



Programme Agri-innovation – Volet B Rapport annuel sur le rendement 2017-2018

Pour les projets ou activités ayant débutés en retard, nous nous attendons à ce que les réponses à certaines questions soient brèves et à ce que d'autres questions ne s'appliquent pas ou soient prématurées. Veuillez indiquer « sans objet » si la question n'est pas pertinente pour l'instant.

Nom du bénéficiaire : Centre de recherche agroalimentaire de Mirabel

Titre du projet : Effet de l'utilisation d'engrais verts sur les fonctions écosystémiques de la communauté microbienne du sol.

Numéro du projet : PAI-374

Période visée par le rapport :

01-04-2017 au 31-05-2018

Numéro de l'activité : activité 2

Chercheur principal :

Dr. Caroline Provost

1. Mesures de rendement. Consultez l'annexe A pour obtenir une explication de chaque mesure.

Innovations	Résultats obtenus Nombre	Décrivez (2-3 paragraphes) chaque innovation produite, ainsi que son importance pour le groupe cible ou le secteur. Expliquez tout écart entre les résultats obtenus et les cibles. Utilisez un langage simple.
Nombre d'éléments de propriété intellectuelle découlant du projet		
Nombre de produits nouveaux ou améliorés		



Innovations	Résultats obtenus Nombre	Décrivez (2-3 paragraphes) chaque innovation produite, ainsi que son importance pour le groupe cible ou le secteur. Expliquez tout écart entre les résultats obtenus et les cibles. Utilisez un langage simple.
Nombre de processus ou systèmes nouveaux ou améliorés		
Nombre de pratiques nouvelles ou améliorées	Cible : 1 Atteinte : 1	Les résultats démontrent qu'il est facile d'utiliser une céréale en fin de saison pour protéger le sol de l'érosion durant la période hivernale. Au printemps, aucune contrainte culturale n'est observée. Toutefois, ce projet démontre aussi que la gestion des engrais verts doit être raisonnée individuellement pour chacun des sites. Cette gestion doit tenir compte des conditions de sol mais aussi des besoins particuliers, par exemple la réduction de l'érosion, la décompaction du sol ou l'apport de matière organique.
Nombre de nouvelles variétés		
Nombre de matériaux génétiques nouveaux ou améliorés		
Nombre de séquences de gènes nouvelles ou améliorées		
Nombre de connaissances améliorées	Cible : 1 Atteinte : 1	Les résultats obtenus démontrent que le microbiome du sol est grandement influencé par le type de sol. Pour le site de Mirabel, sur une courte période, les engrais verts ont démontré peu d'impact sur le microbiome du sol, cependant, les communautés bactériennes et fongiques du sol ont un effet positif sur le rendement de la culture principale. De plus, l'utilisation des engrais verts a eu un effet négatif sur la culture de laitue. Ainsi, il faut toujours



Innovations	Résultats obtenus	Décrivez (2-3 paragraphes) chaque innovation produite, ainsi que son importance pour le groupe cible ou le secteur. Expliquez tout écart entre les résultats obtenus et les cibles. Utilisez un langage simple.
	Nombre	
		considérer le rapport bénéfice/pertes lorsque l'on utilise des engrais verts, il est fréquent d'avoir à faire un compromis lorsqu'on les utilise.

Éléments d'information	Résultats obtenus	Donnez une référence complète pour chaque élément. Consultez les exemples de l'annexe A.
Nombre de publications avec un comité de lecture		
Nombre d'éléments d'information		
Nombre de reportages		
Nombre d'événements d'information	1	Provost, C, S. Lamothe, C. Guertin and P. Constant. 2017. Assessing the impact of green manure on ecosystem functioning of soil microbial communities. Future IPM 3.0, IOBC conference, Riva Del Garda, Italie, 17-20 octobre 2017.
		Indiquez le nombre de participants
Nombre de participants aux événements d'information	300	Future IPM
		Indiquez le nombre de participants qui envisagent d'adopter la nouvelle innovation.
Nombre de participants aux événements d'information		



qui envisagent d'adopter la nouvelle innovation		
		Précisez le nom des personnes qui ont décroché un diplôme, le diplôme obtenu ainsi que la date d'obtention.
Nombre de personnes ayant décroché une maîtrise ou un doctorat pendant le projet		

2. Sommaire

Le sommaire comporte deux volets : les points saillants des activités et des résultats scientifiques, et les exemples de réussite. L'information peut être utilisée à des fins de communications internes et externes. Utilisez un langage simple, à l'intention d'un public général. Ne divulguez pas de renseignements confidentiels ou de nature délicate.

Points saillants – Cette section décrit les principales activités et les résultats scientifiques définitifs d'une activité ou d'un projet de manière à ce que les lecteurs puissent obtenir rapidement des renseignements sur une vaste gamme de documents sans avoir à tous les lire. Veuillez fournir un bref énoncé du problème, des renseignements généraux, une analyse concise et les conclusions clés. Longueur maximale proposée : 1 page.

L'intensification des pratiques culturales en agriculture a d'importants impacts sur la dégradation des écosystèmes et la perte de productivité à long terme. Ces impacts se font sentir sur les services écosystémiques et de façon plus particulière sur la diversité. Les engrais verts sont utilisés dans les pratiques culturales afin de répondre à différents objectifs: 1) améliorer la fertilité du sol; 2) participer à la fertilisation de la culture ; 3) améliorer la structure du sol et la teneur en matière organique; 4) réduire l'érosion du sol; 5) contrôler les mauvaises herbes; et 6) interrompre les cycles des ravageurs. Les engrais verts favorisent également une diversification des cultures implantées qui profite à l'écosystème biologique du sol. Tous ces changements physiques du sol et de la disponibilité des nutriments assimilables peuvent avoir des répercussions sur les organismes retrouvés dans le sol. L'objectif du projet est de démontrer que la période d'ensemencement des engrais verts influencera à travers des processus stochastiques et de niche à la fois l' α - et la β -diversité de communauté microbienne du sol. Les objectifs spécifiques sont : 1) intégrer les analyses de diversité microbienne afin de déterminer la sensibilité à identifier des indicateurs des services écosystémiques, notamment la productivité et les processus biogéochimiques; 2) évaluer l'efficacité



de l'identification de certaines bactéries comme indicateur de l'impact des traitements sur les propriétés du sol.

Les essais ont été réalisés pendant la saison 2016-2017 à l'Abbaye d'Oka (loam d'Oka et loam argileux). L'engrais vert utilisé pour les essais est l'avoine et les traitements qui ont été comparés sont les périodes de semis de la fin de saison 2016 : fin juillet; fin juillet incorporé à l'automne; fin août et un témoin. La biomasse sèche, la hauteur des pousses et la profondeur racinaire des différents semis d'avoine ont été observées à l'automne 2016. Quant à la température du sol, la masse volumique apparente, la compaction du sol, la conductivité hydraulique, le développement de la culture principale et le rendement des récoltes de laitue, ils ont été observés au cours de la saison 2017. La présence d'un couvert d'avoine semé en juillet semble avoir favorisé une température minimale de sol légèrement plus élevée. La température moyenne et maximale dans ce couvert d'avoine semble cependant légèrement plus froide. Le semis d'avoine de la fin juillet qui a été incorporé à l'automne a démontré une compaction de sol qui était généralement moindre la saison suivante. Le travail de sol réalisé à l'automne précédant avec une charrue semble en bonne partie expliquer ces observations. Cependant, certains résultats démontrent un léger effet de l'engrais vert d'avoine, peu importe la date de semis, sur la diminution de la résistance du sol comparativement à un sol laissé à nue (témoin). Au niveau des récoltes, il semble plus probable que les différents semis d'engrais verts comparés aient eu un faible impact sur le poids des laitues.

L'analyse du microbiome du sol démontre une grande diversité bactérienne et fongique. Quatre classes ont été identifiées et sont reliées à des composantes principales, dont la compaction du sol, la quantité de carbone et d'azote ainsi que la biomasse de l'engrais vert. L'effet de l'engrais vert est grandement influencé par les types de sol. Les résultats de cette étude démontrent des profils physicochimiques et du microbiome différents pour les deux sites. Le site de Mirabel a permis de comprendre la dynamique de l'effet des engrais verts (avoine) et du microbiome sur le rendement de la culture principale (laitue). Ainsi, ce projet démontre que la gestion des engrais verts doit être raisonnée individuellement pour chacun des sites. Cette gestion doit tenir compte des conditions de sol mais aussi des besoins particuliers, par exemple la réduction de l'érosion, la décompaction du sol ou l'apport de matière organique.

Exemples de réussite – Un exemple de réussite présente un résultat important ou une étape clé. Il vise à montrer les réalisations dans le domaine de la recherche appliquée. L'accent est mis sur les résultats de la recherche, les transferts réussis de technologies, le potentiel de commercialisation et/ou les répercussions possibles. Un exemple de réussite ne constitue pas un rapport d'étape pour chaque activité (longueur maximale proposée : 2-3 paragraphes).

Le semis d'avoine de la fin juillet qui a été incorporé à l'automne a démontré une compaction de sol qui était généralement moindre la saison suivante. Le travail de sol réalisé à l'automne précédant



avec une charrue semble en bonne partie expliquer ces observations. Cependant, certains résultats démontrent un léger effet de l'engrais vert d'avoine, peu importe la date de semis, sur la diminution de la résistance du sol comparativement à un sol laissé à nue (témoin). Au niveau des récoltes, les différents semis d'engrais verts ont eu un très faible impact sur le poids des laitues.

Les analyses du microbiome démontrent que certains paramètres ont un impact sur sa composition et que la compaction du sol est une caractéristique discriminante. L'effet de l'engrais vert est grandement influencé par les types de sol. Le site de Mirabel a permis de comprendre la dynamique de l'effet des engrais verts (avoine) et du microbiome sur le rendement de la culture principale (laitue). Un compromis doit être envisagé : au départ, l'utilisation de l'avoine avait comme but de protéger le sol de l'érosion durant la période hivernale, c'est pourquoi l'utilisation d'une céréale comme engrais vert a été favorisée. La présence d'une biomasse de paille était importante pour assurer une bonne protection, toutefois, cette quantité importante de matière à décomposer au printemps a affecté la disponibilité de l'azote pour la culture principale. Ainsi, une date de semis qui permet d'avoir un peu moins de biomasse de paille pourrait très bien permettre de réduire l'érosion du sol tout en réduisant l'effet négatif sur la culture suivante.

Ainsi, ce projet démontre que la gestion des engrais verts doit être raisonnée individuellement pour chacun des sites. Cette gestion doit tenir compte des conditions de sol mais aussi des besoins particuliers, par exemple la réduction de l'érosion, la décompaction du sol ou l'apport de matière organique.

3. Objectifs/Résultats (vous pouvez utiliser un langage technique pour cette section)

Veillez fournir un bref résumé qui comprend une introduction, les objectifs, l'approche ou la méthodologie utilisée, les produits livrables et les résultats attendus, les résultats obtenus, une discussion, ainsi que les étudiants au doctorat ou à la maîtrise ayant été recrutés pour ce projet.

INTRODUCTION

L'intensification des pratiques culturales en agriculture a d'importants impacts sur la dégradation des écosystèmes et la perte de productivité à long terme (Matson et al. 1997; Tilman et al. 2002). Les effets négatifs d'une agriculture intensive se font sentir sur les services écosystémiques et de façon particulière sur la diversité (Matson et al. 1997). De façon générale, les impacts de l'agriculture biologique sur l'écosystème sont moindres (Tilman et al. 2002). En effet, ces pratiques favorisent la préservation de la durabilité du sol à long terme et la réduction de l'utilisation de ressources non renouvelables (Tittonell 2014). L'utilisation de ressources locales (p. ex. fumier et résidus végétaux) y est maximisée et les produits agrochimiques et génétiquement modifiés y sont interdits. Elle vise à augmenter la biodiversité, les cycles et l'activité biologiques du sol via des pratiques régénérant les propriétés du sol (Gomiero et al. 2011). Dans ces conditions, les pratiques peuvent avoir des effets



stochastiques sur la structure des communautés microbiennes du sol. Les organismes du sol jouent un rôle crucial dans les cycles biogéochimiques et interagissent avec la végétation à travers le transfert de nutriments et la rétention de l'eau (Coleman et al. 2004). Les perturbations du sol influencent la structure de la composition microbienne des sols (Elfstrand et al. 2007; Peck et al. 2016).

L'engrais vert est une culture qui est implantée avant ou après une culture principale et qui est incorporée au sol à un stade de croissance déterminé. Les engrais verts sont utilisés dans les pratiques culturales afin de répondre à différents objectifs: 1) améliorer la fertilité du sol; 2) participer à la fertilisation de la culture; 3) améliorer la structure du sol et la teneur en matière organique; 4) réduire l'érosion du sol; 5) contrôler les mauvaises herbes; et 6) interrompre les cycles des ravageurs (maladies et insectes) (Abdallahi et N'Dayegamiye 2000; Cherr et al. 2006; Jobin 2000; SARE 2007). Certaines réticences sont encore présentes chez les producteurs et font en sorte que cette pratique est utilisée de façon sous-optimale. La fertilité du sol est améliorée par différents procédés, par exemple, la biomasse de la culture permet de mobiliser les éléments nutritifs qui seront ensuite retournés au sol lors de l'incorporation et l'utilisation de légumineuses permet de fixer l'azote. L'enfouissement et la décomposition de l'engrais vert dans le sol permettent de rendre disponibles les éléments nutritifs pour la culture suivante (Abdallahi et N'Dayegamiye 2000; Cherr et al. 2006). Aussi, l'enfouissement de l'engrais vert fournit une source de nourriture accessible aux micro-organismes du sol et améliore l'activité biologique tout en permettant le renouvellement de la quantité d'humus dans le sol (Abdallahi et N'Dayegamiye 2000). Les racines de l'engrais vert permettent aussi d'effectuer un certain travail dans le sol et contribuent à réduire la compaction du sol (Jobin 2000). L'engrais vert est une pratique culturale qui permet de réduire l'érosion du sol. Le couvert végétal produit ainsi que le système racinaire développé permet de protéger la surface du sol du ruissellement et du lessivage tout en retenant les éléments nutritifs (Jobin 2000). Les producteurs ont l'habitude de labourer leurs engrais verts à l'automne, craignant une complexification des opérations au printemps suivant et les impacts sur les cultures implantées. Garder une telle couverture végétale durant tout l'hiver permet de réduire l'érosion des sols. L'utilisation des engrais verts permet aussi de lutter contre les mauvaises herbes et les ravageurs (Cherr et al. 2006). L'engrais vert peut aussi avoir un impact sur la température du sol (Cram. 2017). Ainsi, ces changements physiques du sol et de la disponibilité des nutriments assimilables peuvent avoir des répercussions sur les organismes retrouvés dans le sol (Lupwayi et al. 1998; Sekiguchi et al. 2007; Stark et al. 2008).

L'utilisation des engrais verts dans les pratiques culturales a aussi des effets sur l'écosystème et l'environnement. La couverture du sol et la fixation des éléments nutritifs par les engrais verts réduisent les risques de pollution diffuse dans les cours d'eau et les nappes phréatiques par les sédiments, la matière organique et les minéraux (SARE 2007). De plus, le bilan énergétique de l'entreprise peut être amélioré entre autres par la réduction de l'apport en engrais. Enfin, l'engrais vert peut être introduit dans les rotations ce qui favorise la diversification des cultures implantées et profite à l'écosystème biologique du sol. L'effet de l'engrais vert sur la santé du sol varie selon l'espèce utilisée, le type de sol, le niveau de fertilité, la fertilisation appliquée, l'antécédent cultural et la période de croissance. (Cherr et al. 2006; Jobin 2000; SARE 2007). L'utilisation des engrais verts est une pratique



culturelle qui affecte grandement les propriétés du sol et conséquemment se répercute sur les cultures principales. Les engrais verts permettent de favoriser la fertilité des sols, améliorent sa structure, réduisent l'érosion, augmentent l'activité biologique, ce qui généralement augmente les rendements (Abdallahi et N'Dayegamiye 2000).

OBJECTIFS

L'objectif du projet était de démontrer que la période d'ensemencement des engrais verts influence à travers des processus stochastiques et de niche à la fois l' α - et la β -diversité de communauté microbienne du sol. La densité des engrais verts selon leur date d'implantation et la complexité des activités culturales au printemps suite à l'implantation des engrais verts peuvent altérer la richesse et l'homogénéité d'un site reflétant la résilience ou la vulnérabilité des organismes (α -diversité). De plus, la structure de composition microbienne des réplicats d'un même traitement peut être un indicateur d'augmentation, de décroissance ou de stabilité de l'hétérogénéité (β -diversité). On peut s'attendre que les variations du microbiome du sol permettent d'établir des indicateurs biologiques de la santé des sols et des rendements d'une culture. Les objectifs secondaires sont : 1) intégrer les analyses de diversité microbienne afin de déterminer la sensibilité à identifier des indicateurs des services écosystémiques, notamment la productivité et les processus biogéochimiques; 2) évaluer l'efficacité de l'identification de certaines bactéries comme indicateur de l'impact des traitements sur les propriétés du sol.

MÉTHODOLOGIE

Le présent projet vise à mesurer les coûts et les bénéfices de l'utilisation d'engrais verts en regard de leurs impacts sur certaines fonctions écosystémiques. Il est proposé d'utiliser la diversité microbienne (bactéries, champignons et archées) comme mesure pour suivre les changements dans la productivité, la diversité et les fonctions du sol induit par différentes pratiques culturales. Cette approche pourrait aussi servir à définir des outils de mesure basés sur la taxonomie et la diversité microbiennes permettant d'évaluer la santé des sols et de définir les pratiques les plus propices à leur conservation.

Ce projet est la continuité d'un projet débuté en 2014 concernant *l'Évaluation de la période d'implantation des engrais verts sur les pratiques culturales et les cultures*. La première phase du projet a démontré des résultats intéressants concernant l'impact des dates de semis d'engrais verts sur les propriétés du sol. Dans le cadre du présent projet, la collecte des données agronomiques et physiques du sol ainsi que des effets sur la culture principale se sont poursuivis, mais un volet plus approfondi a été ajouté avec l'analyse des propriétés physico-chimiques du sol et l'analyse du microbiome du sol.

Volet terrain

Les essais ont été réalisés au cours des saisons 2016-2017 à l'Abbaye d'Oka (Annexe 1). Le sol de ce site est composé d'un loam graveleux / argileux. Les antécédents culturaux pour les parcelles étaient



du haricot et de la moutarde (2011-2013), un engrais vert d'orge (2014) et un engrais vert d'avoine suivi d'une culture de laitue (2015-2016). L'engrais vert utilisé pour les essais est l'avoine et les traitements qui ont été comparés sont les périodes de semis de fin saison 2016 : 1) fin juillet, 2) fin juillet incorporé à l'automne, 3) fin août et 4) un témoin sans engrais vert. Trois réplicats de chacun des traitements ont été mis en place selon une distribution en blocs aléatoires.

Des travaux de sol ont été réalisés dans les parcelles ciblées avant chaque semis de 2016, avec une herse à disques et un vibroculteur, afin de réaliser un désherbage et préparer le sol. Le désherbage des parcelles n'ayant pas encore reçu de semis était réalisé au besoin durant la saison avec un vibroculteur. Une charrue et une herse à disques ont été utilisées à la fin de l'automne (6 novembre 2016) pour enfouir seulement le traitement de fin juillet qui devait être incorporé au sol. Les travaux de sol printanier nécessaires pour enfouir les semis d'engrais verts de 2016 et / ou préparer le terrain pour la culture principale ont été réalisés dans toutes les parcelles le 11 juin 2017. Les résidus d'avoine présents dans les parcelles des différents traitements n'ont ni d'aucune façon aux travaux de sol. De plus, très peu de résidus étaient encore visibles après les différents travaux réalisés. Seuls les semis d'avoine de la fin juillet et la fin juillet incorporés présentaient encore quelques résidus. Une fertilisation conventionnelle a été faite à raison de 260 kg de (27-0-0) azote / ha et 125 kg de (0-0-60) / ha. Ces doses ont été calculées à partir de l'analyse de sol et les recommandations de fertilisation du guide du CRAAQ. La culture principale implantée est la laitue. La variété retenue pour les essais est la Bergam's green (Norsec). Cette variété a été retenue, car elle est résistante à la montaison et à la brûlure de la pointe. La laitue a été transplantée à l'aide d'un transplanteur à godets le 13 juin 2017. Les résidus d'avoine des différents traitements qui restaient après les travaux de sol printaniers n'ont ni d'aucune façon à l'implantation des laitues. Chacune des parcelles expérimentales était composée de quatre rangs de cultures ayant 15 plants de longs (distance de plantation 30 cm). Un système d'irrigation goutte à goutte a été installé et utilisé au besoin (1-2 heures tous les 2-3 jours) en l'absence de précipitations. Un suivi hebdomadaire de la croissance végétative de la culture principale et des ravageurs a été réalisé jusqu'à la récolte.

Les informations complètes sur les différents paramètres observés au cours des saisons 2016-2017 sont présentées à l'Annexe 2 dans le Tableau 1. Les paramètres qui ont été observés à l'automne 2016 sont: 1) la biomasse sèche pour un quadrat de 30 x 30 cm, 2) la hauteur des pousses et 3) la profondeur du système racinaire des semis d'engrais verts (2 réplicats par parcelle). Tous les autres paramètres ont été observés dans les différents traitements à une ou plusieurs périodes pendant la saison 2017. Ces paramètres sont 4) la température du sol, 5) la masse volumique apparente (MVA), 6) la résistance du sol à l'enfoncement (pénétrromètre), 7) la conductivité hydraulique (perméamètre de Guelph), 8) le développement de la culture principale (nombre de feuilles) et 9) le rendement des récoltes de laitue. Des analyses de variance ont été utilisées pour comparer les effets des dates de semis d'avoine sur les différents paramètres (densité, propriétés du sol, développement végétatif et rendement).

Volet Laboratoire

Échantillonnage du sol et caractérisation.



Pour une approche d'échantillonnage en composite, des échantillons de sols des différents traitements ont été prélevés au printemps 2017 suite à l'incorporation de l'engrais vert et avant l'implantation de la culture principale (laitue). Les échantillons de sol ont, entre autres, été analysés en laboratoire pour leur valeur en nutriments (C, N, P) et autres propriétés physicochimiques, notamment la capacité de rétention du H₂, CO et CH₄ atmosphérique et la production de CO₂ qui sont la résultante d'activité microbienne. L'ensemble de ces observations forme les métadonnées qui ont aussi été considérées comme des variables pouvant étroitement être liées à l'information sur le microbiome des sols.

Analyse du microbiome.

Au niveau du microbiome, l'approche qui a été retenue visait à établir la structure taxonomique des microorganismes du sol. Le profil taxonomique des bactéries, champignons et archées du sol a été réalisé par l'amplification des séquences partielles du gène ribosomal 16S de l'ARN chez les archées et les bactéries, et des régions de transcription interne (ITS) de l'ARN ribosomale des champignons. Les réactions d'amplification ont été validées par des étalons internes avant le séquençage afin de s'assurer d'une quantification absolue et relative de chaque génotype. Les réactions de PCR, la préparation des bibliothèques et les réactions de séquençage à haut débit (Illumina MiSeq) ont été réalisées à Génome Québec. Les analyses bio-informatiques ont été réalisées au laboratoire de l'Institut nationale de la recherche scientifique (laboratoires Dr. Constant et Dr. Guertin) en utilisant des procédures standards et l'accès aux serveurs de Calcul Canada. L'abondance et l'affiliation taxonomique des microorganismes associés à chaque échantillon ont servi au calcul de la diversité. Cette approche permet de sélectionner des marqueurs taxonomiques associés aux différents traitements. De plus, il a été possible de faire un lien entre les changements physicochimiques enregistrés et des modifications dans la structure organisationnelle de la communauté microbienne.

RÉSULTATS

Biomasse sèche, hauteur et profondeur racinaire des différents semis d'avoine (automne 2016)

Des différences significatives ont été identifiées entre les différentes dates de semis d'avoine évaluées concernant la biomasse sèche ($p= 0,0026$), la hauteur ($p < 0,0001$) et la profondeur racinaire ($p= 0,0002$) de l'engrais vert mesuré au début du mois d'octobre 2016 (Tableau 2). La biomasse sèche des semis d'avoine de la fin août (17,8 g) était plus faible que celle des semis de fin juillet (82,7 g) et fin juillet incorporé à l'automne (87,4 g). Aucune différence de biomasse n'a été observée entre les traitements de juillet incorporés ou non. Les mêmes différences significatives ont également été notées tant pour la hauteur et la profondeur racinaire de l'engrais vert. La hauteur moyenne de l'engrais vert était respectivement de 108,9 cm, 108,8 cm et 35,6 cm pour les semis de fin juillet, de fin juillet incorporé à l'automne et de fin août. Les profondeurs racinaires étaient quant à elle de 18,6 cm, 20,6 cm et 15,3 cm respectivement pour les semis de fin juillet, de fin juillet incorporé à l'automne et de fin août. Les résultats obtenus démontrent que les semis d'avoine effectués plus tôt en saison ont connu une meilleure croissance et engendrent une biomasse d'engrais vert plus importante.



Tableau 2 : Biomasse sèche, hauteur moyenne et profondeur racinaire de l'avoine observées pour les différentes périodes de semis. Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes ($p \leq 0.05$).

l'Abbaye (Oka)							
Date de prise de mesures	Période du semis	Biomasse sèche moyenne (g)	Écart-type	Hauter moyenne de la culture (cm)	Écart-type	Profondeur racinaire moyenne (cm)	Écart-type
	Fin juillet 2016	82,7	12,9 a	108,9	5,7 a	18,6	2,4 a
6 octobre 2016	Fin juillet incorporé 2016	87,4	4,5 a	108,8	7,7 a	20,6	0,7 a
	Fin août 2016	17,8	3,0 b	35,6	3,7 b	15,3	0,8 b

Température du sol (printemps 2017)

Les températures de sol moyennes, minimales et maximales hebdomadaires (Tableau 3) mesurées entre le 10 avril et le 11 juin 2017 ont été analysées. De façon générale, peu de différences significatives sont ressorties entre les différents traitements comparés. Cependant, lorsque des différences statistiques sont observées, elles suivent toujours la même logique. Les températures moyennes et maximales (généralement influencées par observation de jours) sont plus faibles sous un couvert important d'engrais vert comparativement à un sol nu ou presque nu. On note des différences de 0,8 °C pour la température moyenne et de 3,3 à 7,0 °C pour la température maximale. Les températures maximales observées dans la semaine du 10 au 16 avril 2017 ($p = 0,0300$) et moyennes observées dans la semaine du 17 au 23 avril 2017 ($p = 0,0354$), étaient plus élevées dans le témoin (sol nu) comparativement à celles observées dans les parcelles dont le semis a été fait à la fin juillet qui n'a pas été incorporé. La même tendance, mais non significative ($p = 0,0609$) a été observé dans la semaine du 15 au 21 mai 2017 pour la température moyenne du sol. Pour la même période ($p < 0,0001$), les températures maximales observées dans le témoin étaient plus élevées que dans les de semis non incorporés de fin juillet et fin août. Les températures de sol observées dans le semis de fin juillet qui a été incorporé à l'automne étaient également plus élevées que dans son homologue non incorporé. Les températures maximales observées pendant la semaine du 29 mai au 4 juin 2017 étaient aussi plus élevées dans les parcelles témoins que dans les parcelles ayant reçu un semis d'avoine à la fin juillet, qu'il soit incorporé ou non ($p = 0,0010$). Au niveau des températures minimales, elles semblent être plus élevées dans les parcelles ayant reçu un semis d'engrais vert à la fin juillet. Cette différence de température est de l'ordre de 2,3 °C. Des différences statistiques ont cependant été observées seulement pour la semaine du 29 mai au 4 juin ($p = 0,0107$). Les températures de sol observées dans le semis de fin juillet incorporé à l'automne étaient plus élevées que pour le semis de fin août. Une tendance similaire, mais non significative a également été observée entre le semis de fin juillet non incorporé et le témoin. Ces observations laissent supposer que la forte biomasse d'engrais vert couchée au sol pourrait nuire au réchauffement du sol comparativement au témoin (sans engrais vert) et au semis de fin août (engrais vert de plus faible densité). Les résultats obtenus au niveau des températures minimales laissent penser qu'un fort couvert d'engrais vert peut servir d'isolant pendant



la nuit afin de limiter les pertes de chaleur ou que l'énergie thermique libérée par les processus de décomposition de l'avoine favorise un réchauffement du sol.

Masse volumique apparente du sol (saison 2017)

La masse volumique apparente (MVA) du sol pour les différents traitements a été calculée à trois moments durant la saison 2017 (Tableau 4). Cette évaluation a été effectuée avant le travail de sol nécessaire à la transplantation de la laitue ainsi que pendant et après cette culture pour les portions de sol 0-7 cm et 7-14 cm. Les valeurs de MVA calculées dans les différents traitements variaient de 1,15 g/m³ à 1,40 g/m³ pour la portion de sol 0-7 cm tandis qu'elles variaient de 1,42 g/m³ à 1,62 g/m³ pour le 7-14 cm. Aucune différence significative n'a cependant été observée pour les différents traitements de semis d'avoine, peu importe la période et la profondeur de prise de mesure (0-7 cm (avant plantation : $p=0,2182$, culture laitue : $p=0,2327$ et après récolte : $p=0,9694$) et 7-14 cm (avant plantation : $p=0,4735$, culture laitue : $p=0,9352$ et après récolte : $p=0,4920$)). Cette situation permet de conclure à deux possibilités : 1) la période d'étude est trop courte pour voir les effets de l'avoine sur la MVA du sol, 2) la méthode d'analyse n'est pas suffisamment sensible pour détecter les différences, et/ou 3) le système racinaire de l'avoine a un impact très limité sur les valeurs de MVA du sol. Il faut aussi noter que les valeurs de MVA observées au site d'Oka sont légèrement plus élevées à la profondeur 7-14 cm qu'à 0-7 cm. Selon le tableau provenant de Issoufou (2013) (Annexe 4), les valeurs de MVA observées à Oka (mélange loam d'Oka et loam argileux) sont généralement idéales pour la profondeur 0-7 cm, mais augmentent à un niveau pouvant nuire à l'enracinement de la culture à la profondeur 7-14 cm.



Tableau 3 : Températures hebdomadaires moyennes, minimales et maximales du sol observées au printemps à l'abbaye d'Oka (10 avril au 11 juin 2017) pour les différents traitements (périodes de semis). Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes ($p \leq 0.05$). Les valeurs suivies d'un astérisque présentent des tendances non significatives.

l'Abbaye (Oka)							
Semaine de prise de mesures	Période du semis	Température moyenne du sol	Écart-type	Température minimale du sol	Écart-type	Température maximale du sol	Écart-type
10 au 16 avril 2017	Fin juillet 2015	8,1	1,3	6,0	2,1	10,6	1,5 b
	Fin juillet incorporé 2015	9,1	1,7	5,4	3,0	13,8	3,0 ab
	Fin août 2015	8,8	1,4	5,8	2,6	12,5	2,3 ab
	Témoin 2015	9,3	1,5	5,5	2,9	13,9	2,5 a
17 au 23 avril 2017	Fin juillet 2015	7,8	0,6 b	5,7	1,1	9,9	1,7
	Fin juillet incorporé 2015	8,3	0,9 ab	4,9	1,6	11,9	3,0
	Fin août 2015	8,3	0,7 ab	5,3	1,6	11,5	2,6
	Témoin 2015	8,6	0,8 a	4,9	1,8	12,5	2,8
24 au 30 avril 2017	Fin juillet 2015	10,5	2,8	8,1	2,6	13,3	3,6
	Fin juillet incorporé 2015	11,8	3,5	8,0	3,2	16,9	4,7
	Fin août 2015	11,3	3,1	7,9	3,0	15,5	4,1
	Témoin 2015	11,9	3,4	7,7	1,4	17,4	4,3
1er au 7 mai 2017	Fin juillet 2015	9,5	1,1	7,5	1,0	11,7	2,1
	Fin juillet incorporé 2015	10,1	1,4	6,9	1,6	14,0	3,2
	Fin août 2015	10,0	1,3	7,1	1,4	13,4	3,0
	Témoin 2015	10,3	1,4	6,9	1,6	14,4	3,3
8 au 14 mai 2017	Fin juillet 2015	9,9	2,3	7,7	2,3	12,4	2,8
	Fin juillet incorporé 2015	11,0	3,1	6,9	3,0	15,8	4,3
	Fin août 2015	10,5	2,5	7,1	2,6	14,5	3,4
	Témoin 2015	11,0	2,7	6,9	2,7	16,0	3,6
15 au 21 mai 2017	Fin juillet 2015	15,4	2,3 *	12,0	2,5	18,9	2,6 c
	Fin juillet incorporé 2015	18,6	3,2	12,6	3,4	25,6	4,0 ab
	Fin août 2015	16,2	2,4	11,3	2,8	21,6	2,7 bc
	Témoin 2015	18,5	3,0 *	12,2	1,0	26,5	3,7 a
22 au 28 mai 2017	Fin juillet 2015	15,1	1,8	12,6	1,0	17,9	3,6
	Fin juillet incorporé 2015	16,7	2,7	12,4	1,1	21,7	6,0
	Fin août 2015	15,9	2,2	12,2	1,0	20,1	4,8
	Témoin 2015	16,6	2,3	12,4	1,0	21,6	5,2
29 mai au 4 juin 2017	Fin juillet 2015	15,2	1,2	12,1	1,5 ab	19,1	1,7 b
	Fin juillet incorporé 2015	15,5	1,4	12,7	1,5 a*	18,8	1,6 b*
	Fin août 2015	16,2	2,0	10,2	2,2 b	24,8	5,5 ab*
	Témoin 2015	16,3	1,9	10,4	2,1 ab*	25,5	5,5 a
5 au 11 juin 2017	Fin juillet 2015	16,6	2,8	13,2	2,2	20,6	5,2
	Fin juillet incorporé 2015	16,5	2,8	13,4	2,3	20,1	4,9
	Fin août 2015	18,3	4,4	11,9	2,3	26,8	10,1
	Témoin 2015	18,8	4,7	11,8	2,3	27,9	10,6



Tableau 4 : Masse volumique apparente (MVA) moyenne du sol mesurée avant les travaux de sol pour l'implantation, pendant la culture principale de laitue et après la récolte pour les différentes périodes de semis. L'absence de lettre signifie l'absence de différences significatives ($p > 0.05$).

l'Abbaye (Oka)				
Avant les travaux de sol pour l'implantation				
Profondeur	Date de prise de mesures	Date du semis	MVA (g/cm ³)	Écart-type
0-7 cm	27 avril 2017	Fin juillet 2016	1,20	0,22
		Fin juillet incorporé 2016	1,15	0,24
		Fin août 2016	1,28	0,16
		Témoin 2016	1,40	0,17
7-14 cm	27 avril 2017	Fin juillet 2016	1,57	0,22
		Fin juillet incorporé 2016	1,45	0,13
		Fin août 2016	1,55	0,08
		Témoin 2016	1,62	0,17
Pendant la culture de laitue				
Profondeur	Date de prise de mesures	Date du semis	MVA (g/cm ³)	Écart-type
0-7 cm	11 juillet 2017	Fin juillet 2016	1,25	0,16
		Fin juillet incorporé 2016	1,25	0,06
		Fin août 2016	1,35	0,05
		Témoin 2016	1,33	0,10
7-14 cm	11 juillet 2017	Fin juillet 2016	1,42	0,15
		Fin juillet incorporé 2016	1,43	0,05
		Fin août 2016	1,43	0,21
		Témoin 2016	1,47	0,08
Après la culture de laitue				
Profondeur	Date de prise de mesures	Date du semis	MVA (g/cm ³)	Écart-type
0-7 cm	1er août 2017	Fin juillet 2016	1,33	0,15
		Fin juillet incorporé 2016	1,38	0,22
		Fin août 2016	1,32	0,12
		Témoin 2016	1,30	0,11
7-14 cm	1er août 2017	Fin juillet 2016	1,57	0,12
		Fin juillet incorporé 2016	1,45	0,17
		Fin août 2016	1,43	0,15
		Témoin 2016	1,48	0,15



Résistance du sol à l'enfoncement (saison 2017)

La résistance à l'enfoncement des sols a été mesurée à Oka à trois reprises en 2017 à l'aide d'un pénétromètre (Field Scout SC-900®). Ce paramètre a été évalué avant le travail de sol nécessaire à la transplantation de la laitue ainsi que pendant et après cette culture pour la portion de sol 0-20 cm (Tableau 5, 6 et 7). Des différences au niveau de la résistance du sol à l'enfoncement ont été observées entre les différents traitements, et ce pour les trois périodes d'observation. Ces différences ont généralement été observées aux profondeurs **5** (avant plantation : $p=0,0$ et culture laitue : $p=0,0025$), **10** (avant plantation : $p<0,0001$ et culture laitue : $p=0,0005$), **15** (avant plantation : $p<0,0001$, culture laitue : $p<0,0001$ et après récolte : $p<0,0001$) et **20 cm** (avant plantation : $p<0,0001$ et culture laitue : $p<0,0001$) (Tableau 5, 6 et 7). De façon générale, la résistance à l'enfoncement du sol était plus faible dans les parcelles dont le semis de fin juillet a été incorporé à l'automne que dans les autres traitements.

La résistance à l'enfoncement avant le travail de sol printanier était plus faible dans le semis de fin juillet incorporé contrairement aux parcelles ayant eu un semis d'avoine à la fin juillet (non incorporé), fin août et le témoin (aucun semis) et ce pour les profondeurs de 10, 15 et 20 cm. À 5 cm de profondeur, ce sont les semis de fin juillet (non incorporés) et de fin août qui étaient significativement plus faibles que le témoin. Durant la culture de laitue, la résistance mesurée à 5 et 10 cm dans les parcelles dont le semis de fin juillet a été incorporé à l'automne (5 et 10 cm) et le semis de fin août (10 cm) était plus faible que pour le témoin. À 15 cm, cette résistance était plus faible dans les parcelles dont le semis de fin juillet a été incorporé à l'automne que dans tous les autres traitements. La résistance était également plus faible pour les semis de fin juillet et fin août comparativement au témoin. Dans la zone de 20 cm de profondeur, la résistance était plus faible dans les parcelles dont le semis de fin juillet a été incorporé à l'automne que dans les traitements de fin juillet et le témoin. La résistance à la pénétration était également plus faible dans le traitement de la fin août comparativement au témoin. Après la culture de laitue, les seules différences ont été observées à une profondeur de 15 cm. La résistance à l'enfoncement dans le sol des semis de fin juillet incorporés ou non à l'automne était plus faible que pour le témoin et le semis de fin août.

Le travail de sol réalisé à l'automne précédant avec une charrue semble en bonne partie expliquer ces observations. Cependant, certains résultats démontrent un léger effet de l'engrais vert d'avoine, peu importe la date de semis, sur la diminution de la résistance du sol comparativement à un sol laissé à nue (témoin). Une évolution spatio-temporelle de la résistance à l'enfoncement est également observée dans les différents traitements. Du point de vue spatial, la résistance augmente en fonction de la profondeur d'échantillonnage, peu importe la période. Du point de vue temporel, la résistance mesurée augmente tout au long de la saison. Cette évolution de la résistance du sol à l'enfoncement est probablement en lien avec le passage de la machinerie utilisée pour le travail de sol et l'implantation de la laitue qui ont été réalisés au printemps 2017. De façon générale, le travail de sol à l'automne influence la résistance du sol à l'enfoncement la saison suivante, rendant le sol plus meuble.

Duiker (2002) présente le lien entre la résistance du sol à l'enfoncement et la pénétration des racines (Annexe 4, Figure 1). Lorsque la résistance de pénétration atteint 200 PSI (1379 kPa), il y a un peu moins de 35% des racines qui pénètrent le sol. Des valeurs semblables ont été observées régulièrement



avant (15 cm), pendant (10 et 15 cm) et après (5 cm) la culture principale. Rendue à une résistance de pénétration de 300 PSI (2068 kPa), aucune racine n'est théoriquement censée être en mesure de pénétrer le sol. Les racines peuvent cependant être présentes, même à des niveaux plus élevés, si le sol comporte des crevasses et/ou des pores naturels. Des valeurs similaires, voir même plus élevées, ont été mesurées à quelques reprises pendant (15 et 20 cm) et après (10 à 20 cm) la culture de laitue. Dans ce cas, il serait plus juste de parler de compaction du sol à ces profondeurs. Il est fréquent d'observer de la compaction du sol sur des terres agricoles à ces profondeurs (on parle souvent de semelle de compaction). Compte tenu de l'action limitée des racines à ces profondeurs, l'avoine a eu peu d'impact sur la compaction du sol.

Conductivité hydraulique du sol (printemps 2017)

Les opérations nécessaires pour calculer la conductivité hydraulique du sol ont été réalisées à l'aide du perméamètre de Guelph le 9 mai, 17 juillet et le 7 août 2017. Les valeurs de conductivité hydraulique ont été calculées à l'aide du calculateur Excel développé par Soilmosture®. Les valeurs obtenues variaient de 0,0062 à 0,0626 cm/min pour les traitements comparés (Tableau 8). Des différences significatives ont été observées entre les différents traitements comparés lors des observations faites avant le travail de sol du printemps 2017 ($p = 0,0037$). La conductivité hydraulique calculée dans les parcelles dont le semis de fin juillet a été incorporé à l'automne ou non était plus élevée que pour les parcelles témoins et ayant reçu un semis à la fin août. Aucune autre différence significative n'a été observée entre les différentes dates de semis pendant $p = 0,2832$ et après ($p = 0,0724$) la culture principale de laitue. Le niveau de précision du perméamètre de Guelph permet de détecter des différences de conductivité hydraulique entre différents types de sol ou certains problèmes de santé pour un même sol. La simple présence de roches ou de fissures dans un sol hétérogène peut mener à des lectures aberrantes. Dans le cadre des essais réalisés, le perméamètre ne semble pas être un outil suffisamment précis pour détecter des différences liées à la présence, plus ou moins importante, d'un engrais vert d'avoine dans le sol hétérogène des parcelles expérimentales du Cram.

Croissance de la laitue (printemps 2017)

Un suivi hebdomadaire de la croissance des plants de laitue (nombre de feuilles) a été effectué les 19 juin, 26 juin, 3 juillet et 10 juillet 2017 (Figure 2). Les différentes périodes de semis d'automne n'ont pas affecté la croissance des laitues au cours de la saison subséquente (19^e juin : $p = 0,2822$, 26 juin : $p = 0,1979$, 3 juillet : $p = 0,8465$ et 10 juillet : $p = 0,0779$). Selon la période d'observation, le nombre moyen de feuilles par plant était de 11,8 le 19 juin, 16,0 le 26 juin, 23,1 le 3 juillet et 35,9 le 10 juillet 2017.



Tableau 5 : Résistance du sol à l'enfoncement moyenne (kPa) mesurée avant les travaux de sol pour l'implantation de la laitue pour les différentes périodes de semis. Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes ($p \leq 0.05$).

l'Abbaye (Oka)				
Profondeur	Date de prise de mesures	Date du semis	résistance du sol (Kpa)	Écart-type
0 cm	19 avril 2017	Fin juillet 2016	181,7	139,4
		Fin juillet incorporé 2016	227,1	171,0
		Fin août 2016	174,7	131,2
		Témoin 2016	271,4	261,6
5 cm	19 avril 2017	Fin juillet 2016	366,9	169,7 b
		Fin juillet incorporé 2016	472,7	298,2 ab
		Fin août 2016	379,5	269,0 b
		Témoin 2016	603,8	370,9 a
10 cm	19 avril 2017	Fin juillet 2015	790,1	399,4 a
		Fin juillet incorporé 2015	402,0	246,3 b
		Fin août 2015	912,0	554,9 a
		Témoin 2015	921,1	394,7 a
15 cm	19 avril 2017	Fin juillet 2016	1503,9	355,9 a
		Fin juillet incorporé 2016	562,5	439,6 b
		Fin août 2016	1366,2	449,6 a
		Témoin 2016	1523,8	447,2 a
20 cm	19 avril 2017	Fin juillet 2016	1777,3	378,5 a
		Fin juillet incorporé 2016	926,0	456,6 b
		Fin août 2016	1830,8	588,6 a
		Témoin 2016	1621,5	481,5 a



Tableau 6 : Résistance du sol à l'enfoncement moyenne (kPa) mesurée pendant la culture principale de laitue pour les différentes périodes de semis. Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes ($p \leq 0.05$).

l'Abbaye (Oka)				
Profondeur	Date de prise de mesures	Date du semis	résistance du sol (Kpa)	Écart-type
0 cm	6 juillet 2017	Fin juillet 2016	292,2	200,1
		Fin juillet incorporé 2016	212,3	130,1
		Fin août 2016	409,5	489,2
		Témoin 2016	336,9	272,9
5 cm	6 juillet 2017	Fin juillet 2016	707,3	328,6 ab
		Fin juillet incorporé 2016	515,8	274,9 b
		Fin août 2016	709,0	526,7 ab
		Témoin 2016	889,2	404,3 a
10 cm	6 juillet 2017	Fin juillet 2015	1161,5	667,0 ab
		Fin juillet incorporé 2015	778,1	227,3 b
		Fin août 2015	1129,3	717,0 b
		Témoin 2015	1528,3	678,5 a
15 cm	6 juillet 2017	Fin juillet 2016	1851,5	617,5 b
		Fin juillet incorporé 2016	1167,8	479,9 c
		Fin août 2016	1814,1	779,3 b
		Témoin 2016	2374,1	588,7 a
20 cm	6 juillet 2017	Fin juillet 2016	2021,7	406,3 ab
		Fin juillet incorporé 2016	1602,4	463,3 c
		Fin août 2016	1927,4	402,0 bc
		Témoin 2016	2307,9	473,0 a



Tableau 7 : Résistance du sol à l'enfoncement moyenne (kPa) mesurée après la culture principale de laitue pour les différentes périodes de semis. Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes ($p \leq 0.05$).

l'Abbaye (Oka)				
Profondeur	Date de prise de mesures	Date du semis	résistance du sol (Kpa)	Écart-type
0 cm	1er août 2017	Fin juillet 2016	252,0	282,6
		Fin juillet incorporé 2016	333,2	339,6
		Fin août 2016	439,3	479,1
		Témoin 2016	477,2	596,8
5 cm	1er août 2017	Fin juillet 2016	778,0	513,2
		Fin juillet incorporé 2016	857,4	585,8
		Fin août 2016	1083,6	684,0
		Témoin 2016	1313,4	926,8
10 cm	1er août 2017	Fin juillet 2015	1811,2	869,2
		Fin juillet incorporé 2015	2090,7	947,4
		Fin août 2015	2385,2	1083,2
		Témoin 2015	2336,5	1116,6
15 cm	1er août 2017	Fin juillet 2016	2562,0	791,7 b
		Fin juillet incorporé 2016	2180,4	886,7 b
		Fin août 2016	3240,0	844,0 a
		Témoin 2016	3665,0	744,7 a
20 cm	1er août 2017	Fin juillet 2016	2857,4	1073,3
		Fin juillet incorporé 2016	2767,0	904,6
		Fin août 2016	3001,6	885,6
		Témoin 2016	2802,0	1072,1



Tableau 8 : Conductivité hydraulique du sol (cm/min) mesurée avant les travaux de sol pour l'implantation de la laitue pour les différentes périodes de semis. L'absence de lettre signifie l'absence de différences significatives ($p > 0.05$).

I'Abbaye (Oka)			
Avant les travaux de sol pour l'implantation			
Date de prise de mesures	Date du semis	Conductivité Hydraulique (Kfs) (cm/min)	Écart-type
	Fin juillet 2016	0,0209	0,0022 b
9 mai 2017	Fin juillet incorporé 2016	0,0148	0,0029 b
	Fin août 2016	0,0062	0,0009 a
	Témoin 2016	0,0067	0,0002 a
Pendant la culture de laitue			
Date de prise de mesures	Date du semis	Conductivité Hydraulique (Kfs) (cm/min)	Écart-type
	Fin juillet 2016	0,0184	0,0029
17 juillet 2017	Fin juillet incorporé 2016	0,0396	0,0186
	Fin août 2016	0,0129	0,0063
	Témoin 2016	0,0106	0,0006
Après la culture de laitue			
Date de prise de mesures	Date du semis	Conductivité Hydraulique (Kfs) (cm/min)	Écart-type
	Fin juillet 2016	0,0210	0,0080
7 août 2017	Fin juillet incorporé 2016	0,0358	0,0156
	Fin août 2016	0,0242	
	Témoin 2016	0,0626	0,0238

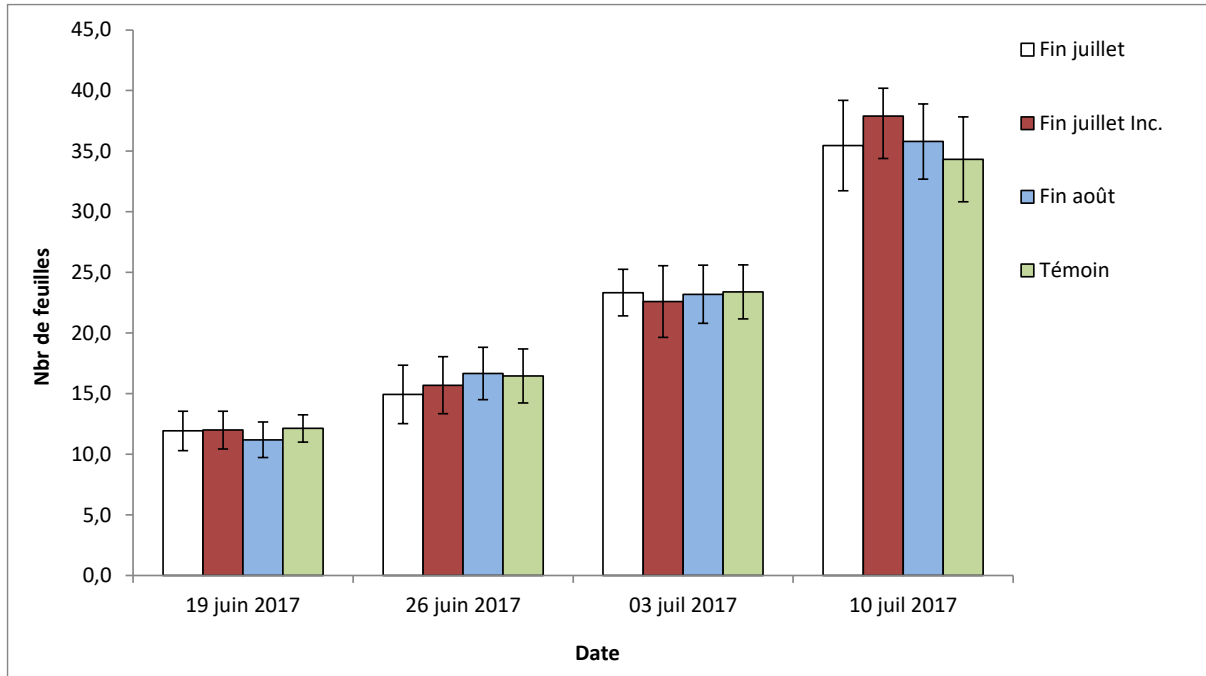


Figure 2 : Développement de la laitue (nombre de feuilles) pour les différentes périodes de semis. L'absence de lettre signifie l'absence de différences significatives ($p > 0.05$).

Récolte (été 2017)

Les laitues ont été récoltées le 11 juillet 2017. En ce qui concerne le poids moyen d'une laitue récoltée, il variait entre 470,2 et 531,7 g selon le traitement (Figure 3). Une différence significative a été observée à ce niveau entre les différents traitements ($p = 0,0033$). Le poids moyen d'une laitue dans les parcelles témoins était plus faible que pour celui d'une laitue provenant des parcelles ayant eu un semis à la fin août. Le poids des laitues pour les autres traitements était statistiquement similaire. Au niveau du poids moyen de la récolte / mètre linéaire de culture, aucune différence entre les traitements n'est ressortie des analyses ($p = 0,1816$). Les rendements observés variaient entre 1,6 et 1,8 kg / mètre linéaire. Les résultats observés sont plutôt difficiles à interpréter d'un point de vue agronomique. Il semble plus probable que les différents semis d'engrais verts comparés aient eu un très faible impact sur le poids des laitues. Les sols à l'abbaye d'Oka sont reconnus pour être très riches. Dans un contexte de sol plus pauvre, l'effet de l'engrais vert sur le poids des laitues pourrait être plus marqué.



Date	Fin juillet 2016	Fin juillet incorporé 2016	Fin août 2016
Biomasse sèche (g)	82,7 g	87,4 g	17,8

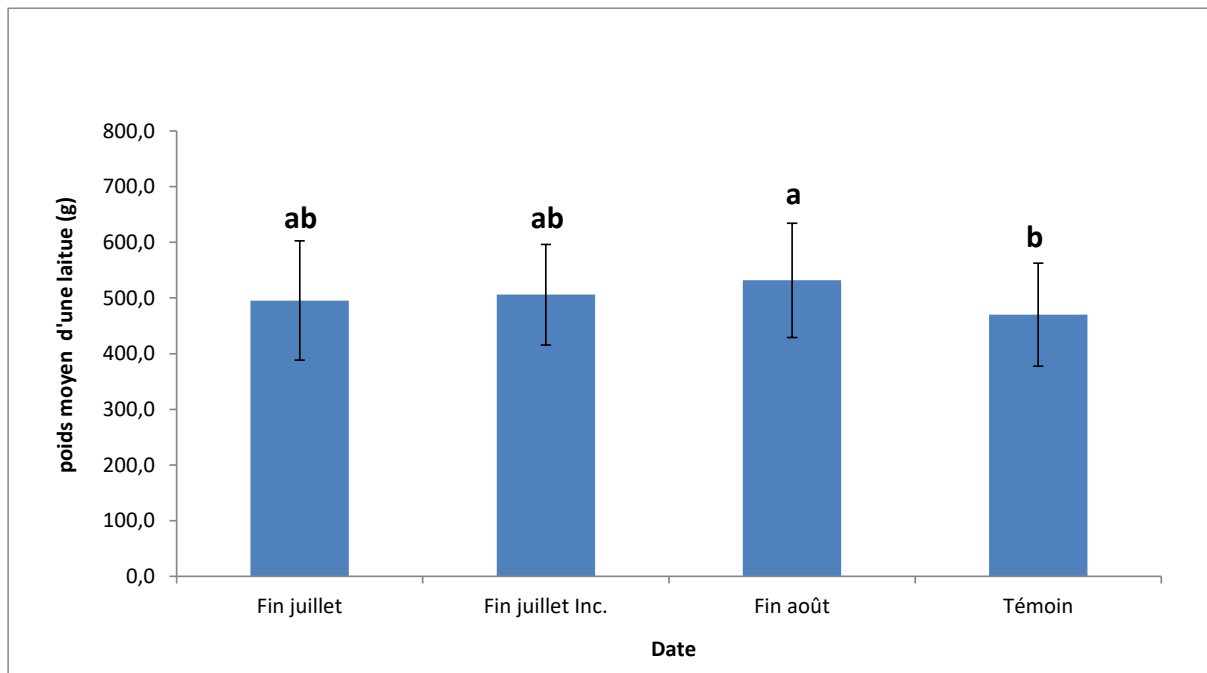


Figure 3 : Poids moyen d'une laitue (g) récoltée aux sites d'Oka pour les différentes périodes de semis. Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes ($p \leq 0.05$). La biomasse sèche de l'engrais vert est indiquée pour fins de compréhension.

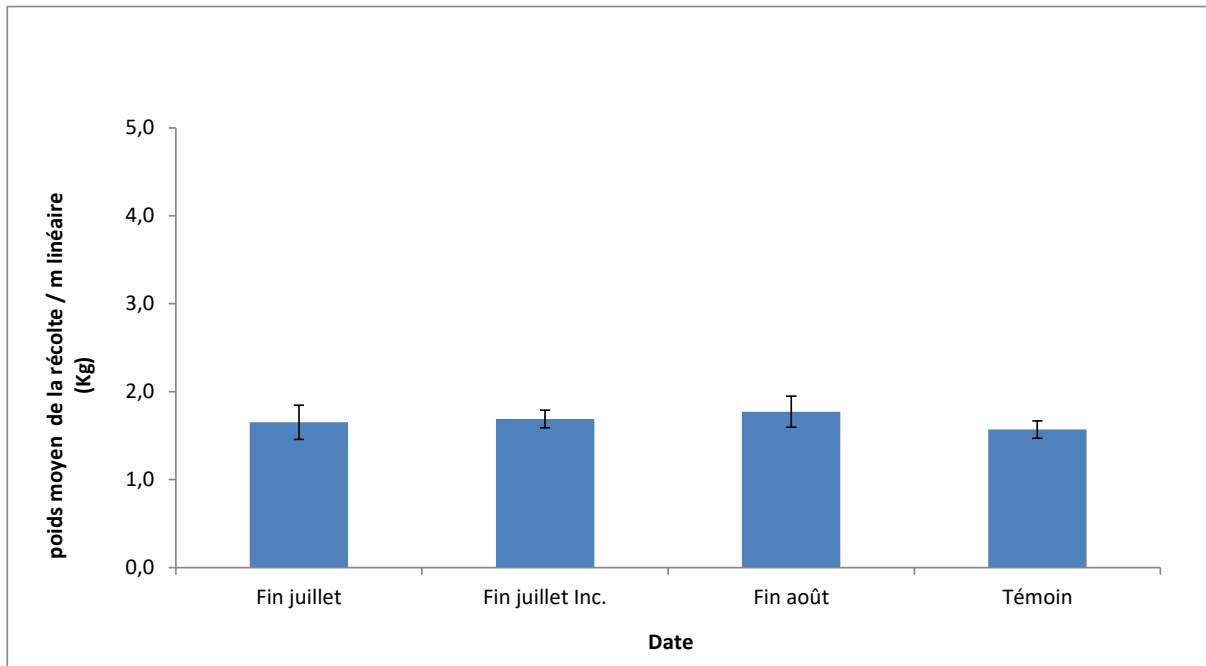


Figure 4 : Poids de la récolte 1 m linéaire d'une culture de laitue (kg) récoltée aux sites d'Oka pour les différentes périodes de semis. Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes ($p \leq 0.05$). La biomasse sèche de l'engrais vert est indiquée pour fins de compréhension.

La présence d'un couvert d'avoine semé en juillet semble avoir favorisé une température minimale de sol légèrement plus élevée. La température moyenne et maximale dans ce couvert d'avoine semble cependant légèrement plus froide. Il est reconnu que la présence d'un paillis végétal laissé par les engrais verts non enfouis (surtout les graminées) durant l'hiver permet une meilleure protection du sol durant la période hivernale, mais ce paillis ralentit l'assèchement et le réchauffement du sol au printemps (Jobin et Douville 2000; Weill et Duval 2009). Le semis d'avoine de la fin juillet qui a été incorporé à l'automne a démontré une compaction de sol qui était généralement moindre la saison suivante. Le travail de sol réalisé à l'automne précédant avec une charrue semble en bonne partie expliquer ces observations. Cependant, certains résultats démontrent un léger effet de l'engrais vert d'avoine, peu importe la date de semis, sur la diminution de la résistance du sol comparativement à un sol laissé à nue (témoin). Il est documenté que l'utilisation des graminées permet une structuration et une décompaction du sol par le système racinaire très ramifié (Cherr et al. 2006; Jobin et Douville 2000). Au niveau des récoltes, il semble plus probable que les différents semis d'engrais verts comparés aient eu un très faible impact sur le poids des laitues. Les effets des engrais verts sur les récoltes est très variable, toutefois, plusieurs études démontrent que l'utilisation des graminées comme engrais verts a peu d'impact positif sur la culture principale la même année, mais qu'un léger effet peut être observé la seconde année (après l'enfouissement) (Cherr et al. 2006; Maltas et al. 2012a, 2012b).



Microbiome du sol

Sur la base des échantillons de sol réalisés à l'été 2016 et 2017 sur les parcelles d'Oka et de Mirabel, l'extraction de l'ADN a été réalisée afin de documenter la structure des communautés microbiennes et les paramètres physicochimiques associés au sol soumis à différents traitements. Au niveau de la diversité microbienne des sols, près de 7000 différentes unités taxonomiques (OTU) bactériennes et fongiques a été obtenu. La diversité bactérienne est beaucoup plus importante que celle des champignons. Une analyse de la diversité spécifique des communautés microbiennes (diversité alpha) dans les différents traitements indique que ces derniers n'affectent en rien le nombre et l'abondance des espèces retrouvées dans les sites échantillonnés. Devant l'absence d'effet des traitements sur les communautés microbiennes, une analyse multivariée tenant en compte les paramètres physicochimiques, le rendement et le temps de récolte des cultures et la production de biomasse a été réalisée. Cette approche devait permettre de réaliser une classification multifonctionnelle ayant pour objectif de fournir des éléments de prédiction sur le rendement. Ainsi, les différentes parcelles se regroupent en quatre classes distinctes et significatives (Fig. 5).

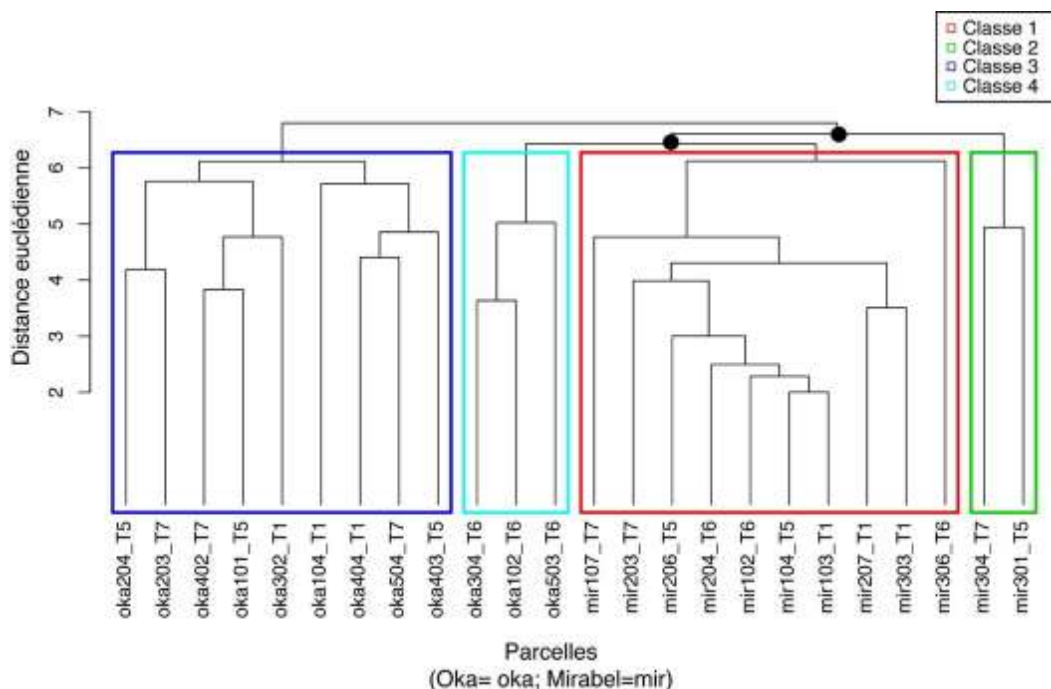


Figure 5. Classification multifonctionnelle des sites d'échantillonnage en fonction des paramètres physicochimiques, le rendement et le temps de récolte et la biomasse totale.

Ce regroupement implique que des variables jouent un rôle crucial dans l'assignation aux différentes classes. Une analyse en composantes principales a donc été réalisée afin d'identifier ces variables. Trois composantes viennent expliquer plus de 56% de la variabilité



des échantillons (Fig. 6). La première composante (24,5%) est largement associée à un facteur de compactage du sol, tandis que l'axe 2 (16,1%) est lié à un gradient de carbone et azote total. Finalement, l'axe 3 (15,8%) est accolé à la biomasse totale correspondant à la quantité d'engrais vert produit.

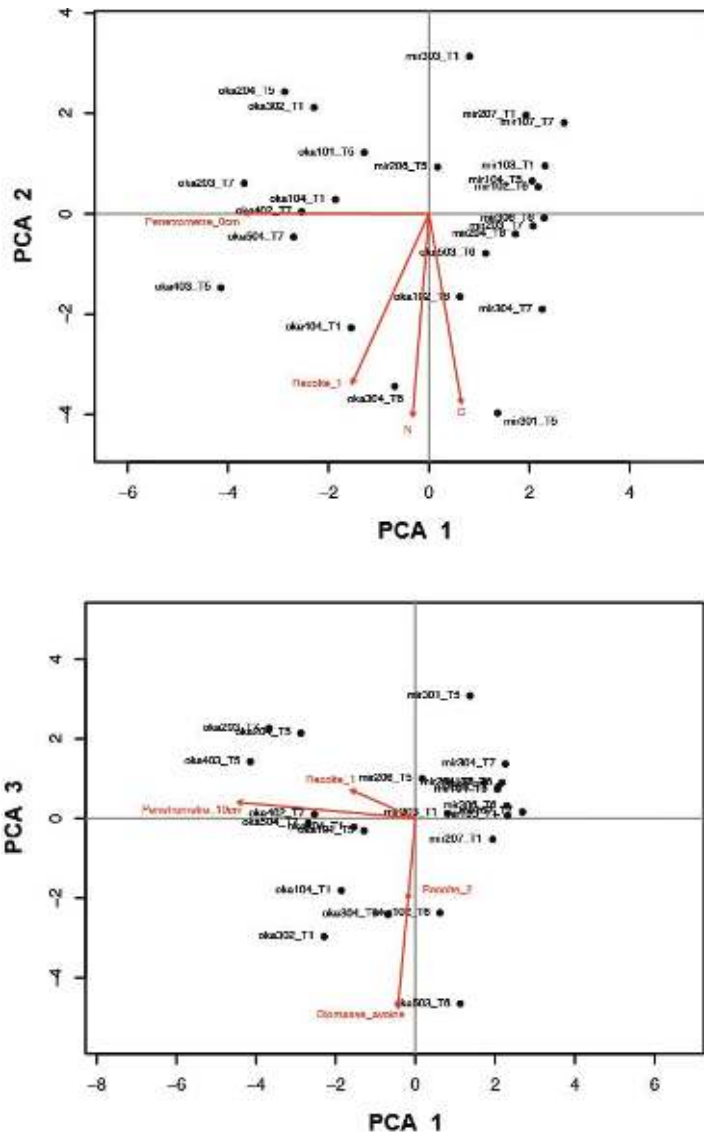


Figure 6. Analyse en composantes principales présentant les trois axes expliquant plus de 56% de la variabilité des échantillons.

Ces résultats montrent que la compaction des sols est une mesure permettant de discriminer les sites de Mirabel et d'Oka. Il est intéressant de constater que la récolte 1 de la laitue est influencée par l'axe 2 correspondant au gradient de carbone et d'azote total. Par contre, les



résultats indiquent qu'il y a une forme de compétition pour les ressources entre la production d'engrais et la récolte de la laitue. Il serait intéressant d'approfondir les analyses afin de documenter ce phénomène pour chacun des sites.

Une analyse permettant d'identifier les espèces bactériennes et fongiques indicatrices a été réalisée. Sur la base de cette analyse statistique à multiniveau des patrons de distribution des espèces d'OTU microbiennes, il a été possible d'identifier des marqueurs spécifiques pour chacune des quatre classes observées. Ainsi, le tableau 9 donne un sommaire de cette analyse. Sur les 7000 espèces d'OTU bactériennes et fongiques identifiées, 359 sont associées à ces différentes classes. Ainsi, la Classe 1 est caractérisée par 19 espèces, tandis que la Classe 4 l'est par 21 espèces.

Tableau 9. Sommaire des indicateurs biologiques spécifiques au classement des échantillons de sols prélevés à Mirabel et Oka en 2016. Axe 1 correspondant au compactage, l'Axe 2 a un gradient de nutriments et l'Axe 3 à la production d'engrais vert.

Classification des échantillons	Nombre d'espèces d'OTU associées	Axe 1	Axe 2	Axe 3
Classe 1	19	-	-	+
Classe 2	264	-	+	+
Classe 3	55	+	-	-
Classe 4	21	+	+	-

Ces résultats sont très intéressants, puisqu'ils montrent que des indicateurs génétiques microbiens peuvent être associés à la classification multifactorielle. Ainsi, à partir de ces données, certaines espèces indicatrices pourraient prédire si les conditions optimales sont rencontrées pour la production de la laitue. Malgré l'absence de différences significatives entre les parcelles, les indicateurs génétiques suggèrent que la Classe 4 serait celle permettant d'obtenir les meilleurs rendements. Une étude est actuellement en cours pour valider ce modèle.

Intégration des données du microbiome et des pratiques culturales

L'analyse des différentes données présentées précédemment démontre que les sites de Mirabel et Oka sont significativement différents, au niveau des paramètres physicochimiques mais aussi du microbiome, ce qui mène à les considérer de façon distincte. La distinction des



deux sites a permis de réaliser un modèle d'équation structurale montrant le rôle écologique du microbiome et son impact avec les engrais verts (Fig. 8). La première analyse au niveau d'Oka démontrait qu'il n'y avait pas d'effet des engrais verts sur le rendement de la culture principale (la laitue), tout comme aucun effet des paramètres physicochimiques du sol et du microbiome. Cette absence de différence est grandement reliée à l'hétérogénéité causée par le site au niveau de la granulométrie du sol et le gradient hydrique, donc peu d'uniformité dans le sol. Il est aussi mentionné dans quelques études, que dans un sol non limitant en azote, les engrais verts ont des effets contrastés sur le rendement des cultures, soit positif ou négatif, mais que dans le cas des pailles (graminées) l'effet est généralement négatif (Charles et al. 2011; Maltas et al. 2012b). Le site d'Oka est un sol argileux très riche, ce qui pourrait aussi expliquer en partie le peu d'effet de l'engrais vert sur le rendement de la culture principale.

Au site de Mirabel, la date de semis des engrais verts a eu un effet significatif sur la structure des communautés microbiennes, principalement la présence de certaines bactéries (PerMANOVA $p=0,042$) (Fig. 7). L'analyse détaillée des communautés microbiennes démontre que le traitement semis d'avoine en juillet se détache des autres traitements et a une différence significative au niveau du profil global de communauté microbienne (Fig. 7a). Les communautés fongiques sont toutefois plus hétérogènes et sont peu affectées par la date de semis des engrais verts (Fig. 7b). Sur la base des résultats obtenus, un modèle d'équation structurale a été obtenu pour expliquer la covariation entre les rendements de la laitue et les paramètres biotiques et abiotiques (Fig. 8a). La schématisation du modèle d'équation structurale démontre qu'il y a un effet antagoniste entre les engrais verts et le rendement en laitue ainsi qu'un effet positif des agents biotiques sur le rendement. Les résultats démontrent que l'engrais vert n'a pas d'influence sur la communauté biologique du sol ainsi que les propriétés physicochimiques du sol. L'utilisation des engrais organiques (incluant les engrais verts) a démontré dans plusieurs études un effet positif sur les propriétés physicochimiques du sol, notamment par l'apport de matière organique, et les micro-organismes du sol (e.g. Maltas et al. 2012a; Yang et al. 2007; Warman 1981). Il est observé que les sols recevant régulièrement des engrais organiques présentent une biomasse et une activité microbienne plus importante que les sols ne recevant que des engrais minéraux. Toutefois, il faut noter que ces études sont généralement sur une plus grande période de temps et que la période de notre étude (soit 1 année pour cette analyse) est très courte pour voir un effet sur ces communautés, tout comme sur les propriétés physicochimiques du sol.

Au site de Mirabel, le type de sol est sableux, donc il est plutôt normal de voir peu d'effet de l'avoine sur la compaction du sol, par exemple. De plus, ce type de sol est généralement plus limitant en azote. L'utilisation d'un engrais vert dans un type de sol plus limité en azote a



souvent des effets positifs sur le rendement de la culture principale (Maltas et al. 2012b). Toutefois, il est reconnu que l'avoine (ou les céréales) apporte une quantité de matière fertilisante négligeable au sol l'année de l'incorporation, tout comme l'année suivante (Jobin et Douville 2000; Maltas et al. 2012; SARE 2007). La matière organique apportée par l'enfouissement des céréales stimule l'action microbienne des micro-organismes hétérotrophes (responsable de la décomposition) et des organismes indépendants (qui peuvent fixer l'azote de l'atmosphère par exemple) (Cherr et al. 2006; Gomiero et al. 2011; Warman 1981). Les engrais verts peuvent augmenter soit la quantité de matière organique ou soit la quantité d'azote disponible (engrais verts fixateur d'azote), mais rarement les deux en même temps. L'enfouissement des pailles au printemps augmente la quantité de matière organique à décomposer. Si l'azote apporté par l'engrais vert est insuffisant, les bactéries consommeront l'azote disponible dans le sol pour effectuer le processus de décomposition, rendant l'azote disponible pour la culture principale plus rare (Cherr et al. 2006; Gomiero et al. 2011; Warman 1981). Ce processus explique en partie les résultats obtenus au site de Mirabel, les semis d'avoine en juillet ont généré davantage de paille, donc de matière à décomposer, ce qui a pu réduire la quantité d'azote disponible pour la culture de laitue.

Ainsi, les résultats obtenus démontrent que le microbiome du sol est grandement influencé par le type de sol. Pour le site de Mirabel, sur une courte période, les engrais verts ont démontré peu d'impact sur le microbiome du sol, cependant, les communautés bactériennes et fongiques du sol ont un effet positif sur le rendement de la culture principale. De plus, l'utilisation des engrais verts a eu un effet négatif sur la culture de laitue. Dans le cas présent, un compromis doit être envisagé : au départ, l'utilisation de l'avoine avait comme but de protéger le sol de l'érosion durant la période hivernale, c'est pourquoi l'utilisation d'une céréale comme engrais vert a été favorisée. La présence d'une biomasse de paille était importante pour assurer une bonne protection, toutefois, cette quantité importante de matière à décomposer au printemps a affecté la disponibilité de l'azote pour la culture principale. Ainsi, une date de semis qui permet d'avoir un peu moins de biomasse de paille pourrait très bien permettre de réduire l'érosion du sol tout en réduisant l'effet négatif sur la culture suivante.

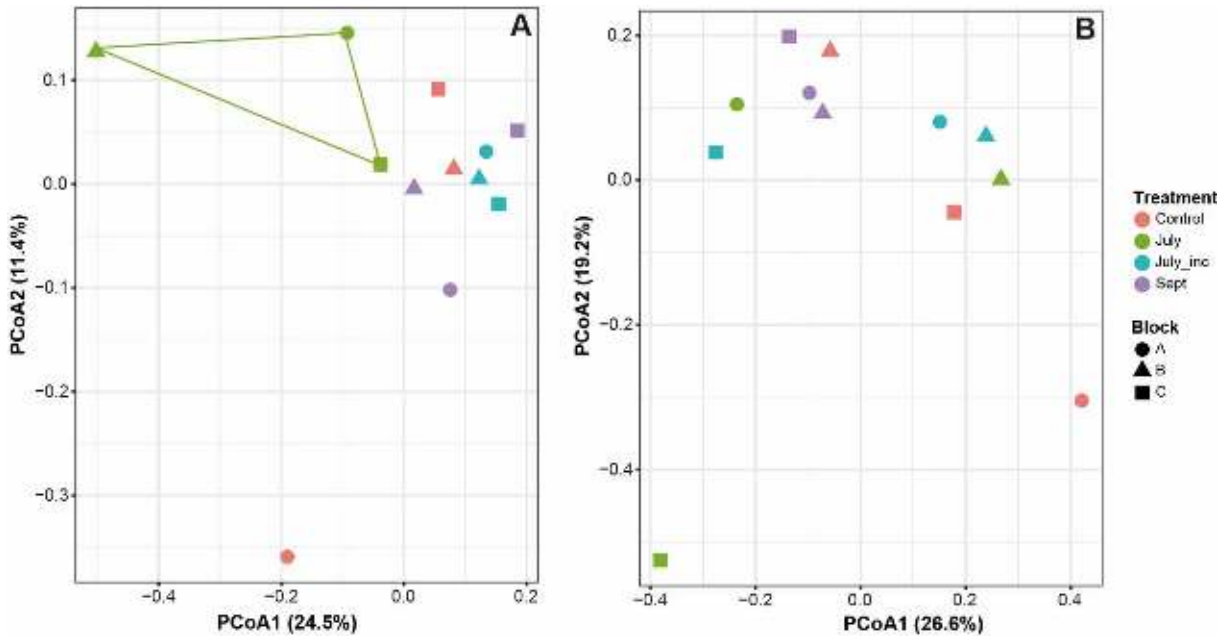
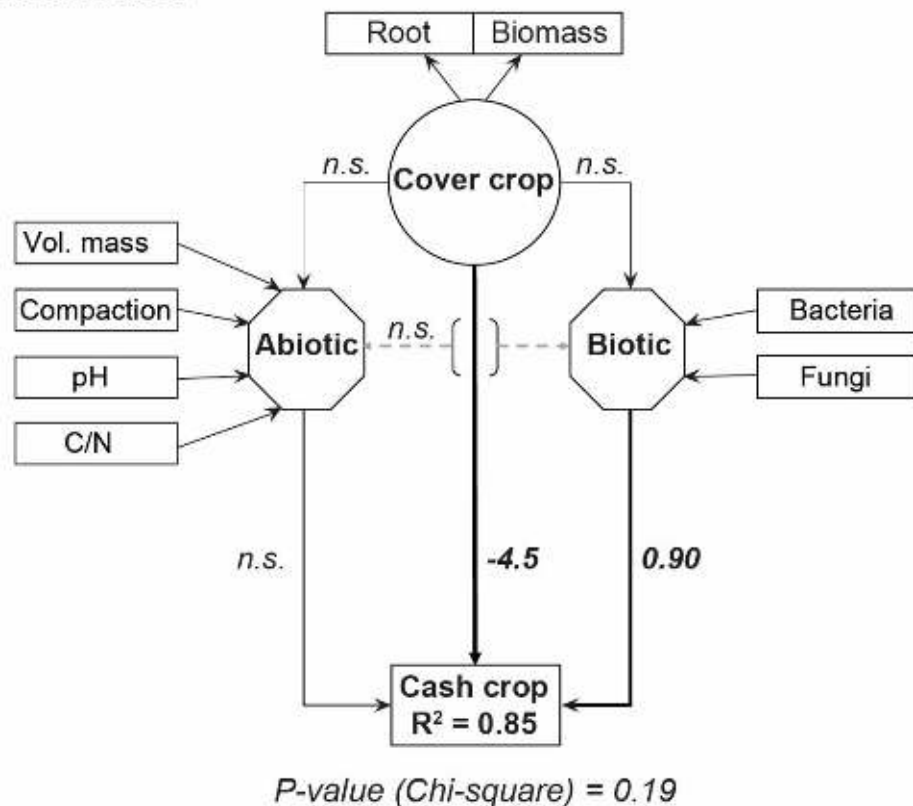


Figure 7. Analyse en coordonnées principales (ACoP) présentant les deux axes contribuant le plus à expliquer les différences de profils des communautés (a) bactériennes et (b) fongiques des sols prélevés à Mirabel. Seules les bactéries démontrent une réponse significative au traitement d'engrais vert. Les coordonnées des deux ACoP ont été introduites dans le modèle d'équations structurales.

A. Mirabel



B. Oka

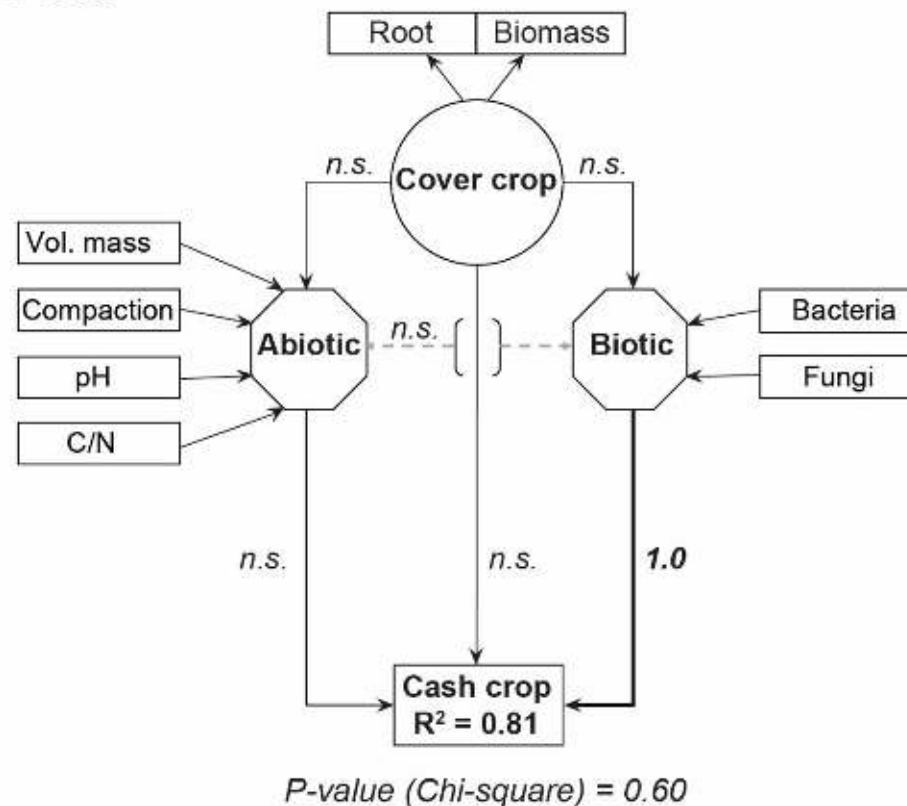


Figure 8. Schématisation du modèle d'équations structurales testé pour le site expérimental déployé à Mirabel. Le modèle vise à expliquer variation des rendements de laitue « culture » à partir de trois variables indépendantes : **(a)** la variable latente « engrais vert » (indicateur calculé à partir de la profondeur racinaire et de la biomasse de l'avoine), **(b)** la variable composite « Phys Chim » (intégration des mesures de la compaction du sol, la masse volumique apparente, le pH et le contenu carbone et azote total) et **(c)** la variable composite « Bio » (intégration de l'abondance des bactéries et des champignons dérivés par PCR quantitatif ainsi que l'ordination des profils de communautés de bactéries et champignons dans l'analyse en coordonnées principale).



CONCLUSION

Les analyses du microbiome démontrent que certains paramètres ont un impact sur sa composition et que la compaction du sol est une caractéristique discriminante. L'effet de l'engrais vert est grandement influencé par les types de sol. Les résultats de cette étude démontrent des profils physicochimiques et du microbiome différents pour les deux sites. De plus, l'hétérogénéité du sol à Oka ne permet pas de voir un effet du traitement des dates de semis des engrais verts sur les communautés biologiques. Cependant, le site de Mirabel a permis de comprendre la dynamique de l'effet des engrais verts (avoine) et du microbiome sur le rendement de la culture principale (laitue). Ainsi, ce projet démontre que la gestion des engrais verts doit être raisonnée individuellement pour chacun des sites. Cette gestion doit tenir compte des conditions de sol mais aussi des besoins particuliers, par exemple la réduction de l'érosion, la décompaction du sol ou l'apport de matière organique.

Les résultats obtenus permettent de mieux informer les producteurs sur les pratiques culturales nécessaires pour une utilisation efficace des engrais verts. Ces résultats permettent également de réduire certaines réticences véhiculées à propos des engrais verts. L'utilisation des engrais verts dans les pratiques culturales à la ferme est relativement simple, mais requiert une bonne organisation et une bonne connaissance de son site.



REFERENCES

- Abdallahi, M.M., N'Dayegamiye, A. 2000. Effets de deux incorporations d'engrais verts sur le rendement et la nutrition en azote du blé (*Triticum aestivum*), ainsi que sur les propriétés physiques et biologiques du sol. *Canadian Journal of Soil Science*, 80: 81-89.
- Charles, R., Cholley, E., Frei, P., & Mascher, F. (2011). Maladies et rendement du blé d'automne: influence du système de culture. *Recherche Agronomique Suisse*, 2(6), 264-271.
- Cherr, C. M., Scholberg, J. M. S., & McSorley, R.. 2006. Green manure approaches to crop production. *Agronomy Journal*, 98(2), 302-319.
- Coleman, D. C., Crossley, D. A., & Hendrix, P. F.. 2004. *Fundamentals of soil ecology*. Academic Press.
- Elfstrand, S., Hedlund, K., & Mårtensson, A.. 2007. Soil enzyme activities, microbial community composition and function after 47 years of continuous green manuring. *Applied Soil Ecology*, 35: 610-621.
- Gomiero, T., Pimentel, D., & Paoletti, M. G.. 2011. Environmental impact of different agricultural management practices: conventional vs organic agriculture. *Critical reviews in plant sciences*, 30: 95-124.
- Jobin, P. and Y. Douville. 2000. *Engrais verts et cultures intercalaires*. Centre de développement d'agrobiologie. 20p.
- Lupwayi, N. Z., Rice, W. A., & Clayton, G. W..1998. Soil microbial diversity and community structure under wheat as influenced by tillage and crop rotation. *Soil Biology and Biochemistry*, 30: 1733-1741.
- Maltas, A., Charles, R., Bovet, V., & Sinaj, S. (2012a). Effet à long terme des engrais organiques sur le rendement et la fertilisation azotée des cultures. *Recherche Agronomique Suisse*, 3(3), 156-163.
- Maltas, A., Oberholzer, H., Charles, R., Bovet, V., & Sinaj, S. (2012b). Effet à long terme des engrais organiques sur les propriétés du sol. *Recherche Agronomique Suisse*, 3(3), 148-155.
- Matson, P. A., Parton, W. J., Power, A. G., & Swift, M. J.. 1997. Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science*, 277: 504-509.
- Peck, V., Quiza, L., Buffet, J. P., Khdhiri, M., Durand, A. A., Paquette, A., Thifault, N., Messier, C., Beaulieu, N, Guertin, C. & Constant, P. 2016. Towards the development of multifunctional molecular indicators combining soil biogeochemical and microbiological variables to predict the ecological integrity of silvicultural practices. *Microbial biotechnology*.
- Sekiguchi, H., Kushida, A., & Takenaka, S.. 2007. Effects of cattle manure and green manure on the microbial community structure in upland soil determined by denaturing gradient gel electrophoresis. *Microbes and Environments*, 22(4), 327-335.
- Stark, C. H., Condon, L. M., O'Callaghan, M., Stewart, A., & Di, H. J.. 2008. Differences in soil enzyme activities, microbial community structure and short-term nitrogen mineralisation resulting from farm management history and organic matter amendments. *Soil Biology and Biochemistry*, 40, 1352-1363.
- Sustainable agriculture research education (SARE). 2007. *Managing cover crops profitability*. University of Maryland. 248 p.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S.. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418: 671-677.



Tittonell, P. 2014. Ecological intensification of agriculture - sustainable by nature. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 8: 53-61.

YANG, L. P., L. Z., SHAN, Y. H., & HAN, Y. (2007). Influence of Returning Green Manure and Wheat Straw to Paddy Soils on Soil Available N Content and Rice Yield [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1, 008.

Warman, P.. 1981. Principes fondamentaux de la culture d'engrais verts. *Ecological Agriculture Projects*, Publication-51F.

4. Enjeux

- Décrivez les défis auxquels vous vous êtes heurtés ou les préoccupations que vous avez eues pendant le projet. Comment les avez-vous surmontés ou comment prévoyez-vous les surmonter?
- Décrivez tout changement survenu par rapport au plan de travail initial et au budget prévu. Comment ces changements ont-ils été ou seront-ils pris en charge?

Des conditions météorologiques auraient pu affecter l'accès aux parcelles expérimentales au printemps. Le projet a été réalisé sur 2 années afin de pallier à cette contrainte et tous les traitements ont pu être implantés selon le calendrier. De plus, des sites appropriés ont été utilisés pour réduire les contraintes d'accès au site.

Toutefois, un des sites (Oka) avait une hétérogénéité au niveau de la granulométrie et du gradient hydrique du sol. Ces facteurs ont causé une plus grande variabilité des données au sein des parcelles expérimentales, ce qui a pu nuire à l'obtention de résultats probant au niveau du microbiome. Ces facteurs ont été considéré lors de l'analyse des données.

5. Leçons apprises

Décrivez les principales leçons apprises dans le cadre du projet (p. ex. une approche plus efficace permettant d'exécuter une tâche particulière pour une activité ou un projet).

La variabilité au sein d'un site expérimental peut avoir de grands effets sur les résultats obtenus. Le site d'Oka avait une hétérogénéité au niveau de la granulométrie et du gradient hydrique du sol. Ces facteurs ont causé une plus grande variabilité des données au sein des parcelles expérimentales, ce qui a pu nuire à l'obtention de résultats probant au niveau du microbiome. Un site plus homogène, comme celui de Mirabel, est plus approprié pour ce type d'étude.

Ce projet a aussi permis de voir que la préservation de la communauté microbienne du sol est un enjeu important pour le rendement des cultures. De plus, il faut toujours considérer le rapport bénéfice/pertes lorsque l'on utilise des engrais verts, il est fréquent d'avoir à faire un compromis lorsque l'on utilise les engrais verts. Enfin la sélection des engrais verts doit toujours être raisonnée selon les besoins du producteur.



6. Possibilités futures connexes

Décrivez les prochaines étapes pour les innovations produites dans le cadre de l'activité ou du projet. Faut-il mener des travaux de recherche supplémentaires? Les innovations peuvent-elles être commercialisées ou adoptées? Si vous n'avez aucune prochaine étape prévue, veuillez fournir une explication.

Les résultats de ce projet ont permis d'établir des assises importantes pour l'élaboration d'autres projets de recherche concernant les effets des engrais verts sur le microbiome du sol. Ce projet a conduit à l'élaboration, la soumission, puis l'acceptation du projet *Multifactorial agronomic decision tool to design biologically optimal cover crop sequences in Québec and Ontario under a changing climate*, un projet collaboration entre le Centre de recherche agroalimentaire de Mirabel, l'INRS-Institut-Armand-Frappier (QC) et l'Université de Guelph (ON).



ANNEXE 1 : Photos des parcelles d'Oka



Photo 1 : Semis de la fin juillet
(automne 2016).



Photo 3 : Semis de la fin août
(automne 2016).



Photo 5 : Semis de la fin juillet
incorporé (automne 2016).



Photo 7 : Témoin (automne 2016).



Photo 2 : Semis de la fin juillet
(printemps 2017).



Photo 4 : Semis de la fin août
(printemps 2017).



Photo 6 : Semis de la fin juillet
incorporé (printemps 2017).



Photo 8 : Témoin (automne 2017).



ANNEXE 2 : Information sur les différents paramètres ont été observés durant la saison 2016-2017

Tableau 1 : Période d'observation des paramètres mesurés

Prise de données	2015	2016		
	automne	Avant travail de sol	Pendant la culture de laitue	Après la culture de laitue
1) Densité engrais vert Biomasse sèche (quadrats)	X			
2) Hauteur de la culture	X			
3) Profondeur du système racinaire	X			
4) Température du sol		X		
5) Masse volumique apparente (MVA)		X	X	X
6) Compaction du sol (pénétrromètre)		X	X	X
7) Conductivité Hydrolitique		X	X	X
8) Stade de développement de la laitue			X	
9) rendement de la récolte			X	



ANNEXE 3 :

Évaluation de la qualité des sols concernant la MVA (tableau issu de Issoufou, I. (2013))

Texture	MVA idéale (g/cm ³)	MVA pouvant affecter l'enracinement (g/cm ³)	MVA empêchant l'enracinement (g/cm ³)
Sable, sable-loameux, loam-sablonneux	<1.6	1.7	>1.8
Loam, loam sable-argileux, loam-argileux, limons, loam-limoneux, argile limoneuse	<1.4	1.6	>1.8
Argile sablonneuse, argile, loam-argileux (33-45 % argile)	<1.1	1.5	>1.6
Argile (>45 %)	<1.1	1.4	>1.5

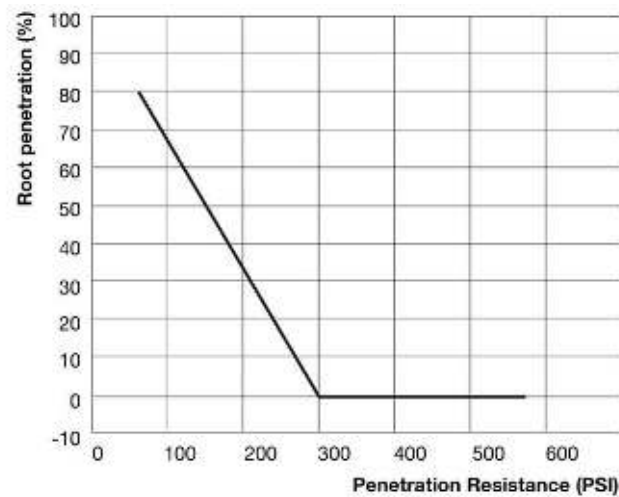


Figure 1 : Pénétration des racines selon la densité du sol. Duiker S.W., 2002. Diagnosing Soil Compaction Using a Penetrometer (Soil Compaction Tester). Penn Stat Extension. Agronomy Facts 63.