

Faculté des bioingénieurs

Etude comparative entre un couvert végétal multi-espèce et des couverts purs des espèces constituant le mélange

Auteur : Olivier Mees

Promoteur : Prof. Pierre Bertin (UCLouvain/ELI/ELIA)

Lecteurs : Prof. Richard Lambert (UCLouvain/ELI/ELIA)

Hugues Falys (Responsable opérationnel de la Ferme de Marbaix)

Année académique 2020-2021

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de Bioingénieur :
sciences agronomiques

Remerciements

Tout d’abord, je tiens à remercier Pierre Bertin, mon promoteur, de m’avoir aidé à améliorer mon travail et guidé dans mes choix tout au long de l’année.

Je voudrais tout particulièrement remercier Thomas Dagbert et Pierre Van Thor pour leur aide lors des prélèvements d’échantillons en champ ainsi que lors des expériences en laboratoire.

Je voudrais également remercier :

- Marc de Toffoli et son équipe Protect’eau de m’avoir donné un coup de main pour plusieurs mesures et pour l’emprunt de leur matériel.
- Karine Henin, Claudine Givron et Hélène Daily de m’avoir guidé lors de l’analyse de divers échantillons.
- Anne Doat, Jérémy Lefour et Sébastien François pour leur aide et leurs conseils lors de l’utilisation des casseroles à haute et basse pression.
- Lola Leveau, Richard Lambert et Hugues Falys d’avoir accordé de leur temps pour me renseigner sur certains aspects du mémoire et partager leurs connaissances.
- Mon père et mon cokoteur de m’avoir donné un coup de main pour la mise en place et l’analyse de mes échantillons.
- Ma mère pour m’avoir encouragé tout au long de l’année.

Merci.

Table des matières

Table des figures.....	VI
Table des tableaux.....	VII
Liste des acronymes	VIII
Introduction.....	1
1 Etat de l'art.....	2
1.1 Etat des connaissances sur les couverts végétaux mixtes	2
1.1.1 Histoire du rôle du travail du sol dans l'agriculture	2
1.1.2 Agriculture de conservation	2
1.1.3 La couverture permanente du sol	3
1.1.4 Définition de couverture végétale et différents types de couverts	3
1.1.5 Aspect législatif des couverts	3
1.1.6 L'affinité des agriculteurs pour l'utilisation des couverts	4
1.1.7 Les couvertures végétales multi-espèces.....	4
1.1.8 La diversité des mélanges d'un point de vue écologique.....	5
1.1.9 Hypothèses de diversité	5
1.1.10 Lien entre ces trois hypothèses.....	6
1.1.11 La diversité caractérisée par la richesse en espèces et la richesse en groupes fonctionnels.....	7
1.1.12 Différence entre un système écologique et un système agronomique	7
1.1.13 La diversité des mélanges d'un point de vue agronomique.....	7
1.2 Connaissances complémentaires en lien avec l'essai mené dans le cadre de ce mémoire..	10
1.2.1 Inventaire des espèces utilisées, leur famille et leur fonction dans le couvert	10
1.2.2 Estimation du carbone labile par la méthode POXC	12
1.2.3 Estimation de l'activité des microorganismes du sol par la méthode TBI	13
1.3 Récapitulatif et perspectives futures	14
2 Objectif du mémoire	15
3 Matériels et méthodes	16
3.1 Parcelle expérimentale et protocole.....	16
3.1.1 Information et description de la parcelle	16
3.1.2 Explication du choix variétal.....	16
3.1.3 Description du protocole expérimental	17
3.1.4 Correction des données	18
3.1.5 Problème technique rencontré	19

3.2	Mesures réalisées	19
3.2.1	Couverture du sol par le couvert.....	20
3.2.2	Identification et comptage des espèces.....	21
3.2.3	Green Area Index (GAI).....	21
3.2.4	Biomasse aérienne	21
3.2.5	Rapport carbone sur azote la biomasse aérienne	21
3.2.6	Rétention et apport d'azote par le couvert.....	22
3.2.7	Capacité de rétention en eau du sol	22
3.2.8	Méthode POXC (carbone labile)	24
3.2.9	Méthode TBI (activité des microorganismes)	24
3.3	Analyse statistique	25
4	Résultats	29
4.1	Identification et comptage des espèces.....	29
4.2	Couverture du sol par le couvert.....	32
4.3	Green Area Index (GAI).....	34
4.4	Biomasse aérienne	35
4.5	Rapport C/N de la biomasse aérienne.....	36
4.6	Rétention et apport d'azote par le couvert.....	37
4.7	Disponibilité en eau	40
4.8	Carbone labile (POXC)	41
4.9	Tea Bag Index	42
5	Discussion	43
5.1	Contexte de l'étude	43
5.2	Pourcentage de germination.....	44
5.3	Production de biomasse	45
5.4	Stabilité de la biomasse	46
5.5	Suppression des adventices	46
5.6	Interception du rayonnement solaire	49
5.7	Rétention et apport d'azote par le couvert.....	50
5.8	Capacité de rétention en eau du sol	52
5.9	Critique	53
5.9.1	Estimation du carbone labile par la méthode POXC	53
5.9.2	Estimation de l'activité des microorganismes du sol par la méthode TBI	54
6	Conclusion	56

7	Références bibliographiques	57
8	Annexes	62
8.1	Itinéraire technique de la parcelle d'expérimentale.....	62
8.2	Graphique de température et de précipitation lors de l'essai.....	63
8.3	Tableau récapitulatif de plusieurs espèces utilisées comme couvert végétal	64

Table des figures

Figure 1 : Vue aérienne de la parcelle expérimentale en bleu et du champ en rouge (Google Maps 2020).....	16
Figure 2 : Schéma de la parcelle reprenant les bandes de traitements, les bandes de références en bleu foncé (mélange 1) et les bandes perpendiculaires des répétitions pour le prélèvement d'échantillons des mesures réalisées en bleu clair. Le chemin en gris foncé oriente la parcelle par rapport à la Figure 1.	18
Figure 3 : Photo de la bande du traitement Moutarde. Les lignes noires délimitent la bande. Les hachures rouges délimitent les zones hétérogènes qui sont évitées lors de la prise de mesure. Photo prise le 5 novembre 2019.....	19
Figure 4 : Cadre utilisé pour observer la couverture du sol par le couvert.....	20
Figure 5 : Plan de l'échantillonnage de la parcelle d'essai pour l'APL. L'emplacement des trois répétitions des mesures est représenté par les bandes grises-bleues. Les points bleus figurent l'emplacement des huit échantillons de terres prélevés avec une sonde sur les trois horizons (0-30 ; 30-60 ; 60-90 cm) de chaque bande. Cet emplacement est aléatoire.....	22
Figure 6 : Evolution de la couverture du sol (%) pour les différents traitements avec une estimation de la dynamique de croissance selon le modèle défini. Les couverts ont été semés le 29 août 2019.	33
Figure 7 : Green Area Index en fonction des différents traitements.	34
Figure 8 : Biomasse aérienne en fonction des différents traitements.....	35
Figure 9 : Rapport Carbone sur Azote de la biomasse aérienne en fonction des différents traitements.	36
Figure 10 : Concentration de NO_3^- du sol en fonction des différents traitements dans l'horizon 0-60 cm.....	37
Figure 11 : Concentration de NO_3^- du sol en fonction des différents traitements dans l'horizon 60-90 cm.....	38
Figure 12 : Teneur en eau disponible du sol en fonction des différents traitements.....	40
Figure 13 : Fraction massique de POXC du sol en fonction des différents traitements.....	41
Figure 14 : Taux de décomposition (k) du sol en fonction des différents traitements.	42
Figure 15 : Facteur de stabilisation (S) du sol en fonction des différents traitements.....	42
Figure 16 : Photo de la bande du traitement Mélange 2. Les lignes noires délimitent la bande. Photo prise le 5 octobre 2019.....	43
Figure 17 : Relation entre la matière sèche du couvert et la lutte contre <i>A. palmeri</i> à la fin de Juin dans les rangs de coton sans l'utilisation d'herbicides ($R^2=0,81$). (Webster et al., 2013).	47
Figure 18 : Partie de l'itinéraire technique réalisée par un entrepreneur en vue de la préparation de culture de betterave (culture suivant le couvert végétal). Source : Hugues Falys, Responsable Opérationnel de la ferme de Marbaix.....	62
<i>Figure 19 : Température et précipitation de la région de Louvain-la-Neuve du 29/9/2019 au 22/01/2020 Source : www.pameseb.be.....</i>	<i>63</i>

Table des tableaux

Tableau 1: Nom des traitements, leur composition en terme d'espèce, la densité de celles-ci au sein de chaque traitement et le poids de mille grains (PMG) de chaque espèce.	17
Tableau 2 : Tableau récapitulatif de l'agenda des mesures réalisées et des interventions agricoles.....	19
Tableau 3 : Nombre attendu en fonction de la densité de semences et nombre observé des différentes espèces présentes dans les couverts au mètre carré. Pourcentage de germination de chaque espèce selon le nombre observé divisé par le nombre attendu.	30
Tableau 4 : Pourcentages attendus en fonction des proportions de semences et pourcentages observés des différentes espèces présentes dans les couverts ainsi que les repousses de froment et autres adventices.	31
Tableau 5 : Estimation et écarts-types des paramètres du modèle de l'évolution de la couverture du sol (v = taux d'expansion au point d'inflexion et t_0 = nombre de jours après le semis au point d'inflexion) selon les différents traitements.	32
Tableau 6 : Moyennes et écarts-types des mesures de Green Area Index en fonction des traitements. Des lettres de groupes identiques signifient que les moyennes ne sont pas significativement différentes.	34
Tableau 7 : Moyennes, écarts-types et coefficients de variation des mesures de biomasse aérienne en fonction des traitements. Des lettres de groupes identiques signifient que les moyennes ne sont pas significativement différentes.	35
Tableau 8 : Moyennes et écarts-types des mesures de C/N de la biomasse aérienne en fonction des traitements. Des lettres de groupes identiques signifient que les moyennes ne sont pas significativement différentes.	36
Tableau 9 : Moyennes et écarts-types des mesures de concentration en NO_3^- du sol en fonction des horizons. Des lettres de groupes identiques signifient que les moyennes ne sont pas significativement différentes.	37
Tableau 10 : Moyennes et écarts-types des mesures de concentration en NO_3^- du sol en fonction des traitements pour l'horizon 0-60 cm. Des lettres de groupes identiques signifient que les moyennes ne sont pas significativement différentes.	38
Tableau 11 : Moyennes et écarts-types des mesures de concentration en NO_3^- du sol en fonction des traitements pour l'horizon 60-90 cm. Des lettres de groupes identiques signifient que les moyennes ne sont pas significativement différentes.	39
Tableau 12 : Moyennes et écarts-types de la teneur en eau au niveau de la capacité au champ et la teneur en eau au niveau du point de flétrissement en fonction des traitements.....	40
Tableau 13 : Moyennes et écarts-types des mesures de fraction massique de POXC du sol en fonction des traitements.	41
Tableau 14 : Tableau récapitulatif de plusieurs espèces utilisées comme couvert végétal. Pour chaque espèce : Prix (€/ha-1), densité de semis recommandé, poids de mille grains (PMG), familles végétales, types racinaires, rapport C/N des parties aériennes et racinaires, biomasses aériennes et racinaires (T de MS.ha-1) et la sensibilité au gel. Source : Heymans (2018).	64

Liste des acronymes

AC	Agriculture de conservation
N	Azote
APL	Azote potentiellement lessivable
COS	Carbone organique du sol
CV	Coefficient de variation
CIPAN	Culture intermédiaire piège à nitrate
GAI	Green area index
LAI	Indice de surface foliaire
MO	Matière organique
POXC	Permanganate-oxidizable carbon
PAC	Politique agricole commune
PGDA	Programme de gestion durable de l'azote
SIE	Surface d'intérêt écologique
TBI	Tea bag index

Introduction

Les couvertures végétales fournissent une variété de services agroécologiques importants pour les cultures suivantes. En général, ces couverts sont semés en culture pure ou en mélange simple de deux espèces graminées-légumineuses. Cependant, la théorie écologique et des preuves empiriques suggèrent que les services agroécologiques que fournissent les couverts pourraient être améliorés en cultivant des couverts végétaux avec des mélanges riches en espèces. Des recherches supplémentaires et une étude plus élargie sur les différents services fournis par les couverts est nécessaire afin de mieux comprendre l'intérêt des mélanges dans une rotation de culture.

Ce mémoire a pour but d'étudier l'effet de la diversification des couverts sur plusieurs services agroécologiques. Pour cela, un mélange composé de six espèces est étudié de même que ces six espèces cultivées en pure. Un couvert de moutarde et un autre mélange de référence sont aussi étudiés. Plusieurs facteurs sont mesurés : Le pourcentage de germination, la présence d'adventices, le recouvrement du sol, la production de biomasse, le Green Area Index, le rapport C/N, la rétention d'azote, la rétention en eau du sol, le carbone labile du sol et l'activité des microorganismes.

Pour les deux derniers facteurs cités, deux nouvelles méthodes simplifiées sont testées pour leur efficacité : la méthode POXC et la méthode TBI pour la mesure du carbone labile et de l'activité des microorganismes respectivement.

Ce mémoire est composé de quatre parties :

La première partie « *Etat de l'art* » place le contexte dans lequel les couverts végétaux sont utilisés et définit le rôle de ceux-ci dans l'agriculture. Les avantages de la diversité des couverts aperçus d'un point de vue théorique et empirique y sont repris de même que la comparaison entre ces deux points de vue.

La seconde partie « *Matériels et méthodes* » détaille la méthodologie utilisée lors de cette étude. Des explications sur le contexte du mémoire ainsi que sur la parcelle expérimentale mise en place pour cet essai sont reprises dans cette partie.

La troisième partie « *Résultats* » présentent une visualisation des données obtenues à partir des différentes méthodes expliquées dans la deuxième partie. À partir de celles-ci, différents tests statistiques ont été effectués afin de mettre en évidence les traitements qui sont significativement différents des autres.

La dernière partie « *Discussion* » se base sur une analyse des résultats obtenus dans la partie précédente et les remet dans un contexte plus global. Cette analyse met en lien les différentes variables mesurées et les compare avec les connaissances reprises dans la première partie.

1 Etat de l'art

1.1 Etat des connaissances sur les couverts végétaux mixtes

1.1.1 Histoire du rôle du travail du sol dans l'agriculture

Dans l'histoire de l'agriculture, le travail du sol joue un rôle majeur pour la gestion des cultures. On trouve des références de travail du sol à partir de 3000 avant JC en Mésopotamie. Avec l'avènement de la révolution industrielle au XIXe siècle, la puissance mécanique et les tracteurs sont devenus disponibles pour faciliter et renforcer les opérations de labour. Aujourd'hui, une gamme d'équipements est disponible pour le labour et la production agricole (Hobbs *et al.*, 2008). Les avantages du travail du sol sont variés : préparer le lit de semence pour assurer une bonne et uniforme germination des graines, gérer les mauvaises herbes, aider à la libération des éléments nutritifs du sol nécessaires à la croissance des cultures par minéralisation et oxydation, et incorporer les résidus de culture et les amendements (engrais, organiques ou inorganiques) dans le sol (Farooq *et al.*, 2015).

Il ne fait aucun doute que cette liste des avantages du travail du sol est bénéfique pour l'agriculteur, mais à un coût pour lui, l'environnement et les ressources naturelles du sol dont dépend l'agriculture (Hobbs *et al.*, 2008). Le travail du sol, en particulier dans les écosystèmes fragiles, a été remis en question pour la première fois dans les années 1930 aux Etats-Unis. A cette époque, les sols étaient peu couverts en dehors des cultures d'intérêt économique et travaillés de manière intensive par des outils comme la charrue. L'exposition d'une surface nue et non protégée dû à l'action du labour a entraîné une érosion importante des sols de grandes cultures. Ce modèle agricole intensif et une longue période de sécheresse a conduit à l'apparition de gigantesques tempêtes de poussières appelées « Dust Bowl ». Cette catastrophe a touché près des deux tiers du pays. Le Dust Bowl et un contexte économique défavorable de cette période a entraîné une remise en question des agriculteurs sur leur système et pratiques culturales. Certains ont changé leur façon de cultiver afin de limiter l'érosion de leurs sols. Les premières formes de l'Agriculture de Conservation sont nées (Braibant et Morelle, 2018).

1.1.2 Agriculture de conservation

L'agriculture de conservation (AC) est un système cultural qui a pour but de maintenir et améliorer le potentiel agronomique des sols, tout en conservant une production régulière et performante. L'AC est un terme qui a été créé en 2001 par la FAO. Ce système se base sur trois piliers : la réduction du travail du sol, la couverture permanente du sol et la diversification des espèces cultivées au sein d'une rotation. Ces trois piliers permettent d'accroître la biodiversité et stimuler les processus biologiques naturels qui ont lieu au-dessus et en dessous de la surface du sol, ce qui contribue à une utilisation plus efficace de l'eau et des nutriments et permet d'améliorer durablement la production végétale (FAO, 2020).

L'agriculture de conservation est aussi perçue comme une réponse aux problèmes liés au changement climatique que l'on fait face à l'heure actuelle. Les pratiques de l'AC permettent en effet de réduire les émissions de CO₂ grâce à une utilisation réduite du diesel en simplifiant le travail du sol. Le non-labour participe à la séquestration de carbone dans les sols. Et ce, en limitant la décomposition de la matière organique qui est, notamment, responsable d'une production de dioxyde de carbone via les micro-organismes du sol (Braibant et Morelle, 2018). L'AC permet à l'agriculture de s'adapter au changement climatique en la rendant plus résiliente. Pour reprendre

l'exemple de Reynolds *et al.* (2010), l'AC augmente l'infiltration de l'eau et la pénétration du sol par les racines, ce qui permet aux cultures de mieux s'adapter à la baisse des précipitations.

1.1.3 La couverture permanente du sol

Parmi les trois piliers de l'AC cités ci-dessus, la couverture permanente du sol peut être assurée en laissant les résidus de culture sur le sol, mais s'il s'écoule un délai trop long entre la récolte précédente et le semis, il est peut-être nécessaire de recourir à des plantes de couverture pendant cet intervalle (FAO, 2020). Cette pratique a vu le jour dans les années 1970. La flambée des prix du carburant a poussé les agriculteurs à se tourner vers des solutions plus économiques que les engrais chimiques industriels pour apporter de la fertilité à leurs champs (Braibant et Morelle, 2018). Aujourd'hui, le concept de couverture végétale est plus complexe et les couverts sont à présent utilisés pour remplir plusieurs fonctions.

1.1.4 Définition de couverture végétale et différents types de couverts

Afin de baliser le concept de couverture végétale, une définition selon Justes *et al.* (2017) ; est donnée ci-après :

Un couvert végétal est planté entre deux cultures principales, l'objectif étant de fournir un certain nombre de services écosystémiques (agronomiques et écologiques) via des fonctions agroécologiques. Il peut s'agir principalement de : réduire le lessivage, fournir de l'azote à la culture suivante, réduire l'érosion, améliorer la structure du sol et les propriétés hydriques du sol, réduire la pression parasitaire sur les cultures, prévenir la croissance des adventices, accroître la biodiversité du paysage et de l'environnement agricoles (faune, abeilles, etc.). Ces couverts ne sont pas destinés à être récoltés et sont détruits (ou leur croissance est arrêtée) avant la plantation de la prochaine culture principale. Leur biomasse est restituée au sol pour favoriser le recyclage des composants nutritionnels pour la prochaine culture et améliorer la fertilité physique, chimique et biologique du sol. Si la culture semée entre deux cultures principales est destinée à être récoltée, le terme de culture intermédiaire ou de culture dérobée est alors utilisé. Il peut s'agir, par exemple, d'une culture fourragère ou d'une culture de vente à cycle court (Braibant et Morelle, 2018). Une couverture, appelée culture intercalaire, peut aussi être semée en même temps que la culture principale. Elle offre des services écosystémiques durant le développement de la culture de rente et ne sera pas récoltée en fin de saison.

Lorsqu'un couvert végétal est planté dans le but principal ou initial de réduire le lessivage du nitrate dans des situations où le risque d'un tel événement est élevé, le terme « *Culture intermédiaire piège à nitrate* (CIPAN) » est utilisé. Lorsque l'objectif principal est la rétention des nutriments et le maintien de la matière organique pour la culture suivante, donc principalement dans des contextes à faibles intrants, le terme « *Engrais vert* » est utilisé. Lorsque l'objectif principal est de recouvrir le sol pour limiter l'érosion hydrique et/ou jouer un rôle structurant du sol via l'action des racines, on utilise le terme généralisé « *Couvert végétal* ». Il va sans dire que les couverts végétaux peuvent remplir simultanément plusieurs fonctions agroécologiques différentes. Ces fonctions dépendront des espèces utilisées comme couverture, leur famille (Graminées, légumineuse, Crucifères...) et si le couvert est récolté ou non (Justes *et al.*, 2017).

1.1.5 Aspect législatif des couverts

Depuis Juin 2014, l'utilisation de couverts, et plus précisément les CIPAN, est réglementée par le Programme de Gestion Durable de l'Azote en agriculture (PGDA) afin de diminuer la pollution des

eaux souterraines et de surface par le nitrate d'origine agricole (Protect'eau, 2020). De plus, ces CIPAN, dont l'utilisation est obligatoire selon certaines conditions, peuvent être valorisées en surface d'intérêt écologique (SIE) par les agriculteurs. En effet, selon la politique agricole commune (PAC), au moins 5% de la surface des terres arables de l'exploitation doit être consacrée à des surfaces ayant un impact favorable pour l'environnement ou la biodiversité. Pour ce faire, les couverts utilisés doivent répondre à certains critères spécifiques, notamment être constitués d'au moins deux espèces de familles différentes (Graminées, légumineuse, crucifères...) (Natagriwal, 2020). Ces couverts sont appelés couvertures végétales multi-espèces ou couverts végétaux mixtes.

1.1.6 L'affinité des agriculteurs pour l'utilisation des couverts

Une étude chez différents agriculteurs de la région wallonne, dans le cadre du mémoire de Braibant et Morelle (2018), a permis d'analyser leurs pratiques agricoles concernant les couverts. Selon cette étude, l'implémentation des couverts végétaux dans les exploitations est antérieure à la réglementation sur les CIPAN. C'est néanmoins cette dernière qui a permis leur expansion. Aujourd'hui, cette mesure obligatoire en région de grandes cultures est appliquée chez tous les agriculteurs interviewés. De même, les SIE sont d'application partout. La possibilité de recevoir des subsides en diversifiant ses couverts végétaux a permis l'expansion des couverts diversifiés au-delà du pourcentage imposé. Les réglementations sur les CIPAN et les SIE ont donc engendré une réflexion sur l'intérêt des couverts végétaux et leur diversité.

Cette étude a catégorisé les agriculteurs interviewés selon leur affinité avec le deuxième pilier de l'AC. Parmi eux, seul un faible pourcentage d'entre eux voit l'utilisation obligatoire des couverts comme étant un verrouillage. Selon ce groupe, les dates d'implantation imposées pour les couverts diminuent la fenêtre d'intervention pour les travaux du sol, notamment pour le désherbage mécanique. Par contre, la majorité des agriculteurs interviewés ayant une forte affinité avec l'AC considèrent l'utilisation des couverts comme une opportunité de se tourner vers une agriculture plus durable. Parmi l'ensemble de ces agriculteurs, aucun d'entre eux plante uniquement une seule espèce dans leurs couverts végétaux. La valorisation des CIPAN en SIE semble avoir un impact sur ce phénomène. Le nombre d'espèces présentes dans le couvert est relativement hétérogène. Cependant certains agriculteurs maintiennent un nombre d'espèces plus réduit pour avoir un couvert performant et peu coûteux (car au plus il y a d'espèces, au plus le couvert coûte cher). En effet, les couverts végétaux ne sont généralement pas récoltés, ils n'apportent donc aucun bénéfice économique direct (hors subsides). Par conséquent, souvent, des compromis coûts-bénéfices agronomiques sont pris (Braibant et Morelle, 2018).

1.1.7 Les couvertures végétales multi-espèces

Alors que les couvertures végétales sont utilisées depuis longtemps pour leurs avantages pour les sols et les cultures, l'utilisation de couvertures végétales multi-espèces très divers est un phénomène relativement récent. Généralement, ces couverts sont semés en culture pure ou en mélange simple de deux espèces graminées-légumineuses. Cependant, les cultivateurs et les chercheurs s'intéressent de plus en plus à la question de savoir s'il peut y avoir des avantages supplémentaires à cultiver des couverts végétaux plus diversifiés.

Il a été suggéré qu'en augmentant la diversité des espèces dans les couverts, les diverses fonctions de ceux-ci seraient améliorées et stabilisées. Plus précisément, il a été proposé à la fois dans la presse populaire et dans la littérature scientifique (Finney *et al.*, 2016 ; Florence *et al.*, 2019 ;

Schappert *et al.*, 2019 ; Smith *et al.*, 2014) que l'augmentation de la diversité des espèces présent dans les couverts devrait être associée à une productivité accrue, à la suppression des mauvaises herbes et à la stabilité de la biomasse. Afin de mieux comprendre cette suggestion, une recherche plus approfondie de ses fondements est détaillée ci-après.

1.1.8 La diversité des mélanges d'un point de vue écologique

On retrouve la notion de diversité des espèces et de ses bienfaits dans la littérature écologique (Hooper *et al.*, 2005). En effet, cette notion de diversité est partout présente dans les écosystèmes naturels. Une compréhension des processus intervenant en milieu naturel permet de mieux comprendre ceux qui se déroulent dans le champ d'un agriculteur. Les écologistes ont déterminé deux processus agissants lorsque plusieurs espèces végétales sont présentes au sein d'un même écosystème : le processus de complémentarité des niches et le processus de facilitation.

- **Processus de complémentarité des niches**

La complémentarité résulte de la réduction de concurrence interspécifique au sein d'un écosystème grâce au cloisonnement des niches. Les espèces complémentaires utilisent des ressources différentes, ou les mêmes ressources mais à des moments différents ou à des points différents dans l'espace (Hooper *et al.*, 2005). Les interactions entre ces espèces ont lieu à la fois au niveau aérien pour l'interception du rayonnement, et au niveau racinaire pour le prélèvement de l'eau et des nutriments. La partition spatiale d'une ressource du sol entre deux espèces complémentaires se produit particulièrement lorsque ces dernières présentent des vitesses et des profondeurs d'enracinement différenciées. Il en va de même pour l'utilisation de la lumière lorsque les espèces associées présentent des architectures et/ou des dynamiques de croissance complémentaires (Justes *et al.*, 2014).

La compétition entre espèces peut être réduite par le phénomène de complémentarité de niche lorsque les espèces présentent des enracinements contrastés en profondeur. Dans ce cas, les deux espèces sont à la fois en compétition pour les ressources présentes dans les horizons supérieurs mais également complémentaires du fait que les ressources situées en profondeur ne sont accessibles que pour celle ayant l'enracinement le plus profond (Justes *et al.*, 2014).

- **Processus de facilitation**

Dans les écosystèmes plurispécifiques, les interactions indirectes entre espèces peuvent être représentées comme les effets d'une espèce sur le milieu et la réponse d'une seconde espèce à ces changements (Justes *et al.*, 2014). Lorsque ce changement est positif pour la seconde espèce, en atténuant les conditions environnementales difficiles ou en fournissant une ressource essentielle pour la seconde espèce, ce processus est appelé facilitation. (Hooper *et al.*, 2005).

Ces différentes interactions entre espèces sont complexes du fait qu'elles se produisent en dynamique et qu'elles dépendent entre autres de la disponibilité en nutriments, du contexte pédo-climatique, des espèces et des cultivars associés et de leur plasticité d'utilisation des ressources en réponse à la compétition (Justes *et al.*, 2014).

1.1.9 Hypothèses de diversité

Un rapport de l'Ecological Society of America de 2005 (Hooper *et al.*, 2005) a recensé les connaissances écologiques concernant les effets de la biodiversité sur le fonctionnement d'un

écosystème naturel. La communauté scientifique est parvenue à un large consensus sur de nombreux aspects de la relation entre la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes naturels au niveau de la productivité, l'invasibilité et la stabilité. Trois hypothèses ressortent de ce consensus. Elles sont reprises ci-dessous et représentent les facteurs influencés par la diversité :

- **Hypothèse de diversité-productivité**

« Certaines combinaisons d'espèces sont complémentaires dans leurs modèles d'utilisation des ressources et peuvent augmenter les taux moyens de productivité et de rétention des nutriments. Dans un même temps, les conditions environnementales peuvent influencer l'importance de la complémentarité dans la structuration des communautés. L'identification de quelles espèces et combien d'espèces agissent de manière complémentaire dans des communautés complexes ne fait que commencer. »

- **Hypothèse de diversité-invasibilité**

« La sensibilité à l'invasion par des espèces exotiques est fortement influencée par la composition des espèces et, dans des conditions environnementales similaires, diminue généralement avec l'augmentation du nombre d'espèces. Cependant, plusieurs autres facteurs, tels que la pression des propagules, le régime de perturbation et la disponibilité des ressources, influencent aussi fortement le succès de l'invasion et l'emportent souvent sur les effets du nombre en espèces dans les comparaisons entre différents sites ou écosystèmes. »

- **Hypothèse de diversité-stabilité**

« Le fait d'avoir une gamme d'espèces qui réagissent différemment aux différentes perturbations environnementales peut stabiliser les taux de processus de l'écosystème en réponse aux perturbations et aux variations des conditions abiotiques. L'utilisation de pratiques qui maintiennent une diversité d'organismes ayant différents effets fonctionnels et types de réponses fonctionnelles aidera à préserver une gamme d'options de gestion. »

1.1.10 Lien entre ces trois hypothèses

Alors que les hypothèses de diversité-productivité, diversité-invasibilité et diversité-stabilité peuvent sembler aborder trois thèmes distincts, le concept de complémentarité des niches entre les espèces est utilisé comme base logique pour tous. La complémentarité des niches implique que différentes espèces ont des besoins en ressources et des capacités d'acquisition différents. On s'attend à ce qu'une seule espèce laisse des ressources inexploitées qu'une autre espèce pourrait être en mesure d'exploiter, par exemple, grâce à une architecture de racine ou de canopée différente. Ainsi, l'hypothèse de la diversité-productivité implique qu'un système plus diversifié soit plus productif qu'un système moins diversifié en raison d'une utilisation plus efficace des ressources ou d'une complémentarité de niche. De plus, puisqu'une communauté plus diversifiée est censée utiliser plus pleinement les ressources finies dans un environnement qu'une communauté moins diversifiée, l'hypothèse de la diversité et de l'invasion prédit qu'une communauté plus diversifiée sera également moins susceptible d'être envahie par d'autres espèces qu'une communauté moins diversifiée, car davantage de ressources disponibles ont été prélevées. En outre, étant donné que différentes espèces ont des besoins en ressources et des efficacités physiologiques différents, il s'ensuit que différentes espèces se développeront et mourront dans des conditions différentes. En conséquence, l'hypothèse de la diversité-stabilité prédit que la présence de nombreuses espèces garantit qu'au

moins certaines espèces se développeront dans des conditions environnementales variables, stabilisant ainsi les performances du mélange d'espèces (Florence *et al.*, 2019).

1.1.11 La diversité caractérisée par la richesse en espèces et la richesse en groupes fonctionnels

Des expériences avec des niveaux de diversité manipulés ont démontré à plusieurs reprises que les processus écosystémiques sont en effet positivement affectés par le nombre et les différences entre les espèces d'une communauté (Marquard *et al.*, 2009). Ces deux facteurs sont appelés la richesse en espèce (*species richness*) et la richesse en groupes fonctionnels (*functional group richness*) d'une communauté. La richesse en espèces représente une mesure de la variété des espèces basée simplement sur un comptage du nombre d'espèces dans un échantillon particulier. Un groupe fonctionnel est un ensemble d'espèces qui partagent les mêmes caractéristiques et les mêmes fonctions au sein d'une communauté. Une grande variété de ces groupes au sein d'un échantillon particulier augmente sa richesse en groupes fonctionnels.

La richesse en espèces ou la richesse en groupes fonctionnels pourraient accroître les propriétés des écosystèmes grâce à des interactions positives entre les espèces. Complémentarité et facilitation sont les deux principaux processus conduisant au phénomène de sur-rendement, dans lequel la production végétale en mélanges dépasse les attentes basées sur les rendements de cultures pures. Si les espèces utilisent des ressources différentes, une plus grande partie des ressources totales disponibles devrait être utilisée par la communauté. Si ces ressources limitent la croissance, alors l'augmentation de la richesse en espèces ou la richesse en groupes fonctionnels devrait conduire à une plus grande productivité totale et à une diminution des pertes de ressources de l'écosystème. Les interactions de facilitation entre les espèces pourraient également conduire à une augmentation des pools d'écosystèmes ou des taux de processus à mesure que la richesse en espèces ou la richesse en groupes fonctionnels augmentent. Une telle facilitation pourrait se produire si certaines espèces atténuent les conditions environnementales difficiles ou fournissent une ressource essentielle pour d'autres espèces (Hooper *et al.*, 2005).

1.1.12 Différence entre un système écologique et un système agronomique

D'un point de vue agronomique, la validité de ces hypothèses pour les systèmes de culture de couverture est en grande partie inexplorée (Finney *et al.*, 2016). Il existe des contrastes importants entre les systèmes agronomiques et naturels qui peuvent limiter les effets de la diversité sur la productivité des couverts végétaux. Les cultures de couverture sont des espèces annuelles cultivées pendant une courte période, tandis que les systèmes naturels dans lesquels la relation de productivité de la diversité a été étudiée incluent des espèces pérennes et tiennent compte de la productivité sur plusieurs années.

1.1.13 La diversité des mélanges d'un point de vue agronomique

Dans un couvert végétal, la biculture graminée-légumineuse est fréquemment utilisée par les agriculteurs pour leur complémentarité en phénologie et leur fonction par rapport à l'azote (N) ; les graminées exploitent les ressources en N du sol tandis que les légumineuses fixent le N₂ atmosphérique en plus d'utiliser le N du sol. Ce mélange a largement été étudié pour leur potentiel à la fois à capter le N résiduel du sol et à fournir du N à une culture ultérieure. Le rendement de la biomasse des cultures de graminées-légumineuses est souvent égal ou supérieur au rendement des

cultures pures des espèces qui les constituent, ce qui suggère que leur complémentarité peut conduire à un sur-rendement par les mélanges de cultures de couverture (Finney *et al.*, 2016).

Sur base des concepts écologiques abordés ci-dessus, il y a un certain nombre de raisons de penser qu'un mélange de cultures de couverture plus diversifié pourrait conférer des services agroécosystémiques améliorés par rapport à une culture pure ou une culture simple de deux espèces. Une large gamme d'espèces végétales peut être utilisée comme cultures de couverture, y compris des espèces de graminées, de légumineuses, de brassicacées et d'autres familles. Bien que chaque espèce individuelle puisse exceller dans un ou quelques services, aucune espèce n'est capable de fournir tous les services possibles et de manière conséquente pour observer des avantages substantiels pour l'agroécosystème. Ainsi, on pourrait s'attendre à ce qu'un mélange de plantes de couverture contenant une diversité d'espèces, chacune ayant des caractéristiques fonctionnelles différentes, pourrait fournir une plus grande diversité de services relatifs à une culture pure ou à une communauté de cultures de couverture à deux espèces. Par exemple, l'hypothèse de la diversité-productivité suggère que l'augmentation de la productivité associée à la diversité des espèces est due à une utilisation plus efficace des ressources. On devrait donc s'attendre à ce que diverses espèces au sein d'un couvert produisent plus de biomasse que des couverts à une seule espèce. (Smith *et al.*, 2014).

C'est dans l'optique de vérifier ces assumptions et de mieux comprendre le rôle que joue la diversité au sein d'un couvert végétal que plusieurs études et expériences ont été menées. Parmi celles-ci, les hypothèses de productivité, d'invasibilité et de stabilité ont été testées :

- **Production de biomasse aérienne**

Au niveau de la biomasse aérienne, les résultats de plusieurs expériences (Finney *et al.*, 2016 ; Florence *et al.*, 2019 ; Smith *et al.*, 2014) observent une production de matière sèche plus élevée dans des mélanges à plusieurs espèces que la production moyenne de matière sèche de différents couverts à une espèce constituant le mélange. Un phénomène de sur-rendement est observé pour le mélange. Cependant, la production de matière sèche des mélanges est plus faible que la production de matière sèche du couvert à une espèce la plus productive. On parle alors de sur-rendement non-transgressif. Le sur-rendement se produit lorsqu'un mélange d'espèces produit plus de biomasse par unité de surface que le rendement moyen des espèces constituantes cultivées en pure. Le sur-rendement transgressif, en revanche, se produit lorsqu'un mélange produit plus de biomasse totale par unité de surface que les espèces les plus productives cultivées en pures (Finney *et al.*, 2016). Alors que le sur-rendement est fréquemment utilisé pour évaluer l'efficacité du mélange de plusieurs espèces sur une superficie fixe, le sur-rendement transgressif peut être plus pertinent pour évaluer la productivité des couvertures végétales, étant donné que l'objectif est de maximiser la production de biomasse absolue d'une culture qui n'est pas récoltée et pour lesquelles le nombre d'espèces cultivées n'est pas déterminé par les marchés et les besoins de suffisance pour l'alimentation humaine ou animale. (Smith *et al.*, 2014).

- **Suppression des adventices**

En ce qui concerne la suppression des adventices, différentes études (Florence *et al.*, 2019 ; Schappert *et al.*, 2019 ; Smith *et al.*, 2014) mesurent une diminution d'adventices dans des couverts plus diversifiés. Cependant, étant donné que la biomasse aérienne des cultures de couverture est

également corrélée à la richesse en espèces, il est possible que la corrélation entre la suppression des mauvaises herbes et la richesse en espèces soit due à la biomasse des cultures de couverture plutôt qu'à la richesse des espèces. Cela peut occulter les différences entre corrélation et causalité, et peut confondre l'effet de la diversité avec l'effet de la productivité de la biomasse. En effet, l'augmentation de la productivité des plantes est associée à une résistance accrue à l'invasion dans les systèmes indigènes et à une suppression accrue des mauvaises herbes dans les systèmes agricoles (Florence *et al.*, 2019). En contrôlant l'effet de la productivité sur la suppression d'adventices, ils constatent que l'effet de la diversité des mélanges de plantes de couverture sur la suppression des mauvaises herbes a complètement disparu dans la plupart des cas. De plus, il existe au moins une espèce constituant le mélange plus efficace cultivé en pure que le mélange lui-même (Smith *et al.*, 2014).

- **Stabilité de la biomasse**

Le terme « stabilité » est utilisé dans la littérature écologique et agricole pour désigner différentes idées et se mesure de différentes manières. Cependant, le coefficient de variation (CV) de la biomasse du couvert, qui est estimé en divisant l'écart type de l'échantillon de la biomasse moyenne par la biomasse moyenne de l'échantillon, est l'un des moyens les plus courants de mesurer la stabilité (Florence *et al.*, 2019). Des études (Finney *et al.*, 2016 ; Florence *et al.*, 2019 ; Smith *et al.*, 2014) observent une corrélation entre l'augmentation de la diversité et la diminution du CV. Néanmoins, cette corrélation est dirigée par la relation négative entre le CV et la biomasse moyenne des cultures de couverture. A faible biomasse, le CV a tendance à être plus élevé et moins constant qu'en présence d'une plus grande biomasse. Ces résultats se produisent parce que des erreurs liées à l'échantillonnage à des niveaux élevés de biomasse moyenne ont des effets marginaux sur le CV, tandis qu'à de faibles niveaux de biomasse moyenne, elles peuvent avoir un effet élevé sur le CV. Pour cette raison, la relation en la diversité et le CV n'est pas clair car elle est fortement corrélée la production de biomasse des couverts.

1.2 Connaissances complémentaires en lien avec l'essai mené dans le cadre de ce mémoire

1.2.1 Inventaire des espèces utilisées, leur famille et leur fonction dans le couvert

Lors de la mise en place d'essai, un choix judicieux des espèces à utiliser est nécessaire afin de mettre en évidence le phénomène d'interactions des espèces dans le couvert végétal. Pour mieux comprendre les possibilités d'interaction au sein du mélange et les propriétés individuelles de chacune d'entre-elles, un état des connaissances des espèces utilisées et de leur famille est repris ci-après.

Graminées

La plupart des espèces de graminées sont en général faciles à planter, produisent une forte biomasse aérienne et racinaire qui couvre rapidement le sol et évite le développement de plantes non désirées (Heymans, 2018). Les graminées s'installent moins rapidement que les crucifères. Les graminées apportent du carbone au sol. Cependant, cette haute teneur en carbone se traduit par une consommation d'azote du sol lors de leur dégradation, ce qui peut créer une faim d'azote pour la culture suivante. C'est pourquoi les graminées sont souvent associées aux légumineuses pour équilibrer (Arvalis, 2020).

- **Avoine de printemps (*Avena sativa*)**

L'avoine de printemps est quelquefois privilégiée par rapport à l'avoine d'hiver (autre variété de *Avena sativa*) pour sa plus grande sensibilité au gel. Elle se montre sensible aux viroses et à la rouille couronnée. Souvent récolté et utilisé comme fourrage lorsque semé comme un couvert. Elle ne germe pas avec des températures très chaudes (>35°C). Bonne tolérance aux conditions fraîches à moyennes, ainsi qu'au stress hydrique. (Arvalis, 2020).

- **Avoine brésilienne (*Avena strigosa*)**

C'est une avoine estivale fourragère tout terrain qui résiste à la sécheresse. Elle concurrence fortement les adventices grâce à sa forte densité (tallage) et sa hauteur (jusque 1,5m) (Hirissou, 2014). Elle s'avère souvent plus précoce à la montaison que les avoines de printemps. Etant régulièrement en cours de montaison en hiver, ses tiges gèlent facilement. Si elle n'est pas assez avancée, des talles peuvent repartir du pied au printemps. Elle produit plus de biomasse que l'avoine de printemps (Arvalis, 2020).

Légumineuses

Les légumineuses sont intéressantes en termes de couvert végétal pour leur capacité de fixation de l'azote atmosphérique et de redistribuer l'azote emmagasiné. Cependant, la plupart des légumineuses ne couvrent pas rapidement le sol et ne sont pas fortement concurrentielles avec les adventices (Heymans, 2018). Les associer avec d'autres familles tel que des graminées permet d'augmenter la biomasse du couvert afin de développer un humus de qualité pour la culture suivante.

- **Trèfle d'Alexandrie (*Trifolium alexandricum*)**

Le trèfle d'Alexandrie est une légumineuse souvent présente en association. Ce trèfle est facile d'implantation, couvre rapidement le sol et produit une source de fourrage de qualité. Il est gélif

donc facilement destructible surtout à un stade avancé (Arvalis, 2020). Il a besoin d'eau et chaleur pour se développer, il résiste mal à la sécheresse (Hirissou, 2014). Son système racinaire est composé de courtes racines pivotantes allant jusqu'à environ 30 cm de profondeur (Heymans, 2018).

- **Pois fourrager (*Pisum sativum*)**

Le pois fourrager est une des légumineuses les plus performantes pour produire de la biomasse en automne. C'est une espèce de couvert gélive et qui ne laisse pas de repousse dans la culture suivante (Arvalis, 2020). Il lève facilement en condition sèche. Son système racinaire est abondant et profond. En association, il utilise les autres espèces comme tuteur pour mieux se développer (Hirissou, 2014).

- **Féverole (*Vicia faba*)**

La féverole ne couvre pas bien le sol et est peu concurrentielle. Elle présente un port dressé, buissonnant et entre les buissons, les adventices peuvent s'installer facilement. Elle est donc plus intéressante en association (Arvalis, 2020). La féverole est une bonne fixatrice et restitrice d'azote tout en produisant une quantité de biomasse élevée (Hirissou, 2014). Son système racinaire pivotant structure le sol. Elle est très favorable à la vie du sol et aux mycorhizes (Heymans, 2018).

Crucifères

Les crucifères présentent l'avantage de s'implanter rapidement et de piéger efficacement l'azote. Elles se développent rapidement, produisent beaucoup de biomasse, apporte au sol une quantité importante de matière organique rapidement dégradable, et relargue dans le sol les nutriments qui seront rapidement disponibles pour la culture suivante. Cependant les crucifères ne favorisent pas les mycorhizes, d'où l'intérêt de diversifier les familles. Les espèces les plus fréquemment rencontrées en tant que cultures intermédiaires sont la moutarde, le radis, et le colza.

- **Moutarde (*Sinapis alba*)**

La moutarde blanche est le couvert le plus commun dû au coût limité des semences, semis facile même à la volée, destruction facile, bon piège à nitrate... Elle est cependant sensible au stress hydrique et aux fortes températures en cas de semis très précoce. Sa vitesse d'installation et sa grande taille la rendent assez agressive vis à vis des adventices ou repousses mais aussi des autres espèces du couvert en cas d'associations (Arvalis, 2020). Elle monte en graine de manière précoce en se lignifiant. Son rapport C/N sera alors fort élevé. Elle possède une bonne capacité de piégeage d'azote, mais la restitution est compromise en cas de lignification. Son système racinaire est faiblement développé (Hirissou, 2014).

Autres familles

Les trois familles principales utilisées dans un couvert végétal sont les graminées, les légumineuses et les crucifères. Néanmoins, de plus en plus d'espèces provenant d'autres familles sont utilisées, notamment la phacélie, très répandue aujourd'hui, qui appartient à la famille des hydrophyllacées.

- **Phacélie (*Phacelia tanacetifolia*)**

La phacélie est une espèce de couvert facilement implantable et destructible qui possède une production de biomasse importante. La phacélie se développe rapidement et sans risque de lignification. En raison de sa capacité de couverture rapide du sol, elle empêche le développement

d'adventices (Arvalis, 2020). Elle possède un système racinaire dense, mais superficiel (Heymans Diane, 2018). Lors de son développement, elle perd ses premières feuilles, ce qui est favorable à l'activité biologique du sol (Hirissou, 2014).

1.2.2 Estimation du carbone labile par la méthode POXC

La matière organique du sol (MO) et les propriétés du sol liées à celle-ci sont probablement les indicateurs les plus largement reconnus de la qualité des sols. Étant donné que la MO n'a pas de composition chimique définie, le carbone organique du sol (COS), le constituant élémentaire dominant de la MO, est plus couramment mesuré et rapporté dans la littérature scientifique. Le COS est composé de la fraction labile et la fraction récalcitrante du carbone. La fraction de carbone labile peut être représentée par la biomasse microbienne du sol et le carbone labile, qui présentent des caractéristiques de décomposition rapide et sont un excellent indicateur de la qualité du sol. D'un autre côté, la fraction de carbone récalcitrant met plus de temps à se décomposer et ne sont pas facilement disponible pour les micro-organismes. (Ferraz de Almeida *et al.*, 2019). Le C organique du sol varie naturellement selon les paysages, les types de sols et les zones climatiques. Il se caractérise généralement par des taux élevés de C dans des formes récalcitrantes. Les petits changements de COS résultant de changements dans la gestion des sols sont souvent difficiles à mesurer, mais peuvent avoir des effets prononcés sur le comportement du sol et les processus microbiens. Il peut s'écouler plusieurs années avant que des pratiques de gestion des sols contrastées entraînent des différences mesurables dans le COS. En opposition, des changements dans les fractions labiles de COS peuvent fournir une indication précoce de la dégradation ou de l'amélioration des sols en réponse aux pratiques de gestion, notamment l'utilisation de couvert végétal. Les fractions labiles de C du sol sont importantes à étudier en elles-mêmes, car ces fractions alimentent le réseau trophique du sol et influencent donc grandement les cycles des nutriments et de nombreuses propriétés du sol biologiquement liées (Weil *et al.*, 2003).

Il existe plusieurs façons de mesurer la matière organique labile, mais ces méthodes peuvent être laborieuses et coûteuses. En conséquence, très peu de laboratoires commerciaux d'analyse des sols mesurent la matière organique labile. Sans tests disponibles pour suivre et surveiller ces pools de matière organique, les agriculteurs doivent se demander comment leurs techniques de gestion agricole affectent la fertilité du sol sur leurs terres cultivées. Heureusement, une méthode relativement nouvelle de mesure de la matière organique labile peut fournir aux agriculteurs un moyen abordable de suivre leurs réserves de matière organique à cycle rapide. Appelé « *permanganate-oxidizable carbon* » (POXC), ou carbone labile, ce processus utilise un équipement de laboratoire standard et implique un ensemble de manipulations qui est détaillé dans la partie 2 de ce mémoire (Culman *et al.*, 2012).

Explication de la méthode

Le principe de cette méthode repose sur l'oxydation du carbone labile par le permanganate de potassium. Cette indicateur violet foncé réagit avec le carbone labile et devient rose clair. Plus la quantité de POXC est importante, plus l'intensité de la couleur du KMnO_4 diminue. La concentration du carbone labile peut être déterminée en mesurant l'intensité du KMnO_4 via un spectromètre à une longueur d'onde de 550 nm.

Méthode testée

Une équipe de scientifiques de dix institutions à travers les États-Unis s'est réunie pour en savoir plus sur la façon dont le POXC se compare aux méthodes plus établies et pour mieux comprendre à quel point cette nouvelle méthode est sensible à la détection des changements de gestion par rapport à d'autres mesures (Culman *et al.*, 2012). Un de leurs objectifs était de déterminer la sensibilité relative du POXC en tant que mesure du carbone labile dans une gamme de conditions environnementales et de gestions agricoles. Les résultats de leur recherche suggèrent que la mesure du POXC peut être bien adaptée pour suivre les pratiques de gestion qui favorisent la séquestration du C dans le sol, ce qui en fait un indicateur particulièrement utile pour la recherche sur la qualité des sols. La mesure du POXC semble être tout aussi adéquate que les autres méthodes plus établies pour détecter les différences dans les sols dues à la gestion ou à des facteurs environnementaux. La sensibilité de cette méthode et la relative facilité de mesure suggèrent que le POXC peut être utilisé pour évaluer en routine un sol biologiquement actif.

1.2.3 Estimation de l'activité des microorganismes du sol par la méthode TBI

Une des fonctions du couvert végétal, lorsque celui-ci n'est pas récolté, est de servir d'engrais vert pour la culture suivante. Le couvert est décomposé et est transformé en humus. Cette décomposition se produit lorsque les microorganismes, champignons et bactéries dans le sol, absorbent la matière organique et la transforment en nutriments par le processus de minéralisation. Grâce à la décomposition, les plantes de la culture suivante et les microorganismes du sol reçoivent de la nourriture pour se développer. L'activité des microorganismes du sol peut être mesurée par l'intermédiaire de la mesure du taux de décomposition de la litière. Un taux de décomposition élevé indique une grande activité de ces microorganismes.

Pour mesurer les taux de décomposition des matières végétales mortes (litière), une certaine quantité de litière est placée dans un filet en plastique. La taille de la maille permet aux microorganismes d'entrer et de consommer la litière, mais le filet en plastique empêche la litière de se perdre. Pour mesurer la décomposition de la matière végétale dans le sac, ce sac est enterré dans le sol. La perte de poids du matériau après un certain temps montre à quelle vitesse la décomposition se produit à l'endroit où le sac est enterré (Teatime4Science, 2020).

Explication de la méthode

La méthode des sachets de thé a été inventée par cinq jeunes chercheurs de l'Université de Utrecht, Pays-Bas (Keuskamp *et al.*, 2013). Elle consiste à utiliser deux types de thé avec une décomposition contrastée pour construire une courbe de décomposition en utilisant une seule mesure dans le temps. Cette méthode est considérée comme innovante, rentable et bien normalisée pour recueillir des données sur le taux de décomposition et la stabilisation de la litière en utilisant du matériel disponible dans le commerce comme kits de test standardisés. Elle a pour but d'augmenter la résolution des mesures de décomposition et aussi d'être une référence utile pour faciliter la comparaison des données entre les biomes, les écosystèmes et les types de sols.

L'élément clé de l'approche est l'utilisation de sachets de thé disponibles dans le commerce en tant que kits de test hautement standardisés contenant du thé comme matériel végétal mort représentatif. Des sachets de *Lipton Indonesian tea Sencha tradition*® et de *Lipton Herbal infusion Rooibos*® sont utilisés comme matériel. Ces sachets possèdent des mailles de 0 à 25 mm permettant aux micro-organismes et à la mésofaune d'entrer dans les sacs, mais excluant la macrofaune. Un

indice de sachets de thé (TBI) est déterminé en enfouissant les sachets de thé vert et rooibos et en mesurant la perte de masse du contenu après une période de temps. Le TBI se compose de deux paramètres décrivant respectivement le taux de décomposition (k) et le facteur de stabilisation de la litière (S). La courbe de décomposition est estimée en adaptant la perte de poids à une fonction de décomposition exponentielle décroissante dont le facteur est k . Quant à S , ce facteur peut être interprété comme l'effet inhibiteur de conditions environnementales sur la décomposition de la fraction labile.

Méthode testée

Cette méthode a été testée sur le terrain dans différents écosystèmes (Keuskamp *et al.*, 2013). Les valeurs de k et S obtenues sur les différents sites de terrain sont liées à la température et aux précipitations, qui sont des facteurs environnementaux clés pour la décomposition. La méthode a été testée pour sa sensibilité et sa robustesse dans des écosystèmes et des biomes contrastés, confirmant que le TBI est suffisamment sensible pour faire la distinction entre ces systèmes. Au sein d'un écosystème, le TBI est sensible aux différences de circonstances abiotiques telles que la température du sol et la teneur en eau. Les valeurs k et S collectées sont conformes aux attentes basées sur la littérature sur le processus de décomposition. Elles sont donc interprétables dans le cadre actuel des connaissances.

1.3 Récapitulatif et perspectives futures

Généralement, les couverts végétaux sont semés en cultures pures ou en simples cultures à deux espèces graminées-légumineuses. Cependant, les cultivateurs et les chercheurs s'intéressent de plus en plus à la question de savoir s'il peut y avoir des avantages supplémentaires à cultiver des plantes de couverture en mélanges d'espèces plus diverses. Bien qu'il y ait eu un grand nombre d'études examinant le rôle que joue la diversité des cultures par rapport à des services agroécosystémiques spécifiques (production de biomasse, suppression des adventices, stabilité de la biomasse), peu d'études ont examiné le rôle de la diversité des cultures de couverture de manière explicite. (Smith *et al.*, 2014).

Il y a aussi des raisons pour lesquelles un mélange de cultures de couverture diversifié peut être moins souhaitable pour un agriculteur qu'un couvert composé d'une seule espèce ou de deux. Il s'agit notamment de l'augmentation des coûts des semences de cultures de couverture ; la difficulté à établir et à gérer des mélanges complexes, en particulier si les espèces ont des tailles de graines, des taux de croissance, des cycles biologiques ou des exigences de destruction très différents ; et la possibilité d'interactions antagonistes entre des espèces de cultures de couverture particulières ou d'autres espèces de la rotation des cultures commerciales. Compte tenu des arguments théoriques et pratiques à la fois pour et contre la diversité des mélanges de cultures de couverture, il est clairement nécessaire de mener des recherches supplémentaires sur la manière dont les couverts diversifiés affectent la multitude de services agroécologiques qui sous-tendent la durabilité de l'agriculture.

2 Objectif du mémoire

Afin de pouvoir déterminer les avantages à cultiver des plantes de couverture en mélanges d'espèces plus diverses, l'étude menée dans le cadre de ce mémoire se penche sur la manière dont les couverts plus diversifiés affectent la multitude de services agroécologiques.

L'objectif principal de cette étude est d'observer l'influence de la diversité des couverts végétaux sur les services agroécologiques fournis par ceux-ci.

Pour cela, un mélange composé de six espèces est étudié de même que ces six espèces cultivées en pure. Un couvert de moutarde et un autre mélange de référence sont aussi étudiés. Un couvert végétal multi-espèce et des couverts pures des espèces constituant le mélange sont comparés. Plusieurs facteurs sont mesurés : Le pourcentage de germination, la présence d'adventices, le recouvrement du sol, la production de biomasse, le Green Area Index, le rapport C/N, la rétention d'azote, la rétention en eau du sol, le carbone labile du sol et l'activité des microorganismes.

Pour les deux derniers facteurs cités, deux nouvelles méthodes simplifiées sont utilisées : la méthode POXC et la méthode TBI pour la mesure du carbone labile et de l'activité des microorganismes respectivement.

L'objectif secondaire de cette étude est de tester l'efficacité de ces deux méthodes pour ce contexte et déterminer si elles peuvent être utilisées pour comparer des couverts végétaux variés selon les deux facteurs cités.

3 Matériels et méthodes

3.1 Parcelle expérimentale et protocole

3.1.1 Information et description de la parcelle

L'étude s'est déroulée sur une parcelle expérimentale appartenant à l'UCLouvain. Elle se situe dans la commune de Chaumont-Gistoux en Belgique dans le village de Vieux Sart (Figure 1). Les coordonnées géographiques sont 50° 40' 55" N. et 4° 38' 13" E. La parcelle possède une superficie de 0,39 ha et se situe dans un champ possédant une superficie de 7,82 ha. Selon la carte des sols de Wallonie (SPW 2020), la parcelle expérimentale est composée d'un sol limoneux à drainage naturel favorable (Aba).



Figure 1 : Vue aérienne de la parcelle expérimentale en bleu et du champ en rouge (Google Maps 2020)

La culture précédant la mise en place du couvert était du froment. La moisson de celui-ci s'est déroulée le 1^{er} août 2019. Une application d'engrais (produit : *Chlorure pdt 40-6-4* ; 1000kg/ha) a été faite après la moisson, le 23 août 2019. Ensuite, le sol a été travaillé pour préparer le semis du couvert avec deux passages de déchaumeur à 10 cm de profondeur. Le couvert du champ et les bandes de la parcelle expérimentale ont été semés avec une houe rotative et un semoir à soc, le 29 août 2019. Plus aucune opération agricole n'a eu lieu jusqu'à la destruction du couvert en hiver. Afin de faciliter cette dernière, le passage d'un broyeur mécanique sur le couvert s'est déroulé le 22 janvier 2020. Une nouvelle application d'engrais (produit : *Urean 30 N* ; 482l/ha) a été faite le 30 mars 2020, avant le semis de la culture suivante, la betterave. Le sol a été travaillé avec un vibroculteur et une houe rotative avant le semis de betterave, le 1 avril 2020. Ces informations proviennent de l'itinéraire technique reprise dans l'Annexe 8.1.

3.1.2 Explication du choix variétal

Pour le choix des espèces à utiliser pour le couvert multi-espèces, un mélange considéré comme de référence, complet et équilibré, a été déterminé par Hugues Falys, Responsable Opérationnel de la ferme de Marbaix. Ce mélange, appelé « Mélange 2 » dans le Tableau 1 ci-dessous, est constitué de dix espèces. Cependant, toutes les espèces présentes dans ce mélange ne sont pas aptes à être cultivées en culture pure pour un couvert (lin, tournesol, ...). Un nouveau mélange adapté aux objectifs du mémoire a donc été constitué par Hugues Falys et Pierre Bertin, appelé « Mélange 1 » dans le Tableau 1. Celui-ci est constitué d'espèces pouvant être cultivées en culture pure. Le choix des espèces est aussi basé sur l'équilibre du mélange afin d'avoir une répartition correcte entre graminées, légumineuses et espèces couvrantes. Le nombre d'espèces que contient le mélange 1 est

inférieur au mélange de référence pour éviter d’avoir un trop grand nombre de bandes dans l’essai (restriction de la surface de la parcelle disponible pour l’expérience). Toutes les espèces utilisées sont gélives.

Tableau 1: Nom des traitements, leur composition en terme d’espèce, la densité de celles-ci au sein de chaque traitement et le poids de mille grains (PMG) de chaque espèce.

Traitement	Espèces	Densité [kg/ha]	PMG [g]
Mélange 1	Avoine de printemps	13	36,1
	Pois fourrager	10	182
	Féverole	10	465
	Avoine brésilienne	7	16,9
	Trèfle d’Alexandrie	5	3,1
	Phacélie	1,5	2
Mélange 2	Avoine de printemps	20	36,1
	Pois fourrager	14	182
	Féverole	3,5	465
	Tournesol	5	47,3
	Nyger	1,5	3,2
	Phacélie	0,625	2
	Lin oléagineux	10	5,4
	Trèfle d’Alexandrie	3,3	3,1
	Moutarde blanche	1	7
	Vesce	6,25	40
Moutarde	Moutarde blanche	7,8	7
Avoine prtps	Avoine de printemps	82	36,1
Pois	Pois fourrager	134	182
Féverole	Féverole	178	465
Avoine brési	Avoine brésilienne	36	16,9
Trèfle	Trèfle d’Alexandrie	15,5	3,1
Phacélie	Phacélie	8,4	2

Les traitements choisis pour cette étude sont donc le mélange 1, chaque espèce qui constitue le mélange 1, le mélange 2 complet et équilibré et un traitement moutarde, espèce commune dans la mise en place de couverts chez les agriculteurs.

3.1.3 Description du protocole expérimental

La conduite d’une expérimentation en milieu agricole réel plutôt qu’en station expérimentale présente une série de contraintes liées au matériel agricole. Cela demande le recours à un protocole expérimental particulier. Il n’est en effet pas possible de réaliser un protocole tel que les blocs aléatoires complets, qui requièrent un semoir adapté à la mise en place de petites parcelles successives correspondant à des traitements chaque fois différents. Pour ce protocole, chaque traitement a été semé sur une seule bande de 50m de long et 6m de large (aller-retour du semoir). Seul le mélange 1 a été semé sur plusieurs bandes afin d’avoir chaque autre traitement juxtaposé à celui-ci (Figure 2). Le but de cette manœuvre était de disposer d’un témoin de référence afin de tenir compte de l’hétérogénéité du terrain dans l’analyse des données. L’effet d’un traitement a alors été déterminé par comparaison avec une bande de référence voisine (mélange 1) via une correction des

données expliquée ci-dessous. Le prélèvement des échantillons s'est effectué perpendiculairement aux bandes de traitement selon les bandes de répétitions schématisées sur la Figure 2.

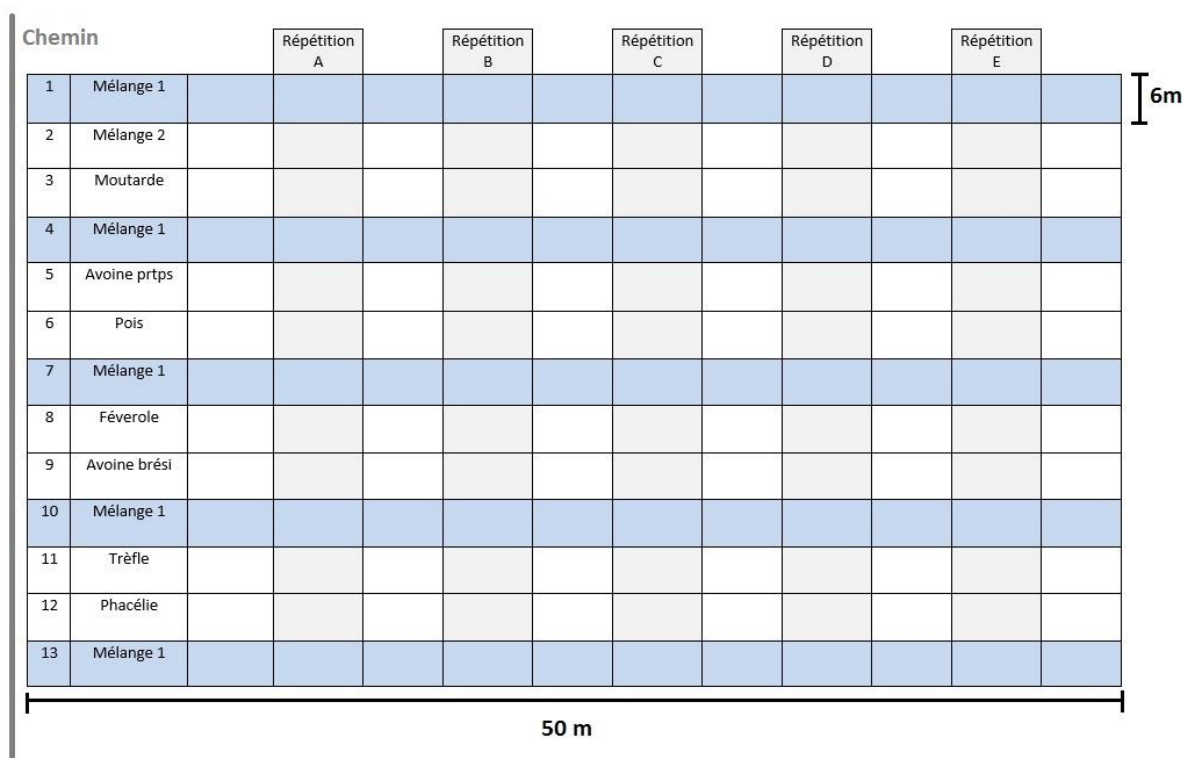


Figure 2 : Schéma de la parcelle reprenant les bandes de traitements, les bandes de références en bleu foncé (mélange 1) et les bandes perpendiculaires des répétitions pour le prélèvement d'échantillons des mesures réalisées en bleu clair. Le chemin en gris foncé oriente la parcelle par rapport à la Figure 1.

3.1.4 Correction des données

Les mesures réalisées ont été corrigées en fonction des bandes de référence qui les juxtaposent afin de tenir compte de l'hétérogénéité du terrain. Pour l'ensemble des mesures, l'Equation 1 a été appliquée :

$$\text{Mesure corrigée}(x) = \text{Mesure}(x) + \text{Moyenne des mesures des références} - \text{Mesure de la référence}(x-1)$$

Équation 1 : Correction des mesures en fonction des références qui les juxtaposent.

Où x est la position sur laquelle la mesure a été réalisée, où (x-1) est la position de la bande de référence juxtaposée à la position x et où la moyenne des mesures des références est calculée sur base de l'ensemble des valeurs obtenues pour les bandes de références.

Dès lors, lorsque la valeur de la référence (x-1) est plus élevée que la moyenne des références, la valeur de la différence entre ces deux dernières est retirée à celle du couvert et inversement. Grâce à cette correction, les mesures sont normalisées et peuvent être comparées entre elles.

La valeur du mélange 1 utilisée dans l'analyse des données correspond à la moyenne des références calculée pour réaliser la correction.

3.1.5 Problème technique rencontré

Des conditions climatiques défavorables et des problèmes mécaniques lors du semis ont entraîné des problèmes de levée de certains traitements. Un mois après le début de la levée, une hétérogénéité à l'intérieur de certaines bandes a été constatée, pouvant entraîner de sérieux problèmes lors de la prise de mesure. Afin de palier à ce problème, les zones hétérogènes où le couvert n'a presque pas poussé ont été délimitées dans chaque bande (Figure 3). Lors du prélèvement des mesures, ces zones ont été évitées afin d'avoir des données représentatives et sans variabilité engendrée par le problème de levée.

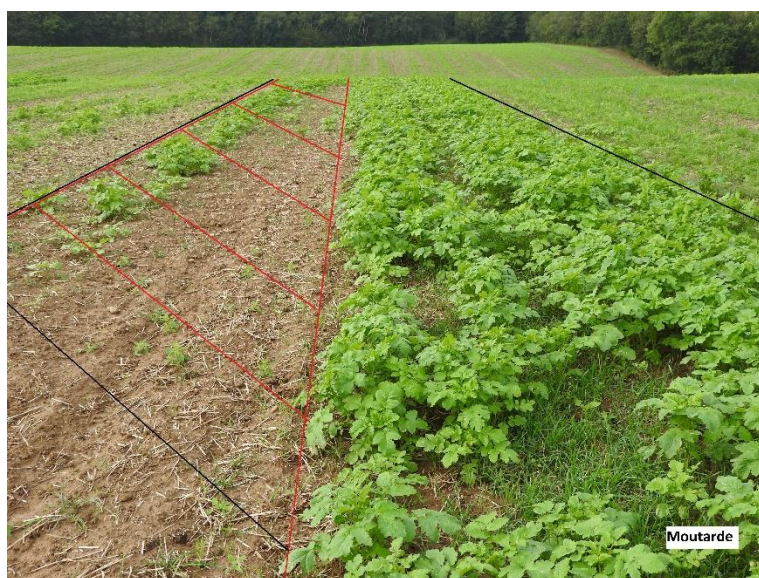


Figure 3 : Photo de la bande du traitement Moutarde. Les lignes noires délimitent la bande. Les hachures rouges délimitent les zones hétérogènes qui sont évitées lors de la prise de mesure. Photo prise le 5 novembre 2019.

3.2 Mesures réalisées

Les mesures réalisées et les dates auxquelles elles ont été prises se retrouvent dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Tableau récapitulatif de l'agenda des mesures réalisées et des interventions agricoles.

Date	Mesures prises
29 août 2019	Semis des couverts végétaux
14 septembre 2019 au 16 novembre 2019	Couverture du sol
05 novembre 2019	Identification et comptage des espèces
27 novembre 2019 au 06 décembre 2019	Green Area index
12 décembre 2019	Biomasse aérienne + Mesure de C/N
22 janvier 2020	Destruction du couvert
02 mars 2020	Disponibilité en eau + Carbon labile
23 mars 2020	Azote potentiellement lessivable
01 avril 2020	Semis betterave
16 avril 2020 au 20 juillet 2020	Tea Bag Index

3.2.1 Couverture du sol par le couvert

Les mesures du couvert du sol ont été réalisées avec un cadre d'un m², divisé en 100 carrés par des cordes (Figure 4). Lorsqu'un carré était couvert à plus de 50% par le couvert, il était considéré comme rempli. Inversement, lorsqu'un carré était couvert à moins de 50%, il était considéré comme vide. Le résultat était donné par la somme des carrés remplis comptés et représentait le pourcentage de la couverture du sol délimité par le cadre. Ces mesures ont été répétées cinq fois par bandes et huit fois dans le temps (du 14 septembre 2019 au 16 novembre 2019) pour mesurer l'évolution au cours du temps du couvert. Des piquets ont été placés de manière à mesurer la même zone à chaque date. La première mesure a été prise lors de la germination du couvert et a été suivie par sept autres mesures prises régulièrement durant la phase de croissance. Une fois la stabilisation du couvert atteinte et que plus aucun changement dans les résultats n'était observé, la prise de mesure a été arrêtée.



Figure 4 : Cadre utilisé pour observer la couverture du sol par le couvert.

Traitement de données

L'évolution de la couverture du sol peut être comparée à une expansion foliaire progressive qui peut être décrite selon l'équation suivante (Heymans, 2018) :

$$L_{(i,t)} = \frac{L_{max}}{1 + \exp \left(4 * \frac{V_{(i)}}{L_{max}} * (t0_{(i)} - t) \right)}$$

Équation 2 : Évolution de la couverture du sol (%) en fonction de la couverture maximale du sol, de la vitesse d'expansion foliaire au point d'inflexion et du nombre de jours après le semis au point d'inflexion.

où :

- $L_{(i,t)}$ = couverture du sol prédite en fonction du temps et du traitement observé (i) [%]
- i = niveau du facteur « Traitement »
- t = nombre de jours après le semis [jours]
- L_{max} = couverture du sol maximum [%]
- $V_{(i)}$ = taux d'expansion au point d'inflexion (taux maximal d'expansion) [%·jour⁻¹]
- $t0_{(i)}$ = nombre de jours après le semis au point d'inflexion (correspond au temps de la moitié de l'expansion) [jours]

Les facteurs analysés dans la partie 4 de ce mémoire sont $V_{(i)}$ et $t0_{(i)}$ pour chaque traitement.

3.2.2 Identification et comptage des espèces

Le comptage d'espèces consistait, pour chaque couvert, à placer un cadre d'un m² sur celui-ci, compter et déterminer toutes les espèces présentes dans ce cadre. Cette mesure a été prise lorsque le couvert était assez développé pour identifier correctement toutes les espèces présentes (05 novembre 2019). Seules l'avoine brésilienne et l'avoine de printemps n'ont pas pu être identifiées séparément et sont donc rassemblées dans un seul groupe appelé « Avoine » dans les résultats. Les espèces ne faisant pas partie de l'essai ont aussi été identifiées et sont rassemblées dans un groupe appelé « Adventices ». Cette mesure est répétée cinq fois par bandes. Pour plus de cohérence avec la mesure de la couverture du sol, le cadre d'un m² a été placé au même emplacement que celle-ci (délimité par les piquets).

3.2.3 Green Area Index (GAI)

Le Green Area Index a été déterminé en récoltant sur chaque bande un mètre carré de couvert. Tout le système caulinaire a été récolté. Les échantillons récoltés ont été entreposés maximum 24 heures dans une chambre froide avant d'être mesurés. La surface totale des différents échantillons a été mesurée en faisant passer l'ensemble des feuilles et tiges, préalablement séparées pour plus de facilité, dans un scanner de type LI-3100c Area Meter de la société LI-COR, USA. Afin de limiter le bruit de fond, le scanner a été nettoyé plusieurs fois durant le processus. La surface donnée en m² par le scanner a été divisée par un m² (=surface du sol de l'échantillon) pour obtenir le green area index [Ø]. Cette mesure est répétée 4 fois par bandes.

Cette démarche pour calculer le GAI était chronophage. Le facteur limitant était le passage des échantillons dans le scanner. Pour cette raison, cette mesure a été étalée sur une semaine et demie de temps (du 27 novembre 2019 au 06 décembre 2019). La première mesure a été faite peu de temps après avoir terminé de mesurer la couverture végétale afin d'avoir un système caulinaire du couvert suffisamment développé.

3.2.4 Biomasse aérienne

Afin de mesurer la biomasse aérienne du couvert, un m² de matière fraîche de chaque bande a été récolté (12 décembre 2019). De nouveau, tout le système caulinaire a été récolté, et pesé. Ensuite, un minimum de 300 g de matière fraîche a été extraite à l'aide d'une sonde pour obtenir un échantillon qui soit homogène. Les échantillons, encore frais, ont été pesés avant d'être placés dans l'étuve à 70 °C pendant 48 heures. Après deux jours, les échantillons ont à nouveau été pesés. La matière sèche [T de MS/ha] du mètre carré récolté a été déterminée à partir de la matière sèche des échantillons extraits selon une règle de trois. Cette mesure est répétée cinq fois par bande.

3.2.5 Rapport carbone sur azote la biomasse aérienne

La mesure du rapport carbone sur azote des échantillons récoltés lors de la mesure de matière sèche a été faite par analyse élémentaire. L'analyseur élémentaire VARIO EL Cube (ELEMENTAR, Allemagne) fonctionne sur le principe d'une combustion catalytique. L'échantillon est injecté dans un four à 1150°C sous flux d'oxygène et d'hélium. A la sortie du tube de combustion, l'azote se trouve sous forme de NO_x, le carbone sous forme de CO₂. Le mélange gazeux généré traverse ensuite le tube de réduction à 850°C, et les NO_x sont réduits en N₂ au contact du Cu (le CO₂ n'est pas affecté). La mesure des éléments se fait par un détecteur thermo-conductif. Cette mesure est répétée cinq fois par bande.

3.2.6 Rétention et apport d'azote par le couvert

A l'aide d'une sonde, des échantillons de terre ont été prélevés dans trois horizons (0-30 ; 30-60 ; 60-90 cm) de chaque bande. Pour constituer un échantillon d'un horizon, huit prélèvements aléatoires (figurés par les points bleus sur la Figure 5) ont été fait dans une surface préalablement délimitée de la bande. Cette surface est représentée par un rectangle (8x6m) gris-bleu sur la figure 5 dans chaque bande. Trois répétitions ont été faites pour chaque bande. Les bandes de répétitions sont équidistantes l'une de l'autre. Les échantillons ont été stockés dans une chambre froide durant 24 heures avant d'être transportés dans des frigobox jusqu'au laboratoire. Les échantillons ont été analysés par le laboratoire du Centre de Michamps. La quantité de NO_3 [kg/ha] et de NH_4 [kg/ha] a été mesurée pour chaque échantillon selon la norme ISO 14256-2. D'après cette norme, les échantillons de sol homogénéisés sont extraits au moyen d'une solution de chlorure de potassium à 1 mol/L. Les concentrations des composés minéraux de l'azote sont déterminées dans les extraits par des méthodes spectrophotométriques automatisées.

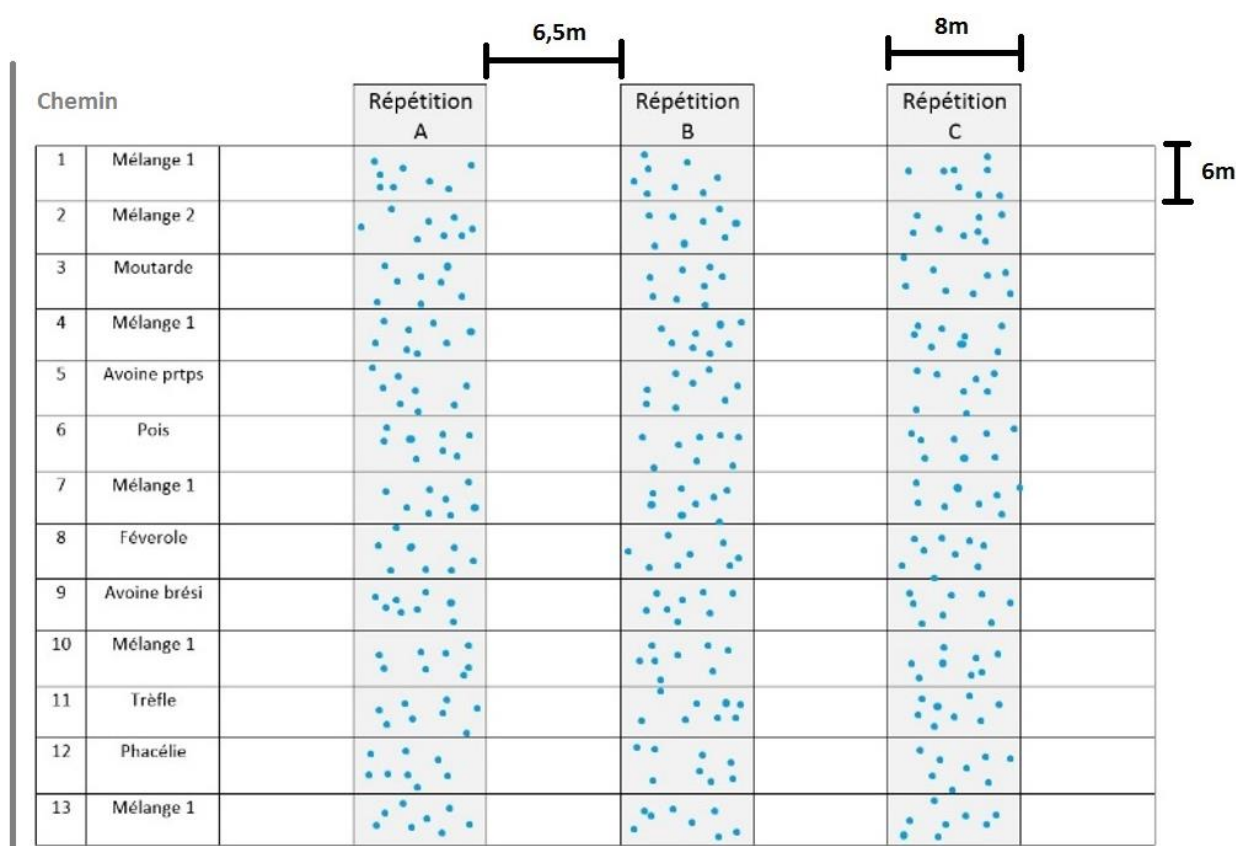


Figure 5 : Plan de l'échantillonnage de la parcelle d'essai pour l'APL. L'emplacement des trois répétitions des mesures est représenté par les bandes grises-bleues. Les points bleus figurent l'emplacement des huit échantillons de terres prélevés avec une sonde sur les trois horizons (0-30 ; 30-60 ; 60-90 cm) de chaque bande. Cet emplacement est aléatoire.

3.2.7 Capacité de rétention en eau du sol

La disponibilité en eau est déterminée en calculant la différence entre la mesure de la capacité au champ et la mesure du point de flétrissement du sol. La méthode utilisant un gaz sous pression et un extracteur à plaque poreuse a été appliquée selon le protocole de Javaux (2018) ; afin de trouver ces deux mesures. Ce protocole est basé sur la norme ISO 11274. Le principe de cette méthode est d'appliquer, au sein d'une enceinte fermée, une pression d'air donnée sur des échantillons de sol posés sur une plaque poreuse dont la face inférieure est connectée à la pression atmosphérique. Le

gradient de pression s'applique sur la phase liquide qui va traverser la plaque poreuse et ainsi désaturer l'échantillon jusqu'à équilibre de potentiel entre l'eau du sol et la pression appliquée.

La capacité au champ est déterminée à une pression appliquée de 0,3 bar dans une casserole basse pression tandis que le point de flétrissement est déterminé à une pression de 15,8 bar dans une casserole haute pression. Pour ce faire, des échantillons non perturbés de 100 cm³ (Kopeckis) et des échantillons en vrac ont été prélevés dans chaque bande. Lors du prélèvement, le premier centimètre du sol a été retiré afin avoir une surface plate et homogène. Les Kopeckis ont été enfoncés dans cette surface pour prélever l'échantillon dans l'horizon 1-8cm. Cette mesure est répétée cinq fois par bande.

Pour la capacité au champ, les Kopeckis, préalablement saturés, ont été déposés sur des plaques poreuses. Ces plaques ont été placées dans une casserole basse pression avec des tiges de raccordement reliant les plaques et l'extérieur de la casserole pour évacuer l'excédent d'eau. Une pression de 0,3 bar a été appliquée jusqu'à l'équilibre de la casserole. Une fois l'équilibre atteint, les Kopeckis ont été pesés et placés durant 48h à l'étuve à 105°C. Après 48h, les Kopeckis ont été repesés.

Pour le point de flétrissement, les échantillons en vrac ont été mélangés avec une solution de saturation pour obtenir une boue homogène et sans grumeaux. Cette boue est placée dans des anneaux sur des plaques poreuses. Ces plaques ont été placées dans une casserole haute pression avec des tiges de raccordement reliant les plaques et l'extérieur de la casserole pour évacuer l'excédent d'eau. Une pression de 15,8 bar a été appliquée jusqu'à l'équilibre de la casserole. Une fois l'équilibre atteint, les boues séchées ont été pesées et placées durant 48h à l'étuve à 105°C. Après 48h, les boues séchées ont été repesées.

Traitement de données

L'Equation 3 est employée pour déterminer la teneur en eau volumique des échantillons de sol à partir de la méthode des casseroles à pression :

$$\theta = \frac{V_{eau}}{V_{tot}} = \frac{(M_{humide} - M_{sec}) / \rho_{eau}}{V_{kopecki}} = \frac{(M_{humide} - M_{sec}) / \rho_{eau}}{M_{sec} / \rho_{apparente}}$$

Equation 3 : détermination de la teneur en eau volumique des échantillons de sol à partir de la méthode des casseroles à pression.

où :

- θ = teneur en eau volumique
- V_{eau} = volume d'eau contenu dans l'échantillon de sol [m³]
- V_{tot} = volume total de l'échantillon de sol [m³]
- M_{humide} = masse de l'échantillon humide [g]
- M_{sec} = masse de l'échantillon sec [g]
- ρ_{eau} = 1000 ; masse volumique de l'eau [g.L⁻¹]
- $V_{kopecki}$ = 10⁻⁴ ; volume des kopeckis [m³]
- $\rho_{apparente}$ = masse volumique apparente des boues séchées

3.2.8 Méthode POXC (carbone labile)

Le prélèvement d'échantillons s'est déroulé le même jour que le prélèvement pour la disponibilité en eau. Un échantillon en vrac a été prélevé dans l'horizon 0-10cm pour chaque bande avec 5 répétitions pour chaque bande. Ces échantillons ont été séchés 48h à l'air sec, écrasés avec un mortier et passés dans un tamis avec un quadrillage de 2mm afin de retirer les cailloux restants.

La procédure selon Culman *et al.* (2014) est suivie pour mesurer le POXC des échantillons. A partir d'une solution mère de KMnO_4 , quatre solutions standards de différentes concentrations ont été préparées pour établir la courbe d'étalonnage. En ce qui concerne les échantillons, 2,5g de ceux-ci ont réagi avec le KMnO_4 durant dix minutes. Une fois les dix minutes passées, les solutions d'échantillonnage ont été préparées pour l'analyse. L'absorbance des étalons et des inconnues a été lue à 550nm à l'aide d'un spectrophotomètre.

Traitement de données

La masse de POXC des échantillons de sol inconnus a été calculée à partir de la courbe d'étalonnage et de leur absorbance selon l'Equation 4 :

$$POXC = [0,02\text{mol/L} - (a + b * Abs)] * (9000\text{mg C/mol}) * (0,02\text{L solution/Wt})$$

Equation 4 : Détermination de la masse de POXC des échantillons de sol inconnus à partir de la courbe d'étalonnage et de leur absorbance.

où :

- POXC = masse de POXC [mg.kg^{-1} de sol]
- 0,02 mol/L = concentration de la solution initiale
- a = intercepte de la courbe d'étalonnage
- b = pente de la courbe d'étalonnage
- Abs = absorbance de l'échantillon
- 9000 = mg de Carbone oxydé par 1 mole de MnO_4 ($\text{Mn}^{7+} \rightarrow \text{Mn}^{4+}$)
- 0,02 L = volume réagit de la solution mère
- Wt = poids de l'échantillon de sol [kg]

3.2.9 Méthode TBI (activité des microorganismes)

Des sachets de *Lipton Indonesian tea Sencha tradition*® (thé vert) et de *Lipton Herbal infusion Rooibos*® (thé rooibos) ont été pesés avec une balance de précision (0.001g) et ont été tagués sur l'étiquette pour les reconnaître individuellement. Un sachet de thé vert et un sachet de thé rooibos ont été enterrés ensemble à 8cm de profondeur dans chaque bande. Seules les étiquettes des sachets ne sont pas enterrées. Un piquet a été planté à leur emplacement afin de les retrouver facilement. Ils ont été enterrés le 16 avril 2020. Trois mois plus tard, le 20 juillet 2020, les sachets de thé ont été déterrés. Ceux-ci ont été placés 48 heures dans une étuve à 70°C. Après avoir séché, ils ont été repesés avec la même balance. Cette mesure est répétée dix fois par bande.

Traitement de données

Afin de déterminer les facteurs k et S (cfr point 1.2.3) des traitements, une série d'équations ont été utilisées selon Keuskamp *et al.* (2013) :

$$S = 1 - \frac{a_g}{H_g}$$

$$a_r = H_r(1 - S)$$

$$W_{(t)} = a_r e^{-kt} + (1 - a_r)$$

Équation 5 : détermination des facteurs S et k à partir des poids initiaux et poids finaux des sachets de thé vert et rooibos selon la méthode TBI.

où :

- a_g = la fraction décomposée du thé vert tel que $a_g = \frac{1 - \text{poids final}_{(\text{thé vert})}}{\text{poids initial}_{(\text{thé vert})}}$
- $H_g = 0,842$; la fraction hydrolysable du thé vert
- S = facteur de stabilisation de la litière
- $H_r = 0,0552$; la fraction hydrolysable du thé vert
- a_r = la fraction décomposée prédite du thé rouge
- t = temps d'incubation des sachets de thé dans le sol [jours]
- $W_{(t)}$ = la fraction restante du thé rouge tel que $W_{(t)} = \frac{\text{poids final}_{(\text{thé rouge})}}{\text{poids initial}_{(\text{thé rouge})}}$
- k = taux de décomposition

3.3 Analyse statistique

Afin d'analyser les résultats obtenus lors de ces expérimentations, les outils et méthodes statistiques utilisés sont inspirés du cours de Biométrie LBIRA2101 (Draye et Govaerts, 2018) et sont détaillés dans cette section. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Microsoft Excel et du logiciel statistique SAS studio. Les résultats de ces analyses sont détaillés dans la partie quatre de ce mémoire.

Pour expliquer les différentes variables quantitatives mesurées lors des expérimentations, un facteur principal de classification est considéré : le facteur « Traitement ». Il s'agit d'un facteur catégoriel et fixe. Les différents traitements analysés sont repris dans le tableau 1.

L'analyse de la variance (ANOVA) est le modèle statistique utilisé dans le cadre de ce mémoire. Il va permettre de déterminer si des moyennes obtenues pour différents niveaux du facteur « Traitement » sont égales ou pas. Afin d'utiliser ce modèle, trois conditions doivent être remplies :

1. les populations étudiées suivent une distribution normale
2. les variances des populations sont toutes égales (Homoscédasticité)
3. les échantillons sont prélevés aléatoirement et indépendamment dans les populations.

La vérification de ces trois conditions est faite à chaque utilisation de ce modèle dans la partie quatre de ce mémoire.

Modèle ANOVA 1 (un facteur) :

$$Y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij}$$

Équation 6 : Modèle théorique de l'analyse de la variance ANOVA 1 pour un facteur catégoriel fixe.

Avec $\sum \alpha_i = 0$; $\varepsilon_{ij} \sim iN(0, \sigma^2)$; $i = 1, \dots, m$ et $j = 1, \dots, n_i$

- Y_{ij} = variable quantitative
- i = niveau du facteur catégoriel
- j = numéro de répétition
- μ_i = résultat moyen attendu pour le $i^{\text{ème}}$ niveau du facteur
- ε_{ij} = fluctuation aléatoire due aux différences à l'intérieur du niveau i
- μ = résultat moyen attendu pour tous les niveaux confondus
- α_i = effet du $i^{\text{ème}}$ niveau

Le modèle ANOVA utilise des tests de Fisher (test F) pour tester statistiquement l'égalité des moyennes. L'hypothèse testée par ce test est la suivante : toutes les moyennes sont égales ($H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_m$). Si la p-valeur obtenue par le test de Fisher est inférieure à 0,05, il y a rejet de l'hypothèse H_0 . Cela signifie qu'il existe au moins une moyenne qui est significativement différente des autres.

Dans le cas des mesures d'azote dans le sol, un modèle ANOVA 2 est utilisé. Celui-ci permet d'expliquer une variable quantitative à partir de deux facteurs catégoriels fixes (le facteur « Traitement » et le facteur « Horizon »). Un facteur interaction entre les deux facteurs cités est pris en compte dans l'analyse.

Modèle ANOVA 2 (deux facteurs) :

$$Y_{ijk} = \mu_{ij} + \varepsilon_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Équation 7 : Modèle théorique de l'analyse de la variance ANOVA 2 pour deux facteurs catégoriels fixes.

Avec $\varepsilon_{ijk} \sim iN(0, \sigma^2)$; $i = 1, \dots, a$; $j = 1, \dots, b$ et $k = 1, \dots, n_{ij}$

$$\sum_i \alpha_i = 0, \sum_j \beta_j = 0, \sum_i \gamma_{ij} = 0, \sum_j \gamma_{ij} = 0$$

- Y_{ijk} = variable quantitative étudiée
- μ = moyenne générale
- α_i = effet du niveau i du facteur A
- β_j = effet du niveau j du facteur B
- k = numéro de répétition
- γ_{ij} = effet d'interaction entre les deux niveaux
- μ_{ij} = moyenne pour le traitement (i, j)
- ε_{ijk} = fluctuation aléatoire entre l'observation k et la moyenne μ_{ij}

Tout comme l'ANOVA 1, l'ANOVA 2 utilise des tests de Fisher. L'ANOVA 2 permet de tester trois hypothèses :

1. $H_0 : \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_a = 0$ Si la p-valeur de cette hypothèse est inférieure à 0,05, il y a rejet de l'hypothèse H_0 et donc le facteur catégoriel α a un effet significatif sur la variable quantitative Y quand l'ensemble des niveaux du facteur catégoriel β sont considérés.
2. $H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$ Si la p-valeur de cette hypothèse est inférieure à 0,05 il y a rejet de l'hypothèse H_0 et donc le facteur catégoriel β a un effet significatif sur la variable quantitative Y quand l'ensemble des niveaux du facteur α sont considérés.
3. $H_0 : \gamma_{ij} = 0 \forall i, j$ Si la p-valeur de cette hypothèse est inférieure à 0,05, il y a rejet de l'hypothèse H_0 et donc il existe au moins une interaction significative entre un niveau i du facteur α et un niveau j du facteur β

Pour vérifier la qualité du modèle utilisé, le coefficient R^2 est calculé. Le R^2 d'un modèle est le coefficient de détermination du modèle. Il exprime la part de variabilité expliquée par le modèle et donc renseigne sur la qualité de prédiction d'un modèle linéaire.

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \text{ et } R^2_{ajusté} = 1 - \frac{MSE}{MST} = 1 - \frac{SSE / (N - k)}{SST / (k - 1)}$$

$$SST = SSM + SSE = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y})^2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (Y_i - \bar{Y})^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2$$

Équation 8 : Coefficient de détermination (R^2) et coefficient de détermination ajusté ($R^2_{ajusté}$) en fonction des degrés de liberté. Décomposition de la Sum of Square Total (SST).

où :

- SST = estimation de la variabilité totale des données
- SSE = estimation de la variabilité des résidus (à l'intérieur d'un traitement)
- SSM = estimation de la variabilité entre les traitements
- Y_i = mesures du niveau i du traitement
- Y_{ij} = mesures j à l'intérieur du niveau i du traitement
- $\bar{Y}_i$ = moyenne du traitement i
- $\bar{Y}$ = moyenne de l'ensemble des mesures
- $N - k$ = degré de liberté des résidus
- $k - 1$ = degré de liberté des traitements

Le R^2 ajusté est utilisé pour expliquer la qualité des modèles.

Malgré que le modèle ANOVA nous renseigne sur l'inégalité des moyennes grâce au test de Fisher, celui-ci ne permet pas de déterminer quelle est ou quelles sont les moyennes qui sont significativement différentes des autres. Pour cela, un test de Tukey est utilisé. Il compare deux à deux l'ensemble des moyennes pour les différents niveaux de facteurs. Si la p-valeur obtenue grâce au test est inférieure à 0,05, l'hypothèse d'égalité de deux moyennes est rejetée. Les deux moyennes testées sont alors considérées comme significativement distinguées entre-elles.

L'équation du coefficient de corrélation de Bravais-Pearson est calculé pour déterminer la corrélation entre deux variables. Le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson est un indice statistique qui exprime l'intensité et le sens (positif ou négatif) de la relation linéaire entre deux variables quantitatives. Il assume des valeurs se situant dans l'intervalle qui va de - 1 à +1. Une valeur égale à - 1 ou à +1 indique l'existence d'une relation linéaire parfaite (fonctionnelle) entre les deux variables. En revanche, ce coefficient est nul ($r = 0$) lorsqu'il n'y a pas de relation linéaire entre les variables.

L'intensité de la relation linéaire sera donc d'autant plus forte que la valeur du coefficient est proche de +1 ou de - 1, et d'autant plus faible qu'elle est proche de 0. Par ailleurs, le coefficient est de signe positif si la relation est positive (directe, croissante) et de signe négatif si la relation est négative (inverse, décroissante). Le coefficient r de Bravais-Pearson entre deux variables X et Y se calcule en appliquant la formule suivante:

$$r(X, Y) = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_X \cdot \sigma_Y}$$

Équation 9 : Coefficient de corrélation linéaire de Bravais-Pearson

où :

- $Cov(X, Y)$ = covariance entre les deux variables
- σ_X = écart-type de la variable X
- σ_Y = écart-type de la variable Y

4 Résultats

Les résultats présentent une visualisation des données obtenues à partir des différentes méthodes expliquées dans la partie précédente. À partir de celles-ci, différents tests statistiques ont été effectués afin de mettre en évidence les traitements qui sont significativement différents des autres ($\alpha=0,05$).

4.1 Identification et comptage des espèces

Les comptages d'espèces nous donnent un aperçu des proportions d'espèces observées au sein des différentes bandes de traitements (Tableau 3) et les proportions des adventices et des repousses de froment par rapport aux bandes (Tableau 4).

Le Tableau 3 reprend le pourcentage de germination observé pour chaque espèce. De manière générale, on s'aperçoit que le pourcentage de germination est très faible avec une moyenne générale de tous les traitements de 44%.

Au niveau des deux mélanges, une moyenne du pourcentage de germination est calculée en tenant compte du pourcentage de germination des toutes les espèces comprises dans le mélange et de la proportion de ces espèces dans le mélange. Le Mélange 1 (52%) a un pourcentage de germination légèrement plus élevé que le Mélange 2 (45%). Les espèces dominantes sont les deux avoines (68%), le pois fourrager (53%) et la féverole (44%) pour le Mélange 1 et l'avoine de printemps (73%), la moutarde (80%) et la vesce (64%) pour le Mélange 2.

En ce qui concerne les couverts purs, le Pois fourrager (52%), la Féverole (55%) et l'Avoine brésilienne (65%) ont un pourcentage plus élevé que la moyenne générale.

Tableau 3 : Nombre attendu en fonction de la densité de semences et nombre observé des différentes espèces présentes dans les couverts au mètre carré. Pourcentage de germination de chaque espèce selon le nombre observé divisé par le nombre attendu.

Traitement	Espèces	Nbre attendu [m ⁻²]	Nbre observé [m ⁻²]	Germination [%]
Mélange 1	Avoine	68,1	46,8	68,7
	Phacélie	75	26,2	35
	Pois fourrager	5,5	2,9	53,1
	Féverole	2,2	1	44,6
	Trèfle d'Alexandrie	322,6	23,8	7,4
	Moyenne			52,51
Mélange 2	Avoine de printemps	55,4	40,6	73,3
	Phacélie	31,3	11,2	35,8
	Pois fourrager	7,7	2,2	28,6
	Féverole	0,8	0	0
	Trèfle d'Alexandrie	106,5	24,8	23,3
	Nyger	46,9	11,2	23,9
	Tournesol	10,6	3,4	32,2
	Lin	185,2	59,6	32,2
	Moutarde blanche	14,3	11,4	79,8
	Vesce	15,6	10	64
	Moyenne			45,47
Moutarde	Moutarde blanche	111,4	41,4	37,2
Avoine prtps	Avoine de printemps	227,1	79	34,8
Pois	Pois fourrager	73,6	38,8	52,7
Féverole	Féverole	38,3	21,2	55,4
Avoine brési	Avoine brésilienne	213	138,6	65,1
Trèfle	Trèfle d'Alexandrie	500	154	30,8
Phacélie	Phacélie	420	100,2	23,9

Dans le Tableau 4, on peut observer pour le Mélange 1 que les deux avoines (42%), la phacélie (24%) et le trèfle (22%) ont pris le dessus sur le pois (3%) et la féverole (1%). Tandis que pour le Mélange 2, les espèces majoritaires sont le lin (33%), l'avoine de printemps (23%), le trèfle (14%), la phacélie (6%), le nyger (6%), et la moutarde (6%). En ce qui concerne le pois (1%) et la féverole (0%), leurs proportions sont beaucoup plus faibles que celles attendues.

On peut aussi comparer les différentes proportions des repousses de froment et d'adventices par bande. Au niveau des deux mélanges, la proportion de froment est faible avec 1% et 0% pour le Mélange 1 et le Mélange 2 respectivement. La proportion d'adventice est aussi faible avec 7% et 2% pour le Mélange 1 et le Mélange 2 respectivement.

Pour les couverts à une espèce, les traitements Moutarde (66%), Pois (48%), Féverole (55%) et Phacélie (44%) ont des proportions élevées en froment. Inversement, les traitements Avoine de printemps (3%), Avoine brésilienne (2%) et Trèfle d'Alexandrie (14%) ont des proportions faibles en froment.

Tableau 4 : Pourcentages attendus en fonction des proportions de semences et pourcentages observés des différentes espèces présentes dans les couverts ainsi que les repousses de froment et autres adventices.

Traitement	Especes	% attendu	% observé
Mélange 1	Avoine	43,01	41,97
	Phacélie	3,23	24,29
	Pois fourrager	21,51	2,71
	Féverole	21,51	0,94
	Trèfle d'Alexandrie	10,75	21,93
	Froment	0	1,34
	Adventices	0	6,81
Mélange 2	Avoine de printemps	30,69	22,70
	Phacélie	0,96	6,32
	Pois fourrager	21,48	1,25
	Féverole	5,37	0
	Trèfle d'Alexandrie	5,06	13,95
	Nyger	2,30	6,25
	Tournesol	7,67	1,89
	Lin	15,34	33,14
	Moutarde blanche	1,53	6,43
	Vesce	9,59	5,56
	Froment	0	0,12
	Adventices	0	2,40
Moutarde	Moutarde Blanche	100	28,82
	Froment	0	66,46
	Adventices	0	4,72
Avoine prtps	Avoine de printemps	100	80,37
	Froment	0	3,50
	Adventices	0	16,13
Pois	Pois Fourrager	100	40,75
	Froment	0	47,60
	Adventices	0	11,65
Féverole	Féverole	100	23,15
	Froment	0	54,59
	Adventices	0	22,25
Avoine brési	Avoine brésilienne	100	88,77
	Froment	0	2,20
	Adventices	0	9,03
Trèfle	Trèfle d'Alexandrie	100	81,73
	Froment	0	14,24
	Adventices	0	4,03
Phacélie	Phacélie	100	51,07
	Froment	0	44,31
	Adventices	0	4,62

4.2 Couverture du sol par le couvert

La couverture du sol a été mesurée approximativement toutes les semaines après le semis des couverts et a été modélisée selon l'Equation 2. Les deux paramètres estimés sont donc le taux d'expansion au point d'inflexion (v) et le nombre de jours après le semis au point d'inflexion (t_0) pour chaque traitement. Les valeurs de ces paramètres sont reprises dans le Tableau 5.

Pour le paramètre v , les traitements Mélange 1 ($0,32 \pm 2,17$ %/jours), Mélange 2 ($0,55 \pm 2,05$ %/jours), Avoine de printemps ($0,45 \pm 2,39$ %/jours), Pois fourrager ($0,48 \pm 2,96$ %/jours) et Avoine brésilienne ($0,47 \pm 2,89$ %/jours) possèdent un taux d'expansion élevé. Tandis que les traitements Féverole ($0,34 \pm 0,63$ %/jours) et Trèfle d'Alexandrie ($0,39 \pm 0,64$ %/jours) possèdent un faible taux d'expansion.

Pour le paramètre t_0 , qui correspond au nombre de jours après le semis nécessaire pour atteindre 50% du sol couvert, les traitements Mélange 1 ($1,66 \pm 46,37$ jours), Moutarde ($2,27 \pm 55,41$ jours), Pois fourrager ($1,47 \pm 40,56$ jours) et Avoine brésilienne ($1,46 \pm 42,42$ jours) s'installent plus rapidement. Inversement, les traitements Féverole ($39,32 \pm 130,45$ jours) et Trèfle d'Alexandrie ($47,40 \pm 136,17$ jours) s'installent lentement.

Tableau 5 : Estimation et écarts-types des paramètres du modèle de l'évolution de la couverture du sol (v = taux d'expansion au point d'inflexion et t_0 = nombre de jours après le semis au point d'inflexion) selon les différents traitements.

Traitement	v	σ	t_0	σ
Mélange 1	2,17	+/- 0,32	46,37	+/- 1,66
Mélange 2	2,05	+/- 0,55	82,48	+/- 4,01
Moutarde	1,41	+/- 0,22	55,41	+/- 2,27
Avoine prtps	2,39	+/- 0,45	72,49	+/- 2,21
Pois	2,96	+/- 0,48	40,56	+/- 1,47
Féverole	0,63	+/- 0,34	130,45	+/- 39,32
Avoine brési	2,89	+/- 0,47	42,42	+/- 1,46
Trèfle	0,64	+/- 0,39	136,17	+/- 47,40
Phacélie	1,13	+/- 0,19	59,60	+/- 2,88

A l'aide de ces deux paramètres, une courbe de l'évolution de la couverture du sol pour les différents traitements a pu être modélisée (Figure 6). On peut apercevoir que les traitements Moutarde, Phacélie et Mélange 1 commence à se développer et recouvrir le sol dès les premiers jours près le semis. Par ailleurs, les traitements Avoine brésilienne, Pois fourrager et Mélange 1 sont les seules à recouvrir pas loin de 100% du sol avant l'hiver.

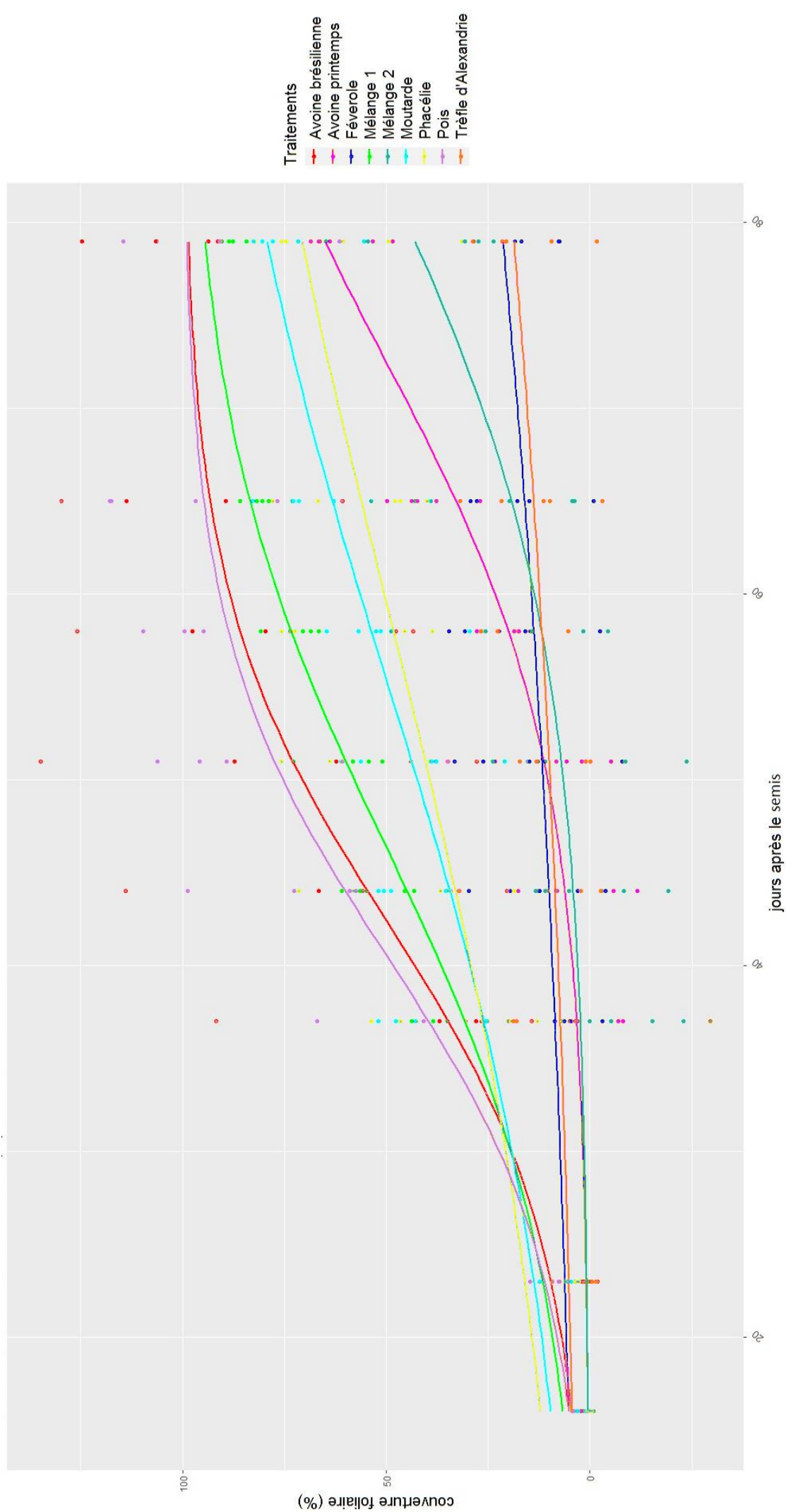


Figure 6 : Evolution de la couverture du sol (%) pour les différents traitements avec une estimation de la dynamique de croissance selon le modèle défini. Les couverts ont été semés le 29 août 2019.

4.3 Green Area Index (GAI)

L'analyse du GAI indique que le facteur traitement est significatif ($F_{8,27} = 10.87$, $p < .0001$). Le R^2 est de 0,76. Ce qui montre que 76% de la variabilité des mesures est expliquée par le facteur traitement. Une observation de la Figure 7 nous indique que les traitements Avoine brésilienne ($0,49 \pm 3,06$), Mélange 1 ($0,24 \pm 2,99$) et Moutarde ($0,38 \pm 2,93$) possèdent les GAI les plus élevés tandis que les traitements Féverole ($0,47 \pm 1,26$) et Trèfle d'Alexandrie ($0,37 \pm 1,07$) possèdent les GAI les plus faibles. Le test de Tukey confirme pour les deux plus faibles traitements cités qu'ils sont significativement distincts par rapport à la majorité des autres traitements (Tableau 6). Seulement, pas de différence significative peut être observée chez les traitements les plus performants par rapport aux autres traitements.

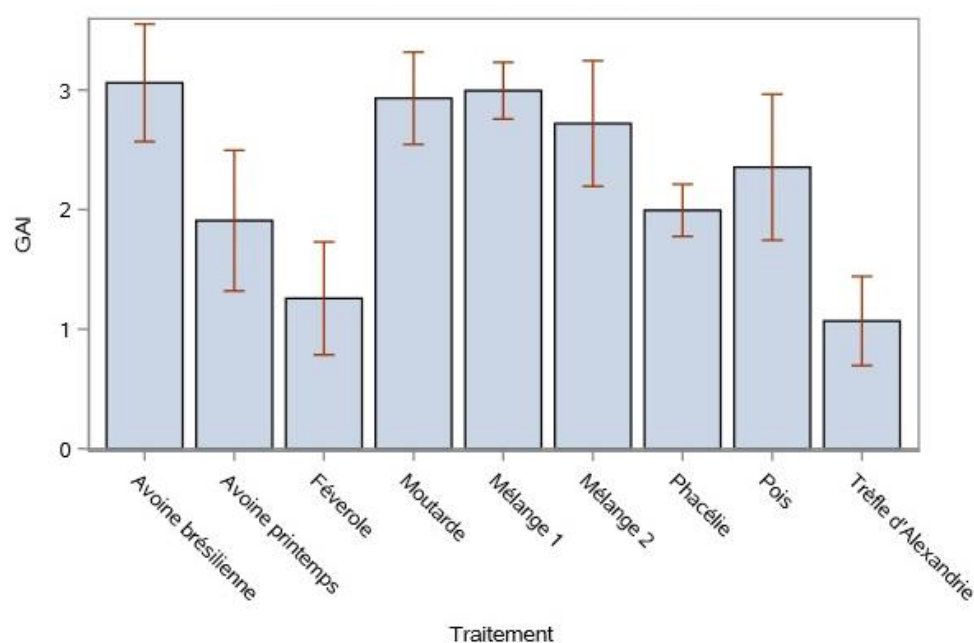


Figure 7 : Green Area Index en fonction des différents traitements.

Tableau 6 : Moyennes et écarts-types des mesures de Green Area Index en fonction des traitements. Des lettres de groupes identiques signifient que les moyennes ne sont pas significativement différentes.

Traitement	μ	σ	Groupe
Avoine brési	3,06	+/-0,49	A
Mélange 1	2,99	+/-0,24	A
Moutarde	2,93	+/-0,38	AB
Mélange 2	2,72	+/-0,52	AB
Pois	2,35	+/-0,61	AB
Phacélie	1,99	+/-0,22	ABC
Avoine prtps	1,91	+/-0,59	BC
Féverole	1,26	+/-0,47	C
Trèfle	1,07	+/-0,37	C

4.4 Biomasse aérienne

La biomasse aérienne des couverts est influencée par le facteur traitement ($F_{8,36} = 7.58$, $p < .0001$), 63% de la variabilité des mesures est expliquée par ce facteur ($R^2 = 0,63$). Sur la Figure 8, on aperçoit que le traitement Moutarde ($1,04 \pm 3,94$ T de MS.ha⁻¹) est bien plus élevé que tous les autres traitements. On observe que le traitement Féverole ($0,47 \pm 1,07$ T de MS.ha⁻¹) et le traitement Trèfle d'Alexandrie ($0,26 \pm 0,59$ T de MS.ha⁻¹) ont une biomasse plus faible. Cependant, ces deux traitements ne sont pas significativement différents de la majorité des autres traitements selon le test de Tukey. Seul le traitement Moutarde est significativement plus élevé que tous les autres traitements sauf le traitement Pois. Par ailleurs, on peut observer dans le Tableau 7 que les écarts-types (σ) sont fort élevés pour les traitements Mélange 2, Moutarde et Phacélie. Si on tient compte du CV dans le Tableau 5, seuls les traitements Mélange 1, Pois Fourrager et Avoine brésilienne ont leurs valeurs les moins dispersées autour de la moyenne.

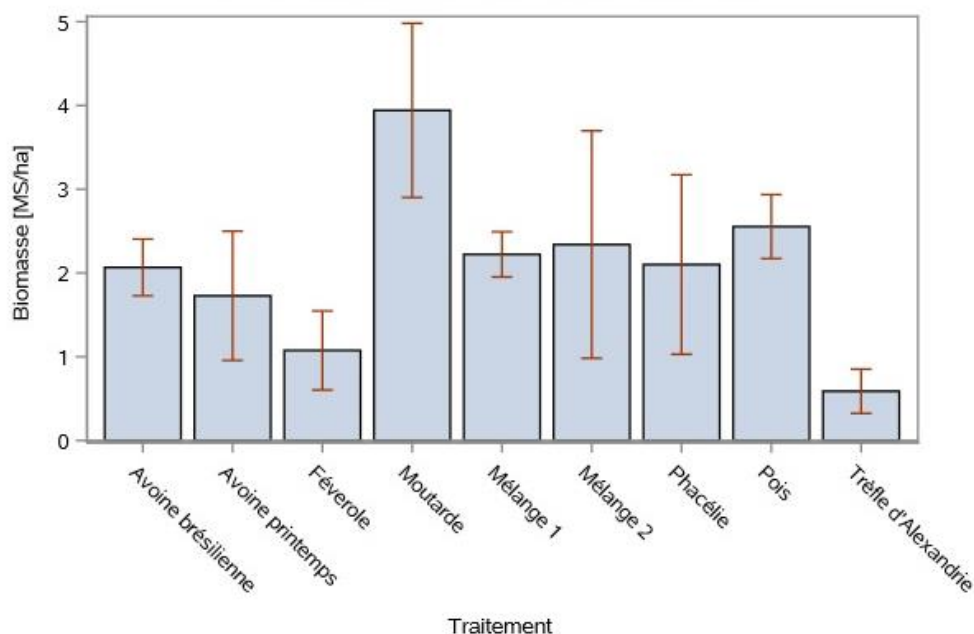


Figure 8 : Biomasse aérienne en fonction des différents traitements.

Tableau 7 : Moyennes, écarts-types et coefficients de variation des mesures de biomasse aérienne en fonction des traitements. Des lettres de groupes identiques signifient que les moyennes ne sont pas significativement différentes.

Traitement	μ [T de MS.ha ⁻¹]	σ	CV = σ / μ [%]	Groupe
Moutarde	3,94	+/-1,04	26,40	A
Pois	2,55	+/-0,38	14,90	AB
Mélange 2	2,34	+/-1,36	58,12	B
Mélange 1	2,22	+/-0,27	12,16	B
Phacélie	2,10	+/-1,07	50,95	BC
Avoine brési	2,07	+/-0,34	16,42	BC
Avoine prtps	1,73	+/-0,77	44,51	BC
Féverole	1,07	+/-0,47	43,92	BC
Trèfle	0,59	+/-0,26	44,07	C

4.5 Rapport C/N de la biomasse aérienne

L'analyse du rapport C/N indique que le facteur traitement est significatif ($F_{8,36} = 5.59$, $p < .0001$). Le R^2 est de 0,55. Ce qui indique que 55% de la variabilité des mesures est expliquée par le facteur traitement. Une observation de la Figure 9 nous renseigne que les traitements Avoine brésilienne ($0,78 \pm 13,87$), Avoine de printemps ($1,60 \pm 13,12$) et Phacélie ($1,72 \pm 13,01$) possèdent un rapport C/N les plus élevés tandis que les traitements Féverole ($0,45 \pm 10,16$) et Moutarde ($1,46 \pm 9,40$) possèdent un rapport plus faible. Le test de Tukey nous permet de vérifier ces tendances. Dans le Tableau 8, seuls les traitements Avoine brésilienne et Moutarde ne sont pas dans le groupe B. Ce qui signifie que ces deux traitements sont significativement plus élevés et plus faibles respectivement. Le traitement Avoine brésilienne est plus élevé que le Trèfle d'Alexandrie, le Mélange 2, la Féverole et la Moutarde tandis que la Moutarde est plus faible que l'Avoine brésilienne, l'Avoine de printemps, la Phacélie et le Pois.

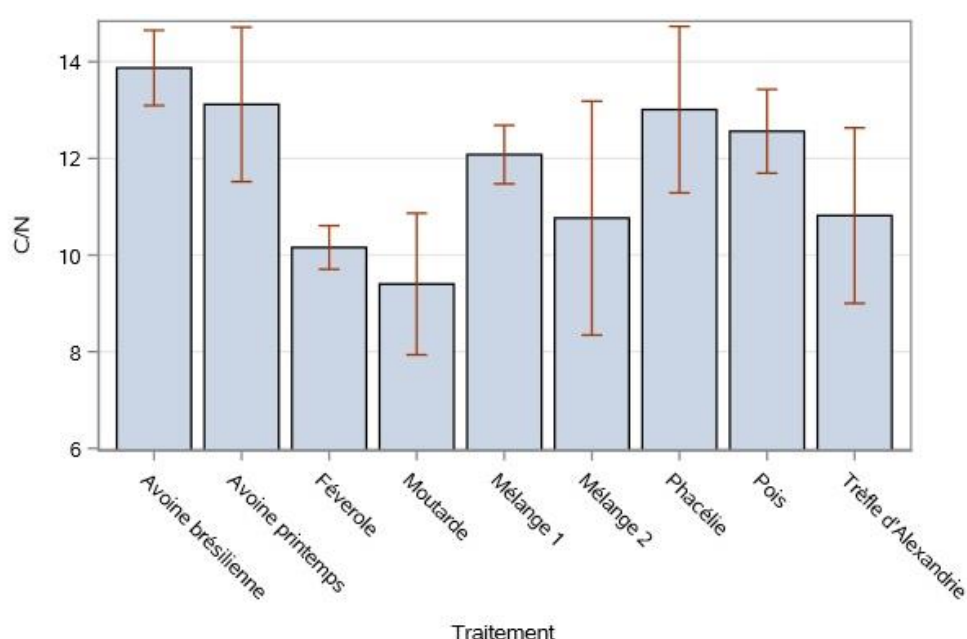


Figure 9 : Rapport Carbone sur Azote de la biomasse aérienne en fonction des différents traitements.

Tableau 8 : Moyennes et écarts-types des mesures de C/N de la biomasse aérienne en fonction des traitements. Des lettres de groupes identiques signifient que les moyennes ne sont pas significativement différentes.

Traitement	μ	σ	Groupe
Avoine brési	13,87	+/-0,78	A
Avoine prtps	13,12	+/-1,60	AB
Phacélie	13,01	+/-1,72	AB
Pois	12,56	+/-0,87	AB
Mélange 1	12,08	+/-0,60	ABC
Trèfle	10,82	+/-1,81	BC
Mélange 2	10,76	+/-2,42	BC
Féverole	10,16	+/-0,45	BC
Moutarde	9,40	+/-1,46	C

4.6 Rétention et apport d'azote par le couvert

Pour les mesures de NO_3^- , une analyse de variance à deux facteurs (Traitement et Horizon) révèle plusieurs informations. Le modèle est significatif ($F_{26,54} = 7.38$, $p < .0001$) avec un R^2 de 0,78. Cependant, le facteur interaction Traitement*Horizon n'est pas significatif ($F_{16,26} = 1.04$, $p = .43$). Ce qui indique que les deux facteurs peuvent être analysés séparément. Un test de Tukey pour le facteur Horizon nous montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux premiers horizons (Tableau 9). Seul l'horizon 60-90cm est significativement différent avec une concentration de NO_3^- plus faible ($3,43 \pm 6,30 \text{ kg.ha}^{-1}$).

Tableau 9 : Moyennes et écarts-types des mesures de concentration en NO_3^- du sol en fonction des horizons. Des lettres de groupes identiques signifient que les moyennes ne sont pas significativement différentes.

Horizon [cm]	$\mu \text{ [kg.ha}^{-1}\text{]}$	σ	Groupe
0-30	9,57	+/-4,16	A
30-60	8,90	+/-4,41	A
60-90	6,30	+/-3,43	B

Sur base des renseignements que nous procure l'ANOVA2, deux nouvelles analyses avec un seul facteur (Traitement) sont effectuées. Pour la première, seules les mesures des deux premiers horizons sont utilisées. Cette ANOVA1 nous indique que le facteur Traitement influence la concentration de NO_3^- dans les horizons supérieurs du sol ($F_{8,45} = 13.98$, $p < .0001$) avec un R^2 de 0,71. On peut constater sur la Figure 10 que les concentrations des différents traitements fluctuent entre 4 et 16 kg.ha^{-1} avec une tendance plus élevée pour la Moutarde ($3,99 \pm 13,23 \text{ kg.ha}^{-1}$) et le Pois ($2,35 \pm 15,66 \text{ kg.ha}^{-1}$).

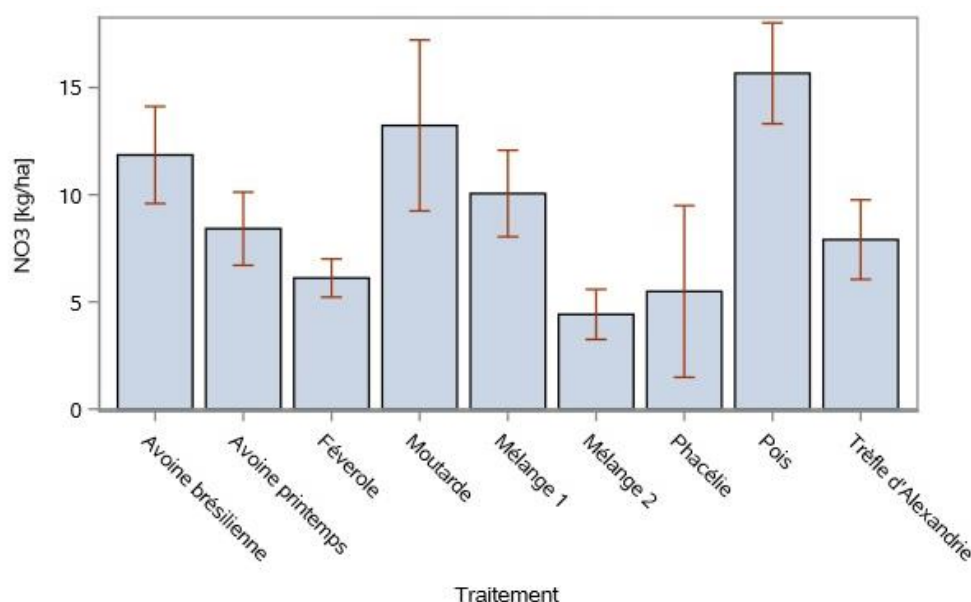


Figure 10 : Concentration de NO_3^- du sol en fonction des différents traitements dans l'horizon 0-60 cm.

Le test de Tukey confirme cette tendance. Le Pois et la Moutarde, faisant partie du groupe A et AB respectivement, sont significativement plus élevés que les traitements Avoine de printemps, Trèfle d'Alexandrie, Féverole, Phacélie et Mélange 2 (Tableau 10). Pour les traitements cités avec une concentration en NO_3^- dans le sol plus faible, il n'y a pas de différence notable entre eux.

Tableau 10 : Moyennes et écarts-types des mesures de concentration en NO_3^- du sol en fonction des traitements pour l'horizon 0-60 cm. Des lettres de groupes identiques signifient que les moyennes ne sont pas significativement différentes.

Traitement	μ [$\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$]	σ	Groupe
Pois	15,66	+/-2,35	A
Moutarde	13,23	+/-3,99	AB
Avoine brési	11,85	+/-2,26	ABC
Mélange 1	10,06	+/-2,02	BCD
Avoine prtps	8,41	+/-1,7	CDE
Trèfle	7,90	+/-1,85	CDE
Féverole	6,11	+/-0,89	DE
Phacélie	5,49	+/-4,00	DE
Mélange 2	4,42	+/-1,17	E

Pour la deuxième analyse, seules les mesures du dernier horizon sont utilisées. Cette ANOVA1 nous indique que le facteur Traitement influence la concentration de NO_3^- dans les horizons supérieurs du sol ($F_{8,16} = 6.03$, $p < .0008$) avec un R^2 de 0,73. On peut constater sur la Figure 11 que le traitement Pois fourrager ($2,03 \pm 12,81 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) a la concentration la plus élevée et le traitement Phacélie ($1,09 \pm 2,30 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) a la concentration la plus faible. Par ailleurs, on peut observer dans le Tableau 11 que les écarts-types (σ) sont fort élevés pour les traitements Féverole, Moutarde et Avoine brésilienne.

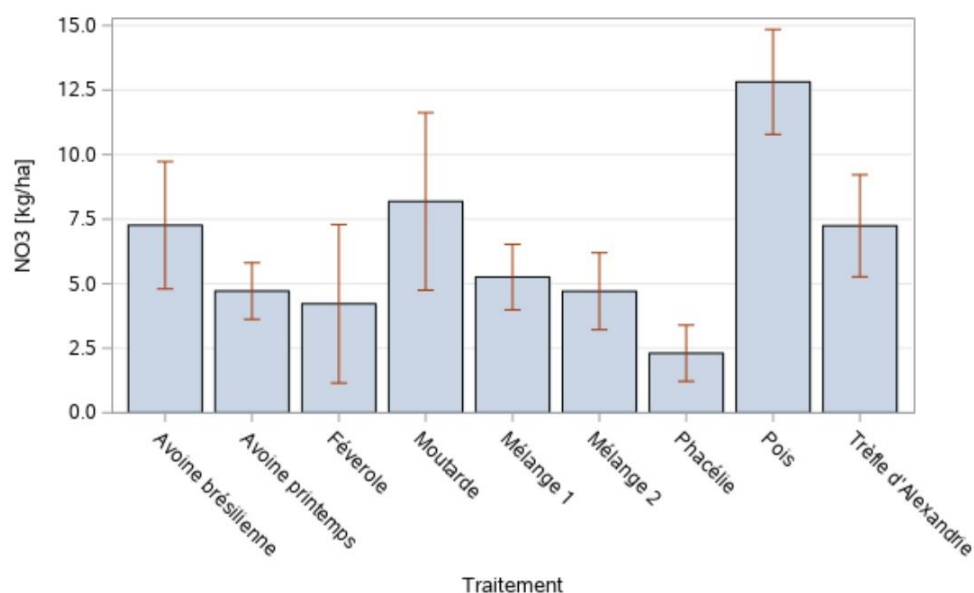


Figure 11 : Concentration de NO_3^- du sol en fonction des différents traitements dans l'horizon 60-90 cm.

Selon le test de Tukey, seul le traitement Pois est significativement plus élevé que les traitements Mélange , Avoine de printemps, Mélange 2, Féverole et Phacélie. Pour les traitements avec une concentration en NO_3^- dans le sol plus faible, il n'y a pas de différence notable entre eux (Tableau 11).

Tableau 11 : Moyennes et écarts-types des mesures de concentration en NO_3^- du sol en fonction des traitements pour l'horizon 60-90 cm. Des lettres de groupes identiques signifient que les moyennes ne sont pas significativement différentes.

Traitement	μ [kg.ha ⁻¹]	σ	Groupe
Pois	12,81	+/- 2,03	A
Moutarde	8,19	+/- 3,44	AB
Avoine brési	7,26	+/- 2,47	AB
Trèfle	7,24	+/- 1,98	AB
Mélange 1	5,25	+/- 1,27	B
Avoine prtps	4,71	+/- 1,09	B
Mélange 2	4,70	+/- 1,49	B
Féverole	4,22	+/- 3,07	B
Phacélie	2,30	+/- 1,09	B

Pour les mesures de NH_4^+ , l'analyse de variance à deux facteurs (Traitement et Horizon) nous renseigne qu'aucun des deux facteurs influence la concentration de NH_4^+ dans le sol. En effet, le modèle n'est pas significatif ($F_{26,54} = 0.69$, $p = .844$). Avec un R^2 de 0,25, seulement 25% de la variabilité des mesures est expliquée par le facteur Traitement et Horizon. La concentration moyenne en NH_4^+ est de 3,65 kg.ha⁻¹ tous les traitements et horizons confondus.

4.7 Disponibilité en eau

La teneur en eau disponible (θ) est calculée à partir de la différence entre la teneur en eau à la capacité au champ et la teneur en eau au point de flétrissement des différentes bandes de traitements. La moyenne et l'écart-type de ces deux variables sont reprises dans le Tableau 12 pour chaque traitement étudié. La Figure 12 reprend quant à elle la teneur en eau disponible et l'écart-type de chaque traitement. On observe sur celle-ci qu'aucun traitement ne semble être différent des autres. L'analyse de variance confirme qu'aucune moyenne n'est significativement distincte des autres ($F_{8,36} = 0.39, p < .9204$). Avec un R^2 de 0,08, seule 8% de la variabilité des mesures est expliquée par le facteur Traitement. Par ailleurs, on remarque sur la Figure 12 que les écarts-types sont fort élevés pour la majorité des traitements. L'origine des écarts-types fort élevés provient principalement de la mesure du point de flétrissement et non de la mesure de la capacité au champ (Tableau 12).

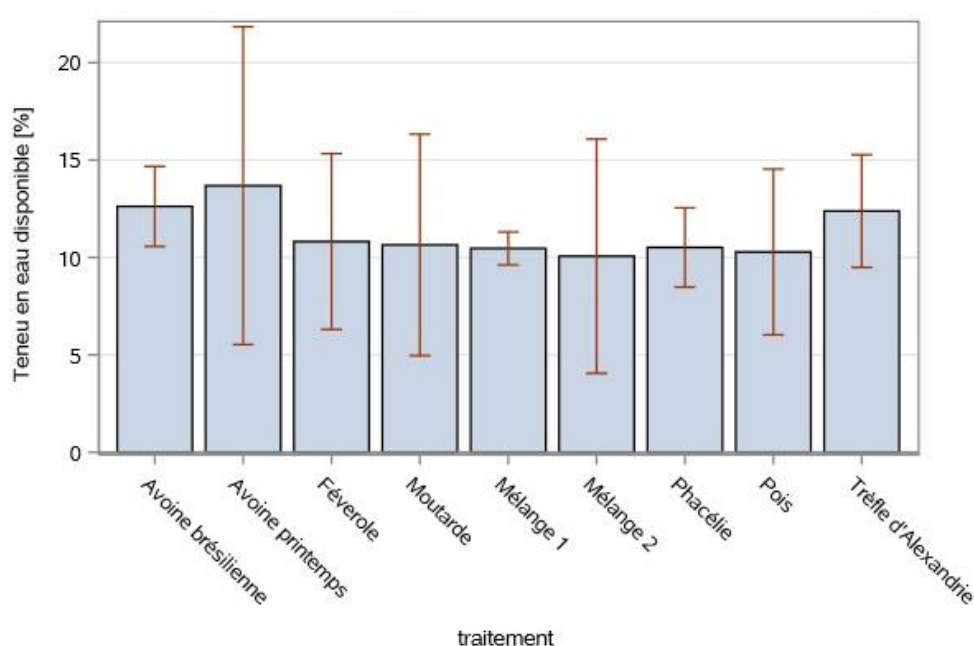


Figure 12 : Teneur en eau disponible du sol en fonction des différents traitements

Tableau 12 : Moyennes et écarts-types de la teneur en eau au niveau de la capacité au champ et la teneur en eau au niveau du point de flétrissement en fonction des traitements.

Traitement	Capacité au champ [θ]	σ	Point de flétrissement [θ]	σ
Mélange 1	34,91	+/- 0,61	24,45	+/- 1,26
Mélange 2	32,91	+/- 1,84	22,84	+/- 4,74
Moutarde	33,51	+/- 0,50	22,86	+/- 5,94
Avoine prtps	34,58	+/- 1,20	20,89	+/- 7,14
Pois	34,81	+/- 1,03	24,52	+/- 4,40
Féverole	35,21	+/- 1,82	24,40	+/- 3,21
Avoine brési	35,16	+/- 0,90	22,54	+/- 1,60
Trèfle	35,37	+/- 1,33	22,99	+/- 2,10
Phacélie	35,12	+/- 1,47	24,61	+/- 2,09

4.8 Carbone labile (POXC)

Une observation rapide de la fraction massique de POXC sur la Figure 13 laisserait croire que le traitement Moutarde ($27,76 \pm 979,76$ ppm) est significativement plus élevé et que les traitements Phacélie ($14,35 \pm 922,92$ ppm) et Trèfle d'Alexandrie ($19,36 \pm 923,19$ ppm) sont significativement plus faibles, mais ceci peut être lié au choix de l'échelle de l'ordonnée (de 850 à 1000ppm). Toutefois, après analyse statistique de type ANOVA de la fraction POXC en fonction du facteur Traitement, les moyennes des traitements ne présentent pas de différence significative ($F_{8,36} = 2.00$, $p < .0747$). Le R^2 est de 0,30. Ce qui montre que seulement 30 % de la variabilité des mesures est expliquée par le facteur traitement. Par ailleurs, on remarque aussi dans le Tableau 13 que l'écart-type du traitement Pois est fort élevé.

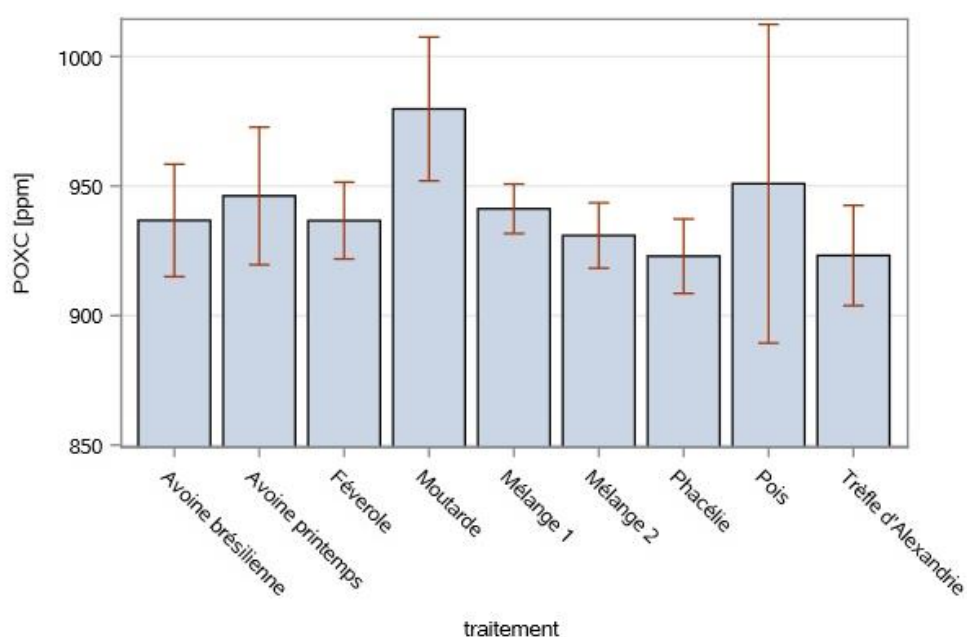


Figure 13 : Fraction massique de POXC du sol en fonction des différents traitements.

Tableau 13 : Moyennes et écarts-types des mesures de fraction massique de POXC du sol en fonction des traitements.

Traitement	μ [ppm]	σ
Moutarde	979,76	+/- 27,76
Pois	950,92	+/- 61,49
Avoine prtps	946,20	+/- 26,55
Mélange 1	941,22	+/- 9,55
Avoine brési	936,74	+/- 21,72
Féverole	936,67	+/- 14,83
Mélange 2	930,93	+/- 12,62
Trèfle	923,19	+/- 19,36
Phacélie	922,92	+/- 14,35

4.9 Tea Bag Index

Pour les deux variables k et S calculées à partir de la méthode TBI, aucun traitement ne semble être significativement distinct sur la Figure 14 et la Figure 15. De plus, l'analyse de variance de donne aucun résultat significatif. Pour la variable k avec un R^2 de 0,10, seul 10% de la variabilité des mesures est expliquée par le facteur Traitement tandis que pour la variable S avec un R^2 de 0,18, seul 18% % de la variabilité des mesures est expliquée par le facteur Traitement. Les moyennes des traitements de présentent pas de différence significative au niveau de la méthode TBI.

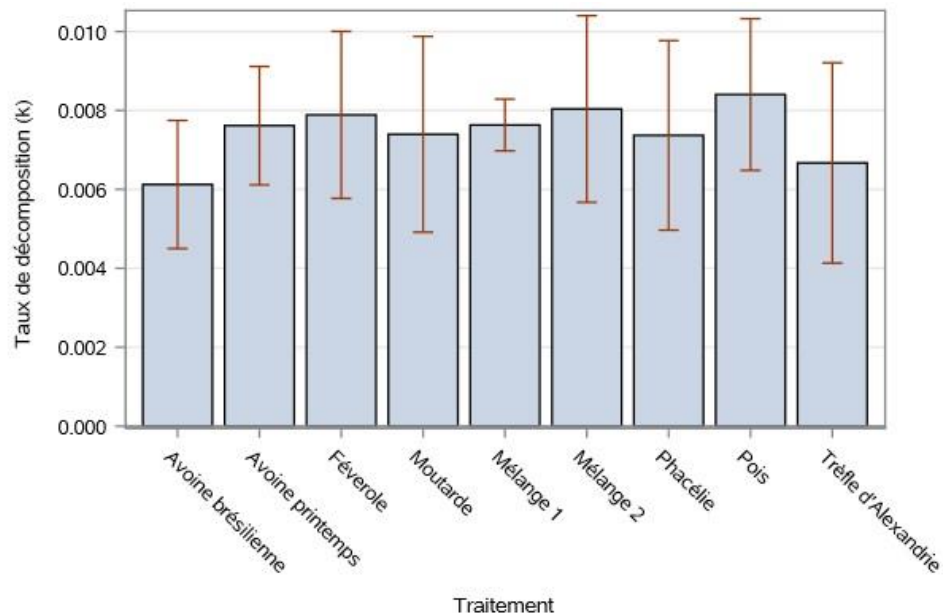


Figure 14 : Taux de décomposition (k) du sol en fonction des différents traitements.

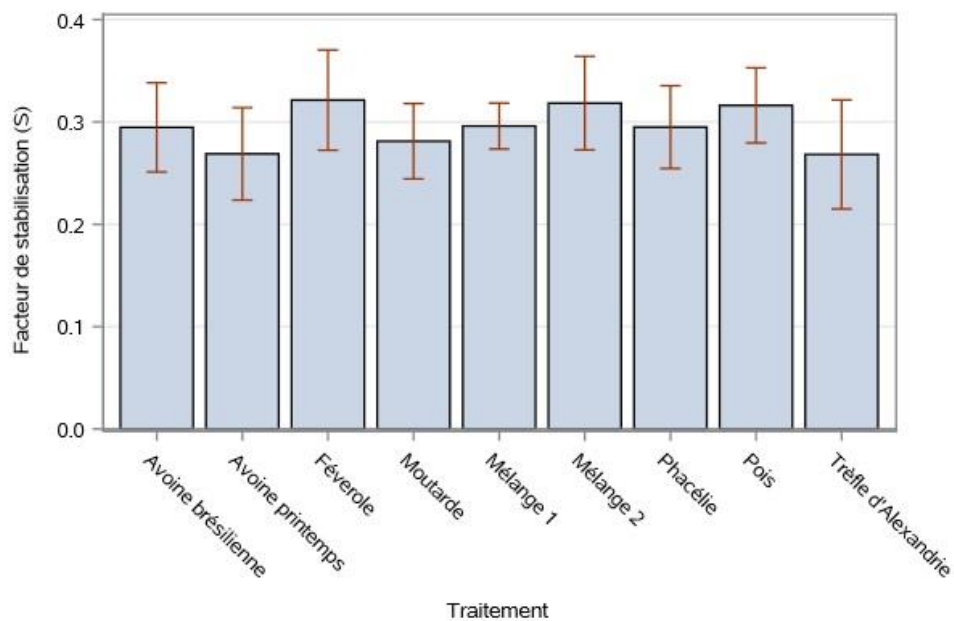


Figure 15 : Facteur de stabilisation (S) du sol en fonction des différents traitements

5 Discussion

La partie discussion de ce mémoire se base sur une analyse des résultats obtenus précédemment et les remet dans un contexte plus global. Cette analyse met en lien les différentes variables mesurées et les compare avec les connaissances reprise dans la première partie. Des recherches supplémentaires ont été faite afin d'appuyer ou de contredire les résultats. Des idées et perspectives futures concernant l'étude des couverts mixtes sont données afin d'approfondir les connaissances acquises de ce mémoire.

5.1 Contexte de l'étude

Avant de discuter des résultats obtenus, il est important de préciser et de remettre en contexte le déroulement de l'expérience. L'ensemble des résultats n'est valable que pour les conditions climatiques qui se sont déroulées durant la période de culture du couvert. De plus, comme expliqué dans la partie 3 de ce mémoire, des problèmes mécaniques lors du semis ont entraîné des problèmes de levée de certains traitements engendrant une hétérogénéité de certaines parcelles. Des zones où le couvert n'a presque pas poussé ont été délimitées et évitées lors de la prise de mesures. Seulement, comme constaté sur la Figure 16, une forte hétérogénéité de la parcelle du traitement Mélange 2 a rendu difficile la prise de mesure. Par conséquent, les résultats obtenus de cette parcelle sont relatifs. Le mélange 2, originellement considéré comme un mélange de référence, complet et équilibré, n'est pas pris en compte comme tel dans l'interprétation des résultats.



Figure 16 : Photo de la bande du traitement Mélange 2. Les lignes noires délimitent la bande. Photo prise le 5 octobre 2019.

Les conditions climatiques n'étaient pas favorables après le semis pour la levée des couverts. Sur le graphique de températures et de précipitations de la région lors du déroulement de l'expérience (Annexe 8.2), on peut apercevoir une période de sécheresse commençant le jour du semis (29 août 2019) et se prolongeant durant 24 jours (22 septembre 2019). Pendant cette période, de très rares précipitations ont eu lieu mais elles n'ont pas été suffisantes pour permettre une levée optimale des couverts. Par ailleurs, le développement de tous les couverts a été retardé, diminuant le rendement et influençant les résultats obtenus.

5.2 Pourcentage de germination

Le climat défavorable et les problèmes mécaniques cités ci-dessus expliquent le faible pourcentage de germination avec une moyenne générale de 44% pour tous les traitements. Néanmoins, certaines espèces ont un pourcentage plus élevé que d'autres. Comme détaillé au point 1.2.1, l'avoine brésilienne, le pois fourrager et la féverole lèvent facilement en condition de sécheresse et résistent bien à de hautes températures. Les résultats obtenus pour ces trois espèces correspondent à cette affirmation.

En ce qui concerne le Mélange 1, sa moyenne est supérieure à la moyenne de l'ensemble des traitements. Parmi les espèces le composant, les deux avoines, le pois fourrager et la féverole sont dominantes. La présence de ces espèces a permis au Mélange 1 de se développer correctement malgré les conditions météorologiques difficiles.

Une étude menée par Tribouillois *et al.* (2016) a déterminé la réponse de la germination à la température et au potentiel hydrique pour des espèces variées utilisées comme couvert végétal, et notamment les espèces utilisées dans la cadre de cette expérience. La germination des graines est mesurée en laboratoire à une température ambiante comprise entre 4,5 et 39,5°C. Pour le potentiel hydrique minimum de germination, les graines ont été semées sur du papier de germination à plat dans des boîtes de Petri auxquels une solution de polyéthylèneglycol a été ajoutée pour obtenir le potentiel hydrique désiré. Différents potentiels sont testés allant de 0 à -1,5MPa.

Durant cette expérience, toutes les espèces ont atteint un pourcentage de germination final de 80 à 100% pour leur température optimale. Les espèces étudiées ont une température optimale comprise entre 25 et 34°C. Deux réponses distinctes sont mises en évidence. Les espèces maintiennent un pourcentage de germination élevé et constant, quelle que soit la température comprise entre 4,5 et 35°C, et qui diminue fortement à partir de 39,5 - 43°C où le pourcentage de germination est bas aux températures minimales et maximales. Selon cette étude, toutes les espèces utilisées dans le cadre de ce mémoire (Tableau 1) correspondent à la première réponse. Les températures durant l'expérience ne dépassant pas les 35°C, celles-ci n'ont pas influencé le pourcentage de germination.

En ce qui concerne la réponse au potentiel hydrique, le pourcentage de germination de toutes les espèces de cultures couvertes diminue avec le potentiel hydrique. Les espèces de la famille des Poacées (avoine de printemps, avoine brésilienne, ...) et des Brassicacées (moutarde blanche, ...) sont les plus résistantes au déficit en eau. D'autres espèces (trèfle d'Alexandrie, phacélie, ...) sont sensibles à la disponibilité en eau, ce qui indique qu'elles sont mieux adaptées aux climats humides. Ces résultats semblent majoritairement correspondre avec ceux obtenus tels que l'avoine brésilienne avec un pourcentage plus élevé que la moyenne des traitements et le trèfle d'Alexandrie et la phacélie avec un pourcentage plus faible que la moyenne.

Selon Tribouillois *et al.* (2016), l'étude de la réponse de la germination à la température et au potentiel hydrique pourrait aider à concevoir des mélanges de couverts végétaux lorsque deux espèces ou plus sont semées et cultivées en même temps et dans les mêmes conditions. Dans ce cas, une façon de profiter des différentes capacités de germination serait de diminuer le risque de non-émergence des couverts dû à des conditions climatiques non prévisibles en choisissant plusieurs espèces aux capacités de germination contrastées.

5.3 Production de biomasse

Les mesures de matière sèche montrent peu de différences significatives. Le traitement Moutarde possède une biomasse plus élevée que tous les autres traitements, sauf le traitement Pois fourrager. En opposition, le traitement Trèfle d'Alexandrie avec la biomasse la plus faible est significativement distinct du traitement Pois fourrager, Moutarde, Mélange 1 et Mélange 2. Aucune autre distinction n'est observée avec le test de Tukey. Deux raisons expliqueraient ce résultat.

Premièrement, comme expliqué dans le point 3.1.5, le contexte de l'expérience a conduit à une faible germination et un développement retardé par les conditions climatiques. Ce contexte a entraîné un rendement faible en matière sèche lors de la prise de mesure. Les espèces demandant une longue durée de végétation n'ont pas pu entièrement se développer. Parmi les espèces utilisées, seule la moutarde blanche, qui fleurit après 40 à 60 jours (Weykmans, 2008), a une durée de végétation très faible. Lors de la destruction du couvert, 146 jours après le semis, la moutarde fleurissait toujours et les graines commençaient seulement à se former. Celle-ci a eu le temps de complètement se former d'un point de vue végétatif, contrairement aux autres espèces.

Deuxièmement, un grand écart-type est observé pour certains traitements tels que l'Avoine de printemps, le Mélange 2, la Moutarde et la Phacélie. Ces valeurs sont dues à de grandes variations de biomasse au sein même des traitements. Les traitements cités sont hétérogènes à cause du problème de semoir. Des valeurs faibles de matière sèche avec de grands écart-types rend la comparaison entre traitement avec le test de Tukey peu efficace.

Barbercheck et White (2017) mentionnent l'utilisation de mélanges plus diversifiés pour prévenir les différences d'une année à l'autre au niveau de la production globale de biomasse, mais aussi pour permettre au mélange de contribuer aux services écosystémiques désirés. Selon eux, une façon de se protéger contre la perte d'un service souhaité est d'augmenter la redondance dans le mélange avec des espèces supplémentaires qui remplissent les mêmes fonctions ou présentent des caractéristiques de croissance similaires. La redondance présente dans les mélanges à plus grande diversité augmente la probabilité qu'au moins une espèce sélectionnée pour remplir un certain rôle puisse prospérer. Ils voient cette idée comme un type de police d'assurance pour garantir que le mélange fournira les services pour lesquels il a été conçu.

Une étude menée par Sanderson *et al.* (2018) sur les couverts végétaux mixtes utilisés comme fourrage dans un environnement semi-aride contredit cette idée de police d'assurance. Dans leur expérience, ils comparent différentes combinaisons de couverts à partir de quatre espèces : deux graminées : Millet commun (C₃) et Triticale (C₄) ; et deux légumineuses : Radis fourrager (C₃) et Trèfle des prés (C₃). On y retrouve des couverts purs composés d'une seule espèce et des couverts mixtes avec différents ratios de ces quatre espèces. Ceux-ci ont été semés au printemps et récoltés en juillet et ont aussi été semés à la fin de l'été et récoltés en Octobre. Cette expérience a été répétée sur trois ans. Ils remarquent que la moyenne de rendement en matière sèche est de 30 à 60% supérieure pour les couverts mixtes par rapport aux couverts purs lorsqu'ils sont semés au printemps. Tandis que pour ceux semés à la fin de l'été, aucune différence significative n'est obtenue entre les différents couverts. A cause des conditions climatiques plus sévères en été, le rendement diminue pour tous les couverts. Seulement, l'utilisation de couverts plus diversifiés ne diminue pas le risque de faible production de matière de sèche dû au climat chaud et sec.

Les résultats de cette étude correspondent avec les résultats obtenus lors de l'essai (Tableau 7). Le rendement des différentes espèces étudiées est inférieur au rendement retrouvé dans la littérature (Annexe 8.3). De plus, aucune différence significative n'est obtenue entre le traitement Mélange 1 et les espèces le constituant cultivées en pure. Seule le traitement Trèfle d'Alexandrie, avec une production de 0,59 T de MS.ha⁻¹, est significativement plus faible que le Mélange 1. Ce traitement est très peu développé (dix fois moins) par rapport à ce qui est retrouvé dans la littérature (5,6-7,6 T de MS.ha⁻¹) pour une densité de semis semblable (Annexe 8.3).

Afin de mieux comprendre l'influence de la diversité sur la résilience du couvert face aux conditions climatiques variables, une nouvelle étude mettant en avant des indicateurs de développement des couverts peut être mise en place. Cette étude se déroulerait durant plusieurs années. Au lieu de comparer les différents traitements entre eux, comme dans l'étude décrite ci-dessus, les traitements seraient comparés à eux-mêmes selon un facteur climat. Cela permettrait de distinguer la résilience des couverts face aux conditions climatiques selon différents indicateurs préalablement choisis. Ensuite, cette résilience serait comparée selon les différents traitements.

5.4 Stabilité de la biomasse

Afin de mesurer la stabilité de la biomasse des couverts, le coefficient de variation des différents traitements est comparé. Un CV inférieur indique une variabilité plus faible et donc une plus grande stabilité dans la production de biomasse. Pour cette expérience, seule la variation spatiale pour chaque répétition des traitements est considérée.

Le traitement Mélange 1, Pois fourrager et Avoine brésilienne ont un coefficient faible par rapport aux autres traitements. Pour l'avoine brésilienne, le phénomène de tallage explique ce faible coefficient. Malgré des variations spatiales au sein du couvert, le tallage de l'avoine permet de compenser et homogénéiser le couvert. Pourtant, au niveau de l'avoine de printemps qui talle aussi, le coefficient est presque trois fois plus élevé que l'avoine brésilienne. Le pourcentage de germination expliquerait la différence entre les deux avoines. Comme observé dans le Tableau 3, l'avoine brésilienne a un pourcentage de germination de 65% tandis que l'avoine de printemps est de 35%. Ce faible taux de germination n'a pas pu être complètement compensé par le tallage, conduisant à une variabilité de biomasse plus élevée dans le couvert.

Si on compare le pourcentage de germination de tous les traitements avec leur coefficient de variation, on remarque qu'il existe une corrélation entre les deux. Au plus le pourcentage de germination est faible, au plus le CV est élevé et inversement. Afin de vérifier cette corrélation, le coefficient de corrélation linéaire de Bravais-Pearson est calculé pour les deux facteurs. Celui-ci est égal à -0,62. Il existe donc une forte relation négative entre le coefficient de variation et le pourcentage de germination des traitements comme décrit ci-dessus. Étant fortement influencé par un autre facteur, il n'est pas possible de déterminer s'il existe une relation entre le CV et la biomasse du couvert tel que décrit dans le point 1.1.13 de ce mémoire.

5.5 Suppression des adventices

Pour la présence des adventices dans les différents traitements, le Tableau 4 nous informe du pourcentage observé de celles-ci par rapport aux espèces présentes dans les couverts. La présence de repousses en froment est dominante par rapport aux autres adventices. Pour cette raison, le

pourcentage de repousses de froment est utilisé pour discuter des résultats au niveau de la suppression des adventices.

A partir des résultats, on distingue deux groupes : le premier groupe est composé des couverts avec une faible présence de froment dont les traitements Mélange 1, Mélange 2, Avoine de printemps, Avoine brésilienne et Trèfle d'Alexandrie. Le deuxième groupe est composé des couverts avec une forte présence de froment dont les traitements : Moutarde, Pois fourrager, Féverole et Phacélie.

Certains résultats semblent contradictoires avec ce qui est abordé au point 1.1.13 : Florence *et al.* (2019), précisent que l'augmentation de la productivité des plantes, tous traitements confondus, est associée à une suppression accrue des mauvaises herbes dans les systèmes agricoles. Or, dans le cas de cette étude, on remarque la forte présence de repousse pour le traitement Moutarde, malgré sa biomasse élevée. Inversement, le traitement Trèfle d'Alexandrie, avec une biomasse plus faible que la Moutarde, présente peu de repousses en froment.

La relation entre la biomasse aérienne et la diminution en adventices est mise en évidence par Webster *et al.* (2013). Dans leur étude, les couverts végétaux sont évalués pour leur effet sur l'établissement d'*Amaranthus palmeri* (adventice) dans un champ de coton. Les couverts étudiés comprennent du seigle et quatre légumineuses. Chaque légumineuse est évaluée seule et en mélange avec du seigle. La relation entre la matière sèche du couvert et la lutte contre *A. palmeri* à la fin de Juin dans les rangs de coton sans l'utilisation d'herbicides a été décrite par un modèle de régression log-logistique (Figure 17).

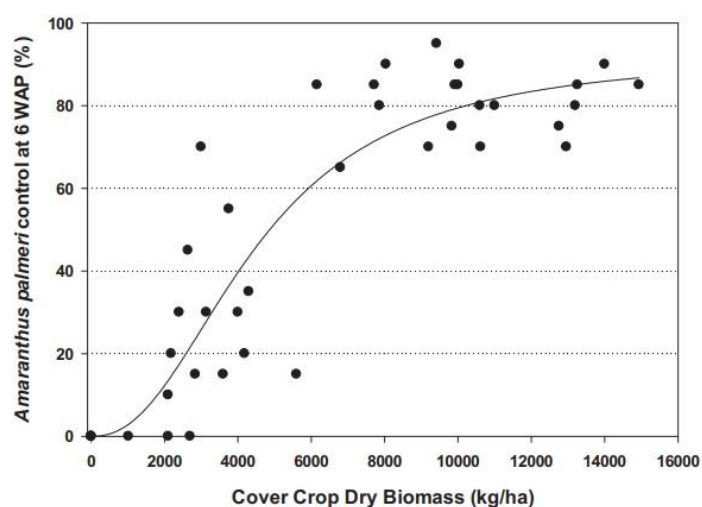


Figure 17 : Relation entre la matière sèche du couvert et la lutte contre *A. palmeri* à la fin de Juin dans les rangs de coton sans l'utilisation d'herbicides ($R^2=0,81$). (Webster *et al.*, 2013).

Pour les deux études décrites ci-dessus et l'essai mené dans le cadre de ce mémoire, la relation entre la productivité et la suppression des adventices est faite en comparant différentes espèces utilisées pour les traitements. Or, d'autres facteurs propres à chaque espèce qui influencent la suppression des adventices ne sont pas pris en compte. Par conséquent, il faudrait comparer pour une seule espèce ou un seul mélange d'espèces sa capacité à supprimer les adventices lorsque sa biomasse varie, par exemple sur plusieurs années.

Un autre facteur propre qui influence la suppression des adventices est la couverture du sol par le couvert. Un couvert doit se développer rapidement afin de concurrencer au plus vite les adventices. De plus, le couvert doit recouvrir entièrement le sol, ne laissant pas la place aux espèces non voulues pour se développer. Dans le cas de la moutarde, elle se développe rapidement, recouvrant 50% du sol en 55 jours après le semis (Tableau 5). Seulement, comme constaté sur la Figure 6, la Moutarde ne recouvre pas 100% le sol après s'être complètement développée. Cela permet aux repousses de froment de se développer sans difficulté dans les espaces non couverts. Malgré une production de biomasse élevée, la Moutarde ne concurrence pas les repousses de froment.

Le traitement Mélange 1, tout comme la Moutarde, recouvre rapidement le sol, atteignant 50% du sol couvert en seulement 46 jours après le semis (Tableau 5). Une fois la couverture végétale complètement développée, le couvert recouvre entièrement le sol (Figure 6), contrairement à la Moutarde. Par conséquent, les repousses de froment n'ont pas l'espace pour se développer correctement.

Le traitement Avoine brésilienne recouvre aussi le sol rapidement et complètement, empêchant les repousses de se développer. Ce recouvrement complet du sol est dû au phénomène de tallage de l'avoine. Cependant, le traitement Avoine de printemps met plus de temps pour recouvrir 50% du sol. Comme expliqué dans le point 5.4 ci-dessus, le faible pourcentage de germination de l'avoine de printemps n'a pas pu être complètement compensé par le tallage de celle-ci.

Le Trèfle d'Alexandrie et la Féverole sont les deux traitements les moins développés au niveau de la couverture du sol. Le taux d'expansion et le temps pour recouvrir 50% du sol de ces deux traitements n'est pas optimal pour un recouvrement rapide. Ce résultat est attendu pour la féverole. Dans le point 1.2.1, on précise que la féverole ne couvre pas bien le sol et est peu concurrentielle. Les adventices et repousses de froment peuvent s'installer facilement. Pour le trèfle d'Alexandrie, le résultat ne correspond pas aux attentes. En effet, Hollander *et al.* (2007) ont analysé les caractéristiques de différents trèfles, notamment le trèfle d'Alexandrie, utilisé comme couvert végétal pour la suppression des adventices. Ils ont déterminé pour le trèfle d'Alexandrie un recouvrement de 50% du sol 50 jours après le semis et un recouvrement total du sol après s'être complètement développé. Cette différence de résultat est probablement due aux problèmes rencontrés lors du semis. On peut remarquer dans le Tableau 3 que le pourcentage de germination du traitement Trèfle d'Alexandrie est de seulement 31%. Ce traitement ne s'est pas correctement développé. Un recouvrement peu développé et une production faible de biomasse en sont les conséquences.

Malgré cela, le pourcentage observé de repousses dans le traitement Trèfle d'Alexandrie reste minime par rapport à d'autres traitements dont le couvert est plus développé. Un facteur autre que la production de biomasse et le recouvrement du sol pourrait intervenir dans la suppression des adventices. Une piste à envisager serait l'effet allélopathique du trèfle d'Alexandrie. Dans les rapports de Ghorbanli *et al.* (2007) et Maighany *et al.* (2012), le potentiel allélopathique du trèfle d'Alexandrie est étudié. Ils ont découvert des substances allélochimiques produites par le trèfle pouvant inhiber la germination de graines de différentes espèces d'adventices. Ces substances sont solubles dans l'eau et d'autres sont solubles dans des solvants organiques tels que le méthanol mais l'identification de ces composés n'a pas encore été faite. Une étude plus poussée sur le Trèfle

d’Alexandrie et son potentiel allélopathique peut être menée pour mettre en avant les avantages de celui-ci dans la composition d’un couvert.

5.6 Interception du rayonnement solaire

En plus de la suppression des adventices, le recouvrement du sol par le couvert joue aussi un rôle dans l’interception du rayonnement solaire. L’importance du rayonnement intercepté par le couvert dans la variation de la production de matière sèche totale est une évidence depuis la fin du siècle passé (Gosse *et al.*, 1986). Une relation linéaire entre la matière sèche totale accumulée et la quantité d’énergie interceptée a été établie. De ce fait, un couvert avec un recouvrement total du sol produit plus de matière sèche. Un autre facteur à prendre en compte est l’indice de surface foliaire (LAI). Cet indice est le ratio de la surface totale supérieure des feuilles à la surface du sol sur laquelle la végétation se développe. Pour deux couverts ayant le même pourcentage de recouvrement de sol, celui avec un LAI plus élevé intercepte mieux le rayonnement solaire. Par facilité, le GAI est mesuré dans le cadre de ce mémoire (cfr point 4.3).

Le résultat de cette mesure pour l’expérience menée ne donne pas d’informations supplémentaires. Parmi tous les traitements, le Trèfle d’Alexandrie et la Féverole ont un GAI significativement plus faible que la plupart des autres traitements. Cette différence résulte du faible recouvrement du sol par les deux couverts. Parmi les couverts plus développés, aucune mesure de GAI ne sort du lot selon le test de Tuckey.

Comme aperçu dans le Tableau 6, les écart-types des mesures de GAI sont fort élevés, empêchant une claire distinction entre les différents traitements s’il y a lieu d’être. L’hétérogénéité des couvert dû aux problèmes lors du semis augmente la variation du GAI au sein d’un même couvert. De plus, La méthode employée pour mesurer le GAI n’est pas optimisée pour ce protocole. Deux points importants liés au protocole peuvent être mis en évidence :

Le premier point est le temps investi dans la prise de mesure. Le facteur limitant est la machine utilisée qui demande beaucoup de temps pour mesurer un échantillon. La main d’œuvre supplémentaire n’augmenterait donc pas la rapidité cette méthode. Dans le cas de cette expérience, la prise de mesure s’est déroulée sur deux semaines. Etaler la prise de mesures sur plusieurs semaines augmente la variation entre chaque répétition du même traitement pris à des moments différents.

Le deuxième point est le prélèvement d’échantillons destructifs pour le couvert. Malgré une large surface allouée à cette expérience, augmenter le nombre de répétitions dans chaque couvert pour augmenter la précision des mesures n’est pas envisageable afin de garder une surface viable de couvert pour le prélèvement des autres mesures.

Ces deux points ont déjà été mis en évidence dans le mémoire de Allart (2018). La même méthode a été utilisée pour déterminer le GAI de couverts végétaux composés d’un nombre varié d’espèces selon le traitement. Malgré des conditions climatiques favorables permettant un recouvrement total du sol de tous les traitements, la mesure du GAI de ceux-ci n’a montré aucun résultat significatif. Des écarts-types élevés ont aussi été observés pour tous les traitements.

5.7 Rétention et apport d'azote par le couvert

Les couverts végétaux jouent un rôle essentiel dans le cycle de l'azote des parcelles agricoles. Lorsque des matières végétales fraîches ou des résidus de culture sont ajoutés au sol, les microorganismes commencent à décomposer ce matériau. D'abord, l'ammonification se produit lorsque la matière organique est décomposée en composés aminés plus simples. L'azote est libéré sous forme d'ammoniac par digestion enzymatique de bactéries et de champignons, puis est dissous dans la solution du sol sous forme d'ammonium (NH_4^+). Ensuite, la nitrification se produit. Il s'agit d'un processus oxydant qui convertit l'ammonium (NH_4^+) en nitrate (NO_3^-). Les formes oxydées (NO_3^-) ou réduites (NH_4^+) d'azote peuvent être utilisées par la culture suivante, bien que la majeure partie de l'absorption de l'azote soit sous forme de nitrate. Le NO_3^- non absorbé sera lessivé (lixiviation) ou transformé en N_2 gazeux (dénitrification) et s'échappera dans l'atmosphère (Mahillon, 2018).

L'azote accumulé dans la biomasse des couverts lors de son développement provient du sol sous forme de NO_3^- principalement. Les couverts, appelés CIPAN (cfr point 1.1.4), vont piéger l'azote et l'empêcher d'être lessivé. Un autre processus appelé fixation de l'azote est aussi à prendre en compte pour la famille des légumineuses. Ce processus consiste à fixer le N_2 atmosphérique et le transformer en NH_4^+ par les bactéries symbiotiques rhizobium trouvées dans les nodules racinaires des légumineuses. Ces bactéries fournissent de l'azote à la légumineuse en échange d'hydrates de carbone. Par cette symbiose, les légumineuses ont la capacité d'apporter de l'azote supplémentaire à la parcelle agricole.

Dans le cadre de cette étude, un état des lieux du profil d'azote est fait sur la parcelle d'essai deux mois après la destruction du couvert. Grâce à celui-ci, on peut apercevoir dans un premier temps que l'ammonium présent dans la parcelle n'est pas variable selon les traitements et les horizons. Avec une moyenne de $3,65 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, la plupart du NH_4^+ a été transformé via la nitrification. En sachant que l'ammonification a lieu plus rapidement que la nitrification en termes de cinétique (Stefanakis *et al.*, 2014), on peut conclure que la décomposition des couverts par les microorganismes est complète au niveau du cycle de l'azote, rendant disponible l'azote du couvert pour la culture semée la semaine suivante la prise de mesure.

Au niveau du profil en nitrate, les deux plus hauts profils sont les traitements Moutarde et Pois fourrager pour l'horizon 0-60 cm. Pour ces deux traitements, leur avantage est un grand apport d'azote pour la culture suivante. Ce qui les différencie est l'origine de cette accumulation d'azote dans leur biomasse durant leur développement. On aperçoit dans le profil pour l'horizon 60-90 cm que le NO_3^- est plus élevé pour le traitement Pois fourrager que la Moutarde. En effet, la lixiviation potentielle des nitrates en dessous de 60 cm est un indicateur du service de rétention de l'azote. Pour la moutarde, de la famille des crucifères, son implantation est rapide et permet de piéger efficacement l'azote par rétention (cfr point 1.2.1). Elle est très utilisée comme CIPAN pour empêcher le lessivage de l'azote. Pour le pois fourrager, de la famille des légumineuses, sa capacité de fixer l'azote atmosphérique et de redistribuer l'azote emmagasiné permet d'augmenter cet apport pour les parcelles (cfr point 1.2.1). Seulement, le pois possède une faible capacité de rétention. L'azote présent dans le sol avant le couvert est lessivé dans l'horizon inférieur pour le traitement Pois fourrager.

En ce qui concerne les autres traitements, on peut remarquer de manière générale une tendance pour les graminées, la phacélie et les deux mélanges à mieux retenir l'azote potentiellement

lessivable (APL) avec une concentration plus faible en NO_3^- dans l'horizon 60-90 cm que les légumineuses (Figure 11). Cependant, il n'y a pas de différence significative entre eux. Ce qui pourrait expliquer ce résultat est la relation positive de la rétention d'azote avec la biomasse des couverts (Finney *et al.*, 2016). Le faible développement en biomasse des traitements cités (Figure 8) empêcherait une claire distinction entre eux pour leur capacité de rétention en APL. Il en va de même pour l'apport d'azote dans l'horizon supérieur (0-60 cm) lors de leur décomposition. De faibles apports pour les traitements cités sont corrélés à la production de matière sèche de ceux-ci avec un coefficient de corrélation linéaire de Bravais-Pearson égal à 0,56. Il existe donc une forte relation positive entre l'apport d'azote dans l'horizon supérieur et la production de biomasse des traitements.

En plus de la quantité de biomasse des traitements, le facteur qualité de cette biomasse influence l'apport en azote. Selon Finney *et al.* (2016), un indicateur de cette qualité est le rapport C/N de la biomasse du couvert. Si le matériel végétal a un rapport C/N supérieur à 25, la population microbienne utilisera l'azote du sol disponible pour décomposer le résidu. Ce processus est appelé immobilisation de l'azote. Si le rapport C/N du matériel végétal frais est inférieur à 25, la population microbienne libèrera de l'azote disponible supplémentaire (Shi Jianru, 2013). Dans le cas de cette étude, on remarque sur la Figure 9 que le rapport C/N de tous les traitements ne dépasse pas 14. Ce qui signifie tous les traitements libèrent de l'azote supplémentaire pour la culture suivante.

Dans l'ensemble, le rapport C/N de toutes les espèces étudiées est plus faible que ceux que l'on peut retrouver dans la littérature (Annexe 8.3). Les couverts ne s'étant pas complètement développés, leur rapport serait resté faible lors de la prise de mesure. En effet, le rapport d'une jeune plante est plus faible comparé à la plante mature (Advance cover crop, 2020).

Dans le Tableau 8, on remarque un rapport C/N plus élevé pour les graminées et phacélie et un rapport plus faible pour les légumineuses. Les légumineuses ont un rapport C/N faible et, par conséquent, une vitesse de décomposition rapide se traduisant par une libération très rapide de l'azote (Costa Lima Philipe, 2015). Cependant, le traitement Pois fourrager a un rapport C/N fort élevé comparé aux autres légumineuses tandis que le traitement Moutarde a un rapport faible par rapport à ce qui est attendu (cfr point 1.2.1). Il est difficile de trouver la cause de ces rapports particuliers. Pour la moutarde, une piste serait le développement peu avancé de celle-ci dû au retard de germination et aux conditions climatiques. Comme expliqué dans le point 5.3, la moutarde commençait seulement à monter en graine lors de la destruction de celle-ci. Par conséquent, elle n'a pas eu le temps de se lignifier, gardant un rapport C/N faible. Par ailleurs, une autre piste à envisager est la correction des données selon le protocole utilisé (cfr point 3.1.4). Lors de cette correction, le rapport C/N de la parcelle de référence (Mélange 1) juxtaposée au traitement Pois fourrager est bien plus faible que la moyenne des autres parcelles de référence. Un delta positif ($\Delta \approx 2$) est donc additionné aux mesures du traitement Pois fourrager. Bien entendu, ces pistes n'expliquent pas entièrement ces valeurs mesurées. Une nouvelle étude calculant les rapport C/N de ces espèces pourrait confirmer ou infirmer ce résultat.

La rapport C/N, bien qu'indicateur de la qualité de la biomasse du couvert, reste cependant un indicateur partiel de celle-ci. Les recherches menées à l'INRA de Reims (Nicolardot *et al.*, 1998) montrent que la disponibilité de l'azote dépend davantage de la localisation de cet élément dans les

différentes fractions biochimiques (solubles, hémicellulose, cellulose, lignine) que du rapport C/N global du produit.

5.8 Capacité de rétention en eau du sol

La capacité du sol à retenir l'eau ne varie pas selon les traitements pour cette étude (Figure 12). Par ailleurs, les écart-types des traitements sont fort élevés. On peut remarquer dans le Tableau 12 que cette grande variation est principalement dû à la mesure de la teneur en eau au point de flétrissement des échantillons. En effet, deux des quatre plaques poreuses utilisées lors de la manipulation ont eu des soucis d'étanchéité laissant échapper des bulles d'air via le tuyau de raccordement. L'équilibre de ces deux plaques n'a donc pas pu être vérifiée. La casserole a tout de même été ouverte lorsque les autres plaques présentes ont atteint l'équilibre. Malheureusement, l'agenda fort chargé des casseroles à haute pression et le manque de plaques étanches ont rendu impossible le lancement d'une nouvelle casserole avec les mêmes échantillons pour la vérification des données.

D'autres études ont été menées sur les couverts végétaux et leur influence sur la capacité du sol à retenir l'eau (Basche *et al.*, 2016 ; Irmak *et al.*, 2018 ; Landivar *et al.*, 1999). Selon celles-ci, les couverts végétaux n'ont aucune influence sur la capacité en eau du sol par rapport à une parcelle sans couvert. Une variation a cependant été remarquée par Basche *et al.* (2016) durant deux ans consécutifs où le climat était plus sec que la moyenne. La capacité était significativement plus élevée durant ces deux ans pour les traitements avec couverts que les traitements sans couverts. Une étude plus approfondie sur la résilience de la capacité de rétention en eau des sols couverts lors d'un climat plus sec pourrait être menée.

5.9 Critique

5.9.1 Estimation du carbone labile par la méthode POXC

L'utilisation du KMnO_4 comme indicateur pour mesurer le carbone labile, aussi appelé POXC, a été testée dans le cadre de cette étude afin de déterminer si la composition du couvert semé a une influence sur la fraction labile du carbone organique du sol. Sur base des résultats du point 4.8, aucun traitement n'est significativement différent des autres dans le contexte de l'étude. La question à se poser est si ce résultat démontre que la composition du couvert n'a aucune influence sur la quantité de POXC dans le sol ou si la méthode utilisée ne permet pas de déterminer les variations entre les différents traitements ?

Lors du test de cette méthode par l'équipe scientifique en comparaison aux méthodes plus établies, comme expliqué dans le point 1.2.2, l'équipe a testé celle-ci pour différentes conditions et gestions agricoles (Culman *et al.*, 2012). Parmi les différents sites testés, le sol d'un site a été testé en semant différents types de couverts végétaux la première année et ce, après 53 ans de monoculture de maïs. Parmi leurs résultats, la méthode POXC n'est pas sensible aux différents traitements.

D'autres études sur les couverts végétaux qui comparent le carbone labile mesuré par la méthode POXC arrive à la même conclusion (Johnson Anna Murry, 2020 ; Mingwei Chu, 2017 ; White *et al.*, 2020). D'après Johnson Anna Murry (2020), il n'y a aucune différence de POXC entre les traitements, mais la proportion de POXC est plus élevée la deuxième année d'essai que la première. Par ailleurs, Mingwei Chu (2017) explique que pour les différents traitements, le temps expérimental (trois ans pour son étude) peut être la principale raison pour laquelle aucune différence n'a été trouvée. Selon elle, l'augmentation de la teneur en carbone peut prendre plus de temps étant donné que l'effet du couvert peut ne pas être détectable dans les premières années suivant l'établissement.

Le facteur commun entre ces études ci-dessus et celle menée pour ce mémoire est le temps court d'application des couverts. Il semblerait qu'après seulement les premières années, aucune variation entre les traitements n'est visible avec la méthode POXC. Afin de confirmer cette hypothèse, l'application répétée des traitements et la prise de mesure du carbone labile sur un plus long laps de temps pourrait donner des informations supplémentaires.

Parmi les études citées, celle de White *et al.* (2020), s'est déroulée sur huit ans. Ils ont comparé trois couverts végétaux : Moutarde, Seigle et Seigle-légumineuse. Les légumineuses étaient composées de pois fourrager, féverole et deux types de trèfle. Les traitements ont été semés chaque année. Le traitement Seigle-légumineuse a aussi été semé tous les quatre ans (deux fois sur huit ans) comme traitement supplémentaire afin d'essayer de mettre en évidence l'influence de la fréquence d'utilisation des couverts sur les caractéristiques du sol, notamment le carbone labile. Ils ont déterminé que la fréquence annuelle des couverts a un effet sur la fraction labile mesurée par la méthode POXC après six ans de traitement, indiquant les bénéfices potentiels d'une culture de couverture végétale fréquente sur le carbone labile. L'augmentation de la fréquence des cultures de couverture ont augmenté le carbone labile, tandis que les différents types de couverts végétaux ne l'ont pas augmenté.

La fréquence et la durée d'application des couverts augmentent la fraction labile mesurée par la méthode POXC. Cette méthode est par conséquent sensible aux variations et peut être utilisée pour mesurer de manière simplifiée et peu coûteuse le carbone labile. Au niveau de la composition du

couvert utilisé, des recherches supplémentaires devraient se poursuivre afin de déterminer si la diversité des couverts a une influence sur le carbone labile. Un autre point à éclaircir est si la production de matière sèche des couverts ou des familles variées des espèces présentes dans le couvert influencerait la fraction labile du sol.

5.9.2 Estimation de l'activité des microorganismes du sol par la méthode TBI

La méthode de Tea Bag Index, basée sur l'enfouissement de deux sachets de thés commercialisés, se compose de deux paramètres : le taux de décomposition (k) et le facteur de stabilisation (S). Comme aperçu dans le point 4.9, ces deux paramètres ne varient pas en fonction des différents traitements. Cette méthode ne permet pas de différencier des variations de l'activité des microorganismes selon le couvert semé pour cette étude.

Comme expliqué dans le point 1.2.3, la méthode a été testée pour sa sensibilité et sa robustesse dans des écosystèmes et des biomes contrastés, confirmant que le TBI est suffisamment sensible pour faire la distinction entre ces systèmes. Au sein d'un écosystème, le TBI est sensible aux différences de circonstances abiotiques telles que la température du sol et la teneur en eau. Néanmoins, aucun test n'a été mené dans un champ pour tester la sensibilité de la méthode avec des couverts végétaux variés. Dans le cadre de cette étude, l'utilisation de cette méthode n'est pas efficace pour déterminer des variations dans l'activité biologique du sol selon la composition du couvert. Cependant, le contexte de l'étude peut jouer un rôle dans l'efficacité de la méthode. La matière sèche des couverts n'est pas significativement différente selon les traitements. Seul le traitement Moutarde possède une biomasse plus élevée. (cfr point 4.4). Les populations microbiennes et la diversité de celles-ci sont fortement influencées par la quantité et la qualité des résidus de culture et autres amendements organiques (Nair et Ngouajio, 2012). Par conséquent, les faibles variations de matière sèche entre les traitements ne permettraient pas de faire varier l'activité des microorganismes à un seuil qui serait détectable par la méthode des sachets de thé.

Un autre facteur à prendre en compte pour ce résultat est le moment où l'expérience s'est déroulée. Les couverts ont été détruits en hiver puis incorporés dans le sol. L'enfouissement des sachets de thé a eu lieu en avril après l'ensemencement de la culture suivante (betterave). L'expérience s'est terminée en juillet, dans une culture de betterave bien développée. D'après Finney *et al.* (2017), la présence de biomasse végétale vivante fournit des ressources, tel que des exsudats racinaires et des racines fines renouvelées, pour soutenir les populations microbiennes dans un système agricole. La culture de betteraves a donc pu influencer l'activité biologique du sol par sa présence dans toutes les bandes d'essai durant l'expérience atténuant ainsi les variations potentielles entre les différents traitements.

Il y a deux questions à se poser: Le choix des espèces pour le couvert végétal et l'utilisation de couverts multi-espèces influencent-ils l'activité biologique du sol ? S'il y a des variations entre les différents traitements, est-ce que la méthode TBI permet de détecter celles-ci ?

Afin de répondre à ces deux questions, une nouvelle étude qui tiendrait compte des points abordés ci-dessus pourrait être mise en place. La méthode TBI demande d'enfouir durant trois mois les sachets de thé. Dans l'idéal, il faudrait éviter d'utiliser cette méthode directement après la destruction du couvert en hiver à cause des basses températures qui diminuent l'activité des microorganismes. Pour éviter d'influencer les résultats avec la culture suivante, on pourrait envisager de lancer l'expérience durant le développement du couvert, lorsqu'il est semé. L'influence de la

composition du couvert sur l'activité des microorganismes avant sa destruction serait mesurée. Cependant, les exsudats racinaires et des racines fines renouvelées fournit par la présence de biomasse végétale vivante a un impact moins important sur l'activité des microorganismes que les résidus des couverts après leur destruction en hiver (Finney *et al.*, 2017). Les variations selon les traitements ne serait peut-être pas notable.

Par ailleurs, il faudrait mettre en place une méthode plus rigoureuse pour mesurer l'activité biologique du sol pour comparer les résultats de cette méthode avec ceux de la méthode TBI. Cela permettrait de déterminer s'il y a des variations selon le choix des espèces et si la méthode TBI permet de détecter ces variations. Un exemple de méthode rigoureuse est de mesurer le taux de respiration journalier d'échantillon de sol comme indicateur d'activité biologique du sol tel que décrit dans l'étude de Finney *et al.* (2017). Cette méthode consiste à incuber durant sept jours des échantillons de sol frais dans une bouteille scellée avec de l'eau déionisée. Toutes les 24 heures, un échantillon du gaz contenu dans la bouteille est collecté. Le bouchon est ensuite retiré après chaque collecte afin d'évacuer le CO₂ accumulé puis est remplacé après une heure. La concentration de CO₂ du gaz collecté est mesuré avec un analyseur de gaz infrarouge. Le CO₂ cumulé libéré au cours des sept premiers jours d'incubation est calculé par interpolation linéaire entre les dates d'échantillonnage. Ce CO₂ cumulé correspond au taux de respiration journalier des microorganismes présent dans l'échantillon.

Cette méthode a été testée dans le cadre du mémoire de Lefèvre Adeline (2018). Elle a été utilisée pour déterminer la respiration du sol un mois après la destruction de couverts végétaux composés d'un nombre varié d'espèces selon le traitement. Malgré des conditions climatiques favorables permettant un développement optimal de tous les traitements, la mesure de la respiration du sol de ceux-ci n'a montré aucun résultat significatif. Par ailleurs, l'application des traitements s'est déroulée sur une seule année. Répéter les traitements sur deux ou trois ans pourrait changer ce résultat.

6 Conclusion

Les couvertures végétales fournissent une variété de services agroécologiques importants pour les cultures suivantes. En général, ces couverts sont semés en culture pure ou en mélange simple de deux espèces graminées-légumineuses. Cependant, la théorie écologique et des preuves empiriques suggèrent que les services agroécologiques que fournissent les couverts pourraient être améliorés en cultivant des couverts végétaux avec des mélanges riches en espèces. Des recherches supplémentaires et une étude plus élargie sur les différents services fournis par les couverts est nécessaire afin de mieux comprendre l'intérêt des mélanges dans une rotation de culture.

Ce mémoire avait pour but d'étudier l'effet de la diversification des couverts sur plusieurs services agroécologiques. Pour cela, un mélange composé de six espèces a été étudié de même que ces six espèces cultivées en pure. Un couvert de moutarde et un autre mélange de référence ont aussi été étudiés. Plusieurs facteurs ont été mesurés : Le pourcentage de germination, la présence d'adventices, le recouvrement du sol, la production de biomasse, le Green Area Index, le rapport C/N, la rétention d'azote, la rétention en eau du sol, le carbone labile du sol et l'activité des microorganismes.

Pour les deux derniers facteurs cités, deux nouvelles méthodes simplifiées ont été testées pour leur efficacité : la méthode POXC et la méthode TBI pour la mesure du carbone labile et de l'activité des microorganismes respectivement.

Les résultats de cette étude ont été influencés par un climat chaud et sec durant le premier mois après le semis. Un développement ralenti des couverts a entraîné une diminution du pourcentage de germination, une production de matière sèche faible et une vitesse de recouvrement du sol ralentie pour tous les traitements. Certaines espèces telles que le trèfle d'Alexandrie et la Phacélie ont été plus atteintes que les autres espèces.

Pour le pourcentage de germination, la moyenne du mélange est supérieure à la moyenne de l'ensemble des traitements. Parmi les espèces le composant, les deux avoines, le pois fourrager et la féverole sont dominantes. La présence de ces espèces a permis au mélange de se développer correctement malgré les conditions météorologiques difficiles.

En ce qui concerne le mélange, la production de biomasse n'est pas significativement plus élevée que toutes les autres espèces le composant, cultivé en pure. Pour les autres facteurs mesurés : la stabilité de cette biomasse est élevée pour le mélange ainsi que le pois fourrager et l'avoine brésilienne. La proportion de repousses de froment est faible pour le mélange grâce à une biomasse relativement développée et un recouvrement rapide et complet du sol. Cependant, au niveau de l'apport de l'azote par le couvert pour la culture suivante, le pois fourrager est significativement plus élevé que le mélange.

La méthode POXC pour mesurer la fraction de carbone labile du sol est sensible aux variations et peut être utilisée pour mesurer de manière simplifiée et peu coûteuse le carbone labile. Les variations liées à la composition du couvert ne sont néanmoins pas perceptibles sur le court terme.

Les résultats pour la méthode TBI ne sont pas déterminants. Des études complémentaires nécessaires afin de déterminer si cette méthode simplifiée et peu coûteuse permettrait de détecter des variations liées à la composition du couvert.

7 Références bibliographiques

- Advance Cover Crops (2020). « Carbon Nitrogen Ratio ». Consulté le 18 décembre 2020. <https://advancecovercrops.com/resources-advanced-cover-crops/carbon-nitrogen-ratio/>.
- Allart Denis (2018). « Influence de la composition spécifique de couverts végétaux sur les paramètres physiques et chimiques du système sol-plante », mémoire de l'UCLouvain. 96pages.
- Arvalis (2020). « Les Fiches Couverts ». Consulté le 25 novembre 2020. <http://www.fiches.arvalis-infos.fr>.
- Basche Andrea D., Thomas C. Kaspar, Sotirios V. Archontoulis, Dan B. Jaynes, Thomas J. Sauer, Timothy B. Parkin, et Fernando E. Miguez (2016). « Soil Water Improvements with the Long-Term Use of a Winter Rye Cover Crop ». *Agricultural Water Management* 172: 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.006>.
- Braibant Jérôme et Morelle Max (2018). « L'Agriculture de Conservation en Wallonie : Diversité et verrouillages ». mémoire de l'UCLouvain. 206pages.
- Brooker Rob W., Alison E. Bennett, Wen-Feng Cong, Tim J. Daniell, Timothy S. George, Paul D. Hallett, Cathy Hawes, et al (2015). « Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology ». *New Phytologist* 206, n° 1: 107-17. <https://doi.org/10.1111/nph.13132>.
- Costa Lima Filipe (2015). « Fourniture en azote de résidus issus de différentes espèces légumineuses étudiées en conditions contrôlées au laboratoire ». Travail de stage. 26pages.
- Culman Steven W., Sieglinde S. Snapp, Mark A. Freeman, Meagan E. Schipanski, Josh Beniston, Rattan Lal, Laurie E. Drinkwater, et al (2012). « Permanganate Oxidizable Carbon Reflects a Processed Soil Fraction That Is Sensitive to Management ». *Soil Science Society of America Journal* 76, n° 2: 494-504. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0286>.
- Culman, Steve, Mark Freeman, et Sieglinde Snapp (2014). « Procedure for the Determination of Permanganate Oxidizable Carbon ». KBS POXC Protocol. 5pages.
- FAO (2020). « Conservation Agriculture ». Consulté le 10 octobre 2020. <http://www.fao.org/conservation-agriculture/en/>
- Farooq Muhammad, et Kadambot H. M. Siddique (2015). « Conservation Agriculture: Concepts, Brief History, and Impacts on Agricultural Systems ». In *Conservation Agriculture*, 3-17. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11620-4_1.
- Ferraz de Almeida Risely, Joseph Elias Rodrigues Mikhael, Fernando Oliveira Franco, Luna Monique Fonseca Santana, et Beno Wendling (2019). « Measuring the Labile and Recalcitrant Pools of Carbon and Nitrogen in Forested and Agricultural Soils: A Study under Tropical Conditions ». *Forests* 10, n° 7: 544. <https://doi.org/10.3390/f10070544>.
- Finney Denise M., Charles M. White, et Jason P. Kaye (2016). « Biomass Production and Carbon/Nitrogen Ratio Influence Ecosystem Services from Cover Crop Mixtures ». *Agronomy Journal* 108, n° 1: 39-52. <https://doi.org/10.2134/agronj15.0182>.

- Finney Denise M., Charles M. White, et Jason P. Kaye (2016). « Biomass Production and Carbon/Nitrogen Ratio Influence Ecosystem Services from Cover Crop Mixtures ». *Agronomy Journal* 108, n° 1: 39-52. <https://doi.org/10.2134/agronj15.0182>.
- Finney Denise, J.S. Buyer, et J.P. Kaye. (2017) « Living cover crops have immediate impacts on soil microbial community structure and function ». *Journal of Soil and Water Conservation* 72. <https://doi.org/10.2489/jswc.72.4.361>.
- Florence A. M., Higley L. G., Drijber R. A., Francis C. A., et Lindquist J. L. (2019). « Cover Crop Mixture Diversity, Biomass Productivity, Weed Suppression, and Stability ». *PLOS ONE* 14, n° 3 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206195>.
- Florence Angela (2016). « Cover Crop Mixture Diversity and Function ». Thèse. University of Nebraska-Lincoln. 141pages.
- Ghorbanli Mahlagha, Fariba Maighany, , Javad Khalghani, et Morteza Najafpour (2007). « Allelopathic Potential of Trifolium resupinatum and T. alexandrium on Seed Germination of Four Weed Species ». *Science Alert*. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2007.1141.1143>.
- Google Maps (2020). « Google Maps ». Consulté le 24 octobre 2020. <https://www.google.be/maps/@50.6829352,4.6366725,708m/data=!3m1!1e3>.
- Gosse Ghislain, Claude Varlet-Grancher, Raymond BONHOMME, Michel Chartier, Jean-Michel Allirand, et Gilles Lemaire. (1986) « Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal ». *Agronomie* 6, n° 1: 47-56.
- Govaerts B. et Draye X (2019). « LBIRA2101 : Biométrie ». Cours de la Faculté des Bioingénieurs. UCLouvain.
- Heymans Diane (2018). « Influence de la composition spécifique de couverts végétaux sur les paramètres physiques, chimiques et biologiques du système sol-plante : Étude des racines ». mémoire de l'UCLouvain. 110pages.
- Hirissou F. (2014). « Cultiver avec les couverts végétaux ». Devenir agriculteur. http://www.deveniragriculteur-npdc.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Nouvelle-Aquitaine/ca24_CouvertVegetaux_2014.pdf.
- Hobbs Peter R, Ken Sayre, et Raj Gupta (2008). « The role of conservation agriculture in sustainable agriculture ». *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363, n° 1491: 543-55. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2169>.
- Hollander N., L. Bastiaans, et M. Kropff (2007). « Clover as a cover crop for weed suppression in an intercropping design: I. Characteristics of several clover species ». <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2006.08.011>
- Hooper D. U., Chapin F. S., Ewel J. J., Hector A., Inchausti P., Lavorel S., Lawton J. H., et al (2005). « EFFECTS OF BIODIVERSITY ON ECOSYSTEM FUNCTIONING: A CONSENSUS OF CURRENT KNOWLEDGE ». *Ecological Monographs* 75, n° 1: 3-35. <https://doi.org/10.1890/04-0922>.

- Huston Michael (2014). « Disturbance, Productivity, and Species Diversity: Empiricism vs. Logic in Ecological Theory ». *Ecology* 95, n° 9: 2382-96. <https://doi.org/10.1890/13-1397.1>.
- Irmak Suat, Vasudha Sharma, Ali Mohammed, et Koffi Djaman (2018). « Impacts of Cover Crops on Soil Physical Properties: Field Capacity, Permanent Wilting Point, Soil-Water Holding Capacity, Bulk Density, Hydraulic Conductivity, and Infiltration ». *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)* 61. <https://doi.org/10.13031/trans.12700>.
- Javaux Mathieux (2018). « Utilisation de la casserole à basse pression pour des courbes de rétention en kopeckis ». Secteur des sciences et technologies ELI/ELIE/Génie Rural. Uclouvain. 14pages.
- Javaux Mathieux (2018). « Utilisation de la casserole à haute pression pour des courbes de rétention en kopeckis ». Secteur des sciences et technologies ELI/ELIE/Génie Rural. Uclouvain. 11pages.
- Jianru Shi (2013). « Decomposition and Nutrient Release of Different Cover Crops in Organic Farm Systems ». Thèse. University of Nebraska. 83pages.
- Johnson Anna Murry (2020). « Influence of Cover Crop Mixtures on Soil Health and Weed Control in Cotton Production Systems ». A thesis submitted to the Graduate Faculty of Auburn University. 99pages.
- Justes Eric, Julie Constantin, Caroline Dürr, Carole Hermon, Christine Le Bas, Catherine Mignolet, Isabelle Savini, et Olivier Réchauchère (2017). « Study Context and Methodology ». In *Cover Crops for Sustainable Farming*, 1-12. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-024-0986-4_1.
- Justes Eric, Laurent Bedoussac, Guenaëlle Corre - Hellou, Joëlle Fustec, Philippe Hinsinger, Marie-Hélène Jeuffroy, Etienne-Pascal Journet, Gaëtan Louarn, C. Naudin, et Elise Pelzer (2014). « Les processus de complémentarité de niche et de facilitation déterminent le fonctionnement des associations végétales et leur efficacité pour l'acquisition des ressources abiotiques ». *Innovations Agronomiques* 40: 1-24.
- Keuskamp Joost A., Bas J. J. Dingemans, Taru Lehtinen, Judith M. Sarneel, et Mariet M. Hefting (2013). « Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems ». *Methods in Ecology and Evolution* 4, n° 11: 1070-75. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12097>.
- Landivar Juan, Demóstenes Marcos Pedrosa de Azevedo, Robson Macedo Vieira, et Daryl Moseley (1999). « The Effect of Cover Crop and Crop Rotation on Soil Water Storage and on Sorghum Yield ». *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 34, n° 3: 391-98. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000300010>.
- Lefèvre Adélie (2018). « Influence de la composition spécifique de couverts végétaux sur les paramètres physiques, chimiques et biologiques du système sol-plante : Étude de la biologie du sol ». mémoire de l'UCLouvain. 110pages.
- Mahillon Jacques (2018). « LBIR1350 : Microbiologie générale ». Cours de la Faculté des Bioingénieurs. UCLouvain.

- Maighany Fariba, Mahlagha Ghorbanli, et Morteza Najafpoor (2012). « The Regional Institute - Effect of extracts of Persian and Berseem clover on peroxidase activity of field bindweed (*Convolvulus arvensis*) hypocotyl » http://www.regional.org.au/au/allelopathy/2005/2/1/2662_maighanyf.htm.
- Marquard Elisabeth, Alexandra Weigelt, Vicky M. Temperton, Christiane Roscher, Jens Schumacher, Nina Buchmann, Markus Fischer, Wolfgang W. Weisser, et Bernhard Schmid (2009). « Plant Species Richness and Functional Composition Drive Overyielding in a Six-Year Grassland Experiment ». *Ecology* 90, n° 12: 3290-3302. <https://doi.org/10.1890/09-0069.1>.
- Mingwei Chu (2017). « Effect of Different Cover Crop Species on Crop Production and Soil Health ». Master's Thesis, University of Tennessee. 95pages.
- Nair Ajay et Ngouajio Mathieu (2012). « Soil Microbial Biomass, Functional Microbial Diversity, and Nematode Community Structure as Affected by Cover Crops and Compost in an Organic Vegetable Production System ». *Applied Soil Ecology* 58 : 45-55. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.03.008>.
- Natagriwal (2020). « Les SIE, c'est quoi ? ». Consulté le 10 octobre 2020. <https://www.natagriwal.be/fr/content/les-sie-cest-quoi>
- Protect'eau (2020). « Feuillet PGDA III ». Consulté le 27 octobre 2020. <https://protecteau.be/resources/shared/telechargements/Feuillet%20PGDA%20III%20FR.pdf>.
- Ramirez-Garcia J., Gabriel J. L., Alonso-Ayuso M., et Quemada M. (2015). « Quantitative Characterization of Five Cover Crop Species ». *The Journal of Agricultural Science* 153, n° 7: 1174-85. <https://doi.org/10.1017/S0021859614000811>.
- Reynolds Matthew (2010). *Climate Change and Crop Production*. Volume 1 de CABI climate change series. 292pages.
- Sanderson Matt, Holly Johnson, et J.R. Hendrickson (2018). « Cover Crop Mixtures Grown for Annual Forage in a Semi-Arid Environment ». *Agronomy Journal* 110: 525. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.04.0228>.
- Schappert Alexandra, Matthias Schumacher, et Roland Gerhards (2019). « Weed Control Ability of Single Sown Cover Crops Compared to Species Mixtures ». *Agronomy* 9, n° 6: 294. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060294>.
- Smith Richard G., Lesley W. Atwood, et Nicholas D. Warren (2014). « Increased Productivity of a Cover Crop Mixture Is Not Associated with Enhanced Agroecosystem Services ». *PLOS ONE* 9, n° 5 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097351>.
- SPW. « Carte des Sols de Wallonie ». Consulté le 24 octobre 2020. <http://geoapps.wallonie.be/Cigale/Public/#CTX=CNSW#BBOX=168174.90268008117,169706.8432439623,151792.94521895942,152900.22868352634>.
- Stefanakis Alexandros, Christos S. Akratos, et Vassilios A. Tsihrintzis (2014). « Chapter 5 - Treatment Processes in VFCWs ». In *Vertical Flow Constructed Wetlands*, 57-84. Boston: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404612-2.00005-2>.

- Teatime4Science (2020). « Background & Relevance ». Consulté le 29 novembre 2020. <http://www.teatime4science.org/about/background-relevance/>.
- Tiwari Sachin (2019). « Cover Crop Mixture Diversity and Function » IJARAAS, Volume 1, Issue 1, pp. 8-13.
- Tribouillois Hélène, Carolyne Dürr, Didier Demilly, Marie-Hélène Wagner, et Eric Justes (2016). « Determination of Germination Response to Temperature and Water Potential for a Wide Range of Cover Crop Species and Related Functional Groups ». *PLOS ONE* 11, n° 8. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161185>.
- Webster Theodore, Brian Scully, Timothy Grey, et A. Culpepper (2013). « Winter cover crops influence *Amaranthus palmeri* establishment ». *Crop Protection* 52: 130-35. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2013.05.015>.
- Weil Ray R, Kandikar R Islam, Melissa A Stine, Joel B Gruver, et Susan E Samson-Liebig (2003). « Estimating Active Carbon for Soil Quality Assessment: A Simplified Method for Laboratory and field Use ». *American Journal of Alternative Agriculture* 18, n° 1: 15.
- Wendling Marina, Lucie Büchi, Camille Amossé, Bernard Jeangros, Achim Walter, et Raphaël Charles (2017). « Specific Interactions Leading to Transgressive Overyielding in Cover Crop Mixtures ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 241: 88-99. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.03.003>.
- Weykmans S. (2018). « Floraison moutarde ». <http://www.greenotec.be/pages/recherche/cultures-intermediaires-infotechnique/floraison-moutarde.html>.
- White Charles et Mary Barbercheck (2020). « Making the Most of Mixtures: Considerations for Winter Cover Crops ». Penn State Extension. Consulté le 18 décembre 2020. <https://extension.psu.edu/making-the-most-of-mixtures-considerations-for-winter-cover-crops>.
- White Charles M., S. Tianna DuPont, Mena Hautau, Dave Hartman, Denise M. Finney, Brosi Bradley, James C. LaChance, et Jason P. Kaye (2017). « Managing the Trade off between Nitrogen Supply and Retention with Cover Crop Mixtures ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 237: 121-33. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.016>.
- White Kathryn E., Eric B. Brennan, Michel A. Cavigelli, et Richard F. Smith (2020). « Winter Cover Crops Increase Readily Decomposable Soil Carbon, but Compost Drives Total Soil Carbon during Eight Years of Intensive, Organic Vegetable Production in California ». *PLOS ONE* 15, n° 2. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228677>.
- Wikipédia (2020). « Effets écologiques de la biodiversité ». Consulté le 26 octobre 2020. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Effets_%C3%A9cologiques_de_la_biodiversit%C3%A9&oldid=175954281.
- Wortman S. E., Francis C. A., et Lindquist J. L. (2012). « Cover Crop Mixtures for the Western Corn Belt: Opportunities for Increased Productivity and Stability ». *Agronomy Journal* 104, n° 3: 699-705. <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0422>.

8 Annexes

8.1 Itinéraire technique de la parcelle d'expérimentale

VUE GLOBALE DE L'OPÉRATION contrat lln a cote garde, 7,82ha

PROPRIÉTÉS

Ferme	Agrotour sprl
Nom	Agrotour Sprl
Année de culture	2020
Culture	Betterave à sucre
Variété	
Objectif	
Type de sol	
Première récolte possible	29 octobre 2020 00:00
Culture précédente:	
Culture de couvert:	
Applicateur(s):	Agrotour Sprl (AS)
Coordonnées:	GPS: 50.68245,4.63624

TRAVAIL DES SOLS

Date	AP	Opération	Profondeur	Largeur	SA
22 jan. 2020	AS	Broyage			7,82ha
1 avr. 2020	AS	Préparation du sol vibro + rotative			7,82ha
1 avr. 2020	AS	Préparation du sol vibro + rotative			7,82ha

FERTILISATION

Date	AP	Méthode	Produit	Quantité SA	/ha	Total
23 août 2019	AS	Application d'engrais	Chlorure pdt 40 - 6 - 4	7,82ha	1000,00kg	7820,00kg
30 mars 2020	AS	Application d'engrais	Urean 30 N	7,82ha	482,00l	3769,24l
29 mai 2020	AS	Pulvérisation en champ	effoligo	7,82ha	3,00l	23,46l
			EPSO Microtop	7,82ha	12,50kg	97,75kg
9 juin 2020	AS	Pulvérisation en champ	EPSO Combitop	7,82ha	5,00kg	39,10kg
			EPSO Microtop	7,82ha	10,00kg	78,20kg

N kg/ha	N total	P kg/ha	P total	K kg/ha	K total
190,87	1492,62				

Figure 18 : Partie de l'itinéraire technique réalisée par un entrepreneur en vue de la préparation de culture de betterave (culture suivant le couvert végétal). Source : Hugues Falys, Responsable Opérationnel de la ferme de Marbaix.

8.2 Graphique de température et de précipitation lors de l'essai

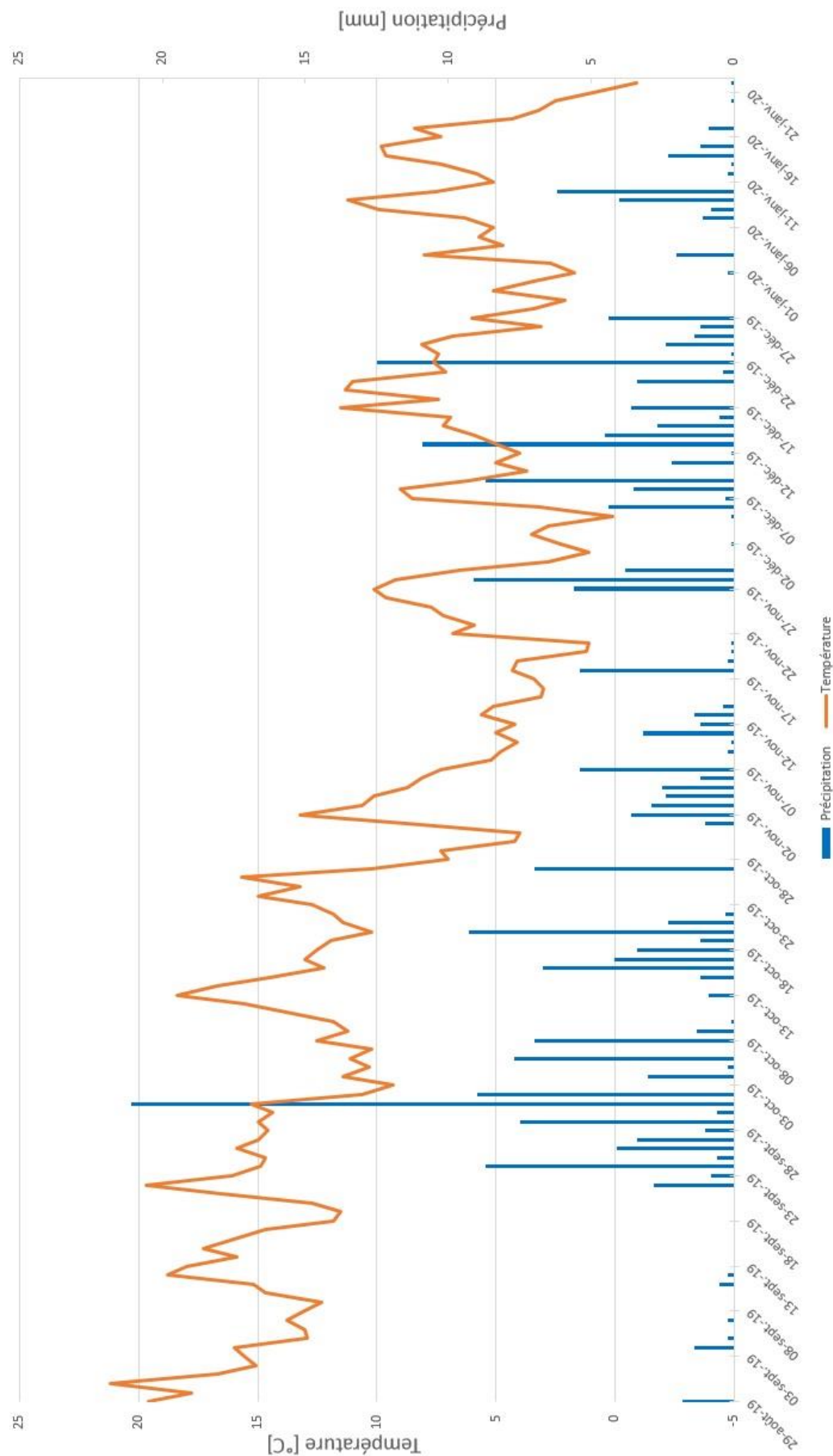


Figure 19 : Température et précipitation de la région de Louvain-la-Neuve du 29/9/2019 au 22/01/2020 Source : www.pameseb.be

8.3 Tableau récapitulatif de plusieurs espèces utilisées comme couvert végétal

Tableau 14 : Tableau récapitulatif de plusieurs espèces utilisées comme couvert végétal. Pour chaque espèce : Prix (€/ha⁻¹), densité de semis recommandée, poids de mille grains (PMG), familles végétales, types racinaires, rapport C/N des parties aériennes et racinaires (T de MS.ha⁻¹) et la sensibilité au gel. Source : Heymans (2018).

Espèces de couvert	Prix (€/ha ⁻¹) ¹	Densité de semis individuel (kg.ha ⁻¹) ¹	PMG	Famille végétale	Type racinaire ²	C/N aérien ³	C/N racinaire ³	Biomasse aérienne (tMS.ha ⁻¹) ³	Biomasse racinaire (tMS.ha ⁻¹) ³	Destruction au gel ⁴
Avoine brésilienne	46.2	35	16,9	Graminée	Fasciculée : I	24,1	25,6	6,4-6,6	1,2-1,6	S
Trèfle d'Alexandrie	33	15	3,1	Légumineuse	Pivotante : I	15,7	14,6	5,6-7,6	1-1, 8	S
Vesce commune	60	50	30 à 75	Légumineuse	Pivotante : S	12,4	13,4	3,3-6,8	0,5-1	S
Féverole	120	100-200	350-700 ⁵	Légumineuse	Pivotante : P	21,4	22,5	7-8,6	1,5-2	S
Moutarde	11.25	8-10	7	Crucifère	Pivotante : P	35,3	59	6-7,4	1,1-2,7	S
Radis chinois	66	10-12	14	Crucifère	Pivotante : P	18,6	26,1	4,3-8,3	2,8-4,8	S
Tournesol	15 ⁶	20	47,3	Astéracée	FP	29,8	66,8	9,2-11	1,5-2,7	G
Nyger	16.9 ⁶	8-12	3	Astéracée	FP	25	50,4	6,5-8,7	1,6-3	G
Lin	34 ⁶	50	7	Linacées	Pivotante : S	22,4	27,4	4,3-6,5	0,6-1,2	S
Phacélie	22.16	8	2	Hydrophyllacée	Pivotante : S	20,6	31,1	5-7,6	0,9-1,5	S
Sarrasin	37.5 ⁶	40-60	21,5	Polygonacée	Pivotante : S	28,9	23,6	2,4-3,2	0,6-1	G

¹ Les prix viennent de ceux proposés par Régénaterre dans leur groupe d'achats de semence.

² S : surface, I : intermédiaire, P : profond, FP : fasciculé profond

³ Les rapports C/N et les biomasses viennent de l'article de (Wendling *et al.* 2016). Les biomasses aériennes ont été réalisées 85 jours après avoir semé et les biomasses racinaires ont été prélevées 118 jours après avoir semé les couverts sur une profondeur de 50 cm.

⁴ S : sensible au gel (si la plante atteint un stade de croissance où la plante ne résiste pas à des températures trop froides) et G : gélif (détruit dans tous les cas par des températures négatives)

⁵ Essayer d'avoir le plus petit possible pour une plus grande densité de semis

⁶ Selon les prix de semences alimentaires

Etude comparative entre un couvert végétal multi-espèce et des couverts pures des espèces constituant le mélange

Présenté par Olivier Mees

Les couvertures végétales fournissent une variété de services agroécologiques importants pour les cultures suivantes. En général, ces couverts sont semés en culture pure ou en mélange simple de deux espèces graminées-légumineuses. Cependant, la théorie écologique et des preuves empiriques suggèrent que les services agroécologiques que fournissent les couverts pourraient être améliorés en cultivant des couverts végétaux avec des mélanges riches en espèces.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier l'effet de la diversification des couverts sur plusieurs services agroécologiques. Pour cela, un mélange composé de six espèces est étudié de même que ces six espèces cultivées en pure. Un couvert de moutarde et un autre mélange de référence sont aussi étudiés. Plusieurs facteurs sont mesurés : Le pourcentage de germination, la présence d'adventices, le recouvrement du sol, la production de biomasse, le Green Area Index, le rapport C/N, la rétention d'azote, la rétention en eau du sol, le carbone labile du sol et l'activité des microorganismes.

Deux méthodes simplifiées et peu coûteuses sont testées pour mesurer le carbone labile et l'activité des microorganismes. La méthode POXC consiste à utiliser du permanganate de potassium pour doser le carbone labile oxydable par celui-ci. Une lecture au spectromètre du KMnO_4 restant permet de déterminer la concentration du carbone labile de l'échantillon de sol. La méthode TBI demande l'utilisation de sachets de thé disponibles dans le commerce en tant que kits de test pour. Les sachets sont enterrés durant trois mois et leur différence de poids permet de mesurer l'activité des microorganismes du sol.

Un climat chaud et sec durant le premier mois après le semis entraîne une diminution du pourcentage de germination, une production de matière sèche faible et une vitesse de recouvrement du sol ralentie pour tous les traitements.

En ce qui concerne le mélange, la production de biomasse n'est pas significativement plus élevée que toutes les autres espèces le composant, cultivé en pure. La stabilité de cette biomasse est élevée pour le mélange. La proportion de repousses de la culture précédente est faible grâce à une biomasse relativement développée et un recouvrement rapide et complet du sol. Cependant, au niveau de l'apport de l'azote par le couvert pour la culture suivante, une espèce le composant est significativement plus élevé que le mélange.

La méthode POXC pour mesurer la fraction de carbone labile du sol est sensible aux variations et peut être utilisée pour mesurer de manière simplifiée et peu coûteuse le carbone labile. Les variations liées à la composition du couvert ne sont néanmoins pas perceptibles sur le court terme.

Les résultats pour la méthode TBI ne sont pas déterminants. Des études complémentaires sont nécessaires afin de déterminer si cette méthode simplifiée et peu coûteuse permettrait de détecter des variations liées à la composition du couvert.