 0,6065$) sur le prélèvement en N des plants, même en comparaison des plants non fertilisés.

Plus tard en saison, au stade des soies (Figure 18 : 9 août en 2017 et 2018), le prélèvement en N des plants ECV semble se démarquer, surtout en 2017, mais l'effet de la fertilisation tient principalement à la différence entre le prélèvement des plants ON et ceux des plants fertilisés. Ainsi, en 2017, les plants ECV ont un prélèvement non statistiquement différent de ceux des plants FPG. En 2018, l'effet fertilisation présente une tendance à $P = 0,1090$. Toutefois, le prélèvement des plants ECV n'est supérieur qu'à celui des plants ON ($P = 0,0209$) et du CEN 0,80 ($P = 0,0906$). De plus, le prélèvement en N des plants du T6 (CEN 1,10) (114 kg N ha⁻¹), apportant moins de N_{total} ha⁻¹

(145 kg N_{total} ha⁻¹) que le traitement ECV (160 kg N_{total} ha⁻¹), est équivalent au prélèvement de ce dernier (116 kg N ha⁻¹). Ceci indique donc une efficacité élevée des FPG à fournir de l'azote assimilable à la culture. Par ailleurs, les prélèvements des plants fertilisés se situent entre 88 et 116 kg N ha⁻¹, soit de 48-64 % des prélèvements totaux finaux (tiges + grains). Les prélèvements soutenus par le sol seul, les deux années, se situaient quant à eux en moyenne à 74 kg N ha⁻¹, ce qui représente tout de même une valeur élevée en comparaison de ce qui est recommandé pour la fertilisation du maïs (CRAAQ 2010). Cette fourniture n'est pas suffisante pour atteindre un plein rendement (Figure 16), mais démontre que le sol seul peut fournir une quantité significative de N. Enfin, le prélèvement des tiges à ce stade est ressorti comme étant hautement corrélé avec le rendement final en grains. Le coefficient de corrélation de Pearson donne un R² de 78 et 84 % en 2017 et 2018, respectivement.

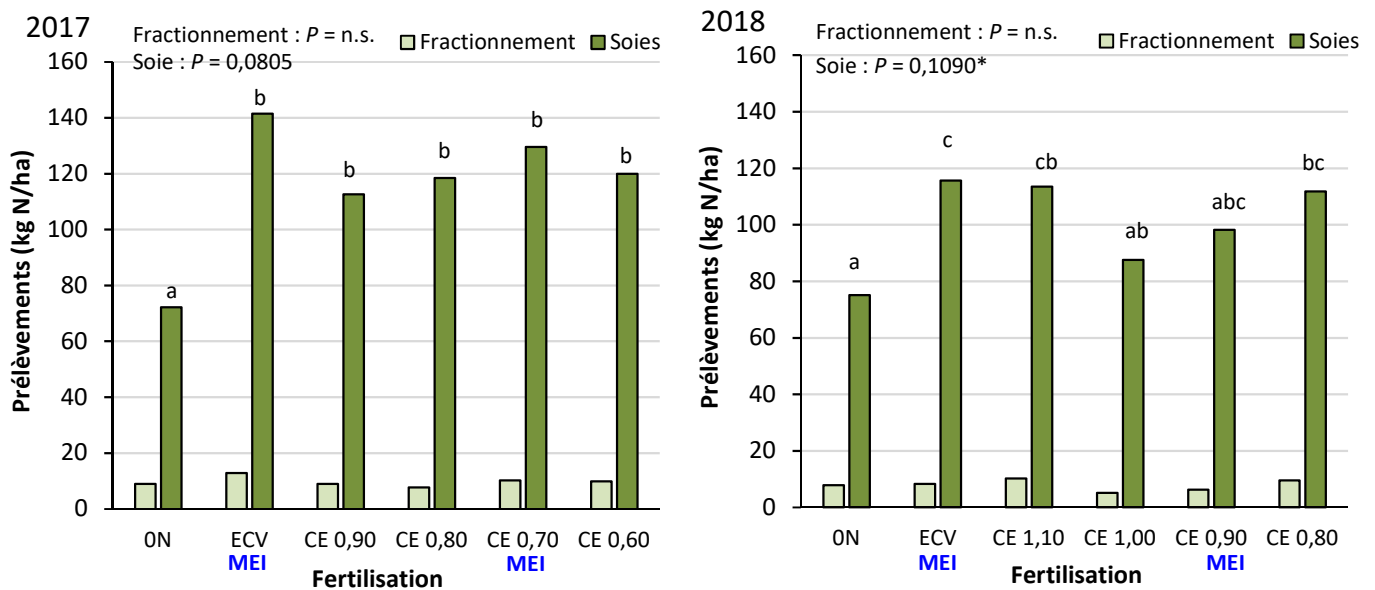


Figure 18. Prélèvements en N par la biomasse aérienne des plants en saison, en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture de l'avoine, en 2017 et 2018. Les valeurs de chaque graphique avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil $P < 0,1$. * Effet fertilisation en 2018 au stade soies au niveau tendance.

3.4 COEFFICIENT D'EFFICACITÉ AZOTÉ DES FIENTES DE POULE EN GRANULÉS

Dans la culture de l'avoine, la compilation des prélèvements totaux (paille + grains) en N par les plants à chacune des années a permis de calculer un TUA du N de l'ECV de 42 % et 51 %, selon les années. Le gain à fertiliser en termes nutritionnels au taux de 60 kg N/ha de 27-0-0 a donc été de 25 et 31 kg N ha⁻¹ en 2017 et 2018, respectivement (Tableau 14). Avec les FPG, les TUA du N les plus hauts atteints ont été de 31 et 27 % en 2017 et 2018, respectivement (Tableau 14). Ainsi, les CEN les plus hauts atteints pour les FPG ont été de 64 et 60 % en 2017 et 2018, respectivement. Toutefois, tel que mentionné dans la section des rendements, sur la base du CEN recommandé (60 %) par le tableau 10.4 du GREF (CRAAQ 2010), une courbe de réponse n'a pas pu être obtenue à aucune des années de l'étude, malgré une hausse marquée des CEN en 2^e saison (2017 : 50-80 %, 2018 : 80-114

%). Ceci empêche de calculer un CEN que l'on pourrait qualifier de maximal car tout apport de FPG excédentaire à ce qui est vraiment nécessaire vient diminuer artificiellement le TUA puisque le prélèvement est divisé par la dose de N_{total} apportée. Il est toutefois possible de statuer que le CEN des FPG est minimalement entre 60 et 65 %, calculé sur la base des prélèvements. Néanmoins, sur la base des rendements obtenus, un CEN de 80 % a été identifié. La différence entre les deux tient à la forte performance de l'ECV à hausser le prélèvement de N, qui ne mène cependant pas à de meilleurs rendements. Le prélèvement supplémentaire avec l'ECV pourrait donc représenter un prélèvement dit «de luxe». Le prélèvement de luxe s'observe lorsque la disponibilité en N est plus grande que nécessaire. Les prélèvements peuvent donc être supérieurs mais ils ne se traduisent pas en gain de rendements. Le prélèvement de luxe représente donc un coût monétaire et environnemental accru sans gain de productivité. Sur cette base, un CEN plus haut devrait être utilisé, sans dépasser 80 %. Une valeur moyenne de $\approx 70\%$ pourrait être utilisée. Des tests supplémentaires, incluant une courbe de réponse à l'ECV, en plus de celle pour les FPG, sont nécessaires pour éviter de calculer sur la base de prélèvement de luxe et pour statuer sur la possibilité d'employer un CEN plus élevé.

Tableau 14. Taux d'utilisation apparent (TUA) du N des engrais et coefficient d'efficacité azoté (CEN) en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG pour la culture de l'avoine, en 2017 et 2018.

Avoine 2017				Avoine 2018			
Traitements	Prélèvement			Traitements	Prélèvement		
	N total (kg ha ⁻¹)	TUA (%)	CEN (%)		N total (kg ha ⁻¹)	TUA (%)	CEN (%)
ECV	79 d	42	100	ECV	95 c	51	100
ON	54 a	-	-	ON	64 a	-	-
CEN 0,80	74 cd	27	64	CEN 1,14	80 b	30	58
CEN 0,70	68 b	17	40	CEN 1,02	79 b	26	50
CEN 0,60	72 bc	18	43	CEN 0,91	81 b	25	49
CEN 0,50	76 cd	18	43	CEN 0,80	87 bc	31	60
Valeurs de P	0,0002	.	.	Valeurs de P	0,0089	.	.

Dans le cas du maïs, l'azote fourni par le sol (Témoin ON) s'est élevé à 70 et 95 kg N ha⁻¹ en 2017 et 2018, respectivement (Tableau 15). En comparaison, la culture ayant reçu 160 kg de N ha⁻¹ avec l'ECV a prélevé 163 et 196 kg N ha⁻¹ en 2017 et en 2018, respectivement. Le TUA moyen du N de l'engrais 27-0-0 est donc d'environ 60 %, ce qui est meilleur que dans le cas de l'avoine. Néanmoins, sur la base du CEN recommandé (70 %) par le tableau 10.4 du GREF (CRAAQ 2010), aucune courbe de réponse n'a été atteinte, car même la plus faible dose d'apport de FPG a donné un rendement équivalent à celui de l'ECV. Comme pour l'avoine, il n'est donc pas possible de conclure sur la valeur maximale que pourrait avoir le CE du N des FPG pour le maïs-grain. Sur la base des prélèvements totaux en N, des CEN de 74 et 90 % ont été calculés. Comme pour l'avoine, ces valeurs semblent

toutefois abaissées par la consommation de luxe en N des plants fertilisés à l'ECV. Sur la base des rendements, un CEN au-delà de 90 % a d'ailleurs été identifié. Ainsi, même un CEN moyen de $\approx 80\%$ calculé sur les prélèvements semble conservateur. Le maïs tendait en effet à produire plus de rendement avec les FPG en 2017 à un CEN de 90 %. De plus, en 2018, il a soutenu un rendement statistiquement équivalent avec des CEN de 80% et 100% et un rendement plus élevé avec un CEN de 110 % (apport moindre de $N_{\text{total}} \text{ ha}^{-1}$ qu'avec l'ECV (voir section 3.3)). Ceci, bien que le mois de juillet ait été caractérisé par des conditions climatiques qui auraient pu nuire à l'efficacité du N_{total} des FPG qui dépend de l'activité des microorganismes du sol, eux-mêmes fortement dépendant de la disponibilité en eau. En attendant de nouveaux essais, tel que recommandés pour l'avoine, permettant d'atteindre un plateau de rendement et d'utiliser des valeurs de prélèvements du N de l'ECV hors de la zone de luxe, un CEN de 85-90 % pourrait être utilisé pour les cultures nitrophiles avec application en bande fractionnée.

Tableau 15. Taux d'utilisation apparent (TUA) du N des engrais et coefficient d'efficacité azoté (CEN) en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG pour la culture du maïs-grain, en 2017 et 2018.

Maïs 2017				Maïs 2018			
Traitements	Prélèvement			Traitements	Prélèvement		
	N total (kg/ha)	TUA (%)	CEN (%)		N total (kg/ha)	TUA (%)	CEN (%)
ECV	163 bc	59	100	ECV	196 d	63	100
ON	70 a	-	-	ON	95 a	-	-
CEN 0,90	146 b	43	74	CEN 1,10	178 c	57	90
CEN 0,80	152 b	41	71	CEN 1,00	183 cd	55	86
CEN 0,70	164 b	41	71	CEN 0,90	158 b	36	56
CEN 0,60	173 c	39	66	CEN 0,80	189 cd	47	74
Valeurs de P	<0,0001	.	.	Valeurs de P	<0,0001	.	.

3.5 AZOTE ET PHOSPHORE RÉSIDUEL POST-RÉCOLTE

L'essai visait également à mesurer si une partie du N_{total} des FPG perdurait au-delà de la récolte, présentant ainsi le potentiel de libérer du nitrate s'ajoutant au nitrate résiduel déjà présent et haussant d'autant le risque de lessivage du nitrate vers les eaux souterraines. Le P soluble a aussi été mesuré étant donné qu'il est reconnu que les engrais organiques apportent des composés carbonés qui diminuent la fixation du P dans le sol en compétitionnant pour les mêmes sites de fixation. Le lien entre le P_{eau} (P Sissingh) et les pertes de P liées à l'eutrophisation des cours d'eau est bien établi dans la littérature (Sissingh 1971; Breeuwsma et Reijerink 1993, Pote et coll. 1999).

Avoine

Dans la culture de l'avoine, le potentiel de relâchement de NO_3 par minéralisation des FPG est particulièrement pertinent à mesurer à la récolte car cette culture est récoltée tôt, alors que les conditions sont encore propices pour plusieurs semaines à l'activité biologique. Cependant, aucun effet n'a été mesuré lors des incubations de 2017, ni de 2018. Ce résultat est appuyé par la forte labilité du carbone des FPG (section 3.2.2), à près de 80 % dans la fraction soluble de l'ISB, qui indique que ce produit est rapidement minéralisable. Les flux de NO_3 mesurés sur les MEI corroborent aussi ce résultat puisque les flux se maintenaient près zéro dès la mi-juillet. Conséquemment, ceci indique que cet engrais organique n'aura pas d'arrière-effet N la saison suivante. En ce qui a trait au NO_3 résiduel déjà présent dans le sol au moment de la récolte, un effet significatif a été trouvé seulement en 2017 ($P = 0,0103$) (Tableaux 16 et 17). Les teneurs les plus élevées se retrouvaient dans les sols fertilisés avec l'ECV et les plus fortes doses de FPG, avec des teneurs 1,3-1,7 fois supérieures à celle du sol non fertilisé en N. Cependant, les quantités demeurent basses et ces doses d'apport de FPG ne seraient pas recommandées vu l'efficacité élevée du produit, contrairement à la dose d'ECV qui est celle recommandée dans le GREF (CRAAQ 2010). Aucun effet sur le P_{eau} n'a été mesuré non plus, quelle que soit la fertilisation.

Tableau 16. Potentiel de minéralisation de l'azote et N et P solubles résiduels du sol en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture de l'avoine, le 12 septembre 2017.

Avoine 2017	N- NO_3	N- NH_4	Minéralisation N- NO_3 (10 jrs)	P Soluble
Récolte	kg/ha b.s.	kg/ha b.s.	kg/ha b.s.	mg/kg b.s.
ON	8,71 a	2,027	11,15	4,06
ECV	11,61 b	2,04	9,67	5,05
CEN 0,80	8,07 a	1,98	8,63	4,24
CEN 0,70	8,94 a	2,43	9,25	4,59
CEN 0,60	14,40 c	2,24	9,11	4,14
CEN 0,50	11,62 b	2,23	9,27	3,12
Valeurs de P	0,0103	n.s.	n.s.	n.s.

Tableau 17. Potentiel de minéralisation de l'azote et N et P solubles résiduels du sol en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture de l'avoine, le 27 août 2018.

Avoine 2018	N- NO_3	N- NH_4	Minéralisation	P Soluble
Récolte	kg/ha b.s.	kg/ha b.s.	kg/ha b.s.	mg/kg b.s.
ON	16,53	2,18	12,74	1,74
ECV	20,60	2,39	12,62	1,75
CE 1,14	18,49	2,23	14,26	1,70
CE 1,02	17,25	2,13	12,61	1,80
CE 0,91	20,02	2,00	18,50	2,14
CE 0,80	16,79	2,05	10,25	2,01
Valeurs de P	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

Maïs-grain

Dans la culture du maïs-grain, les quantités de N apportées sont beaucoup plus importantes que dans l'avoine. Les teneurs en NO₃ résiduel au moment de la récolte sont toutefois similaires à celles dans l'avoine puisque les prélèvements en N du maïs sont aussi beaucoup plus grands que pour l'avoine. Un effet significatif de la fertilisation est toutefois mesuré les deux années (Tableau 18 : 2017 ; $P = 0,0405$, Tableau 19 : 2018 ; $P = 0,0263$). Globalement, en 2017, tous les sols fertilisés présentent un contenu en N-NO₃ résiduel équivalent de 12-13 kg N-NO₃ ha⁻¹. En 2018, ce sont les sols fertilisés à l'ECV et une des plus fortes doses de FPG qui ont les teneurs les plus élevées, de 22 % supérieures en moyenne à celle des autres sols fertilisés et de 2,5 fois plus élevées que dans le sol non fertilisé (ON). Cependant, tout comme pour l'avoine, autant en 2017 qu'en 2018, le potentiel de minéralisation du N organique du sol et les contenus en P soluble étaient équivalents entre tous les traitements, ce qui indique que les doses de FPG apportées n'entraînent pas de minéralisation accrue en post-récolte, en comparaison du sol sans fertilisation et ECV.

Tableau 18. Potentiel de minéralisation de l'azote et N et P solubles résiduels du sol en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture du maïs-grain, le 13 novembre 2017.

Maïs-grain 2017	N-NO ₃	N-NH ₄	Minéralisation N-NO ₃ (10 jrs)	P _{eau}
Récolte	kg/ha b.s.	kg/ha b.s.	kg/ha b.s.	mg/kg b.s.
ON	8,09 a	1,46	6,21	4,29
ECV	13,25 bc	1,63	11,59	4,15
CEN 0,90	11,82 bc	2,69	8,62	4,40
CEN 0,80	11,23 b	1,90	8,39	6,42
CEN 0,70	12,07 bc	1,67	10,08	6,46
CEN 0,60	13,99 c	1,64	10,68	5,15
Valeurs de P	0,0405	n.s.	n.s.	n.s.

Tableau 19. Potentiel de minéralisation de l'azote et N et P solubles résiduels du sol en fonction du type d'engrais et des doses d'apports des FPG dans la culture du maïs-grain, le 25 octobre 2018.

Maïs-grain 2018	N-NO ₃	N-NH ₄	Minéralisation N-NO ₃ (10 jrs)	P _{eau}
Récolte	kg/ha b.s.	kg/ha b.s.	kg/ha b.s.	mg/kg b.s.
ON	8,62 a	2,14 a	5,59	2,10
ECV	24,80 c	1,60 b	8,55	2,05
CEN 1,10	17,93 b	1,26 b	7,59	3,18
CEN 1,00	15,77 b	1,68 b	8,63	2,04
CEN 0,90	18,62 bc	1,38 b	7,91	2,24
CEN 0,80	18,09 b	1,34 b	7,59	2,47
Valeurs de P	0,0263	0,0618	n.s.	n.s.

4 CONCLUSION

Cette étude a permis de caractériser la composition chimique des fientes de poules granulées (FPG) et de déterminer leur impact sur la dynamique du nitrate (NO_3) du sol en saison, la nutrition azotée et le rendement de l'avoine et du maïs-grain. Le coefficient d'efficacité du N (CEN) des FPG a aussi été testé pour ces deux cultures en comparaison des CEN recommandés par le Guide de référence en fertilisation du Québec (GREF 2010). Il en ressort que les FPG sont constituées à 75 % de C facilement minéralisable (ISB=13), dont 16 % de C labile (C_{eau}), et que leur contenu en N_{total} est à 96 % organique (N_o). Cette combinaison permet une minéralisation rapide du N_o et un relâchement hâtif de nitrate (NO_3), tel que le corrobore le suivi *in situ* des flux de NO_3 sur toute la saison pour les deux cultures. De même, les FPG ont été efficaces à nourrir les cultures en N, en plus de stimuler l'activité biologique du sol aux doses appliquées pour le maïs-grain. Leur efficacité fertilisante azotée a d'ailleurs été élevée. Il n'a pas été possible de statuer sur un CEN spécifique, mais les intervalles suggérés sont tous plus élevés que les CEN du GREF (2010). D'une part, l'engrais de synthèse (ECV) a entraîné un prélèvement de luxe. Ceci vient artificiellement abaisser les CEN calculés selon ce paramètre (avoine : CEN = 60-64 %, maïs : CEN=74-90 %). Ces derniers se sont donc avérés plus bas que les CEN identifiés selon les rendements (avoine : CEN=80 %, maïs : CEN=90-110 %). D'autres part, comme il n'a pas été possible d'obtenir de courbe de réponse complète des rendements, due à l'efficacité plus grande que prévue des FPG, ce paramètre ne permet pas non plus de statuer sur le CEN maximal. Dans l'attente d'essais supplémentaires, un CEN plus élevé pourrait toutefois être utilisé dans les cultures non-nitrophiles, sans dépasser 80 %. Une valeur moyenne de ≈ 70 % pourrait être proposée. Dans le cas du maïs-grain, un CEN entre 85-90% semble sécuritaire. Il ressort également que le CEN est plus élevé lorsque les FPG sont utilisées pour fertiliser le maïs-grain que l'avoine. Le caractère nitrophile de la culture, couplé au mode d'application en bande et fractionnée, contribuent probablement à cette meilleure efficacité. Les FPG ont tout de même été performantes dans la culture de l'avoine, mais l'application à la volée tendait à induire un délai suivant l'application de l'engrais en comparaison de l'ECV. Enfin, l'emploi des FPG, mêmes aux doses les plus grandes testées, n'entraîne pas de hausse du NO_3 résiduel, ni de la fourniture en N du sol en post-récolte et il présente un des meilleurs ratio $N_{\text{eff}}/N_{\text{total}}$, contribuant à diminuer les apports de P excédentaires.

RÉFÉRENCES

AFNOR. 2005. Fractionnement biochimique et estimation de la stabilité biologique : Méthode de caractérisation de la matière organique par solubilisations successives. Association française de normalisation. Norme XP U p.44-162.

Beudet et coll. 2003. Description statistique des propriétés chimiques des sols minéraux du Québec. MAPAQ, IRDA, Québec. 112 p

Breeuwsma, A., et J.G.A. Reijerink. 1993. Phosphate saturated soils: A “new” environmental issue. p. 79–85. In G.R.B. ter Meulen et al.(ed.) Chemical time bombs. Proc. Eur. State-of-the-Art Conf. on Delayed Effects of Chemicals in Soils and Sediments, Veldhoven, the Netherlands. 2–5 Sept. 1992. Foundation for Ecodevelopment “Stichting Mondiaal Alternatief”, Hoofddorp, the Netherlands.

CDFA. 2019. Barley Nitrogen Uptake and Partitioning. Disponible en ligne https://apps1.cdfa.ca.gov/FertilizerResearch/docs/N_Barley.html

CEROM. 2016. Guide réseaux grandes cultures du Québec – essais 2016. Décembre 2016. 51 pages.

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

Côté et coll. 2018. Action spécifique en agriculture biologique à la plateforme d'innovation en agriculture biologique de l'IRDA, volet grandes cultures. Rapport final présenté au MAPAQ. 48 p.

CRAAQ. 2003. Guide de référence en fertilisation du Québec, 1e édition. CRAAQ, Québec, 295 p.

CRAAQ 2010. Guide de référence en fertilisation du Québec. 2e édition. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). Ste-Foy, Québec. 473p.

Duval et coll. 2015. Remplacer l’azote venant des apports de fumier par des engrais verts de légumineuses; des exemples au Québec et ailleurs en Amérique du Nord. Disponible en ligne <http://www.cetab.org/publications/remplacer-lazote-venant-des-apports-en-fumier-par-des-engrais-verts-de-legumineuses>.

Financière Agricole du Québec (FADQ). 2019. <https://www.fadq.qc.ca/salle-de-presse/bulletins-dinformation/etat-des-cultures/2018/>

Gale ES. et coll. 2006. Estimating Plant-Available Nitrogen Release from Manures, Composts, and Specialty Products. J. Environ. Qual. 35(6):2321.

Garcia, C., Hernandez, T. Costa, F. 1990. Study on water extract of sewage sludge compost. Soil Sci. Plant Nutr. 37:399-408.

Gee, G.W. et Bauder, J.W. 1986. Particle-size analysis. p. 383-411. In A. Klute (ed) Methods of soil analysis. Part 1. ASA. Monograph No 9. 2nd edition. Madison, WI.

Giroux, M. et Audesse, P. 2004. Comparaison de deux méthodes de détermination des teneurs en carbone organique, en azote total et du rapport C/N de divers amendements organiques et engrais de ferme. *Agrosol* 15(2):107-110.

Giroux, M., A. N'Dayegamiye et R. Royer. 2007. Effet des apports d'automne et de printemps de fumiers et de boues mixtes de papetières sur le rendement, la qualité de la pomme de terre et l'efficacité de l'azote. *Agrosolutions* 18(1) : 25-34.

Gouvernement du Canada. Règlement sur les engrais. https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/reglements/C.R.C.,_ch._666/index.html page consultée le 25 mars 2019

Gouvernement du Québec. Règlement sur les exploitations agricoles. <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/Q-2,%20r.%2026> page consultée le 25 mars 2019

Institut de la Statistique du Québec (ISQ). <http://www.stat.gouv.qc.ca/>

Isaac, A.R. et Johnson, W.C. 1976. Determination of nitrogen in plants tissue using a block digester. *J. AOAC* 59 :98-100.

Knahm. 2005. Factors influencing nitrogen mineralization during poultry litter composting and calculation for available nitrogen. *World's Poultry Sci. J.* 61:238-255

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

Landry et Boivin. 2012. Performances des fertilisants à libération contrôlée et d'origine organique dans la fraise à jour neutre fertilisée. Rapport final. PSIH10-1-355.

Landry, C., M. Marchand-Roy, J. Mainguy, M. Paradis. 2018. « Tests de régies de fertilisation mixtes d'engrais verts et de ferme sur les rendements en pommes de terre biologique ». IRDA. IRDA. Colloque Pomme de terre 2018, Lévis, novembre 2018.

Landry, C., M. Marchand-Roy, J. Mainguy, C. Côté, M. Généreux, L. Belzile et D. Godonou. 2019. Développement d'une régie de fertilisation combinant des engrais verts et des engrais de ferme pour combler les besoins en azote d'une rotation blé/maïs-grain/soya tout en limitant les apports de phosphore en production biologique. Projet Innov'Action no. IA115487. Rapport final IRDA présenté au Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. 46 pages.

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

Mazzarino, M.J., Laos, F.L., Satti, P. et Moyano, S. 1998. Agronomic and environmental aspects of utilization of organic residues in soils of the Andean-Patagonian region. *Soil Sci. Plant Nutr.* 44:105-113.

McGill et coll. Dynamics of soil microbial biomass and water-soluble organic C in Breton after 50 years of cropping to two rotations 1986. *Can. J. Soil Sci* 66:1-19.

N'Dayegamiye A. et coll. 2004. Épandages d'automne et de printemps de divers fumiers et boues mixtes de papetières : coefficients d'efficacité et nitrates dans le sol. 15(3) : 97-106.

Nguyen HQ. 2010. Long-term effects of land application of poultry manure on crop production, and soil and water quality under a corn-soybean rotation system in Iowa. Thèse de maîtrise. Iowa State University. 89 p.

OMAFRA. 2019. Field Crop Protection Guide. <http://www.omafra.gov.on.ca/english/crops/pub812/p812toc.html>

Peters, J., Combs, S. M., Hoskins, B., Jarman, J., Kovar, J., Watson, M., et Wolf, N. 2003. Recommended methods of manure analysis. University of Wisconsin Cooperative Extension Publishing: Madison, WI.

Pote, D.H., T.C. Daniel, D.J. Nichols, A.N. Sharpley, P.A. Moore, Jr., D.M. Miller et D.R. Edwards. 1999. Relationship between phosphorus levels in three Ultisols and phosphorus concentrations in runoff. *J. Environ. Qual.* 28:170–175.

Ritter, W.F. 2000. Potential impact of land application of by-products on ground and surface water quality. Dans J.F. Power et coll. (eds.) Land application of agricultural, industrial, and municipal by products. SSSA Book Serie No. 6, Madison, WI. Pages 263-287.

Ruiz-Diaz Suarez, Dorivar A., 2007 Assessment of nitrogen supply from poultry manure applied to corn. Retrospective Theses and Dissertations. Iowa State University.

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

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

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

Weil, R.R., K.R. Islam, A. M.A. Stine, J.B. Gruver and S.E. Samson-Liebig. 2003. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. *American J. Alternative Agric.* Vol 18(1): 1-17.

5 ANNEXE 1

5.1 TABLEAUX DES APPORTS DE NUTRIMENTS

Apports totaux en N, P₂O₅ et K₂O dans la culture de l'avoine, selon les diverses régies à l'étude et le type d'engrais utilisé, saison 2017.

Engrais Traitements	FPG T ha ⁻¹	N total		P ₂ O ₅		K ₂ O	
		27-0-0	FPG	0-46-0	FPG	0-0-22-11	FPG
		kg ha ⁻¹					
		Plantation	Plantation				
T1	0	0	0	20	0	20	0
T2	0	60	0	20	0	20	0
T3	2,22	0	120	0	80	0	63
T4	1,85	0	100	0	67	0	52
T5	1,58	0	86	0	57	0	45
T6	1,39	0	75	0	50	0	39

Besoins en N-P₂O₅-K₂O de l'avoine pour le site à l'étude : 60 kg N ha⁻¹ - 20 kg P₂O₅ ha⁻¹ - 20 kg K₂O ha⁻¹

Apports totaux en N, P₂O₅ et K₂O dans la culture du maïs-grain, selon les diverses régies à l'étude et le type d'engrais appliqué, saison 2017.

Engrais Traitements	FPG T ha ⁻¹	N total				P ₂ O ₅		K ₂ O	
		27-0-0	FPG	0-46-0	FPG	0-0-22-11	FPG		
		kg ha ⁻¹							
		Plantation	7 feuilles	Plantation	7 feuilles				
T1	0	0	0	0	0	40	0	40	0
T2	0	50	110	0	0	40	0	40	0
T3	4,93	0	0	83	183	0	178	0	139
T4	4,22	0	0	71	157	0	153	0	119
T5	3,70	0	0	63	138	0	134	0	104
T6	3,29	0	0	56	122	0	119	0	93

Besoins en N-P₂O₅-K₂O du maïs-grain pour le site à l'étude : 160 kg N ha⁻¹ - 40 kg P₂O₅ ha⁻¹ - 40 kg K₂O ha⁻¹

Apports totaux en N, P₂O₅ et K₂O dans la culture de l'avoine selon les diverses régies à l'étude et le type d'engrais appliqué, saison 2018.

Engrais Traitements	FPG T ha ⁻¹	N total		P ₂ O ₅		K ₂ O	
		27-0-0	FPG	0-46-0	FPG	0-0-22-11	FPG
		kg ha ⁻¹					
		Plantation	Plantation				
T1	0	0	0	20	0	50	0
T2	0	60	0	20	0	50	0
T3	1,58	0	75	0	57	9	39
T4	1,39	0	66	0	50	14	34
T5	1,23	0	58	0	44	18	31
T6	1,11	0	53	0	40	21	28

Besoins en N-P₂O₅-K₂O de l'avoine pour le site à l'étude : 60 kg N ha⁻¹ - 20 kg P₂O₅ ha⁻¹ - 50 kg K₂O ha⁻¹

Apports totaux en N, P₂O₅ et K₂O dans la culture du maïs-grain, selon les diverses régies à l'étude et le type d'engrais appliqué, saison 2018.

Engrais Traitements	FPG T ha ⁻¹	N total		N total		P ₂ O ₅		K ₂ O	
		27-0-0	FPG	27-0-0	FPG	0-46-0	FPG	0-0-22-11	FPG
		kg ha ⁻¹							
		Plantation	7 feuilles	Plantation	7 feuilles				
T1	0	0	0	0	0	40	0	80	0
T2	0	50	110	0	0	40	0	80	0
T3	4,22	0	0	55	145	0	152	0	105
T4	3,75	0	0	49	129	0	135	0	93
T5	3,38	0	0	44	116	0	122	0	84
T6	3,07	0	0	40	106	0	110	4	76

Besoins en N-P₂O₅-K₂O du maïs-grain pour le site à l'étude : 160 kg N ha⁻¹ - 40 kg P₂O₅ ha⁻¹ - 80 kg K₂O ha⁻¹