

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

Présenté par Adélise Lefèvre

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

Lecteurs : Prof. Xavier Draye (UCL/ELI/ELIA)
Ir. Frédéric Muratori (Regenacterre)
Mr. Marc Migon (UCL/ELI/ELIA)

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

Remerciements

J'adresse mes remerciements aux personnes sans lesquelles la réalisation de ce mémoire n'aurait pas été possible.

Un tout grand merci à mon promoteur, le professeur Pierre Bertin, d'avoir permis la réalisation de ce mémoire au sein du labo ECAV, mais aussi pour son soutien et son temps accordé à améliorer mon travail. Dans les membres du labo ECAV, je tiens tout particulièrement à remercier Thomas Dagbert et Pierre Van Thorre pour leur aide précieuse lors des nombreux travaux sur le terrain et en laboratoire. Merci à Guillaume Lobet qui a pris de son temps pour m'aiguiller dans l'utilisation du logiciel R studio. Merci aussi à Valentine Calay pour son aide et ses commentaires sur le protocole de respirométrie, ainsi que pour sa participation sur le terrain et en laboratoire.

Je remercie également Marc Migon pour tout le temps accordé à m'accompagner lors des récoltes et à m'initier à l'identification des carabes. Merci à lui d'avoir partagé sa passion d'entomologiste et de m'avoir sensibilisée à l'importance des insectes dans notre écosystème.

Merci à Frédéric Muratori pour la mise en place du projet et merci à Nicolas Braibant pour le travail réalisé sur la parcelle expérimentale mais aussi pour m'avoir éclairée sur divers travaux agricoles, tels que la moisson ou le roulage des couverts.

Merci à Diane Heymans, Denis Allard et Isaure Lohest pour le travail d'équipe réalisé et merci d'avoir rendu la réalisation de ce mémoire plus conviviale.

Finalement, un tout grand merci à mes parents pour la relecture de mon travail et leurs conseils avisés. Merci également à Benjamin, Florent, Élise et à mes amis de m'avoir soutenue tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Table des matières

Introduction	13
Partie 1 : État de l'art	15
1 – Systèmes agraires de nos régions au cours du temps.....	15
2 – Passage à une agriculture de conservation	16
2.1. – Pratique du non-labour	17
2.2. – Couverture végétale	17
2.3. – Rotations culturales.....	18
2.4. – Simultanéité des trois leviers.....	18
3 – Les couverts végétaux dans nos régions.....	19
3.1. – Rôle de piège à nitrates	19
3.2. – Restitution de la matière organique et des éléments minéraux	19
3.3. – Amélioration de la structure du sol.....	21
3.4. – Effets supplémentaires des couverts végétaux.....	22
3.5. – Choix des espèces végétales du couvert	23
3.6. – Situation actuelle : Place des légumineuses et mélanges d'espèces	26
4 – Couverts végétaux et biologie du sol	28
4.1. – La place des bio-indicateurs dans l'analyse du sol	30
4.2. – Les vers de terre, la première biomasse terrestre	30
4.3. – Les carabes, insectes alliés de l'agriculture.....	33
4.4. – Respiration hétérotrophe des micro-organismes du sol	35
Partie 2 : Objectifs du mémoire.....	39
Partie 3 : Matériel et méthodes	41
5 – Parcelle d'intérêt.....	41
5.1. – Historique de la parcelle.....	41
5.2. – Localisation du champ d'expérimentation.....	41
5.3. – Choix de la parcelle.....	42
6 – Plan expérimental	42
7 – Méthodes d'analyse	45
7.1. – Analyses communes.....	45
7.2. – Analyses individuelles.....	50
8 – Traitement statistique.....	56
8.1. – Moyennes et écart-types	56

8.2. – Variabilité due au terrain	57
8.3. – Analyse de la variance.....	57
8.4. – Corrélation	60
8.5. – Régression linéaire	60
Partie 4 : Résultats	61
9 – Mesures communes	61
9.1. – Couverture du sol.....	61
9.2. – Green area index (GAI)	63
9.3. – Biomasse aérienne	65
9.4. – Tea bag index (TBI)	67
10 – Mesures individuelles	68
10.1. – Recensement de lombrics.....	68
10.2. – Recensement de carabes	70
10.3. – Recensement d’autres espèces.....	77
10.4. – Mesures de respirométrie	77
11 – Corrélations	80
Partie 5 : Discussion	85
12 – Mesures communes	85
12.1. – Couverture du sol.....	85
12.2. – Biomasse aérienne	87
12.3. – Biomasse, couverture du sol et GAI	88
13 – Mesures individuelles	89
13.1. – Recensement de lombrics.....	89
13.2. – Recensement de carabes	90
13.3. – Respirométrie.....	92
13.4. – Lombrics, micro-organismes et Tea Bag Index (TBI).....	94
14 – Bilan des mesures effectuées.....	95
Conclusion et perspectives	97
Bibliographie	99

Liste des abréviations

FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
INRA	Institut national de la recherche agronomique
IRM	Institut royal météorologique
SIE	Surface d'intérêt écologique
C/N	Rapport carbone/azote
D1 et D2	Densité de semis 1 et densité de semis 2
T MS/ha	Tonnes de matière sèche par hectare
GAI	Green Area Index
TBI	Tea Bag Index
ANOVA	Analyse of variance
DDL	Degré de liberté
Nbr	Nombre
C _{org}	Carbone organique
V _(i)	Taux d'expansion au point d'inflexion
t0 _(i)	Nombre de jours après le semis
Ish	Indice de diversité de Shannon
r	Coefficient de Pearson
r _s	Coefficient de Spearman
R ²	Coefficient de détermination
μ	Moyenne
σ	Écart-type

Liste des figures

Figure 1 : Effets principaux de la présence de couverts végétaux et de la pratique du non-labour sur des cultures de sorgho (Frasier et al., 2016).	22
Figure 2 : Liste des principales espèces végétales utilisées en couverts végétaux et leurs caractéristiques (Chambre de l'agriculture de l'Isère, 2017).	25
Figure 3 : Biomasse microbienne (exprimée en % du carbone organique) et azote minéralisé en 28 jours (en % de l'azote total) selon différents types de couverts (Bouthier et al., 2017).	26
Figure 4 : Tableau comparatif des différentes caractéristiques des principales familles de couverts (Euben et al., 2017).	28
Figure 5 : Classification des fonctions des organismes du sol dans 4 groupes principaux (Bertin, 2016 (2)).	29
Figure 6 : Schéma représentant les trois groupes principaux de vers de terre (Pfiffner, 2012).	31
Figure 7 : Influence du labour (T), de l'application de nématicides (N) et d'engrais (F) sur la population de vers de terre et des nématodes parasites <i>Radopholus similis</i> . F-N-T- signifie l'absence de F, N et T et F+N+T+ signifie la présence intensive de chacun d'eux. (Clermont-Dauphin et al., 2014).	32
Figure 8 : Anatomie d'un Carabidae en vue dorsale (Quel est cet animal, 2010).	34
Figure 9 : Photo aérienne du champ d'expérimentation et de la parcelle expérimentale (cadre vert) à Vieuxart (GeoPortail Wallonie, 2016).	41
Figure 10 : Plan expérimental de la parcelle d'intérêt. Le chemin et le bois de la Figure 9 y sont représentés afin de déterminer l'orientation du plan expérimental.	43
Figure 11 : Photo aérienne de la parcelle d'intérêt, en période de fin de développement des couverts végétaux (Google Earth, 2017).	45
Figure 12 : Représentation de cadres disposés au-dessus des couverts végétaux à différents stades de développement. De gauche à droite les valeurs de la couverture en % sont : 21, 53 et 89.	46
Figure 13 : Tri des différentes parties végétales des espèces des couverts végétaux avant passage dans le scanneur.	47
Figure 14 : Sonde utilisée pour échantillonnage de la biomasse.	48
Figure 15 : Arrosage du sol par un mélange d'eau et moutarde.	51
Figure 16 : Représentation des emplacements des pitfall traps (x).	52
Figure 17 : Pitfall trap sous le couvert moutarde.	52
Figure 18 : Etapes de tri et d'identification des échantillons d'insectes. Photo à l'extrême droite : Premier tri des carabes en fonction de leur taille avant passage au microscope.	53
Figure 19 : Prélèvements de sol frais à la tarière et tamisage à 5 mm.	54
Figure 20 : Schéma d'un échantillon de respirométrie.	55
Figure 21 : A gauche : bocal fermé hermétiquement et contenant du sol frais et une solution de NaOH. A droite : mesure de la conductivité de la solution de NaOH à l'aide du conductimètre.	56
Figure 22 : Évolution de la couverture du sol (%) en fonction du nombre de jours après le semis (20 juillet 2017) des différents traitements pour la densité D1.	62

Figure 23 : Green Area Index (GAI) des différents traitements pour la densité D1. Les prélèvements ont été réalisés durant la semaine du 18 octobre.	64
Figure 24 : Biomasse aérienne (T MS/ha) des différents traitements aux deux densités D1 et D2. Les prélèvements ont été effectués le 18 décembre 2017.	65
Figure 25 : Production de biomasse aérienne en fonction du nombre d'espèces présentes dans les mélanges, pour la densité D1.	67
Figure 26 : Vitesse de décomposition des résidus végétaux des différents traitements pour la densité 1. Les prélèvements de sachets de thé ont été effectués début décembre, après 2 mois d'incubation.	68
Figure 27 : Population de lombrics récoltés à 3 répétitions sur 1 mètre carré de chacun des différents traitements pour la densité D1. Les prélèvements de lombrics ont été réalisés dans le courant du mois d'octobre.	70
Figure 28 : Nombre total de carabes recensés en fonctions des différents traitements aux densités D1 et D2 durant toute la période d'expérimentation.	72
Figure 29 : Indice de diversité spécifique Ish des différents traitements aux deux densités D1 et D2 durant toute la période d'expérimentation.	75
Figure 30 : Nombre d'autres espèces recensées en fonction des différents traitements sous la densité 1.	77
Figure 31 : Émission moyenne de CO_2 par gramme de sol sec en fonction du temps pour chacun des traitements de densité 1.	78
Figure 32 : Émission moyenne de CO_2 par gramme de carbone organique en fonction du temps pour chacun des traitements de densité 1.	80
Figure 33 : Relation entre les variables Ish et biomasse.	81
Figure 34 : Représentation des coefficients de détermination R^2 de toutes les variables étudiées, comparées deux à deux.	82
Figure 35 : Représentation des coefficients de corrélation de Pearson (r) de toutes les variables étudiées, comparées deux à deux.	82
Figure 36 : Représentation des coefficients de corrélation de Spearman (r_s) de toutes les variables étudiées, comparées deux à deux.	83

Liste des tableaux

Tableau 1 : Estimations et écarts-types des paramètres du modèle de l'évolution de la couverture du sol des couverts végétaux pour les densités D1 et D2.	62
Tableau 2 : Résultats de l'ANOVA 1 pour les paramètres t0 et v. Le facteur testé est le « Traitement ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et Pr>F la p-valeur associée à F. Une p-valeur (Pr>F) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée.	63
Tableau 3 : Estimations et écarts-types des paramètres du modèle de l'évolution de la couverture du sol des couverts végétaux pour les 5 traitements sous densité D1. Les lettres de groupes sont données pour le paramètre t0.....	63
Tableau 4 : Résultats de l'ANOVA 1 pour le GAI. Le facteur testé est le « Traitement ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et Pr>F la p-valeur associée à F. Une p-valeur (Pr>F) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée.....	64
Tableau 5 : Moyennes et écart-types des mesures de GAI des différents traitements de densité D1.....	64
Tableau 6 : Résultats de l'ANOVA 1 pour le TBI. Le facteur testé est le « Traitement ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et Pr>F la p-valeur associée à F. Une p-valeur (Pr>F) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée.....	67
Tableau 7 : Moyennes et écart-types des mesures de TBI des différents traitements de densité D1.....	68
Tableau 8 : Résultats de l'ANOVA 1 pour le comptage de lombrics. Le facteur testé est le « Traitement ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et Pr>F la p-valeur associée à F. Une p-valeur (Pr>F) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée.	69
Tableau 9 : Moyennes et écart-types des mesures de populations de lombrics des différents traitements de densité D1.....	69
Tableau 10 : Résultats de l'ANOVA 3 pour le nombre total de carabes recensés. Les facteurs testés sont le « Traitement », la « Densité » et la « Date ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et Pr>F la p-valeur associée à F. Une p-valeur (Pr>F) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée.	71
Tableau 11 : Résultats de l'ANOVA 1 pour le nombre total de carabes recensés. Le facteur testé est la « Date ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et Pr>F la p-valeur associée à F. Une p-valeur (Pr>F) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée.	71
Tableau 12 : Moyennes, écart-types et groupes de Tukey des mesures du nombre total de carabes recensés lors des différentes dates pour l'ensemble des traitements de densité D1.	71
Tableau 13 : Résultats de l'ANOVA 1 pour le nombre total de carabes recensés. Le facteur testé est le « Traitement ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et Pr>F la p-valeur associée à F. Une p-valeur (Pr>F) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée.	72

Tableau 14 : Moyennes, écart-types et groupes de Tukey des mesures du nombre total de carabes recensés des différents traitements de densité 1 sur l'ensemble de la période d'expérimentation.	72
Tableau 15 : Résultats de l'ANOVA 3 pour Ish. Les facteurs testés sont le « Traitement », la « Densité » et la « Date ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et $Pr > F$ la p-valeur associée à F. Une p-valeur ($Pr > F$) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée.	73
Tableau 16 : Résultats de l'ANOVA 1 pour Ish. Le facteur testé est la « Date ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et $Pr > F$ la p-valeur associée à F. Une p-valeur ($Pr > F$) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée.	74
Tableau 17 : Moyennes, écart-types et groupes de Tukey des mesures de Ish lors des différentes dates pour l'ensemble des traitements de densité D1.	74
Tableau 18 : Résultats de l'ANOVA 1 pour Ish. Le facteur testé est le « Traitement ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et $Pr > F$ la p-valeur associée à F. Une p-valeur ($Pr > F$) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée.	74
Tableau 19 : Moyennes, écart-types et groupes de Tukey des mesures de Ish des différents traitements de densité 1 sur l'ensemble de la période d'expérimentation.	75
Tableau 20 : Nombre total d'espèces recensées de la famille des Carabidae, à l'aide des pièges répartis sur toute la parcelle expérimentale. Les espèces recensées sont réparties entre les 6 dates de prélèvements des pièges (15/09, 29/09, 13/10, 27/10, 10/11 et 24/11).	76
Tableau 21 : Résultats de l'ANOVA 1 pour le nombre d'autres espèces. Le facteur testé est le « Traitement ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et $Pr > F$ la p-valeur associée à F. Une p-valeur ($Pr > F$) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée.	77
Tableau 22 : Résultats de l'ANOVA 1 pour l'émission de CO_2 par gramme de sol sec. Le facteur testé est le « Traitement ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et $Pr > F$ la p-valeur associée à F. Une p-valeur ($Pr > F$) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée. Les prélèvements ont été réalisés le 10 avril 2018.	79
Tableau 23 : Moyennes, écart-types et groupes de Tukey des mesures de l'émission de CO_2 par gramme de sol sec. Les prélèvements ont été réalisés le 10 avril 2018.	79
Tableau 24 : Résultats de l'ANOVA 1 pour l'émission de CO_2 par gramme de carbone organique. Le facteur testé est le « Traitement ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et $Pr > F$ la p-valeur associée à F. Une p-valeur ($Pr > F$) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée. Les prélèvements ont été réalisés le 10 avril 2018.	79
Tableau 25 : Moyennes, écart-types et groupes de Tukey des mesures de l'émission de CO_2 par gramme de carbone organique. Les prélèvements ont été réalisés le 10 avril 2018.	80
Tableau 26 : Valeurs des coefficients de détermination R^2 , des coefficients de Pearson et de Spearman de toutes les variables comparées deux à deux. Les cases grises mettent en avant les valeurs les plus élevées.	83

Introduction

Le monde agricole fait aujourd'hui face à de nombreux défis. Avec l'augmentation de la population mondiale attendue, on estime que la production agricole devrait pratiquement doubler d'ici 2050. L'agriculture, plus intensive que jamais, ne peut toutefois répondre à ce challenge en accroissant ses surfaces cultivées. L'augmentation de production de ces dernières années a été rendue possible par l'utilisation intensive d'intrants chimiques, par une mécanisation conséquente ou encore par des systèmes d'irrigation (Roberts *et al.*, 2018). Cela ne s'est dès lors pas fait sans porter préjudice à l'environnement et à la qualité du sol et des sources naturelles d'eau. Le passage à une agriculture de conservation, regroupant les trois piliers que sont le non-labour, les couverts végétaux et les rotations culturales, apparaît aujourd'hui de plus en plus comme une alternative permettant de concilier conservation des sols et de l'environnement avec une productivité élevée et durable.

Ce mémoire porte sur l'utilisation de divers mélanges de couverts végétaux et leur impact sur le système sol-plante et plus particulièrement sur la biologie du sol. Les couverts végétaux ne se limitent plus au simple rôle de capteur d'éléments minéraux et de protecteur du sol, qui leur était initialement donné. Ils apportent également de la fertilité en réhaussant le statut organique du sol, entraînent une meilleure structure de celui-ci et favorisent la lutte contre les maladies, ravageurs et adventices. Ils s'intègrent dans des systèmes de cultures performants et respectueux de l'environnement (Archambeaud *et al.*, 2016).

Ces nombreux services rendus par les couverts végétaux sont détaillés dans la première partie du mémoire « État de l'art ». La deuxième partie « Matériel et méthodes » aborde, elle, le contexte expérimental du mémoire. Ce dernier est divisé en deux parties ; des expérimentations communes ont dans un premier temps été réalisées à l'aide de trois autres étudiants, une partie individuelle sur l'étude de la biologie du sol a ensuite été effectuée. La troisième partie du mémoire « Résultats » porte sur la description et l'analyse des résultats obtenus dans la partie commune et individuelle. Finalement, la quatrième partie de ce mémoire « Discussion et perspectives » présente les réflexions émanant des résultats expérimentaux et de la bibliographie.

Partie 1 : État de l'art

1 – Systèmes agraires de nos régions au cours du temps

Jusqu'au XVI^e siècle, en Europe, la jachère¹ connaît certaines limites : l'amendement apporté aux parcelles par le passage du bétail est insuffisant et le développement d'adventices est favorisé. Cette technique culturale va dès lors être petit à petit remplacée par des prairies artificielles. Les nouvelles rotations font alterner fourrages et céréales presque sans discontinuité et apportent ainsi une quantité de fumure organique plus importante, elles permettent également une fixation de l'azote atmosphérique par les légumineuses (Archambeaud *et al.*, 2016).

Cette métamorphose agricole est très étroitement liée à la première révolution industrielle. L'accroissement des rendements en Europe va permettre de libérer de la main-d'œuvre pour la grande industrie et cette dernière va fournir à l'agriculture de nouveaux outils (hermes, charrues, moissonneuses, ...) révolutionnant les techniques agricoles (Mazoyer *et al.*, 2002). Finalement, la superficie exploitable par travailleur sera doublée. L'amélioration des techniques de labour permet une lutte efficace contre les adventices et une minéralisation plus adéquate de l'humus due à l'aération des horizons de surface (Archambeaud *et al.*, 2016). Cependant cette méthode de travail de la terre a ses limites. Ces dernières seront approfondies à la fin de ce chapitre.

A partir de 1850, la majeure partie du territoire européen est désenclavée grâce au développement des routes et transports ferroviaires et maritimes. Cela entraîne un accès aux engrais, une voie vers la spécialisation des exploitations agricoles mais également une arrivée massive de produits bon marché en Europe suite aux exportations. Les exploitations les plus fragiles en ressortent ruinées (Bertin, 2016 (a) ; Mazoyer *et al.*, 2002).

Après la Première, puis la Seconde Guerre mondiale, la motorisation des outils agricoles engendre un rapide accroissement de superficie par exploitant. Celle-ci est passée de 20-30 ha en 1940, à 200 ha par travailleur en 2000 (Bertin, 2016 (a) ; Mazoyer *et al.*, 2002).

Cette expansion des surfaces cultivées, ajoutée à la chimisation et à l'amélioration génétique animale et végétale, se fait au préjudice des implantations de prairies artificielles dont la fonction de fertilisation est oubliée. L'usage des engrais (consommation mondiale NPK) est par exemple passé de 4 millions de tonnes en 1900

¹ *Jachère* : État d'une terre labourable non cultivée temporairement (Bertin, 2016 (a)).

à 130 millions en 1980 (FAOSTAT, 2013). Le prix du pétrole, du gaz ou encore de l'électricité n'ayant, pendant longtemps, pas arrêté de diminuer, a également poussé l'agriculture dans cette voie (Bertin, 2016 (a) ; Archambeaud *et al.*, 2016).

Ce n'est qu'à partir des années 1980 que les premiers signes de nuisances liées à ces pratiques culturales provoquent une prise de conscience environnementale. Les limitations de ces méthodes sont maintenant claires : la dégradation de la fertilité du sol à long terme, dû au travail trop intensif de celui-ci, met en péril la biodiversité et la santé humaine. L'agriculture intensive est en partie responsable de la pollution des sols, des nappes phréatiques et des cours d'eau. Les eaux polluées par les nitrates, notamment, sont le symbole d'une agriculture à la dérive (Archambeaud *et al.*, 2016 ; Clermont-Dauphin *et al.*, 2014).

Depuis qu'il a été estimé que les systèmes de production agricole devront produire de quoi nourrir une population mondiale de 9,1 milliards de personnes d'ici 2050 et environ 10 milliards d'ici la fin du siècle, nous allons d'autant plus devoir cultiver nos terres de façon plus raisonnée (Schröder *et al.*, 2017). Le défi d'aujourd'hui est de réinventer d'autres systèmes agraires plus respectueux de l'environnement mais tout aussi rentables. Pour répondre à ce défi, l'innovation en agriculture doit être menée à l'échelle locale. Le plan d'action devra dépendre des conditions de milieu (sol, climat) et de l'historique de la parcelle. Afin d'assurer une agriculture plus durable, l'agronomie moderne doit être issue de pratiques telles que le non-labour et les couverts végétaux entre les cultures de rendement (MacMillan *et al.*, 2014 ; Roberts *et al.*, 2018). Il a en effet été démontré qu'un labour trop intensif aère le sol de façon trop importante et affecte ainsi le complexe argilo-humique. Cela engendre alors des problèmes de perte de rétention d'eau et d'érosion. Ce phénomène est d'autant plus avéré lorsque les sols sont laissés à nu, d'où l'importance des couverts végétaux (Bertin, 2016 (b)).

2 – Passage à une agriculture de conservation

La solution aux contraintes citées ci-dessus semble être l'adoption d'une agriculture dite de conservation. Cette dernière va plus loin que les techniques culturales simplifiées. Elle se définit comme une agriculture reposant sur une forte réduction voire un abandon du travail du sol, une couverture végétale permanente des sols et une rotation de cultures diversifiées. L'adoption de ces systèmes est croissante au niveau mondial. En 2010, 100 millions d'hectares étaient cultivés en agriculture de conservation dans le monde, contre 45 millions en 2000. En Belgique, 268 hectares sont passés à l'agriculture de conservation en 2013 (Derpsch *et al.*, 2009). Ce type d'agriculture redonne au sol le premier rôle dans la production végétale. Le sol n'est pas seulement considéré comme un support de culture inorganique, mais comme un milieu vivant, complexe et dynamique. L'application des

trois pratiques précitées permet de protéger le sol et ainsi d'améliorer son fonctionnement en restaurant ou même en augmentant sa fertilité. Le travail mécanique, considéré comme perturbateur de la structure du sol, est dès lors remplacé par l'activité biologique qui rétablit l'équilibre naturel du système sol-plante (Bertin, 2016 (b) ; Roberts *et al.*, 2018 ; Schaller, 2013).

2.1. – Pratique du non-labour

Le labour est une technique culturale qui consiste à retourner la terre profondément, généralement à l'aide d'une charrue, avant de l'ensemencer. Ce retournement de la terre permet tout d'abord d'enfouir dans le sol les matières organiques telles que le fumier ou les résidus de récolte. Il permet également de détruire les adventices et d'enterrer celles-ci suffisamment profondément afin d'empêcher leur germination. Finalement, le labour aère le sol et ainsi accélère la minéralisation.

Cependant, le labour pratiqué à l'aide d'engins lourds engendre une compaction souterraine accrue, aère le sol excessivement et ainsi peut mener à une oxydation trop rapide de la matière organique. Le complexe argilo-humique est alors affecté et la rétention d'eau dans le sol diminuée. De plus, le labour intensif expose le sol à l'érosion et à la radiation solaire (Bertin, 2016 (b) ; Labreuche *et al.*, 2014). C'est pour cela que la suppression du travail du sol en profondeur est recherchée, mais un travail du sol réduit ou simplifié est souvent pratiqué par les agriculteurs. Il existe en effet différentes techniques de non-labour et celles-ci peuvent se succéder dans le temps, en vue d'une suppression totale du travail du sol. Les effets positifs du non-labour sur le sol ne sont cependant perceptibles qu'au bout de quelques années (Schaller, 2013).

2.2. – Couverture végétale

Lors d'une interculture, c'est-à-dire de la période allant de la récolte d'une culture au semis de la culture suivante, le sol reste soit nu, soit sous une culture intermédiaire. Les cultures intermédiaires sont dans certains cas récoltées (légumes, fourrages, ...). On parle par exemple de cultures dérobées lorsque celles-ci sont valorisées en fourrage vert, en ensilage, en grains ou en énergie via la méthanisation. Lorsque les cultures intermédiaires ne sont pas récoltées, on parle alors de couverts végétaux. Les cultures intermédiaires récoltées ont des effets positifs et non négligeables sur la conservation du sol, toutefois la non récolte des couverts végétaux permet de maximiser ces effets bénéfiques.

Selon le NRCS², les couverts végétaux sont définis comme des « cultures incluant des graminées, légumineuses ou d'autres plantes herbacées établies pour une couverture saisonnière et dans un but de conservation ». Les couverts végétaux ont de nombreuses fonctions. Les Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrates (CIPAN) ont par exemple pour objectif d'éviter la lixiviation des nitrates. Les couverts ont également un rôle dans la lutte antiérosive et favorisent l'activité biologique du sol. L'objectif principal des couverts végétaux, ou du moins en agriculture de conservation, semble dès lors être d'enrichir le sol en matière organique. La matière fraîche dégradée par l'activité biologique va permettre de pallier le manque de disponibilité en azote pour les cultures suivantes et limiter l'utilisation d'intrants organiques, souvent coûteux et pas toujours rentables (Audic, 2015 ; Gabb32, 2012 ; Stephen *et al.*, 2018).

2.3. – Rotations culturales

La rotation culturale est définie comme l'alternance de cultures sur une même parcelle selon une période variable. La suppression du travail du sol évoquée précédemment, rend essentielle une rotation culturale. Les adventices n'étant plus détruites par le labour, leur cycle doit être coupé par l'alternance de cultures d'hiver et de printemps. Leur développement est ainsi mieux maîtrisé et la diversification et l'allongement des rotations permettent de moins spécialiser les populations d'adventices (Schaller, 2013). La rotation de culture a également comme objectif de réduire l'incidence des maladies et ravageurs. À titre d'illustration, la pratique culturale la plus importante pour la gestion de la maladie du piétin-échaudage, causée par le champignon pathogène *Gaeumannomyces graminis* et qui affecte les céréales et graminées, est la rotation culturale. D'autres pratiques influencent le développement du pathogène : date de semis, labour, fongicides, ... mais de façon moins importante (Ramanauskienė *et al.*, 2018). Finalement, la rotation présente aussi des avantages au niveau de la fertilisation et du maintien d'une bonne structure du sol. L'enracinement d'espèces différentes étant plus ou moins profond, les plantes captent leurs besoins au niveau de couches du sol différentes (Bertin, 2016 (a) ; Pousset *et al.*, 2014).

2.4. – Simultanéité des trois leviers

L'association de ces trois principes est actuellement bien documentée et intéresse beaucoup la communauté scientifique. Il est important que ces trois leviers soient appliqués simultanément, sans quoi leur efficacité peut être nettement diminuée. La notion de « système » prend ici toute son importance. Les trois composantes du système, travail du sol diminué, couverture végétale et

² NRCS : Natural Resources Conservation Service, agence du département de l'agriculture des Etats-Unis (USDA), qui offre une assistance technique aux agriculteurs (Wikipédia, 2018 (a)).

rotation interagissent de façon dynamique. À titre d'exemple, sans couverture du sol, les effets positifs du non-labour sont diminués et les effets négatifs, tels que l'apparition d'adventices, peuvent devenir d'autant plus importants. Dans ce cas, un recours à de la main-d'œuvre, au travail du sol ou à des intrants supplémentaires est nécessaire et l'on se retrouve face à un retour en arrière (Bertin, 2016 (b) ; Scopel *et al.*, 2012).

3 – Les couverts végétaux dans nos régions

Comme déjà évoqué précédemment, les couverts végétaux sont un moyen efficace et naturel de préserver le sol et sa fertilité. Ils présentent ainsi un grand nombre d'avantages, mais également certaines difficultés. Le choix des espèces qui composent le couvert, leur mise en place ou encore leur destruction doivent dès lors être étudiés en profondeur afin d'en tirer le meilleur profit.

3.1. – Rôle de piège à nitrates

La surfertilisation minérale ou organique, mais également la minéralisation de la matière organique des sols favorisée par l'intensification du travail du sol, sont responsables du lessivage des nitrates. Ceux-ci se retrouvent alors dans les eaux de surface et dans les nappes phréatiques. La dégradation de la qualité des eaux est ainsi devenue un sujet de préoccupation général. Depuis le début des années 1990, la fonction de piège à nitrates des couverts végétaux a trouvé toute son importance. En 1991, en Région Wallonne, il a été décidé d'imposer l'implantation de couverts végétaux en interculture afin de capter les reliquats d'azote après récolte (Portail Wallonie, 2014). Ces couverts végétaux sont ici appelés CIPAN (cultures intermédiaires pièges à nitrates). Parmi ces cultures, les légumineuses ont tout d'abord été mises de côté car elles ont la faculté de transformer l'azote de l'air en azote organique du sol et donc sont perçues comme allant à l'encontre de l'objectif recherché. Les espèces principalement semées sont la moutarde, qui est de loin la plus rencontrée, la phacélie, le ray-grass, l'avoine ou encore le seigle (Archambeaud *et al.*, 2016 ; Destain *et al.*, 2010 ; Gitton, 2011).

3.2. – Restitution de la matière organique et des éléments minéraux

Les couverts végétaux favorisent un enrichissement du sol en matière organique via l'augmentation de la production annuelle de biomasse et la restitution de celle-ci dans le sol. Les plantes constituant les couverts vont en effet absorber des éléments du sol qui, associés dans des chaînes carbonées plus ou moins longues (lignine, cellulose), vont ensuite être digérés par l'activité biologique du sol, avant

d'être répartis dans les différents compartiments organiques du sol³. Les éléments ne sont donc pas directement assimilables par les plantes des cultures suivantes. En effet, la mise à disposition des éléments nutritifs est accomplie de manière continue par les organismes décomposeurs et minéralisateurs du sol qui s'alimentent de la biomasse morte. Les vitesses de restitution de ces éléments varient dès lors en fonction de nombreux facteurs. Tout d'abord, un sol comportant un taux de matière organique élevé ainsi qu'une activité biologique conséquente libérera plus facilement les éléments minéraux. Un sol affaibli par un travail du sol conséquent et donc mal structuré et ayant une activité biologique affaiblie, nécessitera un certain temps d'adaptation avant d'être à nouveau performant. Il ne faut pas non plus mettre de côté le facteur climatique. Un temps chaud et humide est indispensable à une bonne minéralisation. Finalement, plus la matière organique sera décomposée rapidement, plus vite seront disponibles les éléments minéraux qu'elle renferme (C/N élevé) (Archambeaud *et al.*, 2016 ; Frasier *et al.*, 2016 ; Gitton, 2011).

Le rapport carbone/azote (C/N) est souvent utilisé pour caractériser la biomasse végétale car il diffère d'une espèce à l'autre mais surtout il augmente avec l'âge de la plante. Un couvert laissé trop longtemps sur la parcelle devient ligneux (C/N élevé), alors que détruit suffisamment tôt, il est riche en azote et représente un bon engrais vert. Le couvert détruit plus tardivement et ainsi plus riche en carbone, constituera lui de la matière organique plus stable dans le temps (humus). Les plantes utilisées pour les couverts végétaux ne finissent cependant généralement pas leur croissance et sont ainsi facilement décomposables, à l'inverse des débris de culture tels que les pailles de céréales (C/N élevé). Il est toutefois important que le couvert en décomposition n'ait pas un C/N supérieur à celui des micro-organismes présents dans le sol car ceux-ci devraient alors prélever de l'azote du milieu avoisinant afin d'équilibrer leur propre C/N. Afin de réduire le risque de préemption d'azote, il faut choisir des couverts à faible C/N ou les détruire suffisamment tôt. À titre informatif, toute biomasse végétale ayant un C/N entre 10 et 25 libérera de l'azote, tandis que supérieure à 30, elle consommera de l'azote (Archambeaud *et al.*, 2016).

D'autres éléments minéraux majeurs, autres que l'azote, mais également des oligoéléments sont captés par les couverts végétaux. Ceux-ci vont en effet prélever la totalité des éléments dont ils ont besoin et ainsi faciliter leur recyclage et éviter leur lessivage, leur insolubilisation ou leur immobilisation. Les végétaux ont des besoins spécifiques en éléments minéraux qui diffèrent d'une espèce à l'autre. Les crucifères captent par exemple des quantités importantes de soufre et le sarrasin de phosphore. En cas de carence de ces minéraux dans le sol, les plantes adoptent des stratégies telles que l'association avec les mycorhizes ou la dissolution de la roche-mère. Les

³ Les compartiments organiques du sol sont d'une part la matière organique stable (humus), et d'autre part la matière organique libre, facilement minéralisable (Delmelle et Delvaux, 2016).

couverts végétaux participent donc à l'enrichissement du milieu en éléments minéraux disponibles et à l'économie circulaire de ceux-ci. À long terme, les couverts permettent de lutter contre l'épuisement des ressources du sol qui n'est actuellement plus compensé par l'apport d'engrais minéraux. Cet apport est devenu insuffisant face à un sol étant de plus en plus appauvri (Archambeaud *et al.*, 2016 ; Gitton, 2011).

3.3. – Amélioration de la structure du sol

La structure d'un sol est le résultat d'un équilibre dynamique entre des facteurs structurants et déstructurants. Les facteurs structurants sont représentés par les végétaux, les micro-organismes et les animaux qui, en colonisant le sol assurent une porosité continue et facilitent la circulation de l'eau et des gaz. Ces derniers permettent de corriger les facteurs déstructurants (battance⁴, érosion, ...) dus aux variations climatiques mais également causés par l'Homme. Dans nos régions, le sol est fortement affecté par le travail intensif et la puissance et lourdeur des machines agricoles.

L'implantation d'un couvert favorise naturellement la présence de ces facteurs structurants et cela à une période où de nombreux facteurs sont déstructurants (précipitations, ruissellement, travail du sol, ...). De plus, la fin de l'été et le début de l'automne, périodes durant lesquelles les couverts sont établis, sont des périodes de végétation intense dont il faut profiter (Archambeaud *et al.*, 2016).

Le développement d'un volume racinaire élevé, notamment, mène à une restructuration de différents horizons du sol. Le système racinaire exerce tout d'abord une action positive sur la stabilité des agrégats du sol par son apport de matière organique. Cet apport peut être soit direct par la décomposition des racines mortes ou de leurs sécrétions, soit indirect par la stimulation du développement microbien dans la rhizosphère⁵. Les racines en pivot, comme celles du radis fourrager par exemple, permettent de structurer la terre en profondeur. Tandis que les racines en fascicule, de type avoine par exemple, sont généralement plus en surface où elles forment un réseau dense. Dans les deux cas, ces racines permettent de créer de la porosité et donc confèrent une stabilité au sol et facilitent le passage d'organismes vivants mais également des racines des cultures suivantes (Archambeaud *et al.* 2016 ; Dufey *et al.*, 1986 ; Gitton, 2011).

⁴ *Battance* : Caractère d'un sol tendant à se désagréger et à former une croûte en surface sous l'action de la pluie (Encyclopaedia Universalis, 2018 (a)).

⁵ *Rhizosphère* : Région du sol directement en contact avec les racines ou qui en subit l'influence. Cette zone comprend la majorité des organismes du sol car ils bénéficient des exsudats racinaires (Encyclopaedia Universalis, 2018 (b)).

Finalement, la couverture végétale sert d'interface entre le sol et l'atmosphère et donc de bouclier de protection du sol. Elle permet en premier lieu de limiter l'érosion des sols faiblement en pente, en ralentissant le ruissellement de surface. Les couverts ont de plus le pouvoir d'intercepter les gouttes de pluie et d'ainsi éviter l'effet « splash » menant au phénomène de battance. Finalement, la couverture de végétaux protège le sol du rayonnement solaire et ainsi favorise une stabilité thermique, appréciée par l'activité biologique (Archambeaud *et al.*, 2016 ; Audic, 2015 ; García-González, 2018 ; Gitton, 2011).

3.4. – Effets supplémentaires des couverts végétaux

En plus des nombreux apports de l'utilisation des couverts végétaux déjà détaillés précédemment, d'autres contributions peuvent être citées. Leur effet concurrentiel sur les adventices n'est par exemple pas négligeable. Les besoins en espace, eau, lumière et nutriments des couverts sont dans ce cas compétitifs avec ceux des adventices. De plus, certaines espèces telles que le sarrasin ou le seigle peuvent avoir un effet allélopathique⁶ sur les adventices (Gitton, 2011). De même, la présence d'une couverture végétale permet une plus grande diversité biologique et ainsi aide au développement d'auxiliaires favorables aux cultures tels que les prédateurs de ravageurs (Archambeaud *et al.*, 2016 ; Roberts *et al.*, 2018). Les couverts végétaux sont finalement responsables d'un nombre important d'apports bénéfiques au cours du temps (Figure 1).

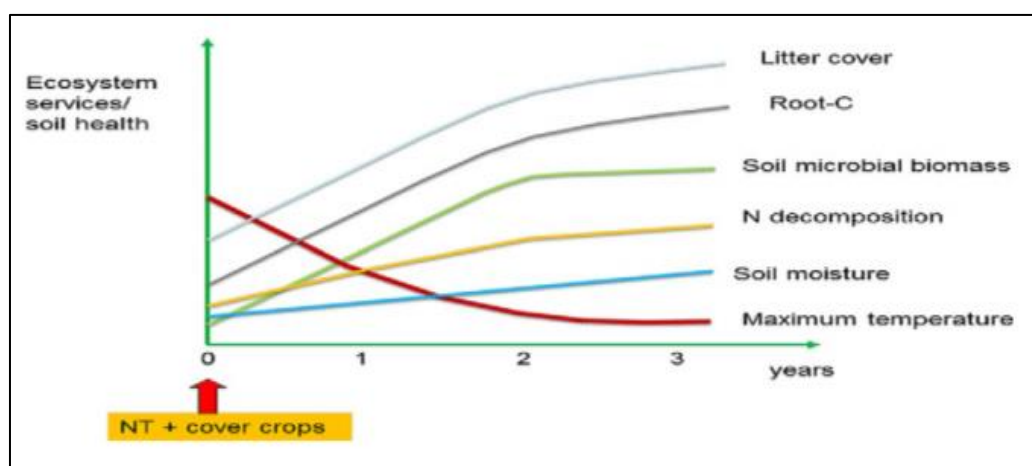


Figure 1 : Effets principaux de la présence de couverts végétaux et de la pratique du non-labour sur des cultures de sorgho (Frasier *et al.*, 2016).

Finalement, à long terme, les couverts végétaux amènent une réduction des coûts pour les exploitants. En effet, l'utilisation des couverts, menant à un travail du sol simplifié, permet en premier lieu une économie au niveau de la mécanisation. Le recyclage des éléments nutritifs évoqué précédemment entraîne également une

⁶ *Organisme allélopathique* : Organisme qui inhibe la croissance d'autres organismes en sécrétant des substances chimiques nocives ou toxiques (Wikipédia, 2018 (b)).

économie de fertilisants. En dernier lieu, l'augmentation de la biodiversité et l'établissement d'un équilibre écologique favorisent une réduction des traitements phytosanitaires ayant un coût non négligeable pour l'agriculteur (Archambeaud *et al.*, 2016).

3.5. – Choix des espèces végétales du couvert

Le choix des espèces végétales qui constituent le couvert repose sur plusieurs critères. Il dépend d'abord et tout naturellement de l'objectif recherché, mais également de la durée d'interculture et des rotations. Il convient en effet d'éviter des espèces déjà présentes ou étant taxonomiquement proches dans les cultures suivant et précédant le couvert, afin de diminuer les risques de maladies et de parasitisme. Il est par exemple déconseillé de semer des graminées comme couvert avant des céréales (risque de maladies car même famille), des légumineuses avant du pois, de la féverole, du soja, du tournesol ou du colza (risque de parasitisme et de sclérotinia⁷), de la moutarde avant du tournesol (risque de sclérotinia) ou finalement du radis ou de la moutarde lorsqu'il y a présence de colza dans la rotation (risque de maladies car même famille) (Chambre de l'agriculture de l'Isère, 2017; Labreuche, 2015).

Le choix des espèces dépend bien entendu aussi de la date à laquelle l'agriculteur désire l'implanter. A titre d'exemple, si l'exploitant désire semer son couvert fin août, début septembre, certaines espèces telles que le trèfle d'Alexandrie ne seront pas les plus adaptées car leur vitesse d'implantation est relativement lente et leurs besoins en chaleur importants. Dans ce cas, la moutarde ou encore l'avoine sont par exemple plus appropriées (Labreuche, 2015 ; Protect'eau, 2018). Le caractère gélif des espèces est également un critère important à prendre en compte. Une espèce sensible au gel dans un couvert végétal permet d'éviter le labour ou même l'utilisation d'un herbicide lors de la destruction des couverts (Archambeaud *et al.*, 2016).

Les espèces principalement utilisées aujourd'hui peuvent être regroupées en six grands groupes. Premièrement, la famille des brassicacées est largement reconnue pour sa fonction dans les couverts végétaux. Celle-ci comprend notamment la moutarde, le radis et le colza. Ces plantes ont comme atouts principaux un volume de végétation important, un système racinaire pivotant très structurant, une capacité de capter et ainsi de mobiliser rapidement les nutriments (azote, phosphore, soufre, potassium et calcium) et de produire une biomasse abondante. Ces couverts peuvent être appliqués sans problème avant des cultures de céréales d'automne ou de printemps, si ce n'est le maïs. Les graminées font elles aussi de très bons couverts.

⁷ *Sclérotinia* : *Sclerotinia sclerotiorum* est une espèce de champignons parasites appartenant au genre *Sclerotinia*. Il est à l'origine d'une maladie connue sous le nom de pourriture blanche, ou sclérotiniose, affectant diverses plantes dont le colza, le tournesol, etc. (Wikipédia, 2018 (c)).

Elles sont principalement remarquables au niveau de la structuration des sols en surface et du recyclage des éléments minéraux. Il faut cependant ici se méfier des régions où les cultures sont principalement céréalières. Ces plantes ayant un rapport C/N élevé, elles seront plus valorisables dans des systèmes déficitaires en azote (élevage, maraîchage). L'avoine et le seigle sont deux exemples de cette famille. En troisième lieu, les graminées estivales, telles que le sorgho ou le mil, sont, elles mieux adaptées aux intercultures de fin d'été et peuvent être semées après céréales. Leur système racinaire fasciculé et fin permet une structuration profonde du sol. Attention cependant à les semer suffisamment tôt (mi-juillet à fin juillet) car elles sont en général sensibles au photopériodisme et auront tendance à terminer leur cycle végétatif prématurément si elles sont semées trop tardivement. Les légumineuses (trèfle d'Alexandrie, pois, vesce, ...), bien que controversées, possèdent aussi de nombreux atouts. Elles ont la capacité de se développer dans des milieux pauvres en azote en fixant l'azote atmosphérique à l'aide d'associations symbiotiques⁸. Les légumineuses sont rarement ligneuses (C/N faible) et permettent ainsi de limiter les risques de faim d'azote. De plus, en apportant des sucres simples, elles favorisent l'activité biologique. Les légumineuses pérennes jouent également un rôle dans les couverts végétaux. Malgré le fait qu'elles soient lentes à s'installer et ne produisent ainsi pas de biomasse rapidement, elles retrouvent toute leur importance lorsqu'implantées pendant quelques années. La légumineuse (luzerne, trèfle blanc, ...) est dans ce cas conservée dans la ou les cultures suivantes, on parle alors de semis sur couvert permanent où le couvert redémarre et occupe l'espace une fois la culture récoltée. Finalement, on retrouve encore quelques autres espèces intéressantes, ne faisant pas partie des familles citées précédemment. Leur introduction permet d'amener une diversité botanique aux couverts et ainsi de limiter les risques de maladies. On retrouve par exemple le tournesol, le nyger, la phacélie, le sarrasin ou encore le lin (Archambeaud *et al.*, 2016). Les différents apports évoqués de ces différents groupes de couverts végétaux sont loin d'être exhaustifs et toutes les espèces appartenant à ces derniers n'ont pas été toutes citées. La Figure 2 présente plus en détail les caractéristiques des principales espèces utilisées aujourd'hui.

⁸ *Association symbiotique* : une *association symbiotique* mycorhizienne est une association végétale entre les racines d'une plante et un champignon, bénéfique pour les deux organismes, d'où la symbiose entre les deux organismes (Encyclopedia Universalis, 2018 (c)).

FAMILLE	ESPÈCE	FACILITÉ D'IMPLANTATION	RAPIDITÉ DE DÉVELOPPEMENT	BIOMASSE PRODUITE	EFFET STRUCTURANT POUR LE SOL	PIÉGEAGE DE L'AZOTE	FACILITÉ DE DESTRUCTION	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
CRUCIFÈRES	Moutarde blanche	+++	+++	+++	++ (surface)	+++	++ (roulage sur gel)	- Itinéraire technique simple - Limite les adventices - Peu attractif pour les limaces - Très bon derrière céréales	- Montée à graines précoce (des variétés tardives permettent d'éviter ce risque) - Peut nécessiter un broyage avant labour si fort développement - Eviter dans les rotations avec colza
	Colza	++	+++	+++	+++ (fissuration en profondeur)	+++	+	Limite les adventices	- A éviter dans les rotations avec colza - Très attractif pour les limaces, sensible aux altises
	Navette	+++	+	+++	+++ (surface)	+++	+	- Limite les adventices - Floraison tardive - Rupture de la plupart des maladies des céréales	- A éviter dans les rotations avec colza - Risque sclerotinia
	Radis fourrager	+++	+++	++	+++ (pivot restructurant)	+++	+	- Limite les adventices - Floraison tardive - Nématicide, réduit les infestations de piétiin échaudage - Peu attractif pour les limaces - Très bon derrière céréales	- A éviter dans les rotations avec colza - Destruction difficile (pivot très développé) - Risque sclerotinia Re-pousses possibles
GRAMINÉES	Avoine fourragère (diploïde, rude)	+++	+	+++	++ (en profondeur)	++	+	- Forte production de biomasse si associée à une légumineuse - Peu attractif pour les limaces grises - Effet allélopathique - Peut être utilisée dans les rotations céréalières	Couvert pouvant être difficile à décomposer (risque de faim d'azote sur culture suivante)
	Seigle	+	+	+	+++ (surface)	++	+	- Forte production de biomasse si associé à une légumineuse - Supporte bien les conditions sèches - Effet allélopathique	- Attractif pour les pucerons et les limaces - A éviter dans les rotations céréalières (risque de parasitisme)
	Ray-gras italien	+	++	++	++ (surface)	++	+	- Utilisation fourragère possible - Enracinement restructurant en surface	- Risque de salissement (montée à graines) - Attractif pour les limaces grises
GRAMINÉES	Moha	+	++	+++	++	++	+++ très gélif	- Supporte bien les conditions sèches - Utilisation fourragère possible - Conseillé en association avec une légumineuse	- A éviter sur cultures sensibles à la fusariose - Attractif pour les pucerons
	Sorgho fourrager	+	++	+++	+	++	++	- Limite les adventices - Supporte bien les conditions sèches - Utilisation fourragère possible	- Semis à soigner, levée délicate - Attractif pour les limaces
HYDROPHYL-LACÉES	Phacélie	+	+++	++	+++ surface	++	++ roulage sur gel	- Bonne dans toutes les successions culturales - Limite les adventices - Peu attractif pour les limaces, répulsif pucerons et altises - S'associe bien avec le trèfle Mélilifère	- Risque de salissement (montée à graines) à long terme - Eviter dans les sols pauvres en azote et compacts
POLYGONACÉES	Sarrasin	+	++	++	++ fissuration du sol	+++	+++ très gélif	- Limite les adventices - Peu attractif pour les limaces - Effet allélopathique	Risque de salissement (montée à graines)
LÉGUMINEUSES	Pois fourrager	++	++	+	++	+	++ mais forte fourniture	Facile en mélange	- Attractif pour les pigeons - Sensible à la sécheresse
	Vesce (hiver ou printemps)	++	+	++	+	+	++ si printemps	- Si associée à une graminée, limite les adventices et forte production de biomasse - Peu attractive pour les limaces grises	- Attractive pour les limaces noires - Risque sclerotinia sur tournesol ou colza
	Trèfle d'Alexandrie	+++	++	++	+	+	++ mais forte fourniture	- Bonne association avec l'avoine fourragère - Limite les adventices si semé tôt - Supporte bien les conditions sèches	Nécessite un bon recouvrement des graines
	Lentille fourragère	++	++	+	+	+	++ mais forte fourniture	Limite les adventices	- A associer pour avoir assez de biomasse - Coût des semences
	Féverole (hiver ou printemps)	++	++	+++	+	+	++ si variété de printemps	- Supporte bien les conditions sèches - Développement rapide	- Bien enterrer la semence (4-5 cm) - Quantité de semence nécessaire - Couvre moyennement le sol (à associer)

Figure 2 : Liste des principales espèces végétales utilisées en couverts végétaux et leurs caractéristiques (Chambre de l'agriculture de l'Isère, 2017).

Le type d'espèce composant le couvert végétal a un impact important sur la biomasse microbienne. L'activité microbienne, traduite par le potentiel de minéralisation du carbone et de l'azote, est par exemple plus élevée sous des couverts de légumineuses seules ou en association, que sous des couverts de graminées ou de crucifères (Figure 3).

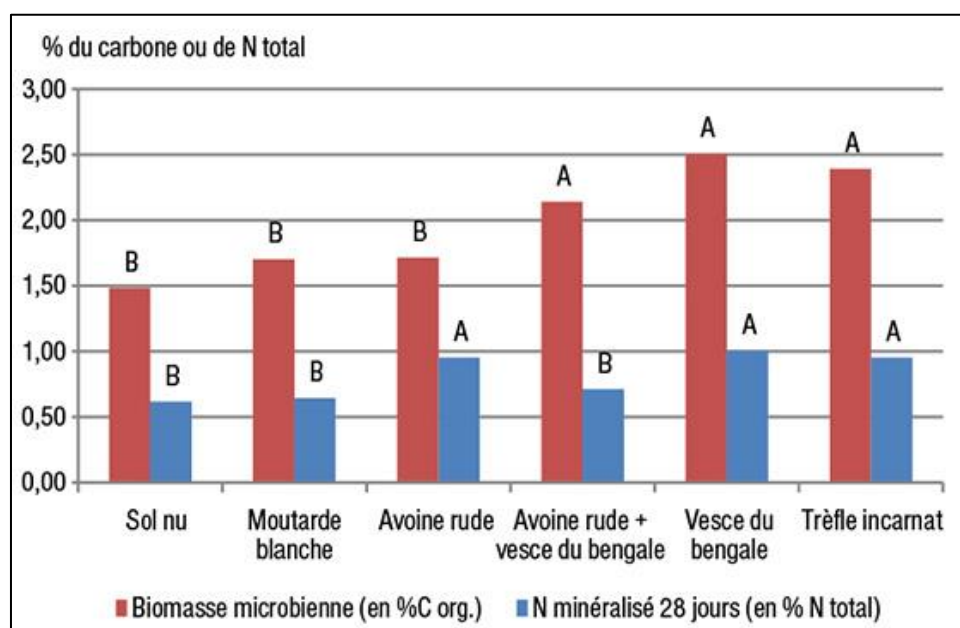


Figure 3 : Biomasse microbienne (exprimée en % du carbone organique) et azote minéralisé en 28 jours (en % de l'azote total) selon différents types de couverts (Bouthier et al., 2017).

Il reste à noter que la mise en place d'intercultures doit être raisonnée et tenir compte de la rotation ainsi que de tout l'itinéraire. En addition au choix de l'espèce, les dates et les modes d'implantation et de destruction des couverts doivent aussi être étudiés plus en profondeur (Gitton, 2011). En fonction de ces critères, des aides aux agriculteurs peuvent être octroyées. Le site web de Protect'eau est un exemple d'aide de choix des espèces de couverts⁹.

3.6. – Situation actuelle : Place des légumineuses et mélanges d'espèces

Comme déjà mentionnée au chapitre 3.1, la notion de CIPAN, au cours du temps et en lien avec la législation, s'est imposée face à la notion d'engrais vert des couverts végétaux. Les cultures sont à ce stade souvent composées de moutarde, phacélie, ray-grass ou encore seigle qui ont une capacité importante de piégeage du nitrate contenu dans le sol. Les légumineuses n'appartiennent alors, à priori, pas aux CIPAN. Or, ces plantes peuvent former de très bons précédents de culture. D'abord, elles semblent être capables de capter presque aussi efficacement que d'autres l'azote minéral du sol ; le pois et la luzerne sont principalement cités pour remplir cette fonction. D'autre part et, comme déjà évoqué au point 3.5, lorsque le milieu se

⁹ Site Protect'eau : URL <https://protecteau.be/fr/cipan>

retrouve pauvre en azote, les légumineuses développent des associations symbiotiques au niveau de leurs racines afin de fixer l'azote atmosphérique. Elles autorisent ainsi des économies d'engrais azotés sur les cultures suivantes. Des mélanges de couverts contenant des légumineuses sont donc à promouvoir (Archambeaud *et al.*, 2016 ; Destain *et al.*, 2010 ; Frasier, 2016 ; Stephen *et al.*, 2018). Actuellement, les légumineuses ont bel et bien leur place dans nos régions. En effet, selon le site web de Protect'eau ; *"Partout en Wallonie, après tout épandage d'azote organique réalisé entre le 1^{er} juillet et le 15 septembre, une Culture Intermédiaire Piège à Nitrate (CIPAN) doit être implantée avant le 15 septembre et maintenue jusqu'au 15 novembre. La CIPAN implantée peut contenir jusqu'à 50 % de légumineuses (en poids de semences)"* (Protect'eau, 2018).

Actuellement, les mélanges de couverts végétaux font, eux aussi, de plus en plus leur apparition dans les pratiques culturales. L'association de différentes espèces en mélange permet d'accumuler les effets positifs de chacune d'entre elles (Figure 4) mais également de diminuer la pression des facteurs défavorables tels que les conditions pédoclimatiques ou les ravageurs et ainsi de diminuer les risques d'échec des couverts. Une première piste à suivre est de mélanger des espèces à faible et à fort C/N. Le couvert sera ainsi capable de libérer progressivement de l'azote tout en accroissant le taux de matière organique du sol. Un deuxième aspect à prendre en compte est le système racinaire des espèces implantées. La combinaison de systèmes fasciculés et pivotants permet d'explorer l'ensemble des horizons de surface et ainsi de laisser un sol plus aéré pour la culture suivante. Les graminées telles que l'orge ou l'avoine ont des racines qui s'étalent en faisceau et restructurent ainsi le sol en surface, tandis que certaines crucifères, telles que le radis ou la navette, ou également le tournesol, ont un pivot puissant et restructurent le sol en profondeur. Finalement, certaines espèces, telles que la phacélie, possèdent un système racinaire mixte (fasciculé + pivotant). De manière générale, les mélanges d'espèces contribuent à de meilleurs apports de biomasse et d'éléments minéraux que les couverts mono-espèces, en occupant mieux l'espace aérien et souterrain (Archambeaud *et al.*, 2016 ; Chambre de l'agriculture de l'Isère, 2017).

Certaines précautions sont cependant à prendre lors du choix des espèces. Premièrement, tout comme pour les couverts mono-espèces, il faut ici aussi choisir des espèces adaptées aux contraintes de la parcelle (conditions pédoclimatiques, succession culturale, ...). Attention également à ne pas associer des espèces pouvant concurrencer le développement d'autres espèces présentes. Des plantes telles que la moutarde ou l'avoine doivent par exemple être semées en densité très faible en mélange car sont considérées comme des "espèces étouffantes". Finalement, d'un point de vue pratique, il est conseillé de choisir des espèces à semences de taille relativement semblable, afin de limiter une sédimentation dans le semoir et donc une mauvaise organisation du mélange (Chambre de l'agriculture de l'Isère, 2017).

Caractéristiques des différentes familles de couverts	
Crucifères: moutarde, radis, colza	Implantation rapide, piégeage efficace de l'azote , la moutarde et le colza sont étouffants dans les mélanges
Graminées: avoine, seigle, ray grass...	Apport de carbone au sol => attention aux faims d'azote temporaires lors de la décomposition, valorisable en fourrage (en mélange avec des légumineuses)
Légumineuses vesce, trèfle, féverole, pois ...	Fixation de l'azote de l'air, démarrage très lent, diminution du rapport C/N (facilite la décomposition du couvert et diminue le risque d'une faim d'azote si destruction tardive)

Figure 4 : Tableau comparatif des différentes caractéristiques des principales familles de couverts (Euben et al., 2017).

Dans la législation belge actuelle, afin d'obtenir le statut de *Surface d'Intérêt Ecologique (SIE)*, une parcelle sous couvert végétal doit contenir au minimum deux espèces appartenant à deux listes différentes parmi celles citées ci-dessous (Protect'eau, 2018) :

- Graminées : avoine brésilienne (*Avena strigosa*), dactyle (*Dactylis glomerata*), fétuque (*Festuca sp.*), froment (*Triticum aestivum*), ray grass anglais (*Lolium perenne*) ou italien (*Lolium multiflorum*), seigle (*Secale cereale*), triticale (*Triticosecale sp.*)
- Légumineuses : féverole (*Vicia faba*), gesse (*Lathyrus sativus*), lotier (*Lotus sp.*), pois fourrager (*Pisum sativum subsp. arvense*), les trèfles (*Trifolium*), vesce commune (*Vicia sativa*) ou velue (*Vicia villosa*)
- Crucifères : chou fourrager (*Brassica oleracea*), moutarde (*Sinapis arvensis*), radis fourrager (*Raphanus sativus*), cameline (*Camelina sativa*)
- Autres espèces : lin (*Linum usitatissimum*), nyger (*Guizotia abyssinica*), phacélie (*Phacelia tanacetifolia*), sarrasin (*Fagopyrum esculentum*), tournesol (*Helianthus annuus*)

Il reste finalement important de noter que de nombreuses connaissances sont encore à acquérir dans ce domaine. Des études portant sur les effets potentiellement positifs ou négatifs des espèces et mélanges de couverts doivent encore être réalisées.

4 – Couverts végétaux et biologie du sol

En addition à tous les effets des couverts végétaux évoqués précédemment, leur impact sur la macro- et microfaune n'ont été que peu abordés. Le sol abrite pourtant une masse d'êtres vivants non négligeable. À titre représentatif, la quantité d'organismes vivants dans un sol de prairie permanente est en moyenne de 1,5 t/ha pour la faune du sol, 2,5 t/ha pour les bactéries et 3,5 t/ha pour les champignons

(Ministère de la transition écologique et solidaire, 2014). Cette population d'êtres vivants est très diversifiée et se divise en plusieurs catégories selon les rôles de chacun (Figure 5). On retrouve en premier lieu les décomposeurs de la matière organique, tels que les milles pattes ou les collemboles. Ensuite, les micro-organismes (bactéries, champignons) ont principalement un rôle de transformateurs des composés organiques complexes (sucre, cellulose, lignine, ...) en nutriments disponibles pour la plante. Après cela, le groupe des prédateurs (carabes, nématodes, ...) joue, lui, principalement un rôle de régulation des populations. Finalement, les "ingénieurs du sol", tels que les vers de terre ou les fourmis, ont un rôle important dans la structure du sol (Bertin, 2016 (b)).

Afin d'être performante, l'activité biologique du sol nécessite une alimentation constante et un milieu de vie stable (humidité, température) où elle pourra se développer et se reproduire aisément. L'implantation de couverts végétaux, par leur production de biomasse végétale (feuilles, racines, exsudats racinaires) en période d'interculture, permet de remplir ce rôle de protection et d'alimentation des organismes du sol (Archambeaud *et al.*, 2016).

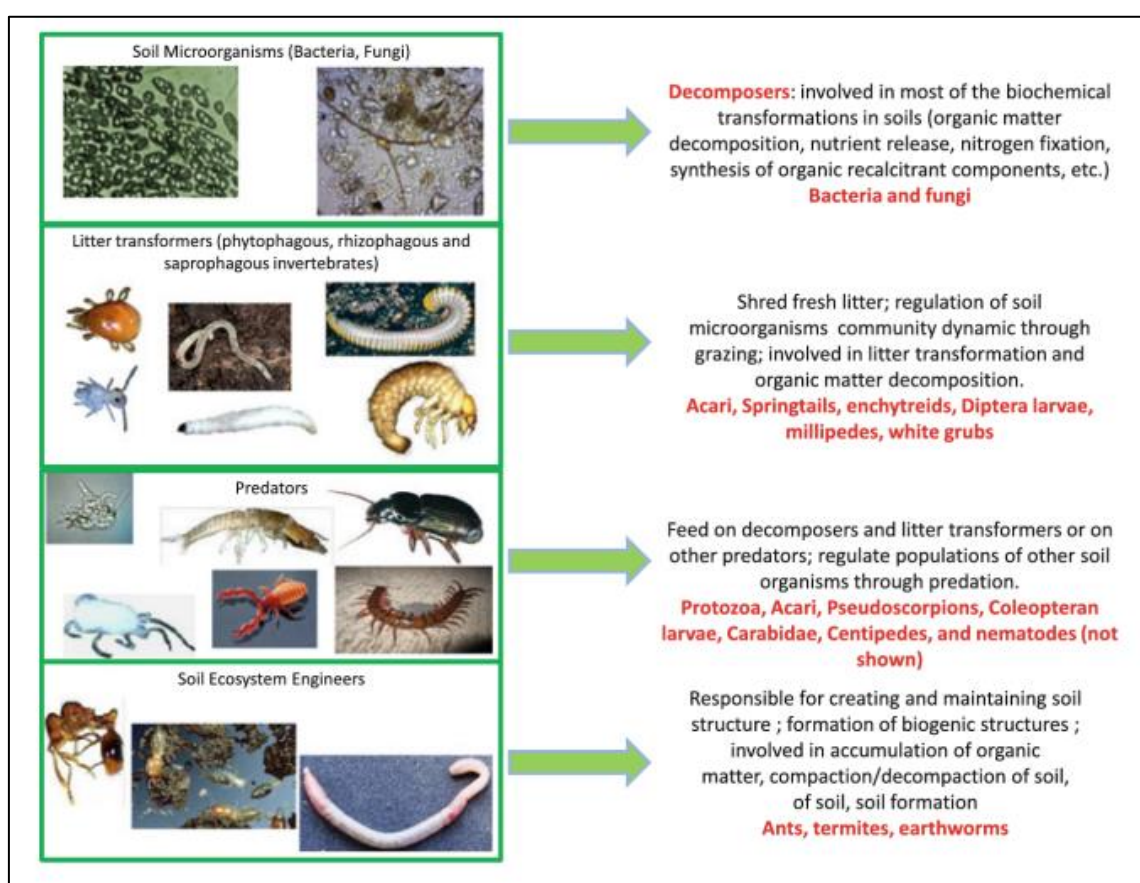


Figure 5 : Classification des fonctions des organismes du sol dans 4 groupes principaux (Bertin, 2016 (2)).

4.1. – La place des bio-indicateurs dans l'analyse du sol

Comme déjà évoqué précédemment, que ce soit sous l'effet de contraintes naturelles ou anthropiques, les sols de nos régions évoluent. Afin de pouvoir mettre cela en évidence, des indicateurs existent. Pendant très longtemps, des analyses de la couleur ou de la texture de la terre permettaient aux agriculteurs d'avoir une idée de l'état de leur sol. Par la suite et depuis lors, ce sont principalement des indicateurs basés sur les propriétés physico-chimiques du sol qui sont employés. Les paramètres biologiques, étant alors considérés comme difficiles à quantifier et à prédire, sont le plus souvent mis de côté. Cette carence est à regretter car, par les nombreux processus biologiques qu'ils assurent, les organismes du sol tiennent une place primordiale dans les fonctions-clés du sol et représentent ainsi des indicateurs précieux et très sensibles de changements d'état du sol. Selon McGeoch (1998), « *un bio-indicateur peut être largement défini comme une espèce ou un groupe d'espèces qui reflète l'état biotique ou abiotique de l'environnement, représente l'impact du changement climatique sur un habitat, une communauté ou un écosystème, ou indique la diversité d'autres espèces* ». Cela fait plusieurs années que des recherches et travaux sont réalisés sur la standardisation et l'évaluation des bio-indicateurs afin d'en faire des outils opérationnels, cependant de nombreuses recherches à ce sujet restent à faire (Briat *et al.*, 2017).

4.2. – Les vers de terre, la première biomasse terrestre

Dans les régions tempérées, les vers de terre constituent le principal composé de la biomasse totale d'organismes vivants, avec une quantité pouvant aller de 2 à 3 tonnes par hectare. Néanmoins, leurs populations peuvent fortement varier dans l'espace et dans le temps. Celles-ci peuvent aller de 10 à 10.000 individus par mètre carré. Dans les systèmes agricoles, 100 vers par mètre carré est généralement considéré comme une bonne valeur. Dans les systèmes cultivés, les populations ne dépassent que rarement 200 individus par mètre carré, comparativement aux prairies qui se retrouvent avec une moyenne de 500 individus par mètre carré (Lamandé *et al.*, 2003 ; USDA, 2001).

Les espèces de vers de terre peuvent être classées en trois groupes principaux (Figure 6). On retrouve tout d'abord les espèces anéciques, de coloration rougeâtre et qui creusent des galeries verticales et profondes. Ces espèces sont typiques des sols agricoles. Ensuite, les espèces endogées sont pâles et transparentes et creusent des galeries horizontales superficielles. Ces derniers ne viennent quasiment jamais à la surface du sol et vivent dans la zone peu profonde des racines des plantes. Finalement, les espèces épigées sont présentes dans la litière de surface et sont de cette manière peu présentes dans les sols labourés (Pfiffner, 2012).

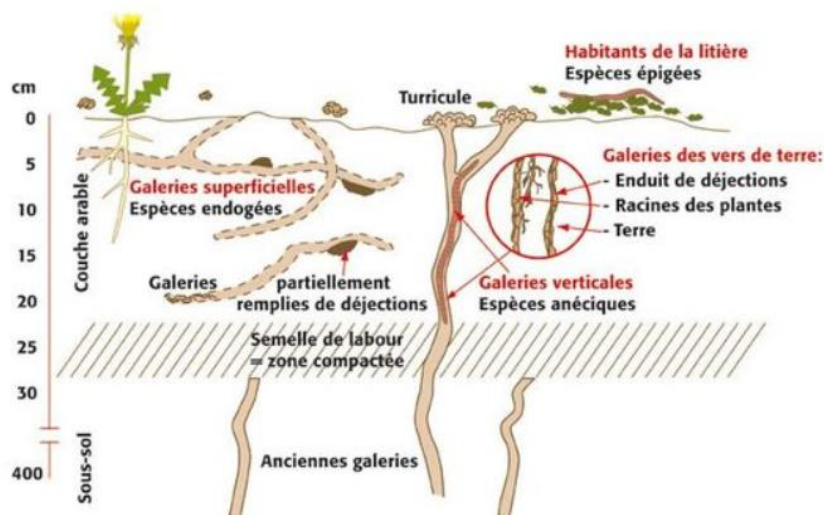


Figure 6 : Schéma représentant les trois groupes principaux de vers de terre (Pfiffner, 2012).

Les vers de terre, principalement les anéciques et endogés, ont une grande influence sur les propriétés physiques du sol par les galeries et agrégats de terre qu'ils forment. Leurs fonctions structurales se partagent sur les différents niveaux de porosité du sol. Au niveau macropore (>1 mm), les galeries qu'ils creusent deviennent des chemins préférentiels pour l'infiltration de l'eau, pour le développement des racines ainsi que pour la circulation des gaz. À plus petite échelle, les vers de terre participent à la création de microporosité ($<0,006$ mm) par la formation de turricules¹⁰ et améliorent ainsi la rétention en eau. Ces améliorations de la structure du sol confèrent une certaine résistance au phénomène d'érosion (Lamandé *et al.*, 2003). Les vers de terre ont par ailleurs d'autres effets sur la qualité du sol. Ils ont notamment la capacité d'améliorer la disponibilité en nutriments. En effet, ces invertébrés fragmentent et enfouissent les résidus organiques en les emmenant avec eux sous le sol, et permettent leur décomposition en les ingérant. Les vers de terre participent également au bon fonctionnement des micro-organismes. Leurs dépôts de mucus et de déjections enrichissent le milieu avoisinant et stimulent l'activité et la diversité des micro-organismes. Indirectement, la formation d'humus, la croissance des végétaux ou encore le contrôle de certaines maladies sont ainsi améliorés (USDA, 2001).

Plusieurs facteurs influencent les populations de vers de terre. La température est par exemple déterminante. L'optimum se situe entre 10 et 20°C, mais de nombreuses espèces peuvent s'adapter physiologiquement ou comportementalement afin de survivre lors de conditions défavorables. Des sols trop sablonneux ou trop argileux ne sont également pas appréciés par ces annélides. L'humidité et le pH du sol jouent aussi un rôle important. Ensuite, il est évident que les vers de terre préféreront des milieux riches en matière organique, qui représente leur principale source alimentaire. Dès lors, les racines mortes et exsudats racinaires peuvent aussi représenter une

¹⁰ *Turricules* : Rejet des vers de terre anéciques visibles à la surface du sol (Wikipédia, 2018 (d)).

évidence une plus grande appétence des vers de terre pour les matières à faible C/N, pauvres en tanins et polyphénols (Weykmans, 2008).

4.3. – Les carabes, insectes alliés de l'agriculture

Par la remise en place d'un équilibre naturel, la pratique des couverts végétaux mène à l'établissement d'un écosystème plus stable. Même s'il semble que, dans un premier temps, l'apport d'une source alimentaire en surface pendant l'interculture favorise les populations de ravageurs, elle permet dans un second temps le développement d'une faune auxiliaire¹¹ et par conséquent la venue de prédateurs. Ces prédateurs (staphylins, carabes, araignées, ...) peuvent ainsi contrôler une éventuelle attaque lors de la culture suivante. À titre d'exemple, une méta-analyse regroupant 66 études en Suède corrobore cette théorie (Bengtsson *et al.*, 2005). Elle a démontré que des exploitations agricoles intensives couvraient une population d'insectes prédateurs moins importante que des exploitations biologiques où une biodiversité élevée est conservée. L'abondance des insectes ravageurs était par ailleurs plus importante dans les systèmes agricoles intensifs. Les méthodes mécaniques ou chimiques employées contre les ravageurs pouvant entraîner des dommages collatéraux aux cultures, exercent souvent un contrôle moins efficace que les prédateurs naturels (Archambeaud *et al.*, 2016).

Les carabes (*Carabidae* : Coleoptera) représentent un groupe important d'insectes auxiliaires. La famille des *Carabidae* rassemble des coléoptères terrestres majoritairement prédateurs. Ces insectes sont répartis dans plus de 1 800 genres et comprennent environ 40.000 espèces à travers le monde, dont 2.700 recensées en Europe. En 2008, 404 espèces étaient connues en Belgique. La plupart des genres de la famille des carabes sont facilement identifiables. Les adultes ont une silhouette fort spécifique, leur tête, thorax et abdomen sont bien différenciés (Figure 8). Ils possèdent des mandibules prononcées, des pattes longues et élancées, des élytres striées et la présence ou non de ponctuations et soies. Beaucoup possèdent des antennes, souvent pubescentes. La plupart d'entre eux sont de couleur foncée, certains ont des couleurs plus claires ou métalliques et finalement plusieurs d'entre eux sont pubescents. Mais bien que ces arthropodes aient une forme générale facile à reconnaître, ils peuvent avoir subi des adaptations morphologiques pour survivre dans leur habitat. Ces modifications ont par exemple permis à certains carabes de courir et creuser dans le sol et le sable (*Promecognathus laevissimus*), de vivre sous des écorces de bois, de grimper sur les plantes (*Carabus auratus*) ou encore de nager dans l'eau (*Blemus fulvescens*). Les carabes vivent en conséquence dans tout type

¹¹ *Faune auxiliaire* : Faune qui regroupe de nombreuses espèces d'animaux interagissant positivement avec les cultures. Ce terme est généralement utilisé en opposition aux espèces dites nuisibles (Ekopédia, 2012).

d'habitat ; forestier, agricole, plaine, friche ou encore en altitude. Certains d'entre eux sont même adaptés aux habitats plus ouverts et perturbés tels que les champs de céréales. Des espèces telles que *Pterostichus melanarius* ou *Trechus quadristriatus* peuvent être présentes en grand nombre sur les parcelles agricoles. La plupart des espèces de carabes résident à la surface du sol, on les appelle alors insectes épigéniques. Certaines espèces peuvent aussi loger sur les plantes-mêmes et d'autres vivent dans des petits tunnels relativement peu profonds dans le sol. Généralement, les différents genres de carabes se retrouvent spécifiquement dans un habitat bien défini. Les espèces du genre *Bembidion* sont par exemple couramment rencontrées parmi la végétation à proximité de sources d'eau ; les espèces *Agonum* ou *Pterostichus* sont des adeptes de sols plus marécageux ; des espèces plus imposantes du genre *Pterostichus* ou *Nebria* sont présentes dans les herbes sèches ou dans les jardins ; dans les habitats fortement exposés au soleil, on retrouve des espèces du genre *Notiophilus* ou *Amara*. L'emplacement de leur micro-habitat peut être influencé par la saison, l'historique du terrain, la présence de concurrence et la disponibilité en nourriture (Bertrand *et al.*, 2015 ; Desender, 2008 ; Riddick, 2008 ; Rouabah, 2015).

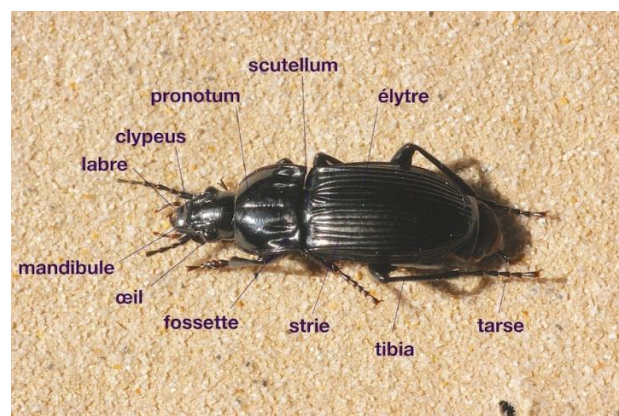


Figure 8 : Anatomie d'un Carabidae en vue dorsale (Quel est cet animal, 2010).

La grande majorité des espèces de carabes sont des prédateurs d'insectes (80% des adultes et 90% des larves). Certains d'entre eux se nourrissent de façon opportuniste selon la saison et la disponibilité de nourriture, et ont ainsi une grande diversité de proies. Les genres *Agonum*, *Pterostichus* et *Poecilus* font par exemple partie de cette catégorie. D'autres espèces sont plus sélectives (oligophages¹²). Le genre *Scaphinotus* est par exemple prédateur de limaces, les genres *Loricera* et *Notiophilus* de collemboles et le genre *Calosoma* de chenilles. Par leur prédation d'un grand nombre de ravageurs, les carabes tiennent une place importante dans le monde agricole. À titre d'exemple, les carabes sont de redoutables prédateurs du doryphore de la pomme de terre, *Leptinotarsa decemlineata* (Chrysomelidae : Coleoptera), insecte posant de sérieux problèmes aux cultures de pomme de terre en Europe. En Allemagne, il a été

¹² Oligophage : Un organisme *oligophage* est un animal prédateur dont les proies appartiennent à un petit nombre d'espèces différentes (Encyclopediae Universalis, 2018 (d)).

démontré que la prédation des larves de doryphore par les carabes réduisait les pertes de rendement d'approximativement 33%, comparativement à des terres infestées ne contenant pas de carabes. La majorité des carabes recherchent leurs proies à la surface du sol, cependant les quelques espèces qui agissent au niveau de la plante ont aussi leur importance, dans la prédation de pucerons par exemple (Riddick, 2008 ; Rouabah, 2015).

Leur population importante, leur capacité à vivre dans tout type d'habitat ou encore leur identification rapide font des carabes d'excellents bio-indicateurs. Beaucoup de recherches ont dès lors été réalisées à leur sujet. Un élément particulièrement favorable et déterminant à leur utilisation comme indicateur de la qualité de l'habitat, est la taille de leur corps. En effet, les carabes présentent de grandes variations de taille ; à titre représentatif, les plus grandes espèces sont près de 20 fois plus grandes que les plus petites. Il a été démontré qu'en règle générale, plus le niveau de perturbation est important, plus l'on retrouve des espèces de carabes de petite taille et moins de grande taille. Il est aussi à noter que les carabes de grande taille semblent être ceux qui participent le plus à la suppression totale des proies (Kotze *et al.*, 2003 ; Rouabah, 2015).

L'impact de l'architecture paysagère sur la dynamique des auxiliaires de culture est aujourd'hui plus largement pris en considération. Les paysages plus complexes comportent une plus grande abondance et diversité d'ennemis naturels tels que les carabes. La préservation de ces auxiliaires dans les parcelles agricoles passe donc par une diversité des cultures mais également par une hétérogénéité des couverts végétaux. La complémentarité des cultures implantées à l'automne et au printemps afin d'assurer un habitat continu aux espèces auxiliaires prend ici toute son importance (Rouabah, 2015 ; Vasseur *et al.*, 2012).

4.4. – Respiration hétérotrophe des micro-organismes du sol

La respiration hétérotrophe du sol est le résultat de la minéralisation de la matière organique par les micro-organismes (bactéries et champignons). Lors de ce processus, les substances organiques sont oxydées en dioxyde de carbone et en eau, tandis que l'oxygène est consommé par les micro-organismes aérobies. Avec la respiration autotrophe (respiration des racines et des mycorhizes), la respiration hétérotrophe constitue une source majeure de dioxyde de carbone en provenance du sol. Quatre sources de la respiration hétérotrophe ont été identifiées ; la respiration microbienne de la matière organique du sol (respiration basale), la respiration microbienne de la matière exogène du sol (compost, écumes de sucrerie, ...), la respiration microbienne des résidus de plantes mortes, et finalement la respiration microbienne des sécrétions et des dépôts racinaires. Il reste à prendre en compte le

transport par diffusion du dioxyde de carbone traversant les pores du sol même si ce dernier intervient à une échelle très faible. Les deux composantes, respiration hétérotrophe et autotrophe, peuvent varier d'un milieu à l'autre, néanmoins la respiration hétérotrophe semble être la composante majeure dans la plupart des cas (Buysse, 2010 ; Tete, 2014 ; USDA, 2001).

La population de micro-organismes présents dans le sol est très importante. À titre représentatif, des études réalisées sur sol agricole argentin ont estimé la population de bactéries à 107-108 CFU¹³/g de sol et celle de champignons à 104-105 CFU/g de sol. Il semblerait cependant que la majeure partie de ces micro-organismes (80-85 %) soit dans un état de dormance et que l'apport de matière organique activerait ces derniers. De nombreuses enzymes produites par les micro-organismes interviennent dans l'activité de minéralisation de la matière organique. Une fois produites par les micro-organismes, les enzymes sont adsorbées sur les particules minérales. Les propriétés des composés auxquels elles s'adsorbent ont un rôle important sur leur pouvoir catalytique. La température joue également un rôle essentiel sur l'activité enzymatique (Buysse, 2010).

La respiration du sol est très variable spatialement et temporellement (en fonction de la saison). Elle est très fortement affectée par des facteurs climatiques tels que la température et l'humidité, par la texture du sol, le pH, la disponibilité en oxygène, le type de culture ou encore les pratiques culturales mises en place. Il est dès lors important de faire attention à ne pas négliger ces éléments, afin de ne pas fausser la détermination de la respiration du sol. La température est la variable la plus influente du processus de respiration. D'un site à l'autre, la température optimale peut varier. À titre d'exemple, des expérimentations menées sur sols forestiers et agricoles en Suède ont estimé un optimum variant de 25 à 30°C. Le taux de respiration commence ensuite à diminuer à partir de 45-50°C. Cela s'explique par la dénaturation des enzymes des micro-organismes sous haute température. Le deuxième facteur environnemental important pour la respiration du sol est la teneur en eau. Il semblerait que la respiration soit optimale lorsque la teneur en eau atteint la capacité au champ et diminue fortement aux teneurs en eau élevées. Lors d'un stress hydrique, la disponibilité des substrats est réduite et les micro-organismes se retrouvent dans un état de dormance ou de sporulation. Lorsque les teneurs en eau sont optimales, l'eau et l'air partagent équitablement l'espace des pores, permettant ainsi tant l'accès des micro-organismes au substrat que la diffusion de l'oxygène. La texture du sol peut aussi avoir un impact, sur l'accessibilité de la matière organique notamment. Les particules d'argile se lient à la matière organique et empêchent ainsi les attaques enzymatiques. En plus de cela, la texture du sol affecte la diffusion du CO₂. La

¹³ CFU : « Colony Forming Unit », unité utilisée pour estimer le nombre de cellules bactériennes ou fongiques vivantes dans un échantillon (Wikipédia, 2018 (e)).

structure du sol peut être modifiée par les pratiques culturales, telles que le labour. Il a en effet été démontré qu'à court-terme, la pratique du labour induit une augmentation du taux de minéralisation de la matière organique par l'augmentation de la porosité du sol et ainsi l'amélioration de la diffusion des gaz et de l'accès à l'eau pour les micro-organismes (Buysse, 2010 ; Tete, 2014 ; USDA, 2001).

Finalement, la respiration hétérotrophe du sol est une réflexion directe de l'activité biologique du sol qui est un indicateur de la dégradation de la matière organique du sol. Cette dégradation implique que deux phénomènes se produisent simultanément ; la perte de carbone du sol et la production de nutriments. Le taux de respiration du sol doit ainsi se trouver à l'équilibre entre ces deux étapes (USDA, 2001).

Partie 2 : Objectifs du mémoire

Les apports bénéfiques de l'utilisation de couverts végétaux pour une agriculture plus durable ne sont aujourd'hui plus à démontrer. À titre d'exemple, une étude américaine réalisée avec 2012 agriculteurs a montré une nette augmentation de rendement pour des cultures de maïs et soja suivant des couverts végétaux (CTIC, SARE & ASTA, 2016). Cependant, jusqu'à présent, peu d'études ont été menées sur l'implantation de mélanges de couverts végétaux et leur impact sur une biodiversité qui semble conférer de nombreux bénéfices aux fonctions écosystémiques (Tiemann *et al.*, 2015).

Afin de détecter l'influence que peuvent avoir les mélanges de couverts végétaux sur le système sol-plante, 5 types de traitements ont été étudiés dans le cadre de ce mémoire en période d'interculture (août – mars) :

- Un traitement sans couvert végétal ;
- Un traitement moutarde ;
- Un traitement de 2 espèces ;
- Un traitement de 5 espèces ;
- Un traitement de 10 espèces.

Le but de ce mémoire a dans un premier temps été d'observer le développement de chacun des couverts (traitements) ainsi que leur influence sur les paramètres physiques, chimiques et biologiques du sol. Dans un second temps, nous avons été amenés à comparer les résultats obtenus pour chacun des traitements et chacune des variables étudiées, et ainsi tenter de répondre aux questions suivantes :

- « Les mélanges de couverts d'un nombre important d'espèces (5 et 10 espèces) ont-ils des effets contrastés par rapport à des couverts plus classiques de 2 espèces ou de moutarde ? » ;
- « Les variables étudiées sont-elles corrélées entre elles ? ».

Les paramètres physico-chimiques du sol ont été étudiés plus spécifiquement par Denis Allard, le développement des racines par Diane Heymans, les mycorhizes par Isaure Lohest et finalement la biologie du sol par moi-même. Ensemble, l'objectif est d'aboutir à une meilleure connaissance des mélanges de couverts végétaux et de leurs impacts sur l'agriculture de demain.

Partie 3 : Matériel et méthodes

5 – Parcelle d'intérêt

5.1. – Historique de la parcelle

La parcelle étudiée dans le cadre de ce mémoire est localisée à Vieusart, hameau de l'entité de Chaumont-Gistoux, aux portes de Louvain-La-Neuve. Il s'agit d'une terre appartenant à l'UCL depuis 2016. Cette dernière est à la disposition d'expérimentations menées par l'UCL et le reste du temps, elle est gérée par la ferme de Marbaix. La ferme de Marbaix est un centre d'expérimentation qui accueille les chercheurs de l'UCL et était sous la direction de monsieur Gérard Collignon jusqu'en mai 2018. Jusqu'à présent, la parcelle était sous agriculture conventionnelle.

À titre informatif, après avoir été exposée à des essais expérimentaux, une parcelle doit être mise en période de « régularisation » pendant minimum 3 ans. Durant ce laps de temps, la terre est cultivée en rotation classique, sans expérimentation.

5.2. – Localisation du champ d'expérimentation

Les coordonnées du point central du champ où est située la parcelle expérimentale sont données en Lambert belge 72 : $X = 168\,950$ et $Y = 152\,450$. La parcelle est caractérisée par une longueur d'environ 130 m et une largeur de 76 m. Cela représente une superficie de 0,98 hectares (Figure 9).



Figure 9 : Photo aérienne du champ d'expérimentation et de la parcelle expérimentale (cadre vert) à Vieusart (GeoPortail Wallonie, 2016).

5.3. – Choix de la parcelle

Afin de minimiser les sources de variabilité au sein de la parcelle d'intérêt, celle-ci a été choisie selon les critères suivants :

-Type de sol : D'après la Carte Numérique des Sols de Wallonie (CNSW) mise à jour en 2016, la couverture pédologique de la parcelle dans son entiereté correspond à un sol "limoneux à drainage naturel favorable" (Aba).

-Dénivelé : Les différents points de la parcelle ont été sélectionnés sur un terrain ayant un dénivelé faible et relativement identique tout au long de la surface d'intérêt.

-Cultures précédentes : Les cultures précédentes étaient identiques sur toute la parcelle d'intérêt durant au moins les deux années antérieures, un historique plus ancien n'ayant pas pu être obtenu. En 2017, la culture de rendement était de l'escourgeon et en 2016 des betteraves.

6 – Plan expérimental

L'objectif de ce mémoire étant de comparer les effets de différents mélanges de couverts végétaux, la parcelle a été divisée en plusieurs « bandes » de couverts d'une largeur de quatre mètres. Ces bandes sont représentées en couleur vert clair sur la Figure 10 et sont numérotées de 1 à 19. Ces mélanges de couverts végétaux porteront par la suite le nom de « traitements », qui sont :

Couvert T1 : 0 espèce : absence de couvert

Couvert T2 : 1 espèce : moutarde (*Sinapis arvensis*)

Référence R : 2 espèces : avoine brésilienne (*Avena strigosa*) / trèfle d'Alexandrie (*Trifolium alexandrinum*)

Couvert T3 : 5 espèces : avoine brésilienne (*Avena strigosa*) / trèfle d'Alexandrie (*Trifolium alexandrinum*) / lin (*Linum usitatissimum*) / phacélie (*Phacelia tanacetifolia*) / tournesol (*Helianthus annuus*)

Couvert T4 : 10 espèces : avoine brésilienne (*Avena strigosa*) / trèfle d'Alexandrie (*Trifolium alexandrinum*) / lin (*Linum usitatissimum*) / phacélie (*Phacelia tanacetifolia*) / tournesol (*Helianthus annuus*) / nyger (*Guizotia abyssinica*) / sarrasin (*Fagopyrum esculentum*) / radis chinois (*Raphanus sativus longipinnatus*) / vesce commune (*Vicia sativa*) / féverole (*Vicia faba*)

Chacun de ces mélanges, hormis le traitement sans couvert, ont été semés à 2 densités, D1 et D2. La densité D1 correspond à celle généralement préconisée par les fournisseurs. La densité D2 est de 30% plus élevée que la densité D1. La surdose des

semis de couverts végétaux vient d'une volonté d'assurer une meilleure réussite de la levée des couverts ainsi que d'être préparé en cas d'éventuelles périodes de sécheresse en été. Les différentes bandes de couverts végétaux ont été placées de manière aléatoire et sont systématiquement séparées par une bande de référence (R). Cette dernière est un mélange d'avoine et de trèfle. L'usage de ces bandes de référence a pour objectif de prendre en compte la variabilité due au terrain. Ce point sera expliqué plus en détails au point 8. Sur la Figure 10 sont également représentés les « blocs » A, B, C, D et E. Ceux-ci représentent les emplacements d'échantillonnages dans chacune des bandes. Ces blocs permettent d'avoir des répétitions pour les analyses mais également de prendre en compte la variabilité de terrain le long de la parcelle. Pour certaines analyses, seuls les blocs A, B et C seront utilisés par manque de temps ou de main-d'œuvre. Il en est de même pour les bandes de couverts végétaux ; dans certains cas seules les densités D1 seront prises en compte et cela pour les mêmes raisons. Le détail des quantités de chaque espèce semée se trouve en Annexe 1. La Figure 11 donne une vue aérienne de la parcelle où l'on peut apercevoir très nettement les différentes bandes de couverts végétaux.

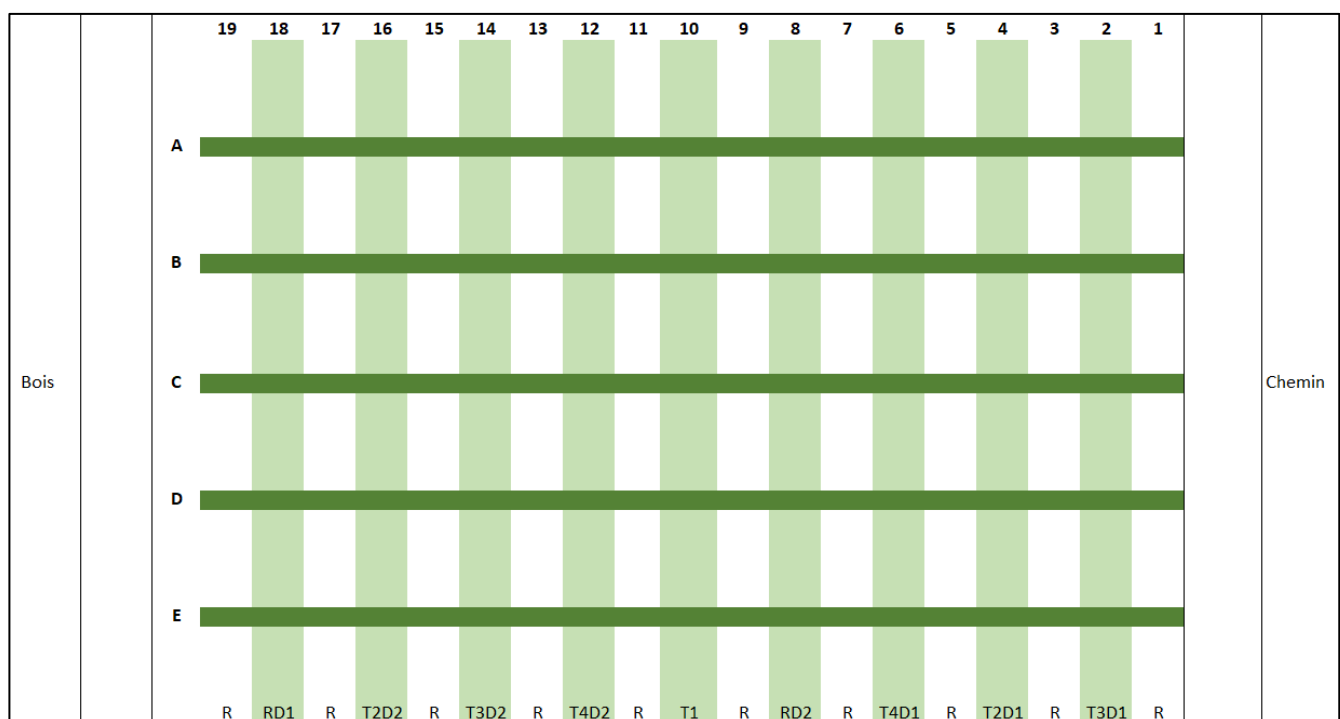


Figure 10 : Plan expérimental de la parcelle d'intérêt. Le chemin et le bois de la Figure 9 y sont représentés afin de déterminer l'orientation du plan expérimental.

Comme déjà mentionné au point 5.1, la parcelle a été jusqu'à présent travaillée de manière conventionnelle. L'historique des activités de la terre, de 2016 à maintenant, est celui-ci :

22/08/16 : Déchaumage¹⁴ et sous-solage¹⁵ du sol
 19/09/16 : Labour du sol
 20-21/09/16 : Préparation de la terre et semis escourgeon (variété Tonic)
 06/10/16: Application herbicide Hérold (0.6 l/ha)
 14/03/17: Application d'engrais azoté NH_4NO_3 (190 kg/ha)
 06/04/17: Application NH_4NO_3 (200 kg/ha)
 07/04/17: Application fongicides (comet 0.3 l/ha et stéréo 1l/ha)
 07/04/17 : Application régulateur de croissance (medax+, 0.6 l/ha)
 02/05/17 : Application NH_4NO_3 (240 kg/ha)
 09/05/17 : Application fongicide (aviator, 1 l/ha)
 05/07/17 : Moisson
 07/07/17 : Ballottage de la paille
 10/07/17 : Epandage d'engrais calcique CaCO_3 (900kg/ha)
 11/07/17 : Sous-solage et déchaumage
 19/07/17 : Déchaumage
 20/07/17 : Semis des couverts végétaux
 Mars 2018 : Roulage des couverts végétaux

Le roulage des couverts végétaux est une technique de destruction des couverts sans travail du sol. Elle est rapide, peu coûteuse et permet de stopper la végétation sans pour autant mettre fin au rôle de protection de surface des couverts végétaux. Les espèces végétales choisies sont principalement gélives afin de faciliter leur destruction. Il est par conséquent recommandé de réaliser le roulage en période de gel. Dans le cas présent de mélanges différents d'espèces, une technique optimale de destruction des couverts végétaux n'est pas aisée à trouver. La technique de roulage est connue pour être plus efficace sur la moutarde ou la phacélie et moins sur les graminées ou le radis (Quéré, 2010). Celle-ci semblait cependant être un bon compromis pour la destruction des couverts sur la parcelle d'intérêt.

Le semis des couverts végétaux a été réalisé par Nicolas Braibant, à l'aide d'un semoir Horsch de quatre mètres de large. C'est également Monsieur Braibant qui a réalisé le roulage des couverts végétaux. Le choix des espèces végétales des différentes bandes de couverts a été fait à l'aide de Frédéric Muratori, directeur exécutif de l' AISBL Regenacterre. Tout d'abord, la moutarde a été choisie car il s'agit d'un couvert conventionnel et beaucoup de données sont disponibles à son sujet dans la littérature. Les mélanges de graminées-légumineuses gélives, tels que celui de l'avoine brésilienne et trèfle d'Alexandrie, rencontrent beaucoup de succès en ce moment. Ces types de mélanges sont économiques, faciles à planter et sont conformes à la

¹⁴ *Déchaumage* : Technique consistant en un travail superficiel du sol destiné à enfouir les chaumes et restes de paille afin de favoriser leur décomposition (Wikipédia, 2018 (f)).

¹⁵ *Sous-solage* : Technique agricole permettant de redonner de la perméabilité au sol en améliorant le drainage naturel et la circulation capillaire horizontale de l'eau sur les sols labourés (Wikipédia, 2018 (g)).

législation actuelle qui impose que les couverts soient composés d'au moins 2 espèces différentes. Des mélanges plus sophistiqués, tels que certains préconisés par Regenacterre, existent également. Néanmoins, les réels apports de ces derniers sont encore discutés. Les espèces ont chacune des propriétés spécifiques pouvant être mises en avant, leurs apports en mélanges doivent encore être étudiés, d'où les expérimentations à venir.



Figure 11 : Photo aérienne de la parcelle d'intérêt, en période de fin de développement des couverts végétaux (Google Earth, 2017).

7 – Méthodes d'analyse

Dans le cadre de ce mémoire, la parcelle a été mise à la disposition de quatre mémorants. Ce système a été mis en place dans le but de réaliser des analyses conséquentes en termes de temps et de main-d'œuvre. Cette partie sera divisée en deux : la présentation des analyses communes sera suivie de celle des analyses individuelles.

7.1. – Analyses communes

7.1.1. – Couverture du sol

Une fois que les couverts végétaux ont commencé à être bien développés, des analyses de couverture du sol ont été effectuées. Cela a été réalisé grâce à l'utilisation d'un cadre d'un mètre carré dans lequel sont représentés 100 petits carrés (Figure 12). Il suffit de disposer le cadre au-dessus du couvert de la bande d'intérêt et d'ensuite compter les petits carrés qui sont au minimum à moitié remplis par des corps végétaux. Une valeur allant de 0 à 100 est alors donnée à chaque point d'échantillonnage et correspond au pourcentage de couverture du sol.

Les mesures ont été prises sur les 19 bandes et sur les blocs A, B et C qui font office de répétitions. Cela représente finalement 57 mesures, réalisées une fois par semaine à partir du 2 août jusqu'au 8 septembre (six dates au total).



Figure 12 : Représentation de cadres disposés au-dessus des couverts végétaux à différents stades de développement. De gauche à droite les valeurs de la couverture en % sont : 21, 53 et 89.

L'évolution de la couverture du sol au cours des semaines peut être comparée à une expansion foliaire progressive, décrite selon l'équation suivante (Demote-Mainard *et al.*, 2013) :

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

Équation 1 : 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 t et du traitement observé i [%] ;
- i = niveau du facteur « Traitement » ;
- t = nombre de jours après le semis ;
- L_{max} = couverture maximale du sol (= 100%) ;
- $V_{(i)}$ = 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].

7.1.2. – Green area index

Dans le courant du mois d'octobre, une fois les couverts bien développés, la surface verte utile des différents mélanges végétaux a pu être mesurée à travers le *Green Area Index (GAI)*. Le GAI prend en compte l'ensemble des tissus de la plante photosynthétiquement actifs, c'est-à-dire les feuilles et les tiges (Kouadio *et al.*, 2012).

La méthode employée pour mesurer le GAI consiste tout d'abord à couper un mètre carré de végétation à l'aide de cisailles sur chaque point d'échantillonnage. Cela a pu être effectué à l'aide d'un cadre d'un mètre sur un mètre. La végétation de chaque point d'échantillonnage a ensuite été récoltée dans de grands sachets individuels et mise en chambre froide. Les végétaux sont ensuite mis à plat et passent sous un scanner *LI-3100c Area Meter* de la société LI-COR (Figure 13). Le scanner donne alors une valeur qu'il faudra diviser par 10000 afin d'obtenir la valeur du GAI. Il s'agit d'un nombre sans dimension, équivalent à des m² de surface verte par m² de sol. La valeur optimale de GAI est généralement comprise entre 3 et 5 (Draye, 2016). Les prélèvements ont été réalisés sur les bandes numérotées de 1 à 7 et de 9 à 11, aux blocs A, B et C.



Figure 13 : Tri des différentes parties végétales des espèces des couverts végétaux avant passage dans le scanner.

7.1.3. – Détermination de la biomasse

L'efficacité des couverts végétaux dans le rôle de protection du sol, d'apport de matière organique et autres services cités dans la partie 1, est liée à leur quantité de biomasse produite. Une biomasse élevée est par exemple synonyme d'une quantité d'éléments nutritifs élevée ou encore d'une lutte plus efficace contre les adventices (Büchi *et al.*, 2016). Il est dès lors intéressant de pouvoir la quantifier.

La méthode de quantification de la biomasse mise en place dans le cadre de ce mémoire consiste à prélever deux mètres carrés de couvert à chaque point d'échantillonnage. Toute la biomasse aérienne est coupée à l'aide de cisailles puis pesée directement. Une quantité, variant de 500 g à 1 kg, est ensuite extraite à l'aide

d'une sonde en inox (Figure 14) afin d'obtenir une quantité représentative du tas de biomasse. L'objectif est ici de représenter au mieux les proportions de chaque espèce présente dans le couvert. Le sachet contenant la biomasse prélevée à la sonde est pesé à son tour et représente le poids frais. Par la suite, les différents sachets sont mis à l'étuve sous 70°C pour une durée d'une semaine environ. Une fois sortis de l'étuve, ils ont été pesés à nouveau afin d'en obtenir le poids sec. À l'aide du rapport entre le poids frais sur deux mètres carrés et celui du sachet, il a été aisé de déterminer la quantité de matière sèche sur deux mètres carrés et par hectare de couvert végétal.



Figure 14 : Sonde utilisée pour échantillonnage de la biomasse.

Ces mesures ont été réalisées sur les 19 bandes de couverts végétaux et sur les blocs A, B et C qui font office de répétitions. Cela représente au total 57 mesures. La date des prélèvements a été choisie en fonction du stade de développement des couverts et des conditions climatiques. Afin d'être le plus représentatif possible, il faut en effet se trouver au plus proche de la date de destruction du couvert ou lorsque celui-ci ne pousse plus. De plus, il est essentiel de prélever une biomasse ressuyée (pas en période de pluie ni de rosée) afin d'éviter des erreurs lors de la pesée.

Il aurait été possible d'aller plus loin par la mise en œuvre de la méthode MERCI (méthode d'estimation de restitution des cultures intermédiaires). Il s'agit d'une méthode permettant d'évaluer les quantités d'éléments présents et qui seront restitués par les couverts végétaux. Il suffit pour cela de multiplier chaque quantité de biomasse d'une espèce du couvert par un coefficient correspondant à l'élément recherché et propre à l'espèce végétale. Les quantités d'éléments disponibles dans le couvert sont ainsi obtenues (Archambeaud *et al.*, 2016). Ces mesures n'ont cependant pas pu être réalisées, faute de temps, car étant trop laborieuses.

7.1.4. – Tea bag index

La méthode des Tea bags a vu le jour en 2010 à Wageningen, aux Pays-Bas. Celle-ci consiste à mesurer la vitesse de décomposition des résidus végétaux par l'usage de simples sachets de thé. Le protocole exact est le suivant (Keuskamp, 2013):

1. Prendre un sachet de thé *Lipton Green tea* (thé fabriqué à partir de feuilles de théier (*Camellia sinensis*)) et un sachet de *Rooibos tea* (thé fabriqué à partir de feuilles de rooibos (*Aspalathus linearis*)) par point d'échantillonnage ;
2. Peser individuellement les sachets et les taguer ;
3. Enterrer 1 sachet de chaque sorte à chaque point d'échantillonnage à une profondeur d'environ huit centimètres, en laissant l'étiquette taguée à la surface

du sol. Les bandes concernées sont ici celles numérotées de 1 à 7 et de 9 à 11, aux blocs A, B et C. Le nombre total de sachets de thé = 60. Date : 11 octobre 2017 ;

4. Récupérer les sachets environ deux mois plus tard (5 décembre 2017) ;
5. Passer les sachets à l'étuve sous 70 °C, pendant au moins 48h ;
6. Peser à nouveau individuellement les sachets ;
7. Encoder les poids avant et après incubation.

La profondeur de huit centimètres empêche la perte ou le déplacement des sachets de thé tout en plaçant ceux-ci dans l'horizon de surface riche en matière organique et donc où l'activité de décomposition est à son maximum. De plus, les facteurs environnementaux, tels que la température et le taux d'humidité, sont plus stables sous une certaine profondeur de sol.

La décomposition est mesurée à partir de la perte de poids des sachets de thé durant l'intervalle de temps qu'ils passent sous terre. La vitesse de décomposition sera ici appelée k et n'est pas considérée comme étant constante. Certains composés organiques sont rapidement décomposés (labiles) alors que d'autres sont plus récalcitrants. Cependant, durant des temps d'incubation sous terre relativement faibles, il n'est pas nécessaire de prendre en compte la constante de la vitesse de décomposition de la fraction récalcitrante. Une approximation de la vitesse de décomposition peut alors être exprimée selon la formule suivante :

$$W_{(t)} = ae^{-kt} + (1 - a)$$

Équation 2 : Poids du substrat de thé après un certain temps d'incubation et en fonction de la vitesse de décomposition et de la fraction décomposable de la matière organique.

Où :

- $W_{(t)}$ = poids du substrat après un temps d'incubation t [g] ;
- t = temps d'incubation [jours] ;
- a = fraction décomposable de la matière organique [$g\ g^{-1}$] ;
- k = constante de la vitesse de décomposition.

La constante de décomposition k peut seulement être estimée à partir des premiers stades de décomposition et la fraction a est seulement estimable à partir du moment où la majeure partie des composés labiles sont décomposés. La vitesse de décomposition du thé rooibos est lente en comparaison avec celle du thé vert. Par conséquent, la décomposition des matières labiles continue dans les thés rooibos une fois que toutes celles du thé vert sont consommées. Afin de résoudre l'Équation 2, une estimation de la fraction décomposable du thé rooibos (a_r) est nécessaire. Pour cela, il faut tout d'abord utiliser la relation entre la fraction décomposable mesurée dans le

champ (a_g) et la fraction hydrolysable H. La fraction hydrolysable est la fraction considérée comme étant décomposable. Elle a été estimée en laboratoire et représente la matière qui peut être prélevée par extraction d'eau et acide. Lors de la décomposition, une partie des composés labiles se stabilise et devient récalcitrante. Cette stabilisation dépend de facteurs environnementaux et résulte du rapport entre la fraction actuelle décomposée (a_g) et la fraction hydrolysable H. L'équation est la suivante :

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

Équation 3 : Facteur de stabilisation en fonction de la fraction décomposable et hydrolysable du thé vert.

Où :

- S = facteur de stabilisation indiquant à quel point la matière est stabilisée ;
- a_g = fraction décomposable du thé vert [$g\ g^{-1}$] ;
- H_g = fraction hydrolysable du thé vert = $0,842\ g\ g^{-1}$.

La fraction décomposable du thé rooibos (a_r) pourra ensuite être déduite par l'équation suivante :

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

Équation 4 : Fraction décomposable du thé rooibos en fonction de sa fraction hydrolysable et du facteur de stabilisation.

Où :

- a_r = fraction décomposable du thé rooibos [$g\ g^{-1}$] ;
- H_r = fraction hydrolysable du thé rooibos = $0,552\ g\ g^{-1}$;
- S = facteur de stabilisation indiquant à quel point la matière est stabilisée.

La fraction décomposable du thé rooibos (a_r) et le poids du sachet de thé rooibos après incubation ($W_r(t)$) seront ceux employés pour résoudre l'Équation 2. La vitesse de décomposition k pourra alors être déterminée (Keuskamp, 2013).

7.2. – Analyses individuelles

7.2.1. – Recensement des vers de terre

La méthode utilisée dans le cadre de ce mémoire pour évaluer la présence de vers de terre a été inspirée de celle mise en place par le projet CARBIOSOL (Portail Wallonie, 2016). Celle-ci consiste à extraire les lombrics en aspergeant le sol d'une solution à base de moutarde. Cette méthode est reconnue comme étant efficace pour la récolte de vers anéciques pouvant être localisés profondément dans le sol

(Jaswinder *et al.*, 2015). Or, comme mentionné au point 4.2, les vers anéciques semblent être ceux ayant le plus d'impact sur les propriétés du sol tout en étant présents en grand nombre en terrains agricoles. Cette méthode apparaît également comme étant très peu impactante sur l'environnement. En plus d'avoir un temps de dégradation dans le sol relativement court, la moutarde ne tue pas les lombrics comme le fait par exemple le permanganate de potassium, et à l'inverse du formol, elle n'est pas cancérigène et n'a pas d'effet phototoxique sur le trèfle (Gunn, 1992). Cette méthode est cependant moins efficace que l'extraction de blocs de sol, mais est moins laborieuse et est recommandée lors d'études comparatives comme dans le cadre de ce mémoire (Eisenhauer *et al.*, 2008).

Les prélèvements doivent être effectués uniquement sur sol ressuyé (ni gelé ou en dégel, ni saturé en eau, ni trop sec). Les prélèvements ont ici été effectués au courant du mois d'octobre. Les bandes concernées sont celles numérotées de 1 à 7 et de 9 à 11, aux blocs A, B et C. Le principe de la méthode appliquée est le suivant :

1. Disposer quatre bâtonnets d'un mètre de longueur en forme de carré au niveau du sol et raser 1 m^2 de culture à l'aide d'un sécateur.
2. Mélanger 10 litres d'eau et 300 g de moutarde ECONOM fine et forte, achetée en magasin, dans un arrosoir.
3. Arroser la parcelle d'1 m^2 avec le mélange eau-moutarde de manière homogène (Figure 15).
4. Recueillir les lombrics dans un petit pot d'éthanol.
5. Après 15 minutes, réitérer les points 2, 3 et 4 pendant encore 15 minutes.
6. Identifier les vers, anéciques ou endogés.



Figure 15 : Arrosage du sol par un mélange d'eau et moutarde.

7.2.2. – Recensement des carabes

Les carabes ont été prélevés à l'aide de *pitfall traps* (Rouabah, 2015). Les *pitfall traps* sont des pots en plastique d'environ 15 cm de diamètre et 15 cm de profondeur, enterrés dans le sol (Figure 17). Ils sont remplis d'une solution d'eau, de sel et de savon. Le savon a pour rôle de réduire la tension de surface de l'eau afin d'attirer les arthropodes vers le fond du piège. Le dessus des pots doit se trouver au niveau de la surface du sol afin de se retrouver sur la trajectoire des insectes épiqués. Les pièges

ont été installés sur les bandes 2, 4, 5, 6, 8, 10, 11, 12, 14, 15, 16 et 18 au niveau du bloc B. Sur chaque bande ont été disposés trois pièges séparés d'une distance de cinq mètres (Figure 16).

		19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
Bois	A																					
					x		x			x			x			x			x			
					x		x			x			x			x			x			
	B		x		x	x	x		x	x	x		x		x	x	x		x			
			x			x			x		x				x		x					
			x			x			x		x				x		x					
	C																					
																						Chemin

Figure 16 : Représentation des emplacements des pitfall traps (x).

La récolte des pièges a été réalisée tous les 15 jours à partir du 15 septembre jusqu'au 24 novembre 2017. Cela représente un total de 6 x 36 échantillons d'insectes. Cet intervalle de temps permet d'englober un maximum d'espèces de carabes présentes sur la parcelle. Dans ce cas-ci, seules les espèces reproductrices d'automne seront représentées. Cette technique de piégeage permet d'obtenir des données fiables sur l'activité des carabes, à l'inverse d'autres techniques telles que les pièges attractifs. Ces derniers ont pour inconvénient d'attirer des espèces qui pourraient être absentes en temps normal (Rasmont *et al.*, 2000).



Figure 17 : Pitfall trap sous le couvert moutarde.

Les échantillons ont tout d'abord été triés au fur et à mesure des semaines de récolte. Les carabes ont été séparés du reste des espèces présentes dans les pièges (Figure 18). Les lombrics, les myriapodes et les staphylins ont été comptés dans chacun des échantillons. Les staphylins sont, eux aussi, des prédateurs de ravageurs. Les lombrics, comme expliqué au point 4.1, jouent un rôle important dans la structure et fertilité du sol. Les myriapodes ont un rôle de décomposeurs de matière organique. Ces individus peuvent donc, eux aussi, jouer le rôle de bio-indicateurs.

Les carabes ont finalement été identifiés jusqu'à l'espèce à l'aide d'un microscope *Leica MS 5* et des clés d'identification « *Handbooks for the identification of british insects* –

Coleoptera Carabidae » de Carl H. Lindroth (1974) et « *De Loopkevers van Nederland & Vlaanderen (Coleoptera : Carabidae)* » de M. Boeken *et al.* (2002) (Figure 18). La collection de carabes de M. Baguette *et al.*, provenant d'une série de pièges situés dans chaque carré UTM de la Belgique et disponible dans les bâtiments de l'UCL, a également été d'une grande aide dans l'étape d'identification.

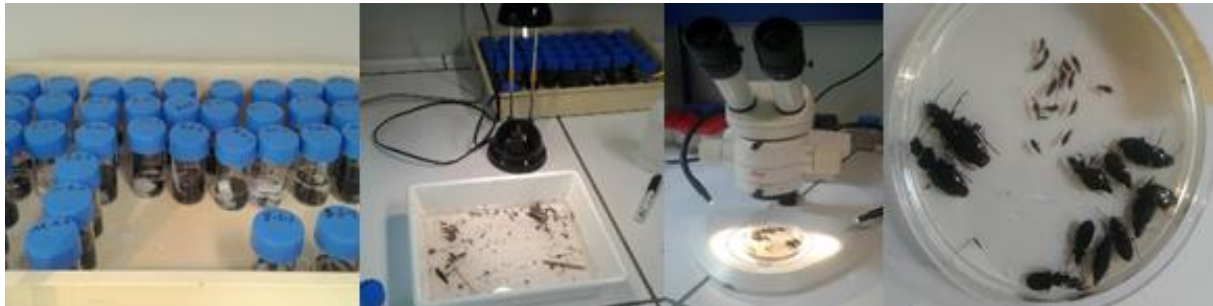


Figure 18 : Etapes de tri et d'identification des échantillons d'insectes. Photo à l'extrême droite : Premier tri des carabes en fonction de leur taille avant passage au microscope.

La diversité est classiquement donnée comme le paramètre principal qui permet d'évaluer la qualité d'un site. L'indice de diversité spécifique de Shannon est l'un des plus connus et sera celui utilisé dans le cadre de ce mémoire. Sa formule est la suivante (Rasmont *et al.*, 2000) :

$$I_{sh} = - \sum_{i=1}^S p_i * \log_2 p_i$$

$$\text{avec } p_i = \frac{N_i}{N}$$

Équation 5 : Indice de Shannon en fonction de la proportion des espèces par rapport au nombre total.

Où :

- I_{sh} = indice de Shannon [bits] ;
- i = une espèce du milieu d'étude ;
- S = richesse spécifique ;
- p_i = proportion d'une espèce i par rapport au nombre total d'espèces (S) dans le milieu d'étude ;
- N_i = nombre de spécimens de l'espèce i ;
- N = nombre total de spécimens de la station.

Le nombre total de carabes présents dans chacun des traitements sera, lui aussi, analysé.

7.2.3. – Respirométrie

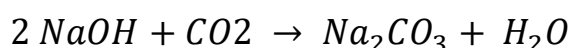
La respirométrie, comme son nom l'indique, permet de mesurer l'activité respiratoire du sol et donne ainsi une indication sur l'activité biologique des micro-organismes présents dans le sol. Cette méthode donne une valeur de la vitesse à laquelle le carbone organique du sol est minéralisé en CO_2 par les micro-organismes. La vitesse dépend d'une part de l'activité métabolique des organismes du sol et d'autre part de la matière organique à dégrader. Les mesures de respirométrie sont rendues possibles via la mesure de l'évolution de la conductivité électrique d'une solution d'hydroxyde de carbone (NaOH) après absorption progressive du CO_2 dégagé par l'activité microbienne du sol.

Les prélèvements ont été faits sur les bandes numérotées de 1 à 7 et de 9 à 11 aux blocs A, B, C, D et E. La date des prélèvements a été choisie en fonction des conditions climatiques (sol ressuyé) et de l'état des couverts végétaux. Les prélèvements ont été réalisés le 6 mars 2018, c'est-à-dire quelques temps après la destruction des couverts. Sur chaque point d'échantillonnage, cinq prélèvements de sol ont été effectués sur un mètre carré à l'aide d'une tarière pédologique (Figure 19). Seuls les 15 premiers centimètres ont été extraits du sol, on considère en effet que la majorité de l'activité microbienne est présente dans cet horizon de sol (Davet, 1996). Les cinq prélèvements de sol frais ont ensuite été mélangés et tamisés à l'aide d'un tamis de 5 mm (Figure 19). De ce mélange ont été prélevés 4 x 40 g de sol. L'un de ces quatre échantillons est envoyé à l'étuve sous 105°C pendant minimum 48 h afin d'en obtenir le poids sec. Les trois autres servent aux mesures de respirométrie. Cela représente au total 150 mesures.



Figure 19 : Prélèvements de sol frais à la tarière et tamisage à 5 mm.

Pour réaliser cette expérience, comme l'illustre la Figure 20, 40 g de sol frais et 25 ml d'une solution d'hydroxyde de sodium 0,5 M (NaOH) contenue dans un petit pot en plastique, ont été placés dans un bocal fermé hermétiquement. Les 150 bocaux ainsi que trois bocaux témoins, contenant seulement une solution de NaOH , ont été placés dans un local fermé et sous température constante de 28°C . Le carbone organique (C_{org}) contenu dans les pots se transforme alors progressivement en dioxyde de carbone gazeux (CO_2). Le CO_2 produit par la population microbienne va ensuite réagir avec la solution de NaOH selon la réaction suivante :



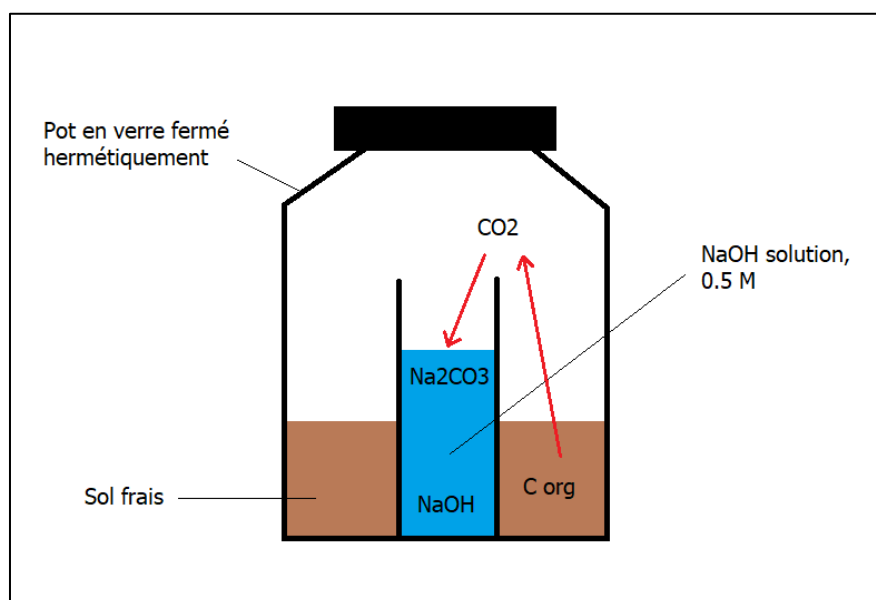


Figure 20 : Schéma d'un échantillon de respirométrie.

Plus le CO_2 réagit, plus la conductivité électrique de la solution décroît. La relation linéaire existant entre le CO_2 absorbé et la conductivité électrique permet de déterminer la quantité de CO_2 à l'aide d'un conductimètre (Figure 21). Cette relation est donnée par l'équation suivante :

$$\text{CO}_2\text{abs}(t) = V \times M \times 44 \times 0,5 \times \frac{C_1 - C_x(t)}{C_1 - C_2}$$

Équation 6 : Quantité de CO_2 absorbé en fonction de la conductivité électrique.

Où :

- $\text{CO}_2\text{abs}(t)$ = quantité de CO_2 ayant réagi avec NaOH au temps t [mg] ;
- V = volume de la solution de NaOH [ml] ;
- M = molarité de la solution de NaOH [mol/L] ;
- C_1 = conductivité électrique de la solution pure de NaOH 0,5 M [mS/cm] ;
- C_2 = conductivité électrique de la solution pure de Na_2CO_3 0,25 M [mS/cm] ;
- $C_x(t)$ = conductivité électrique de la solution de NaOH mesurée à l'instant t [mS/cm] ;
- 44 = masse molaire de CO_2 [g/mol] ;
- 0,5 = coefficient stœchiométrique de la réaction entre CO_2 et NaOH .

La conductivité est mesurée toutes les semaines pendant une période de cinq semaines. Des mesures de carbone organique sont également réalisées sur sol sec prélevé aux mêmes emplacements et à la même période que le sol frais. Ces données permettent de rapporter la quantité de CO_2 produite par les micro-organismes sur la quantité de carbone organique du sol.



Figure 21 : A gauche : bocaux fermés hermétiquement et contenant du sol frais et une solution de NaOH. A droite : mesure de la conductivité de la solution de NaOH à l'aide du conductimètre.

8 – Traitement 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, El Gouch et Govaerts, 2016) et sont détaillés dans cette section. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel *Microsoft Excel* et du logiciel statistique libre *R studio*.

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 comptant 5 niveaux : T1, T2, R, T3 et T4. Pour certaines expérimentations, le facteur « Densité » sera également pris en compte. Il s'agit aussi d'un facteur catégoriel et fixe, et comptant 2 niveaux : D1 et D2. Le facteur « Bloc » (A, B, C, D et E) n'est lui pas considéré comme un facteur explicatif mais sert de répétitions.

8.1. – Moyennes et écart-types

Pour chaque traitement, et dans certains cas à chaque densité, les moyennes (μ) et écarts-type (σ) ont été calculés selon les formules suivantes :

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{et} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n-1}}$$

Équation 7 : Valeurs des moyennes et écart-types des résultats.

Où :

- x_i = valeur obtenue au point de prélèvement i, c'est-à-dire la $i^{\text{ème}}$ répétition ;
- n = nombre de points de prélèvements, c'est-à-dire le nombre de répétitions effectuées pour chaque niveau du facteur explicatif. Comme les données ont

été collectées auprès d'un échantillon représentatif de tous les points de la parcelle, on doit diviser par $n-1$;

- μ = valeur moyenne des résultats ;
- σ = écart-type lié à la moyenne.

L'écart-type permet de voir la dispersion des données autour de la moyenne. Plus celui-ci est élevé, plus les valeurs sont distribuées autour de la valeur moyenne.

8.2. – Variabilité due au terrain

Comme expliqué au point 6, une bande de référence a été semée entre chaque traitement. Cette disposition permet de tenir compte de la variabilité des résultats due à l'effet terrain. Afin d'exprimer cela, la formule suivante a été appliquée à toutes les valeurs obtenues aux points de prélèvements :

$$x_{icorr} = x_i + (\mu_r - x_{r(i)})$$

Équation 8 : Correction des mesures en fonction des valeurs de références qui les juxtaposent.

Où :

- x_{icorr} = valeur obtenue au point de prélèvement i corrigée ;
- x_i = valeur obtenue au point de prélèvement i, c'est-à-dire la $i^{\text{ème}}$ répétition ;
- μ_r = moyenne de toutes les valeurs obtenues aux points de prélèvements situés sur les bandes de référence ;
- $x_{r(i)}$ = valeur obtenue au point de prélèvement situé sur la bande de référence à côté du point de prélèvement i.

8.3. – Analyse de la variance

L'analyse de la variance et le test de comparaison multiple (Tukey) permettent de voir, pour chaque mesure, s'il existe ou non des différences significatives entre les valeurs de chaque traitement et dans certains cas de densité.

8.3.1. – ANOVA 1

Les valeurs moyennes obtenues pour chaque traitement, uniquement à la densité D1, ont été comparées via une analyse de variance à un facteur de classification, soit ANOVA 1. L'ANOVA 1 permet en effet de vérifier si une variable quantitative Y peut être expliquée à partir d'un facteur catégoriel (ici : Traitement).

L'objectif est ici de vérifier, via des tests de Fisher, si les moyennes μ pour chaque niveau d'un facteur donné sont égales. Le modèle utilisé est le suivant :

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

Avec $i = T1, T2, R, T3, T4$; $k = 1, \dots, n_i$

Où :

- Y_{ik} = variable quantitative étudiée ;
- i = niveau du facteur « Traitement » ;
- k = numéro du point de prélèvement ;
- μ_i = moyenne pour le niveau i du facteur « Traitement » ;
- ε_{ik} = écart résiduel entre l'observation k et la moyenne μ_i , avec $\varepsilon_{ik} \sim iN(0, \sigma^2)$;
- μ = moyenne générale ;
- α_i = effet du niveau i du facteur « Traitement ».

L'hypothèse H_0 testée est alors la suivante :

$$H_0 : \mu_{C1} = \mu_{C2} = \mu_{C3} = \mu_{C4} = \mu_{C5}$$

Si la p-valeur issue du test de Fisher est inférieure à 0,05, l'hypothèse H_0 est rejetée. Cela signifie que toutes les moyennes ne sont pas égales et que donc au moins une des 5 moyennes est significativement différente des autres.

Néanmoins, l'ANOVA 1 ne nous permet pas de savoir quels sont les niveaux qui diffèrent des autres. Il sera ici nécessaire de réaliser un test de comparaison multiple, comme expliqué au point 8.3.3.

Avant de réaliser un test ANOVA, trois hypothèses doivent être vérifiées :

- La normalité des résidus : à vérifier en réalisant un QQ plot des résidus.
- L'indépendance : assurée par le design et le bon contrôle des conditions expérimentales.
- L'égalité des variances : à vérifier en réalisant un graphique des résidus en fonction du traitement ou en utilisant le test de Levene.

8.3.2. – ANOVA 2

L'ANOVA 2 permet de vérifier, via des tests de Fisher, si une variable quantitative Y peut être expliquée par 2 facteurs catégoriels (ici : Traitement et Densité). Le modèle utilisé est le suivant :

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

Avec $i = C1, C2, C3, C4, C5$; $j = D1, D2$; $k = 1, \dots, n_i$

Où :

- Y_{ijk} = variable quantitative étudiée ;
- i = niveau du facteur « Traitement » ;
- j = niveau du facteur « Densité » ;
- k = numéro du point de prélèvement ;
- μ_{ij} = moyenne pour le prélèvement (i,j) ;
- ε_{ijk} = écart résiduel entre l'observation k et la moyenne μ_{ij} , avec $\varepsilon_{ijk} \sim iN(0, \sigma^2)$;
- μ = moyenne générale ;
- α_i = effet du niveau i du facteur « Traitement » ;
- β_j = effet du niveau j du facteur « Densité » ;
- γ_{ij} = effet d'interaction entre le niveau i du facteur traitement et le niveau j du facteur densité.

Les hypothèses H_0 testées par l'ANOVA 2 sont les suivantes :

$$\sum_i \alpha_i = 0, \text{ c'est-à-dire que : } \mu_{C1} = \mu_{C2} = \mu_{C3} = \mu_{C4} = \mu_{C5} \quad (1)$$

Si la p-valeur associée à cette hypothèse est inférieure à 0,05, le facteur "Traitement" a un effet significatif sur la variable quantitative Y étudiée lorsque les deux niveaux du facteur "Densité" sont considérés en même temps.

$$\sum_j \beta_j = 0, \text{ c'est-à-dire que : } \mu_{D1} = \mu_{D2} \quad (2)$$

Si la p-valeur associée à cette hypothèse est inférieure à 0,05, le facteur "Densité" a un effet significatif sur la variable quantitative Y étudiée lorsque les cinq niveaux du facteur "Traitement" sont considérés en même temps.

$$\sum_i \gamma_{ij} = 0 \text{ et } \sum_j \gamma_{ij} = 0 \quad (3)$$

Si la p-valeur associée à ces deux hypothèses est inférieure à 0,05, il existe une interaction significative entre les facteurs "Traitement" et "Densité" pour au moins un traitement (i,j). Cela signifie que le fait de passer d'un niveau du facteur "Densité" à l'autre a un effet différent sur la variable quantitative Y selon le niveau du facteur "Traitement" considéré, et inversement.

8.3.3. – Test de Tukey

Dans le cas où l'hypothèse H_0 d'égalité des moyennes est rejetée, c'est-à-dire qu'il y a au moins une différence significative, un test de comparaison multiple, ou test de Tukey, peut être fait. Celui-ci réalise toutes les comparaisons deux à deux et permet ainsi de déterminer quels niveaux de facteurs (ANOVA 1) ou quelles combinaisons de

niveaux de facteurs (ANOVA 2) sont significativement différents. Si la p-valeur obtenue grâce au test est inférieure à 0,05, l'hypothèse d'égalité de 2 moyennes est rejetée.

8.4. – Corrélation

La corrélation mesure la relation entre deux variables quantitatives. Les deux coefficients de corrélation, utilisés dans le cadre de ce mémoire, sont le coefficient de Pearson « r » et le coefficient de Spearman « r_s ». Ceux-ci sont tous les deux compris dans l'intervalle -1 à +1. La valeur -1 indique une variation simultanée dans le sens inverse tandis que la valeur +1 indique une variation simultanée dans le même sens. La valeur 0 représente une absence de corrélation et que donc le couple de variables est indépendant. La corrélation de Pearson évalue la relation linéaire entre deux variables continues tandis que la corrélation de Spearman évalue la relation monotone entre deux variables continues ou ordinales (Statistica, 2016 ; Minitab, 2017).

8.5. – Régression linéaire

La régression linéaire a pour objectif de résumer la relation entre deux variables X et Y par une fonction simple de type « $Y = aX + b$ ». Le coefficient de détermination R^2 mesure la proportion de la variation de Y expliquée par la variation de X. Dans le cas de la régression linéaire :

$$R^2 = \frac{SSE}{SST} ;$$

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

Équation 9 : Coefficient de détermination (R^2) et estimation de la variabilité des données.

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.

Le coefficient R^2 représente donc la proportion de variation de Y expliquée par la variation de X. Ses valeurs sont comprises dans l'intervalle -1 et +1.

Partie 4 : Résultats

Les résultats obtenus lors des analyses communes et individuelles détaillées dans la partie « Matériel et méthodes » sont présentés dans cette partie 4 essentiellement sous forme de graphiques, réalisés à l'aide du logiciel R Studio.

Les analyses statistiques effectuées à partir de ces résultats, sont, elles aussi, réalisées à l'aide du logiciel R Studio. Dans un premier temps, l'analyse statistique ANOVA permet de révéler une différence significative ($\alpha=0,05$) entre les valeurs des différents traitements et dans certains cas des deux densités. Ensuite, lorsque le facteur traitement ou densité a une influence sur les résultats d'après l'ANOVA, les résultats des tests de Tukey permettent de mettre en évidence quels sont les traitements présentant une différence significative entre eux. Les résultats des tests de Tukey sont présentés dans la colonne « Groupe ». Des lettres de groupes identiques signifient que les moyennes des facteurs ne sont pas significativement différentes.

Les résultats concernant les mesures communes sont présentés au point 9, ceux relatifs à la biologie du sol sont présentés au point 10 et finalement les corrélations entre les variables étudiées au point 11.

9 – Mesures communes

9.1. – Couverture du sol

Comme expliqué au point 7.1.1, l'évolution de la couverture du sol peut être comparée à une expansion foliaire progressive décrite selon l'Équation 1. Cette comparaison est rendue possible par les mesures réalisées toutes les semaines environ, depuis le semis des couverts jusqu'à leur expansion maximale.

De cette équation, les deux paramètres variables au cours du temps à estimer sont, premièrement, le nombre de jours après le semis au point d'inflexion (temps nécessaire pour atteindre 50% du sol couvert) $t_{0(i)}$ et, deuxièmement, le taux d'expansion $V_{(i)}$ à ce même point d'inflexion. Pour l'ensemble des mesures, le paramètre $t_{0(i)}$ est estimé à 29,34 jours et le paramètre $V_{(i)}$ est estimé à une croissance foliaire de 3,95% par jour.

Une analyse a été réalisée sur l'ensemble des traitements dans le but de comparer ces deux paramètres pour les deux densités de semis D1 et D2 (Tableau 1). Il n'existe pas de différence significative entre les deux densités. Dans la mesure où la majorité des autres mesures ont été réalisées sur la densité D1 uniquement, la suite des résultats de couverture du sol s'appliquera pour cette densité.

Tableau 1 : Estimations et écarts-types des paramètres du modèle de l'évolution de la couverture du sol des couverts végétaux pour les densités D1 et D2.

Densité de semis	Estimation V	Écart-type V	Estimation t_0	Écart-type t_0
D1	3,98	+/- 0,38	29,38	+/- 0,61
D2	3,92	+/- 0,42	29,29	+/- 0,69

L'évolution de la couverture du sol ($L_{(i,t)}$), prédite en fonction du temps (jours après semis) et du traitement observé, montre une cinétique d'allure relativement semblable pour les traitements sans couvert, 2 espèces, 5 espèces et 10 espèces, qui diffère en revanche de celle du traitement moutarde. De plus, les traitements à 5 et 10 espèces, et principalement celui à 5 espèces, semblent supérieurs aux trois autres (Figure 22).

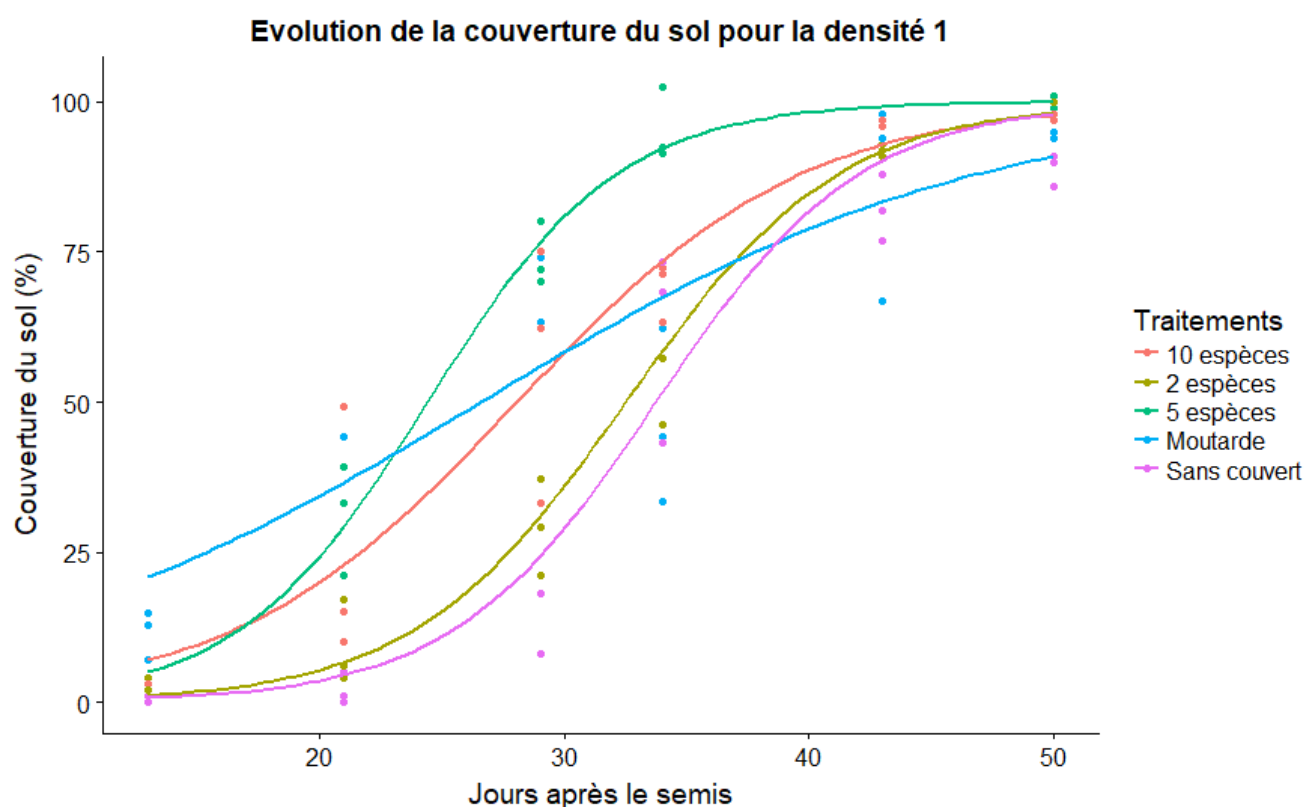


Figure 22 : Évolution de la couverture du sol (%) en fonction du nombre de jours après le semis (20 juillet 2017) des différents traitements pour la densité D1.

Une analyse statistique de type ANOVA 1 des paramètres $V_{(i)}$ et $t0_{(i)}$ a été effectuée en fonction du facteur « Traitement » et ne montre pas de différence significative entre les différents types de couverts pour le paramètre du taux de croissance $V_{(i)}$ (Tableau 2). Pour le paramètre $t0_{(i)}$, à l'inverse, une différence significative est mise en évidence par les différents groupes du test de Tukey (Tableau 3). La différence est significative au seuil $\alpha = 0,01$ (Tableau 2). Il a pu être observé que les traitements moutarde, 5 espèces et 10 espèces présentent une couverture foliaire couvrant 50 % du sol plus rapidement que les deux autres traitements, après respectivement 27, 24 et 28 jours suivant le semis.

Tableau 2 : Résultats de l'ANOVA 1 pour les paramètres $t0$ et v . Le facteur testé est le « Traitement ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et $Pr>F$ la p -valeur associée à F . Une p -valeur ($Pr>F$) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée.

Paramètre	Facteur	DDL	F	Pr>F
$t0_{(i)}$	Traitement	4	7,215	0,00532
$V_{(i)}$	Traitement	4	2,708	0,0918

Tableau 3 : Estimations et écarts-types des paramètres du modèle de l'évolution de la couverture du sol des couverts végétaux pour les 5 traitements sous densité D1. Les lettres de groupes sont données pour le paramètre $t0$.

Traitement	Estimation V	Écart-type V	Estimation $t0$	Écart-type $t0$	Groupe
Sans couvert	5,98	+/- 1,27	33,68	+/- 0,89	A
Moutarde	2,60	+/- 0,30	26,83	+/- 1,02	BC
2 espèces	5,69	+/- 0,85	32,44	+/- 0,62	AB
5 espèces	4,90	+/- 0,62	24,44	+/- 0,71	C
10 espèces	4,25	+/- 0,52	27,77	+/- 0,76	ABC

9.2. – Green area index (GAI)

La surface verte utile des différents traitements (GAI) a été analysée pour la densité 1 uniquement. Une différence apparaît entre les traitements (Figure 23). Les valeurs de GAI sont supérieures à 5 (valeurs optimales) pour les mélanges de 2 et 10 espèces, tandis qu'elles sont inférieures à 3 (valeurs non optimales) pour les autres traitements, et même à 1 pour le traitement sans couvert (Tableau 5).

Néanmoins, une analyse ANOVA 1 a été réalisée sur les valeurs de GAI en fonction du facteur « Traitement » et a montré qu'il n'existait pas de différence significative entre les différents traitements (Tableau 4). De plus, comme l'indiquent la Figure 24 et le Tableau 5, les écart-types sont élevés pour chacun des traitements. Ce dernier est exceptionnellement élevé dans le cas du traitement sans couvert, il est environ six fois supérieur à la moitié de la moyenne. Ces valeurs élevées des écart-types sont l'expression d'une moyenne peu représentative.

Tableau 4 : Résultats de l'ANOVA 1 pour le GAI. Le facteur testé est le « Traitement ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et Pr>F la p-valeur associée à F. Une p-valeur (Pr>F) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée.

	DDL	F	Pr>F
Traitement	4	1,432	0,308

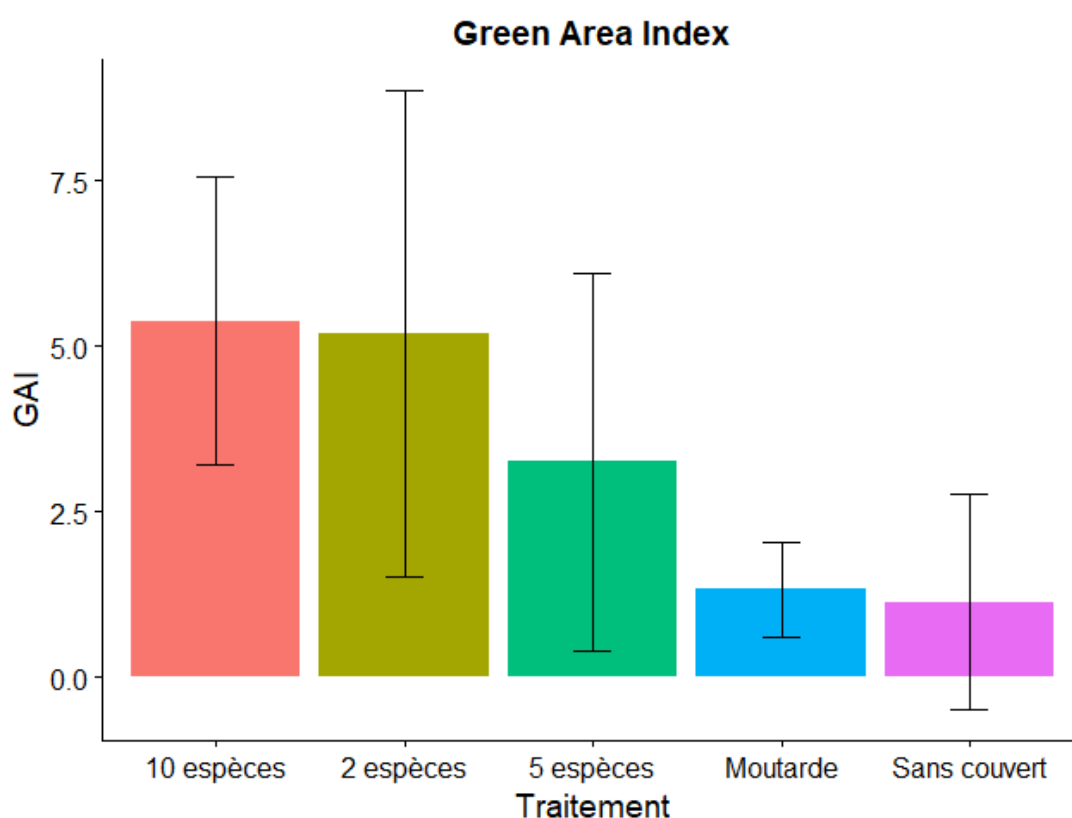


Figure 23 : Green Area Index (GAI) des différents traitements pour la densité D1. Les prélèvements ont été réalisés durant la semaine du 18 octobre.

Tableau 5 : Moyennes et écart-types des mesures de GAI des différents traitements de densité D1.

Traitements	Moyenne	Écart-type
Sans couvert	1,14	+/- 1,62
Moutarde	1,33	+/- 0,71
5 espèces	3,26	+/- 2,85
2 espèces	5,19	+/- 3,67
10 espèces	5,38	+/- 2,17

9.3. – Biomasse aérienne

La biomasse aérienne est une variable quantitative qui peut être expliquée par deux facteurs catégoriels : les facteurs « Traitement » et « Densité ». Les valeurs obtenues en tonnes de matière sèche par hectare ($T\ MS.ha^{-1}$) pour chacun des traitements et chacune des densités, ont dans un premier temps été retranscrites sous forme de graphique (Figure 24). D'une première observation, il ressort que les traitements sans couvert et moutarde présentent une production de biomasse plus faible que les trois autres traitements, et cela pour les deux densités de semis. Il semble également que l'augmentation de densité de semis fasse augmenter la production de biomasse, à l'exception du traitement 10 espèces.

Biomasse aérienne des différents traitements aux densités D1 et D2

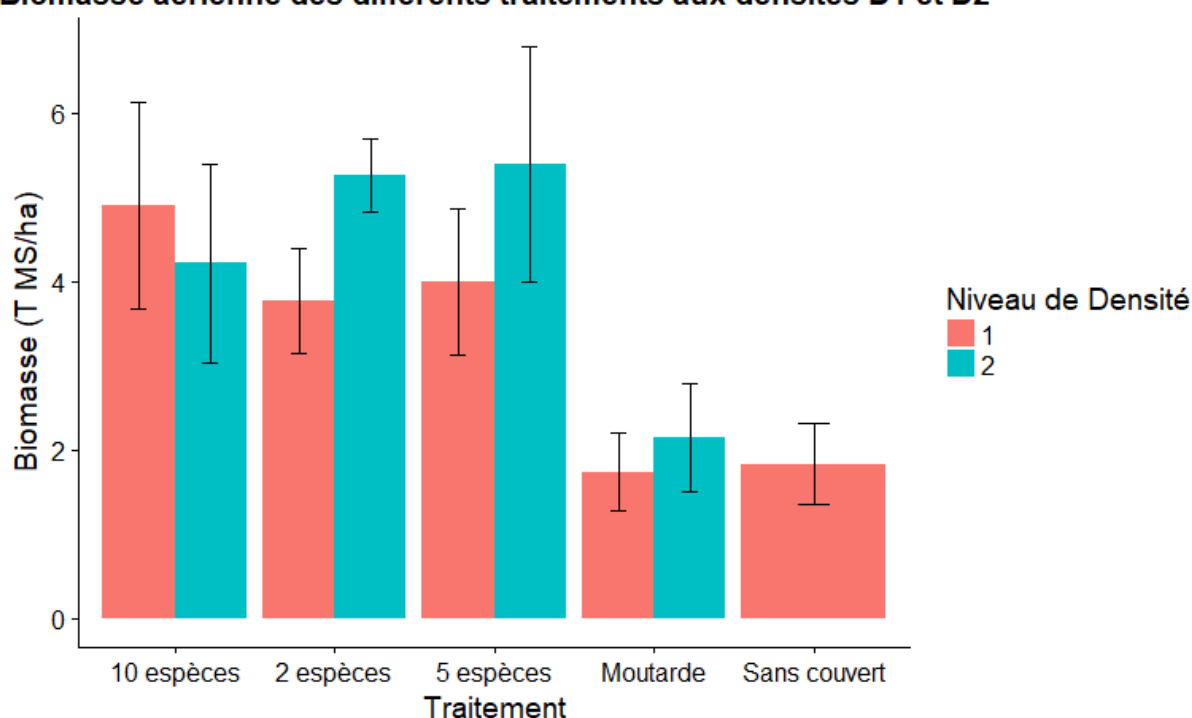


Figure 24 : Biomasse aérienne (T MS/ha) des différents traitements aux deux densités D1 et D2. Les prélèvements ont été effectués le 18 décembre 2017.

L'ANOVA 2 de la biomasse en fonction des traitements et des densités de semis montre qu'il n'existe pas de différence significative entre les deux densités, mais bien entre les différents traitements (Tableau 6). Il n'y a par ailleurs pas d'effet d'interaction (Traitement * Densité).

Tableau 6 : Résultats de l'ANOVA 2 pour la biomasse. Les facteurs testés sont le « Traitement » et la « Densité ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et $Pr>F$ la p-valeur associée à F. Une p-valeur ($Pr>F$) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée.

	DDL	F	Pr>F
Traitement	4	14,365	$2,67.10^{-5}$
Densité	1	3,034	0,0996
Traitement * Densité	3	2,087	0,1399

Étant donné que la majorité des autres variables étudiées ont été analysées en fonction de la densité D1, une ANOVA 1 de la biomasse aérienne a été réalisée selon le facteur « Traitement » pour cette densité (Tableau 7). L'ANOVA montre une différence significative entre les traitements. Un test de Tukey a alors été réalisé et révèle des biomasses plus élevées pour les traitements de 5 et 10 espèces que pour les traitements sans couvert et moutarde. Le traitement 2 espèces n'est lui significativement différent d'aucun autre traitement (Tableau 8).

Tableau 7 : Résultats de l'ANOVA 1 pour la biomasse de densité D1. Le facteur testé est le « Traitement ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et $Pr>F$ la p-valeur associée à F. Une p-valeur ($Pr>F$) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée.

	DDL	F	Pr>F
Traitement	4	9,511	0,00194

Tableau 8 : Moyennes, écart-types et groupes de Tukey des mesures de biomasse des différents traitements de densité 1.

Traitement	Moyenne	Écart-type	Groupe
Sans couvert	1,83	+/- 0,48	B
Moutarde	1,73	+/- 0,46	B
2 espèces	3,77	+/- 0,62	AB
5 espèces	3,99	+/- 0,87	A
10 espèces	4,90	+/- 1,22	A

Une dernière observation de la biomasse en fonction du nombre d'espèces présentes dans les traitements a été effectuée (Figure 25). Afin d'obtenir cette régression linéaire, la variable catégorielle « Traitement » a été convertie en variable quantitative. Le traitement sans couvert a pris la valeur de 0, le traitement moutarde la valeur de 1, et ainsi de suite. De ce graphique peut être déduit que, pour la densité D1, lorsqu'une espèce est ajoutée au mélange, environ 300 kg de $MS.ha^{-1}$ de biomasse supplémentaire sont produits.

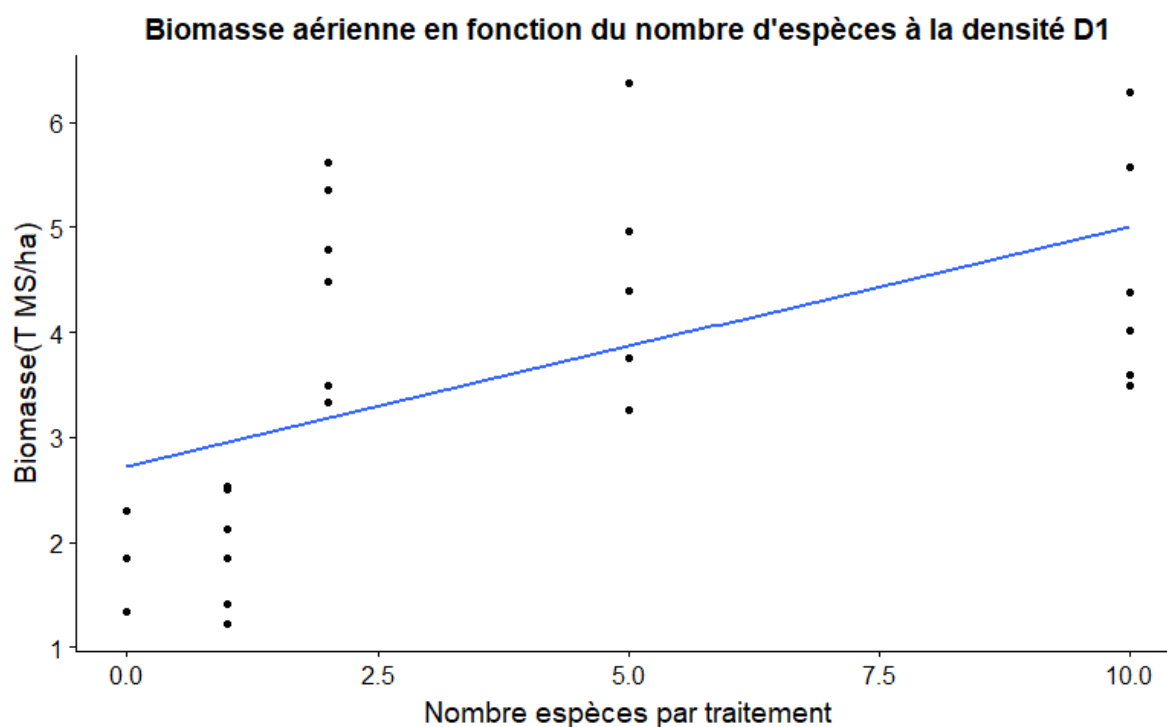


Figure 25 : Production de biomasse aérienne en fonction du nombre d'espèces présentes dans les mélanges, pour la densité D1.

9.4. – Tea bag index (TBI)

La vitesse de décomposition des résidus végétaux « k », mesurée à partir de la perte de poids des sachets de thé dans les différents traitements, a été analysée sous la densité 1 uniquement. Aucune tendance particulière n'apparaît entre les comportements des différents traitements. Le traitement moutarde possède la valeur de k la plus élevée et le traitement 5 espèces la plus faible. Toutefois la différence entre chacun des traitements n'est pas manifeste (Figure 26 et Tableau 7).

Cette observation a été confirmée par une analyse ANOVA 1, réalisée en fonction du facteur « Traitement ». Il n'existe pas de différence significative entre les moyennes de chacun des traitements (Tableau 6).

Tableau 6 : Résultats de l'ANOVA 1 pour le TBI. Le facteur testé est le « Traitement ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et $Pr>F$ la p -valeur associée à F . Une p -valeur ($Pr>F$) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée.

	DDL	F	Pr>F
Traitement	4	0,739	0,588

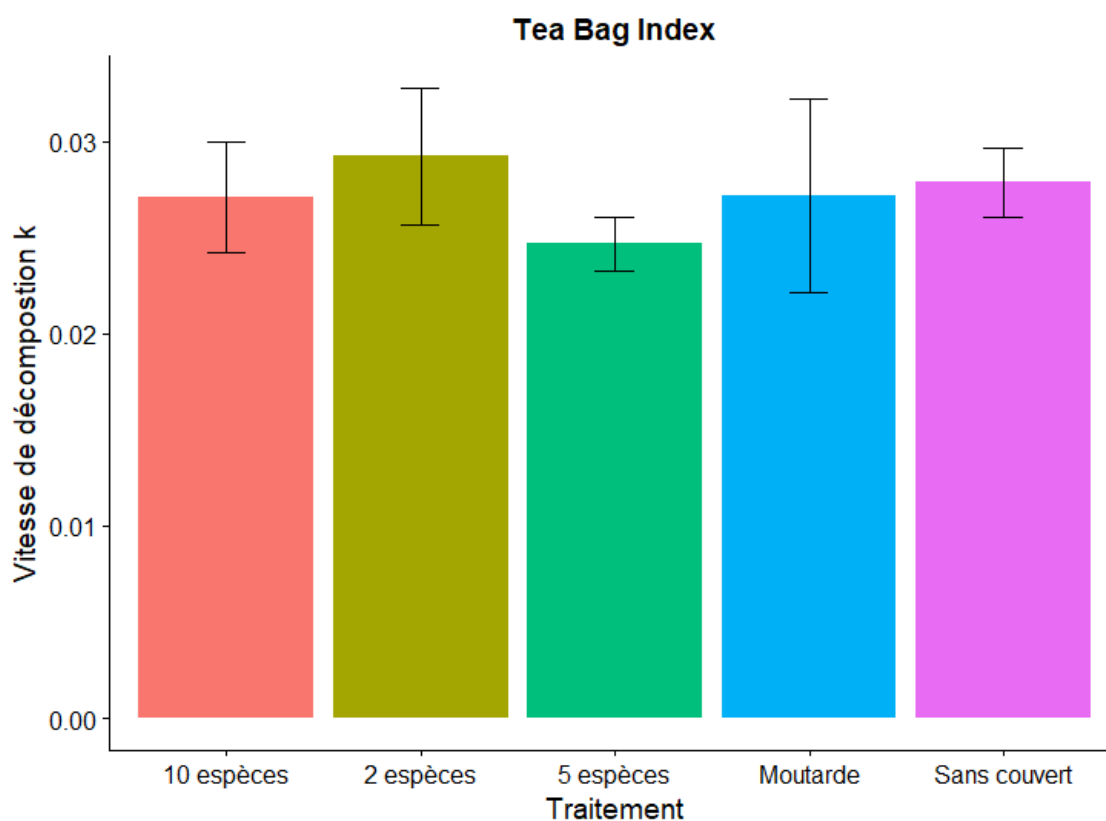


Figure 26 : Vitesse de décomposition des résidus végétaux des différents traitements pour la densité 1. Les prélèvements de sachets de thé ont été effectués début décembre, après 2 mois d'incubation.

Tableau 7 : Moyennes et écart-types des mesures de TBI des différents traitements de densité D1.

Traitements	Moyenne	Écart-type
Sans couvert	0,028	+/- 0,0018
Moutarde	0,027	+/- 0,0050
2 espèces	0,029	+/- 0,0036
5 espèces	0,025	+/- 0,0014
10 espèces	0,027	+/- 0,0029

10 – Mesures individuelles

10.1. – Recensement de lombrics

La population de lombrics par mètre carré, récoltée après arrosage à la moutarde, a été analysée sous les traitements de densité 1 uniquement. Une différence apparaît entre les traitements (Figure 27). La population de lombrics pour le traitement sans couvert est relativement élevée en comparaison aux quatre autres traitements (Tableau 9).

Toutefois, une analyse ANOVA 1 a été réalisée sur les valeurs obtenues pour les populations de lombrics en fonction du facteur « Traitement » et a montré qu'il n'existait pas de différence significative entre les moyennes des traitements (Tableau 8). De plus, comme l'indiquent la Figure 28 et le Tableau 9, les écart-types sont élevés pour chacun des traitements. Ces derniers ont des valeurs particulièrement élevées pour les traitements moutarde et 2 espèces. Les écart-types sont, pour ces deux traitements, supérieurs à la moitié de la moyenne et traduisent donc une moyenne peu représentative.

Tableau 8 : Résultats de l'ANOVA 1 pour le comptage de lombrics. Le facteur testé est le « Traitement ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et Pr>F la p-valeur associée à F. Une p-valeur (Pr>F) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée.

	DDL	F	Pr>F
Traitement	4	1,017	0,444

Tableau 9 : Moyennes et écart-types des mesures de populations de lombrics des différents traitements de densité D1.

Traitements	Moyenne	Écart-type
Sans couvert	17	+/- 4,36
Moutarde	9,33	+/- 7,64
2 espèces	10	+/- 6,54
5 espèces	11	+/- 3,00
10 espèces	12,67	+/- 2,98

Une observation des trous de lombrics dans le profil du sol a été réalisée par Diane Heymans lors de ses prélèvements de carottes de sol. Une étude ANOVA 2 des densités de trous de lombrics observés en fonction des facteurs « Traitement » et « Profondeur » a prouvé qu'il y avait une différence significative entre les différentes profondeurs de sol (30, 45, 60, 75 et 90 cm). Cependant, aucune différence n'a été décelée pour le facteur « Traitement ».

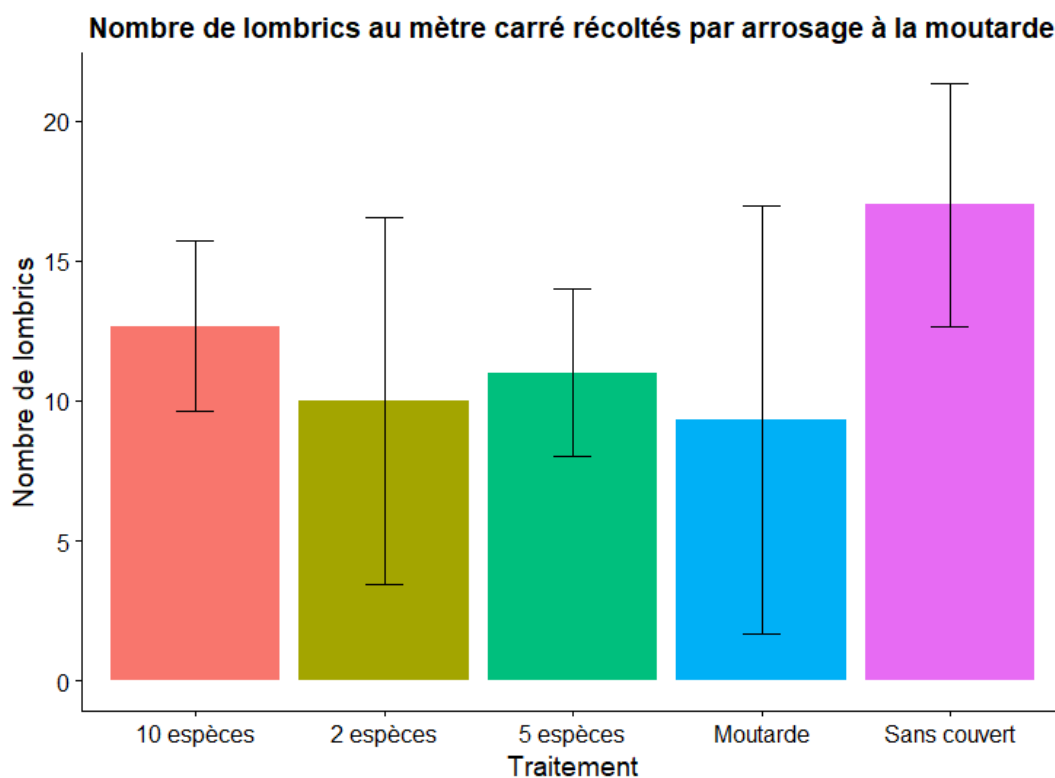


Figure 27 : Population de lombrics récoltés à 3 répétitions sur 1 mètre carré de chacun des différents traitements pour la densité D1. Les prélèvements de lombrics ont été réalisés dans le courant du mois d'octobre.

10.2. – Recensement de carabes

Comme expliqué au point 7.2.2, nous analysons ici le nombre total de carabes recensés et l'indice de diversité spécifique (Ish). Ces deux variables quantitatives peuvent être expliquées par trois facteurs catégoriels : « Traitement », « Densité de semis » et « Date de prélèvement ».

À l'inverse de toutes les autres variables étudiées et par manque de temps, les valeurs obtenues après recensement des carabes n'ont pas subi de correction (Voir point 8.2). Toutefois, les valeurs de production de biomasse entre toutes les bandes de référence n'ont pas montré de différence significative. La présence de carabes étant liée à la flore environnante et ainsi à la production de biomasse, on accepte donc qu'il n'y ait pas eu de correction dans ce cas-ci.

10.2.1. – Nombre total de carabes recensés

Une première ANOVA 3 du nombre total de carabes recensés en fonction des facteurs « Traitement », « Densité » et « Date » montre qu'il y a une différence entre les traitements mais également entre les dates de prélèvements. Aucune différence

n'est observée entre les deux densités. L'interaction entre les facteurs « Traitement » et « Densité » est significative (Tableau 10).

Tableau 10 : Résultats de l'ANOVA 3 pour le nombre total de carabes recensés. Les facteurs testés sont le « Traitement », la « Densité » et la « Date ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et Pr>F la p-valeur associée à F. Une p-valeur (Pr>F) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée.

	DDL	F	Pr>F
Traitement	4	5,566	0,00034
Densité	1	4,125	0,05499
Date	1	10,311	0,00163
Traitement * Densité	3	12,120	$4,04 \cdot 10^{-7}$
Traitement * Date	4	0,217	0,92851
Densité * Date	1	0,137	0,71137
Traitement * Densité * Date	3	1,715	0,16646

Afin de poursuivre le même développement que pour les autres variables étudiées, nous nous intéressons maintenant à la densité D1 uniquement. L'ANOVA 1 (Tableau 11) et le test de Tukey du nombre total de carabes recensés en fonction du facteur « Date » montre tout d'abord une valeur significativement plus élevée pour la troisième date de prélèvement (13/10/2017) que pour la dernière date de prélèvement (24/11/2017), pour l'ensemble des traitements. Les quatre autres dates ne sont, elles, pas significativement différentes les unes des autres (Tableau 12). Le graphique illustrant l'évolution du nombre total de carabes en fonction des différents traitements au cours du temps se trouve en Annexe 2.

Tableau 11 : Résultats de l'ANOVA 1 pour le nombre total de carabes recensés. Le facteur testé est la « Date ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et Pr>F la p-valeur associée à F. Une p-valeur (Pr>F) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée.

	DDL	F	Pr>F
Date	4	5,629	0,0198

Tableau 12 : Moyennes, écart-types et groupes de Tukey des mesures du nombre total de carabes recensés lors des différentes dates pour l'ensemble des traitements de densité D1.

Date	Moyenne	Écart-type	Groupe
15/09/2017	20,00	+/- 9,17	AB
29/09/2017	20,60	+/- 8,37	AB
13/10/2017	21,13	+/- 10,20	A
27/10/2017	19,47	+/- 16,92	AB
10/11/2017	17,47	+/- 7,34	AB
24/11/2017	11,87	+/- 4,39	B

L'ANOVA 1 du nombre total de carabes en fonction du facteur « Traitement » pendant toute la période d'expérimentation (du 15/09 au 24/11), montre des différences

significatives entre les traitements (Tableau 13). Le traitement 2 espèces possède une valeur significativement plus élevée que les traitements sans couvert, 5 et 10 espèces, tandis que le traitement moutarde possède lui une valeur plus élevée que le traitement 5 espèces (Tableau 14). Les écart-types élevés peuvent être expliqués par les écarts entre les dates de prélèvements.

Tableau 13 : Résultats de l'ANOVA 1 pour le nombre total de carabes recensés. Le facteur testé est le « Traitement ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et $Pr>F$ la p-valeur associée à F. Une p-valeur ($Pr>F$) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée.

	DDL	F	Pr>F
Traitement	4	8,811	$5,33 \cdot 10^{-6}$

Tableau 14 : Moyennes, écart-types et groupes de Tukey des mesures du nombre total de carabes recensés des différents traitements de densité 1 sur l'ensemble de la période d'expérimentation.

Traitement	Moyenne	Écart-type	Groupe
Sans couvert	18,83	+/- 8,67	BC
Moutarde	20,72	+/- 7,92	AB
2 espèces	27,39	+/- 13,63	A
5 espèces	11,78	+/- 5,48	C
10 espèces	13,39	+/- 6,54	BC

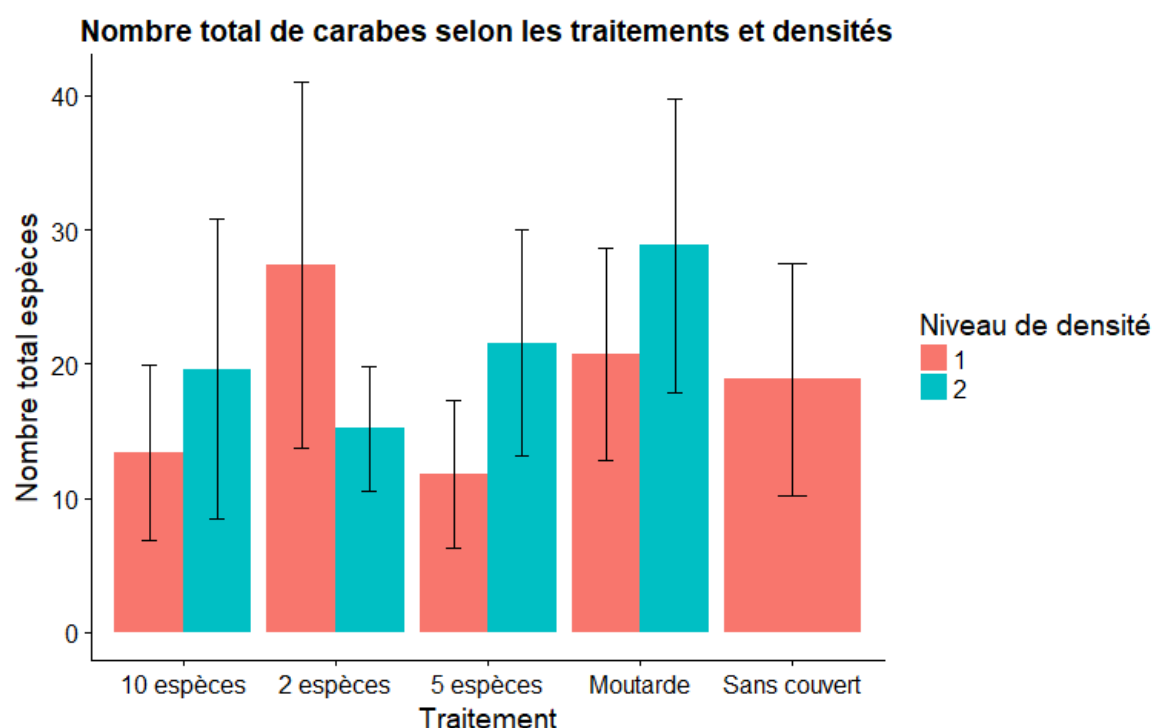


Figure 28 : Nombre total de carabes recensés en fonctions des différents traitements aux densités D1 et D2 durant toute la période d'expérimentation.

Une analyse graphique du nombre total de carabes recensés en fonction des cinq traitements et des deux densités nous laisse penser que l'augmentation de densité de semis fait augmenter l'indice pour tous les traitements à l'exception du traitement 2 espèces (Figure 28). Toutefois, les écart-types élevés du graphique sont signes d'une moyenne peu représentative et l'ANOVA 3 ne montre pas de différence significative (Tableau 10).

10.2.2. – Diversité spécifique des carabes

L'indice de diversité spécifique représente le nombre d'espèces du milieu (richesse spécifique) et la répartition des individus au sein de ces espèces (équitabilité spécifique). La formule de l'indice de diversité spécifique de Shannon (Ish) est fonction de la proportion de chaque espèce de carabe rencontrée, par rapport au nombre total d'espèces dans le milieu d'étude (Équation 5). Le milieu d'étude est ici considéré comme étant la parcelle d'expérimentation à une date précise de prélèvement (Tableau 20).

Les valeurs de l'indice Ish varie de 0 à $\log_2 S$. Ici, le nombre total d'espèces S est 29. L'indice de Ish peut donc varier de 0 à 5 environ. Lorsque la valeur de Ish est minimale, cela signifie que tous les individus du peuplement appartiennent à une seule et même espèce ou que chaque espèce est représentée par un seul individu. L'indice Ish est maximal lorsque tous les individus sont répartis de façon égale sur toutes les espèces (Amghar *et al.*, 2004).

Une première ANOVA 3 de l'indice de diversité en fonction des facteurs « Traitement », « Densité » et « Date » montre qu'il y a une différence entre les traitements mais également entre les dates de prélèvements. Aucune différence n'est observée entre les deux densités. L'interaction entre les facteurs « Traitement » et « Densité » est significative (Tableau 15).

Tableau 15 : Résultats de l'ANOVA 3 pour Ish. Les facteurs testés sont le « Traitement », la « Densité » et la « Date ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et $Pr>F$ la p-valeur associée à F. Une p-valeur ($Pr>F$) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée.

	DDL	F	Pr>F
Traitement	4	8,109	$6,32 \cdot 10^{-6}$
Densité	1	0,947	0,3321
Date	1	5,965	0,0158
Traitement * Densité	3	11,938	$5 \cdot 10^{-7}$
Traitement * Date	4	0,794	0,5312
Densité * Date	1	0,572	0,4508
Traitement * Densité * Date	3	1,309	0,2739

Nous nous intéressons maintenant aux différences entre les dates de prélèvements pour la densité D1 uniquement, et pour l'ensemble des traitements. L'ANOVA 1 montre des différences significatives entre les différentes dates (Tableau 16). En effet, le test de Tukey révèle une diversité significativement plus élevée pour la deuxième date de prélèvement (29/09/2017) que pour la dernière date de prélèvement (24/11/2017). Les quatre autres dates ne sont, elles, pas significativement différentes les unes des autres (Tableau 17). Le graphique illustrant l'évolution de Ish en fonction des différents traitements au cours du temps se trouve en Annexe 3.

Tableau 16 : Résultats de l'ANOVA 1 pour Ish. Le facteur testé est la « Date ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et $Pr>F$ la p-valeur associée à F. Une p-valeur ($Pr>F$) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée.

	DDL	F	Pr>F
Date	4	4,684	0,044

Tableau 17 : Moyennes, écart-types et groupes de Tukey des mesures de Ish lors des différentes dates pour l'ensemble des traitements de densité D1.

Date	Moyenne	Écart-type	Groupe
15/09/2017	0,81	+/- 0,56	AB
29/09/2017	1,23	+/- 0,59	A
13/10/2017	1,00	+/- 0,43	AB
27/10/2017	1,07	+/- 0,74	AB
10/11/2017	0,69	+/- 0,37	AB
24/11/2017	0,65	+/- 0,33	B

L'on considère maintenant l'ensemble des carabes sur chaque traitement pendant toute la période d'expérimentation (du 15/09 au 24/11). L'ANOVA 1 de l'indice Ish en fonction du facteur « Traitement » atteste une différence significative entre les cinq traitements (Tableau 18). En effet, le test de Tukey montre une diversité d'espèces de carabes plus élevée sous les traitements sans couvert et 2 espèces que sous le traitement 10 espèces. Les valeurs de diversité spécifique des traitements moutarde et 5 espèces ne sont pas significativement différentes des valeurs des autres traitements (Tableau 19). Les écart-types élevés peuvent ici aussi être expliqués par les écarts entre les dates de prélèvements.

Tableau 18 : Résultats de l'ANOVA 1 pour Ish. Le facteur testé est le « Traitement ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et $Pr>F$ la p-valeur associée à F. Une p-valeur ($Pr>F$) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée.

	DDL	F	Pr>F
Traitement	4	4,684	0,00183

Tableau 19 : Moyennes, écart-types et groupes de Tukey des mesures de Ish des différents traitements de densité 1 sur l'ensemble de la période d'expérimentation.

Traitement	Moyenne	Écart-type	Groupe
Sans couvert	1,11	+/- 0,45	B
Moutarde	1,03	+/- 0,39	AB
2 espèces	1,14	+/- 0,78	B
5 espèces	0,71	+/- 0,43	AB
10 espèces	0,56	+/- 0,37	A

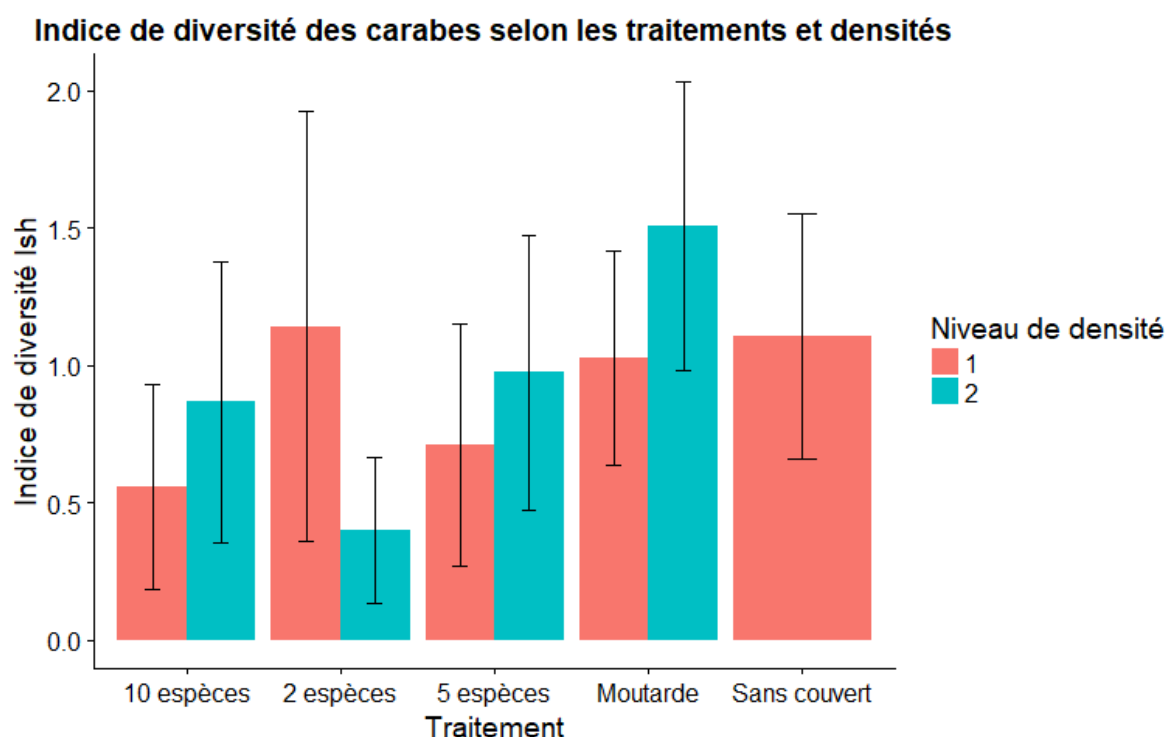


Figure 29 : Indice de diversité spécifique Ish des différents traitements aux deux densités D1 et D2 durant toute la période d'expérimentation.

Le graphique représentant l'indice de diversité en fonction des cinq traitements et des deux densités laisse à penser que l'augmentation de densité de semis fait augmenter l'indice pour tous les traitements à l'exception du traitement 2 espèces (Figure 29). Cependant, une fois encore (Voir point 10.2.1), les écart-types élevés du graphique sont signes d'une moyenne peu représentative et l'ANOVA 3 ne montre pas de différence significative (Tableau 16).

Tableau 20 : Nombre total d'espèces recensées de la famille des Carabidae, à l'aide des pièges répartis sur toute la parcelle expérimentale. Les espèces recensées sont réparties entre les 6 dates de prélèvements des pièges (15/09, 29/09, 13/10, 27/10, 10/11 et 24/11).

Espèces recensées	15/09	29/09	13/10	27/10	10/11	24/11
<i>Abax ater</i>	1		1			
<i>Agonum dorsalis</i>	1	25	7	4	1	2
<i>Agonum muelleri</i>	1	2			1	
<i>Amara eurynota</i>		4	1	1		
<i>Amara similata</i>		2	1	1		
<i>Bembidion guttula</i>	1					
<i>Bembidion lampros</i>	5	6	6	9	2	1
<i>Bembidion optosum</i>		1		2	5	11
<i>Bembidion properans</i>	5	3		12	1	
<i>Bembidion quadrimaculatum</i>	80	61	92	159	93	62
<i>Bembidion tetracolum</i>			1	7	3	3
<i>Calathus piceus</i>	1					
<i>Harpalus affinis</i>	1	1		1		
<i>Harpalus distinguendus</i>	1	2				
<i>Harpalus rufipes</i>	5	2				
<i>Loricera pilicornis</i>	38	1	2	54	100	86
<i>Nebria brevicollis</i>		3	14	13	3	2
<i>Nebria salina</i>	1	38	116	64	18	10
<i>Notiophilus biguttatus</i>					2	
<i>Notiophilus quadripustulatus</i>					1	
<i>Notiophilus substriatus</i>				3		
<i>Poecilus cupreus</i>	3	21	2	1	1	
<i>Poecilus versicolor</i>		1				
<i>Pterostichus madidus</i>		2				
<i>Pterostichus melanarius</i>	287	45	11	4		
<i>Pterostichus niger</i>		3	4	1		
<i>Pterostichus vernalis</i>	3	4		3	1	2
<i>Trechus quadristriatus</i>	327	564	380	449	390	290
<i>Zabrus tenebrioides</i>	1					

10.3. – Recensement d'autres espèces

D'autres espèces ont été recueillies au sein des *pitfall traps*, et témoignent, elles aussi, d'une certaine biodiversité au sein des traitements. Ces espèces sont les myriapodes, les lombrics, les staphylins, les campagnols, les musaraignes et les mulots (Figure 30). Une ANOVA 1 de la somme de ces dernières en fonction du facteur « Traitement » sous la densité D1 a été réalisée et ne montre pas de différence significative entre les traitements (Tableau 21).

Tableau 21 : Résultats de l'ANOVA 1 pour le nombre d'autres espèces. Le facteur testé est le « Traitement ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et $Pr>F$ la p-valeur associée à F. Une p-valeur ($Pr>F$) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée.

	DDL	F	Pr>F
Traitement	4	0,815	0,544

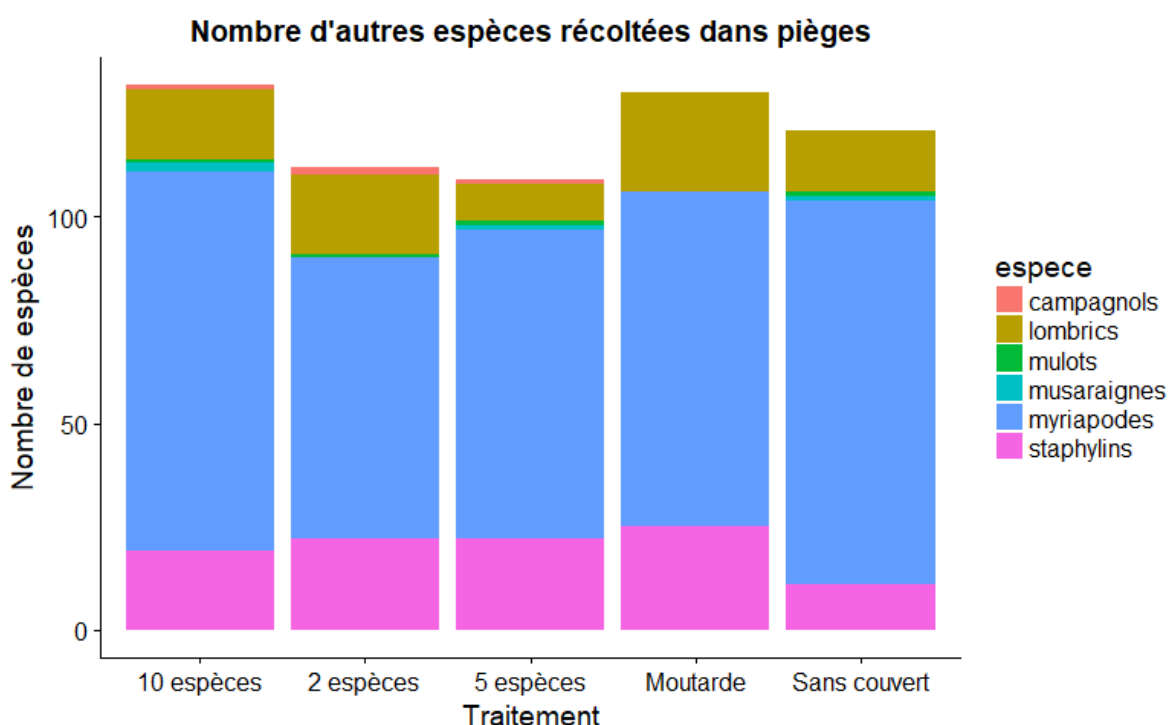


Figure 30 : Nombre d'autres espèces recensées en fonction des différents traitements sous la densité 1.

10.4. – Mesures de respirométrie

La respirométrie a été étudiée sous la densité 1 uniquement. Les mesures de conductivité ont pu être converties en deux types d'informations afin de caractériser la respiration des organismes du sol. Les deux variables ayant été analysées sont les suivantes :

- La quantité de CO_2 émise par gramme de sol sec en fonction du temps [$\text{mg CO}_2/\text{g sol}$] (Figure 31) ;
- La quantité de CO_2 émise par gramme de carbone organique en fonction du temps [$\text{mg CO}_2/\text{g C}_{\text{org}}$] (Figure 32).

10.4.1. – Émission de CO_2 par gramme de sol sec en fonction du temps

Nous pouvons observer que les émissions de CO_2 , par gramme de sol sec, en fonction du temps, des cinq traitements suivent une même cinétique. Les sols des traitements de 10 espèces semblent émettre une quantité de CO_2 plus élevée tout au long de la période d'expérimentation, à l'inverse des sols sous traitement sans couvert qui émettent une quantité plus faible que le reste des traitements. Les trois autres traitements semblent, eux, avoir des valeurs relativement proches (Figure 31 et Tableau 23).

Des ANOVA 1 comparant les émissions de CO_2 par gramme de sol selon le facteur « Traitement », pour chaque date de prélèvement prise individuellement, ont été réalisées. Aucune différence significative entre les traitements n'a toutefois été constatée, et ce pour toutes les dates de prélèvement prises individuellement. L'ANOVA 1 et les tests de Tukey pour la date du 10 avril 2017 ont été développés (Tableaux 22 et 23).

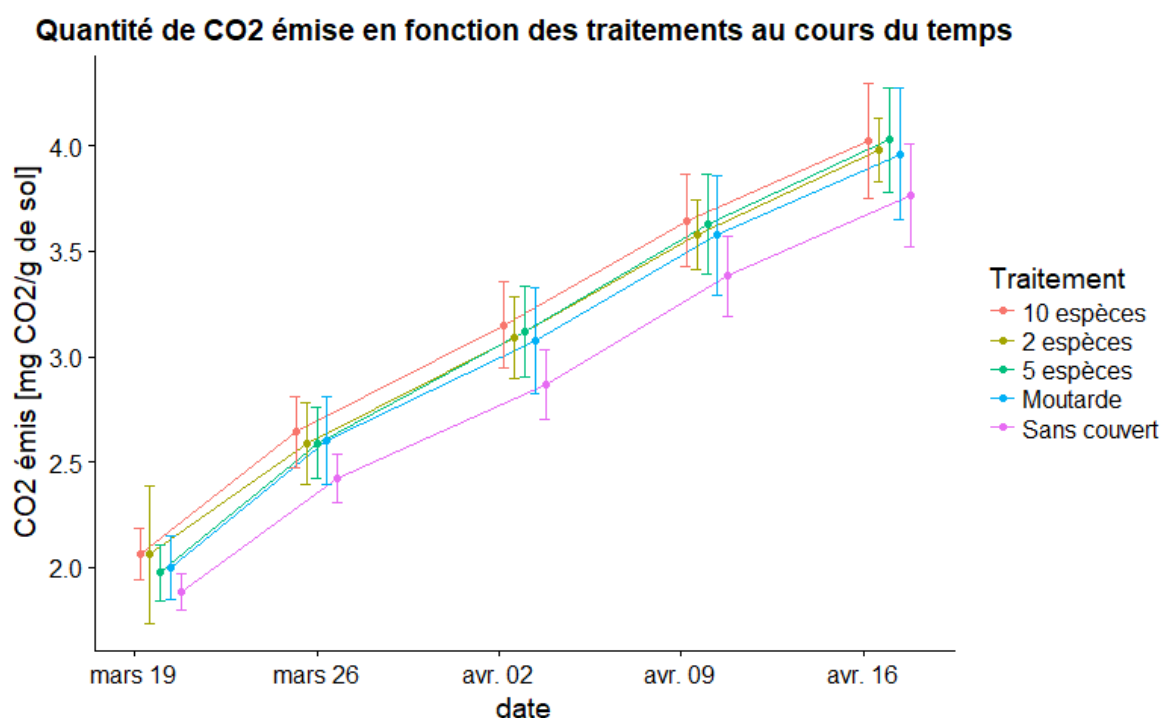


Figure 31 : Émission moyenne de CO_2 par gramme de sol sec en fonction du temps pour chacun des traitements de densité 1.

Tableau 22 : Résultats de l'ANOVA 1 pour l'émission de CO₂ par gramme de sol sec. Le facteur testé est le « Traitement ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et Pr>F la p-valeur associée à F. Une p-valeur (Pr>F) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée. Les prélèvements ont été réalisés le 10 avril 2018.

	DDL	F	Pr>F
Traitement	4	1,118	0,376

Tableau 23 : Moyennes, écart-types et groupes de Tukey des mesures de l'émission de CO₂ par gramme de sol sec. Les prélèvements ont été réalisés le 10 avril 2018.

Traitement	Moyenne	Écart-type	Groupe
Sans couvert	3,38	+/- 0,19	A
Moutarde	3,57	+/- 0,28	A
2 espèces	3,58	+/- 0,16	A
5 espèces	3,62	+/- 0,24	A
10 espèces	3,65	+/- 0,22	A

10.4.2. – Émission de CO₂ par gramme de carbone organique en fonction du temps

À l'aide des valeurs de carbone organique obtenues par Denis Allard (2018), l'émission de CO₂ par gramme de carbone organique a pu être analysée. Nous observons une fois encore que les émissions des cinq traitements suivent une même cinétique et que les traitements moutarde, 2 espèces, 5 espèces et 10 espèces semblent émettre des quantités de CO₂ relativement proches, tandis que le traitement sans couvert présente une émission de CO₂ plus faible (Figure 32).

Néanmoins, les ANOVA 1 comparant les émissions de CO₂ par gramme de carbone organique selon le facteur « Traitement », pour chaque date de prélèvement prise individuellement, ne montrent aucune différence significative (Tableaux 24 et 25).

Tableau 24 : Résultats de l'ANOVA 1 pour l'émission de CO₂ par gramme de carbone organique. Le facteur testé est le « Traitement ». DDL est le degré de liberté, F la valeur résultante du test de Fisher et Pr>F la p-valeur associée à F. Une p-valeur (Pr>F) inférieure à 0,05 signifie que le facteur a un effet significatif sur la variable observée. Les prélèvements ont été réalisés le 10 avril 2018.

	DDL	F	Pr>F
Traitement	4	1,79	0,17

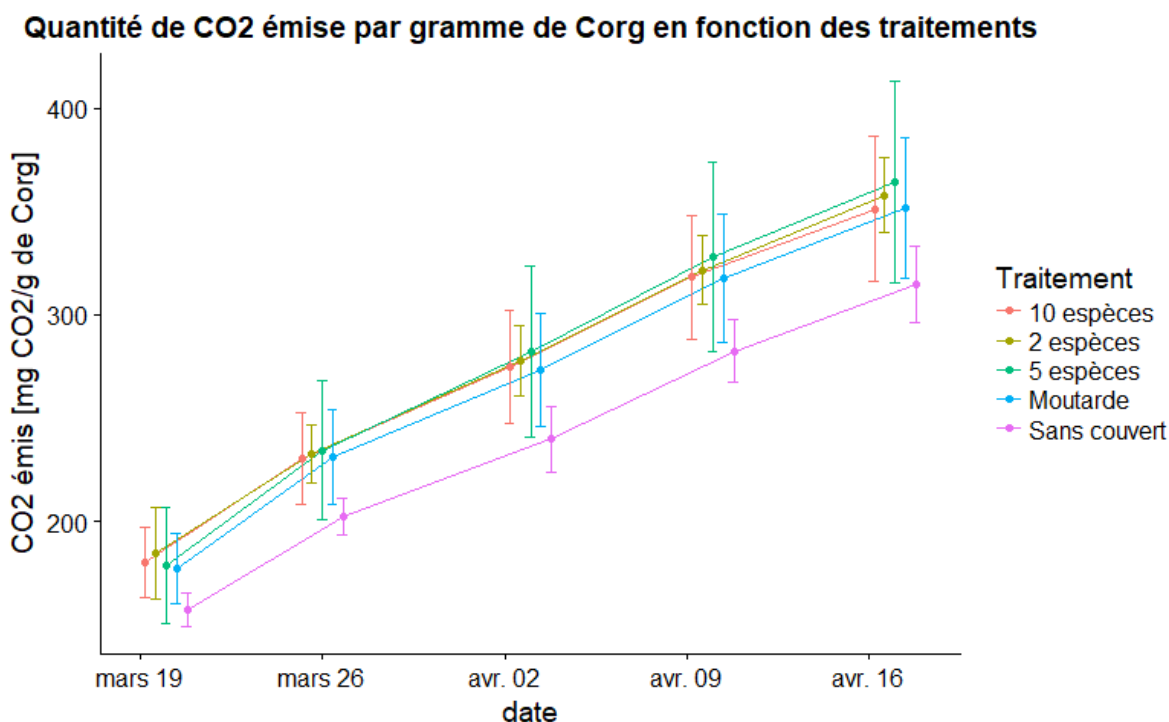


Figure 32 : Émission moyenne de CO₂ par gramme de carbone organique en fonction du temps pour chacun des traitements de densité 1.

Tableau 25 : Moyennes, écart-types et groupes de Tukey des mesures de l'émission de CO₂ par gramme de carbone organique. Les prélèvements ont été réalisés le 10 avril 2018.

Traitement	Moyenne	Écart-type	Groupe
Sans couvert	282,4	+/- 14,90	A
Moutarde	317,4	+/- 30,83	A
2 espèces	321,6	+/- 16,45	A
5 espèces	327,9	+/- 45,88	A
10 espèces	318,1	+/- 30,17	A

11 – Corrélations

Une analyse de corrélation a été effectuée sur les variables quantitatives suivantes : le TBI, le GAI, la production de biomasse, la population de lombrics, l'indice de diversité (Ish) et le nombre total des carabes sur l'ensemble de la période d'expérimentation, le nombre d'autres espèces récoltées dans les *pitfall traps*, la quantité de CO₂ émise par gramme de sol sec le 10 avril 2017 et le nombre de jours après le semis au point d'inflexion $t_{0(i)}$. Le paramètre $t_{0(i)}$ a été choisi à la place du taux d'expansion $V_{(i)}$ car ce dernier donne des informations plus pertinentes sur la capacité de couverture du sol d'un couvert végétal. La quantité de CO₂ émise par gramme de sol sec donne elle aussi des informations plus intéressantes sur l'activité des micro-organismes que la quantité de CO₂ émise par gramme de carbone organique (Voir point 13.3). La date du 10 avril 2017 pour cette variable a été choisie

au hasard car il n'existe pas de différence significative entre les différentes dates de prélèvements. Les données sélectionnées pour cette analyse de corrélation sont celles de chacun des cinq traitements sous la densité D1 et obtenues sur les trois premiers blocs d'expérimentation A, B et C.

Les trois coefficients étudiés dans cette partie sont le coefficient de détermination R^2 , le coefficient de Pearson et le coefficient de Spearman (Figures 34, 35 et 36). Le coefficient de Pearson permet d'examiner une relation linéaire entre deux variables tandis que le coefficient de Spearman permet d'examiner une relation monotone. Une fonction monotone est soit croissante, soit décroissante mais son sens de variation est constant. Une relation linéaire est par conséquent également monotone. Il est cependant important de garder en tête que, premièrement, corrélation n'est pas synonyme de causalité. En effet, les corrélations observées peuvent par exemple être dues au fait que les variables étudiées sont soumises à des influences communes. Deuxièmement, il est important de ne pas oublier que chaque analyse correspond à un spectre de valeurs restreint. Lorsque le spectre est plus étendu, la corrélation entre deux variables n'est peut-être plus valable (Minitab, 2017). Le coefficient de détermination R^2 donne lui une indication sur le pourcentage de variabilité d'une variable expliqué par une autre variable.

La variable étudiée Ish semble avoir un lien relativement marqué avec chacune des autres variables, à l'exception de la variable lombrics et autres espèces récoltées dans les *pitfall traps*. Prenons l'exemple de la combinaison Ish – biomasse, qui présente une relation linéaire modérée et négative. Toutefois, le R^2 global est de 0,34, ce qui signifie que seulement 34% de la variance de Ish serait expliqué par la biomasse et inversement (Figure 33). Les variables les plus corrélées sont reprises en gris foncé (Tableau 26).

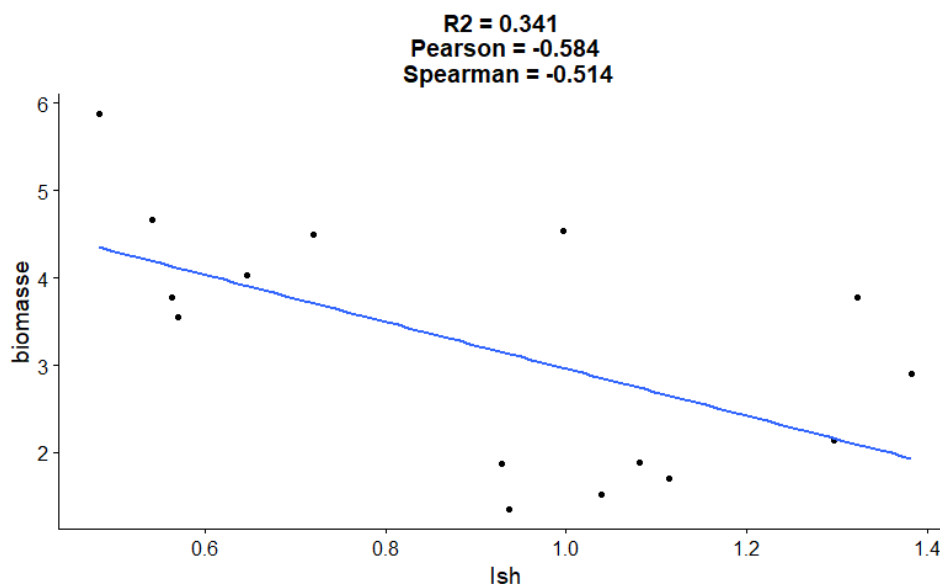


Figure 33 : Relation entre les variables Ish et biomasse.

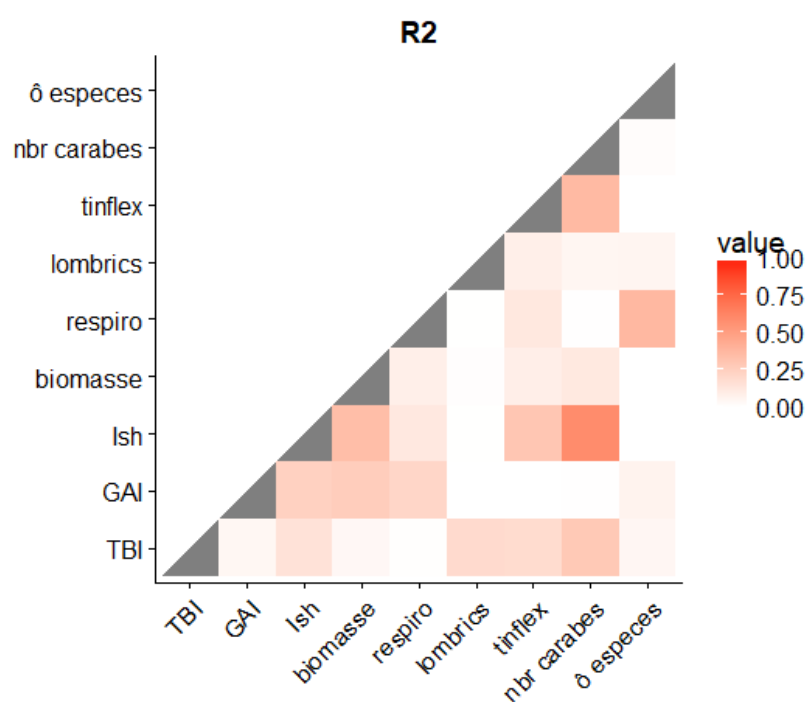


Figure 34 : Représentation des coefficients de détermination R^2 de toutes les variables étudiées, comparées deux à deux.

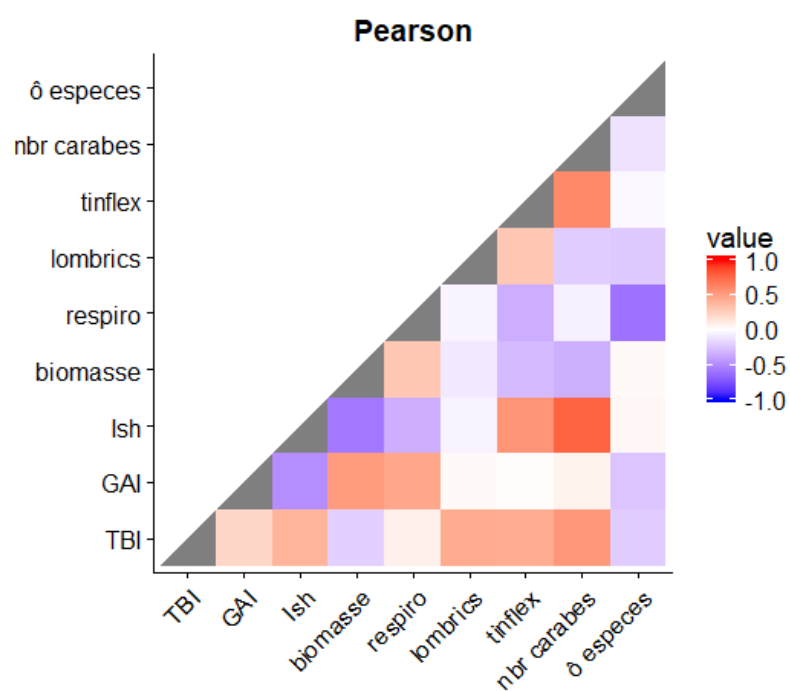


Figure 35 : Représentation des coefficients de corrélation de Pearson (r) de toutes les variables étudiées, comparées deux à deux.

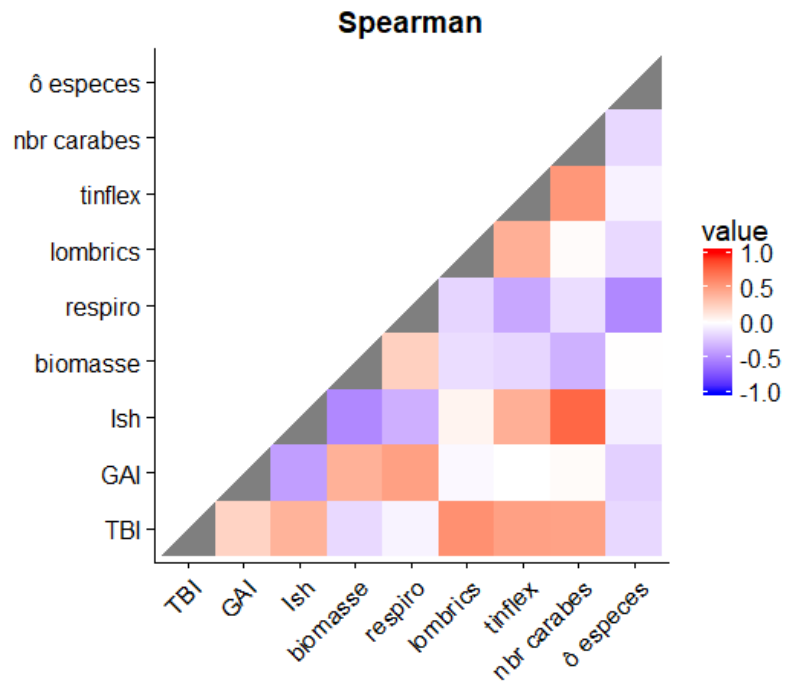


Figure 36 : Représentation des coefficients de corrélation de Spearman (r_s) de toutes les variables étudiées, comparées deux à deux.

Tableau 26 : Valeurs des coefficients de détermination R^2 , des coefficients de Pearson et de Spearman de toutes les variables comparées deux à deux. Les cases grises mettent en avant les valeurs les plus élevées.

	R^2	Pearson	Spearman
TBI – GAI	0,04	0,21	0,23
TBI – Ish	0,15	0,39	0,40
TBI – Biomasse	0,04	-0,20	-0,16
TBI – respiro	0,01	0,07	-0,05
TBI – Lombrics	0,19	0,43	0,57
TBI – $t0_{(i)}$	0,19	0,43	0,49
TBI – nbr carabes	0,28	0,53	0,48
TBI – autres espèces	0,05	-0,22	-0,17
GAI – Ish	0,24	-0,49	-0,41
GAI – Biomasse	0,26	0,51	0,41
GAI – respiro	0,21	0,46	0,49
GAI – Lombrics	0	0,03	-0,03
GAI – $t0_{(i)}$	0	0,01	0

GAI – nbr carabes	0	0,06	0,02
GAI – autres espèces	0,06	-0,25	-0,2
Ish – Biomasse	0,34	-0,58	-0,52
Ish - respiro	0,12	-0,35	-0,34
Ish – Lombrics	0	-0,05	-0,06
Ish – $t0_{(i)}$	0,3	0,55	0,41
Ish – nbr carabes	0,59	0,77	0,75
Ish – autres espèces	0	0,04	-0,07
Biomasse - respiro	0,08	0,29	0,25
Biomasse – Lombrics	0	-0,09	-0,14
Biomasse – $t0_{(i)}$	0,09	-0,3	-0,18
Biomasse – nbr carabes	0,12	-0,34	-0,34
Biomasse – autres espèces	0	0,03	0
Respiro – $t0_{(i)}$	0,12	-0,35	-0,38
Respiro – Lombrics	0	-0,045	-0,18
Respiro – nbr carabes	0	-0,06	-0,14
Respiro – autres espèces	0,37	-0,61	-0,51
Lombrics – $t0_{(i)}$	0,09	0,29	0,41
Lombrics – nbr carabes	0,05	-0,22	0,02
Lombrics – autres espèces	0,05	-0,23	-0,16
Nbr carabes – $t0_{(i)}$	0,36	0,60	0,53
Nbr carabes – autres espèces	0,02	-0,12	-0,17
Autres espèces – $t0_{(i)}$	0	-0,03	-0,05

Partie 5 : Discussion

Dans cette partie sont discutés les résultats des analyses communes et individuelles présentés dans le chapitre 4 de ce mémoire. Cette discussion met en lien les résultats et les sources scientifiques adhérentes, et tente d'apporter un avis critique sur le contexte expérimental.

Pour commencer, il est néanmoins important de rappeler ce contexte expérimental. Le semis des couverts végétaux a été réalisé fin juillet et le roulage dans le courant du mois de mars. Selon les chiffres fournis par le site de l'IRM (2018), les conditions de température, d'humidité et de vent étaient normales durant la mise en culture des couverts. Rappelons également que le sol de la parcelle d'expérimentation est un sol de type Aba, c'est-à-dire limoneux à drainage naturel favorable et, ainsi, propice à l'usage agricole. Avant le semis des couverts végétaux, la parcelle était sous agriculture conventionnelle.

12 – Mesures communes

12.1. – Couverture du sol

La vitesse à laquelle le couvert végétal recouvre le sol est une caractéristique importante des couverts végétaux. Le taux de recouvrement du sol est surtout un indicateur de la capacité du couvert à contrôler l'érosion du sol et le ruissellement (Bowman *et al.*, 2000). La rapidité d'installation de la couverture végétale joue également un rôle important sur le contrôle des adventices. Plus les espèces de couvert s'installent rapidement, plus vite elles deviennent concurrentielles face à la croissance des adventices (Institut de recherche Agroscope de Changins, 2015). Dans le cadre de ce mémoire, l'un des deux paramètres étudiés est le temps nécessaire pour atteindre 50% du sol couvert ($t_{0(i)}$). Ce paramètre sera celui principalement discuté par la suite.

Dans un premier temps, l'effet traitement a été étudié et montre que le couvert 5 espèces présente le plus faible $t_{0(i)}$, suivi du couvert moutarde, 10 espèces, 2 espèces et finalement du traitement sans couvert (Tableau 3). La moutarde est en effet réputée pour sa rapidité au démarrage et pour sa tendance à étouffer les plantes environnantes, telle que des adventices, si elle est semée en dose suffisante (8 à 10 kg/ha semée seule). Il a néanmoins été constaté que la moutarde n'atteignait pas les 100% de couverture du sol (Figure 22). Cela peut être expliqué par le port dressé et peu ramifié de l'espèce moutarde, mais également par son cycle court ; la moutarde

arrive rapidement en floraison et ensuite fait surtout du remplissage de grain et de la lignine plutôt que de la surface foliaire. Cette dernière pourrait dès lors convenir pour une culture associée en occupant un étage supérieur (Archambeaud *et al.*, 2016).

Concernant le mélange 5 espèces, l'avoine brésilienne est connue pour sa vitesse de couverture assez rapide, mais toutefois moindre que celle du trèfle d'Alexandrie (Crémer, 2015). Le tournesol et la phacélie possèdent également une vitesse de couverture relativement élevée et le lin une vitesse plus faible (Cadillon *et al.*, 2012). Les couverts végétaux sont souvent semés en mélange dans le but d'associer les avantages des différentes espèces. Il est toutefois compliqué de prédire de quelle manière et avec quelle intensité les caractéristiques spécifiques à chaque espèce sont combinées (Tosti *et al.*, 2012). Le mélange 5 espèces semble néanmoins avoir acquis un bon compromis.

Le mélange 10 espèces est composé, en plus du mélange 5 espèces, du radis chinois et de la féverole qui connaissent une vitesse de recouvrement relativement élevée. Les espèces végétales sarrasin, nyger et vesce commune ont, quant à elles, une vitesse plus faible (Cadillon *et al.*, 2012). Ce mélange ainsi que celui de 2 espèces, présentent de bons résultats mais semblent être moins optimaux que la combinaison de 5 espèces.

Tel que précisé ci-dessus, le pourcentage de couverture retenu à $t_{0(i)}$ dans le cadre de nos essais est de 50%. Or, selon une étude réalisée par Ramirez-Garcia *et al.* (2014), l'atténuation de l'érosion et du ruissellement s'effectue principalement une fois que la couverture foliaire recouvre 30% du sol. À l'inverse, lorsque la couverture du sol dépasse les 70%, les effets additionnels d'atténuation sont réduits. Bien que ce paramètre n'ait pas été retenu dans le cadre de ce mémoire, il apparaît que la moutarde nécessite un temps inférieur au mélange 5 espèces pour recouvrir 30% du sol, mais également que ces deux traitements présentent toujours des résultats relativement proches (Figure 22). Néanmoins, une analyse de ce paramètre aurait pu être intéressante.

Bien que la présence d'adventices n'ait pas été étudiée dans le cadre de ce mémoire, il s'avère que la combinaison, dans un mélange de couverture, d'espèces ayant des dynamiques échelonnées permet de diminuer le salissement très tôt puis en continu (Institut de recherche Agroscope de Changins, 2015). Dès lors, des différences de cinétique ont ici pu être constatées, et cela principalement entre le traitement moutarde et les mélanges d'espèces (Figure 22).

Le traitement sans couvert présente des résultats fort semblables au mélange 2 espèces. Cela peut être expliqué par la forte présence de repousses d'escourgeon de la culture précédente. Les plants d'escourgeon ont eu la place et les ressources pour se développer, ne subissant aucune concurrence d'une autre espèce.

Il a été démontré que l'augmentation de densité n'a pas d'influence sur le niveau de recouvrement du sol (Tableau 1). Le surdosage, relatif à la densité 2, est mis en pratique afin d'assurer une meilleure levée et une bonne production de biomasse des couverts végétaux, lors de conditions sèches d'été notamment. Cependant, comme cité précédemment, les conditions météorologiques ont été favorables durant la période d'essais et le recours à la densité 2 s'est dès lors avéré inutile.

12.2. – Biomasse aérienne

L'efficacité des couverts végétaux dans le rôle de protection du sol, d'apport de matière organique et d'éléments nutritifs, de lutte contre les adventices ou encore de prévention de lixiviation du sol, est directement corrélée à leur quantité de biomasse produite (Büchi et al., 2016).

La production de biomasse a été observée en fonction du nombre d'espèces présentes dans chacun des cinq traitements de densité 1 (Figure 25). De cette relation a été déduit qu'environ 300 kg de MS.ha⁻¹ de biomasse sont produits après l'ajout d'une espèce supplémentaire au mélange. L'association de plusieurs espèces favorise en effet l'établissement d'une concurrence positive entre les plantes, qui génère une production de biomasse plus élevée. Il est toutefois nécessaire que ces espèces soient complémentaires, c'est-à-dire qu'elles aient une distribution spatiale et des besoins nutritifs différents, ou du moins décalés dans le temps. La biomasse produite sera d'autant plus importante que le mélange comporte des légumineuses qui pourront subvenir aux besoins en azote du couvert (Cardinale *et al.*, 2011 ; Thomas, 2005).

Toutefois, les échantillons de biomasse ont tous été prélevés le 18 décembre 2017. Or à cette date, les différentes espèces se trouvaient à des stades de développement distincts. Pour certains couverts, tels que la moutarde qui connaît une croissance rapide, des chutes de feuilles avaient par exemple déjà eu lieu et ont pu influencer les résultats de biomasse.

Selon des travaux menés par Finney *et al.* (2016), il existe bien une relation positive entre le nombre d'espèces dans un mélange et la biomasse. Ces expériences ont été menées sur des mélanges composés de vesce, trèfle violet, radis fourrager, avoine, chanvre, soja, colza, mil, sorgho, orge et finalement ray-grass d'Italie. Il a pu être déduit de ces travaux que la biomasse moyenne des mélanges de couverts végétaux était plus élevée que la biomasse moyenne des monocultures de chacune des espèces citées. Il a cependant aussi été constaté que la biomasse moyenne des cultures en mélange n'était pas supérieure aux monocultures les plus productrices (colza et ray-grass). Cette dernière comparaison pourrait être tout aussi pertinente que la première pour les agriculteurs.

La biomasse n'est toutefois pas le seul critère à prendre en compte. Les mélanges d'espèces végétales permettent d'avoir des rapports C/N différents et d'ainsi libérer progressivement de l'azote tout en conservant un taux de matière organique favorable. Une diversité au niveau des oligoéléments captés est aussi favorisée par le mélange d'espèces (Voir point 3.2). De plus, la combinaison de systèmes racinaires fasciculés et pivotants rend possible une exploration plus vaste des horizons de surface et laisse ainsi un sol plus aéré pour les cultures suivantes (Voir point 3.3). Comme expliqué au point 7.1.3, il aurait été intéressant d'évaluer les quantités d'éléments (N, P et K) présents dans la biomasse récoltée à l'aide de la méthode MERCI. Les systèmes racinaires ont, eux, été analysés par Diane Heymans.

Il a été démontré que les densités D1 et D2 ne présentaient pas de différence significative en terme de biomasse (Tableau 6). Cependant, en observant la Figure 24, il semblerait que l'augmentation de densité de semis fasse augmenter la production de biomasse de tous les couverts, à l'exception du traitement 10 espèces. Nous sommes alors amenés à nous demander s'il n'existe pas un lien entre le niveau de densité optimum et le nombre d'espèces présentes dans le mélange. Cette observation confirme qu'il serait plus judicieux d'étudier les effets de la densité D2 en condition de sécheresse.

12.3. – Biomasse, couverture du sol et GAI

Comme expliqué précédemment, deux des principaux objectifs recherchés dans le choix des couverts végétaux sont une couverture efficace du sol et une production de biomasse élevée. Ces deux facteurs ne sont toutefois pas forcément liés. Il a été démontré que les variables « biomasse » et « nombre de jours après le semis au point d'inflexion ($t_{0(i)}$) » présentaient des valeurs de coefficients R^2 , Pearson et Spearman relativement faibles (Tableau 26). Effectivement, le traitement 5 espèces se trouve être celui qui recouvre le sol le plus favorablement tandis que le traitement 10 espèces produit une biomasse plus élevée. Il s'agit alors de trouver le meilleur compromis entre ces deux variables.

Le Green Area Index (GAI), c'est-à-dire la surface verte utile des espèces végétales étudiées, n'obéit pas systématiquement aux mêmes évolutions que la biomasse en fonction des traitements (Figure 23). Néanmoins, les valeurs des coefficients R^2 , Pearson et Spearman entre ces deux variables montrent une corrélation positive et modérée. Il a en effet été démontré que la production de biomasse dépendait de l'interception de la lumière (Jaeger *et al.*, 2016). À l'inverse, aucune corrélation entre les variables GAI et $t_{0(i)}$ n'a été observée (Tableau 26). Les valeurs de surface utile sont néanmoins à manipuler avec précaution au vu de leurs écart-types élevés (Tableau 5).

13 – Mesures individuelles

13.1. – Recensement de lombrics

La communauté scientifique montre un intérêt croissant pour le rôle des vers de terre sur la fertilité du sol. Des relations ont aujourd'hui été établies entre un travail du sol réduit ainsi que l'utilisation de couverts végétaux, et l'augmentation des populations lombriciennes (Voir point 4.2). Les résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire ne permettent cependant pas de confirmer ces conclusions de la littérature. Aucune différence significative n'a été observée entre les différents traitements. De plus, les données obtenues possèdent des écart-types étonnamment élevés, en particulier pour les traitements moutarde et 2 espèces (Tableau 9). Un questionnement doit alors être posé sur l'efficacité du protocole expérimental (Voir point 7.2.1).

Premièrement, selon des travaux menés par Pelosi (2008), l'utilisation d'irritants chimiques tels que le formol et l'allyl isothiocyanate (AITC) permettrait une récolte de vers de terre significativement plus élevée que par extraction à la moutarde commerciale. Rappelons cependant que le formol est un produit toxique et donc non recommandé dans notre protocole, à l'inverse des deux autres. Par ailleurs, la méthode ayant le plus fait ses preuves est la combinaison de l'utilisation d'irritants et l'extraction de blocs de sol. Alors qu'une simple extraction de blocs de sol d'une profondeur d'environ 20 cm permet seulement la récupération des plus petits individus vivant à proximité de la surface du sol, cette combinaison permet d'extraire les vers de terre enfouis plus profondément dans le sol, tels que les vers anéciques, et d'ainsi avoir une meilleure représentation de la biomasse lombricienne (Pelosi, 2008 ; Valckx *et al.*, 2011).

Il est également important de noter que les prélèvements ont été réalisés sur trois jours durant le mois d'octobre. Par conséquent, les conditions météorologiques n'ont pas pu être maintenues constantes durant la période d'expérimentation. Les populations de vers de terre peuvent être sensibles aux faibles humidités et, ne pouvant réguler leur température corporelle, aux variations de température (Boukria, 2010). De plus, selon Weykmans (2008), les lombrics sont principalement actifs lorsque les couverts voient leur croissance ralentir, stagner, voire entamer leur sénescence. Or, les prélèvements ont débuté vers la mi-octobre et à cette période certains couverts n'avaient peut-être pas encore commencé à voir leur croissance ralentir, tandis que d'autres si.

Finalement, la technique optimale de prélèvement de vers de terre semble être la combinaison irritant - extraction de blocs de sol. Il est également préférable que tous les prélèvements soient réalisés sous un court laps de temps (conditions

météorologiques homogènes) et lorsque les couverts sont à un même stade de développement. En conclusion, il s'agit d'une technique laborieuse et relativement difficile à mettre en place.

13.2. – Recensement de carabes

Selon la littérature, la diversité culturelle, apportée via la mise en place de couverts végétaux notamment, amène à une diversité d'auxiliaires qui conduit à plus de services écosystémiques pour la culture (Herman *et al.*, 2018). Des assemblages de prédateurs avec une grande diversité fonctionnelle présenteraient une complémentarité de traits associés à la prédation des ravageurs et permettraient ainsi un contrôle biologique plus efficace (Petchey, 2006). En effet, des études portant sur le lien biodiversité – fonctions écosystémiques ont suggéré que c'est la diversité fonctionnelle, plutôt que la richesse spécifique, qui définit l'ampleur des fonctions écosystémiques, telles que la fonction répressive contre les ravageurs (Bruno *et al.*, 2008). Nous nous sommes ici spécifiquement intéressés aux auxiliaires de la famille des *Carabidae*. Sur l'ensemble des espèces de carabes, 80% des adultes et 90% des larves se nourrissent d'insectes, ils sont dès lors considérés comme des prédateurs importants des ravageurs de cultures. L'implantation de couverts végétaux favorise la présence de larves et d'adultes de carabes dans les parcelles mêmes, mais également dans les parcelles environnantes (Rouabah, 2015).

Les valeurs obtenues lors de la récolte des carabes ont, d'une part, été traduites en nombre total de carabes recensés et, d'autre part, en indice de diversité de Shannon (Équation 5). A la lecture des éléments précités, l'indice de diversité semble être un indicateur plus intéressant que le nombre total de carabes recensés lorsqu'il s'agit d'évaluer la qualité d'un site. Les deux variables « Nombre de carabes » et « Diversité spécifique (Ish) » présentent une corrélation élevée et positive (Tableau 26). Cette corrélation est aisément expliquée par le fait que l'indice de diversité spécifique dépend, d'une part, du nombre d'espèces du milieu et, d'autre part, de la répartition des individus au sein de ces espèces.

Dans un premier temps, le facteur « Date » a été analysé pour les deux variables étudiées. Rappelons que les prélèvements ont débuté le 24 septembre et se sont terminés le 24 novembre, c'est-à-dire lorsque les carabes débutaient leur période d'inactivité. Il a été démontré que les deux variables pouvaient varier en fonction des dates de prélèvements (Tableaux 11 et 16). Cela peut être expliqué par la différence de cycle de vie des espèces de carabes. Certaines espèces, telle que le *Pterostichus melanarius*, semblent en effet montrer une fin d'activité plus précoce que d'autres (Tableau 20). Au courant de l'automne, les carabes cherchent refuge dans des espaces où ils trouveront un abri et de quoi se nourrir pour passer l'hiver. Ils reprennent ensuite leur activité avec la remontée des températures à partir du printemps, avec un pic

d'activité au mois de juin (Chambre de l'agriculture région Nord-Pas-de-Calais, 2013). Les couverts végétaux d'hiver sont, par conséquent, en adéquation avec les besoins des coléoptères carabiques.

Le facteur « Traitement » a ensuite été analysé sur l'ensemble des dates de prélèvements et à la densité D1. Les traitements qui semblent présenter le nombre total de carabes le plus élevé sont le mélange 2 espèces suivi de la moutarde, tandis que ceux présentant la diversité la plus élevée sont le mélange 2 espèces et le traitement sans couvert (Tableaux 14 et 19). Rappelons à nouveau que le traitement sans couvert était en réalité occupé par des repousses d'escourgeon qui ont atteint une couverture du sol de pratiquement 100% (Figure 22) et qui, par conséquent, formaient un potentiel abri pour les carabes.

De nombreuses études ont établi une corrélation positive entre une végétation hétérogène et une diversité élevée de carabes (Rouabah, 2015, Siemann *et al.*, 1998). Les résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire ne semblent pas s'accorder avec cette hypothèse. Le couvert le plus diversifié et présentant ainsi la structure la plus hétérogène devrait être le mélange 10 espèces, qui semble néanmoins avoir l'indice de diversité le plus faible. Selon Brose (2003), la structure de la végétation agit sur les populations de carabes via trois mécanismes. Premièrement, une végétation architecturalement diversifiée offre de nombreux sites pour l'oviposition et l'hibernation des carabes. Deuxièmement, elle affecte la vulnérabilité des carabes qui ont plus de chance d'échapper à leurs ennemis naturels (oiseaux, rongeurs) sous une densité élevée. Et troisièmement, elle influence la capacité de chasse des carabes. Les carabes ont en effet besoin d'une végétation suffisamment éparse pour pouvoir se déplacer et capturer leurs proies. Il s'agit dès lors de trouver un compromis entre une végétation diversifiée et des espaces dégagés permettant aux carabes de se déplacer sans trop de difficulté. Le couvert 2 espèces, composé d'avoine brésilienne et de trèfle d'Alexandrie, possède l'indice de diversité mais également le nombre total de carabes recensés les plus élevés et, par conséquent, présente peut-être ces deux aspects. De plus, une corrélation négative et modérée a été observée entre les variables « Diversité spécifique (Ish) » et « Biomasse » (Figure 33). La corrélation entre les variables « Nombre de carabes » et « Biomasse » présente également des valeurs négatives, mais plus faibles (Tableau 26). Nous sommes alors amenés à nous demander si une biomasse trop élevée n'entraîne pas une diminution de la population de carabes.

Il est cependant important de se questionner sur l'exactitude des résultats obtenus. Premièrement, aucune différence significative n'a été observée entre les traitements selon le facteur « Densité » pour les deux variables étudiées (Tableaux 10 et 15). Néanmoins, les Figures 28 et 29 montrent des résultats inverses pour le traitement 2 espèces de densité 2 à ceux analysés sous la densité 1, tandis que les autres traitements présentent des tendances similaires sous les 2 densités. Nous nous

interrogeons dès lors sur l'exactitude des résultats du traitement 2 espèces, d'autant plus au vu de son écart-type élevé. Deuxièmement, la méthode des *pitfall traps* connaît certaines limites. Les *pitfall traps* mesurent l'abondance mais également l'activité des carabes. Il se pourrait dès lors que les espèces les plus actives soient sur-représentées. *Pterostichus melanarius* est par exemple considéré comme une espèce qui se déplace rapidement (Rouabah, 2015) et a été retrouvé en nombre élevé dans les pièges au début des prélèvements (Tableau 20). Toutefois, leur activité est positivement corrélée à leur capacité à capturer les ravageurs, ce que nous recherchons à identifier. Un troisième point important à prendre en compte sont les distances séparant les différents traitements. Chaque bande de traitement possède en effet une largeur de seulement 4 m. Les carabes peuvent dès lors aisément se déplacer d'une bande à l'autre et se retrouver dans les pièges des bandes voisines. Il a été démontré qu'un carabe parcourait des distances journalières allant de 1 à 30 m environ, selon la densité de couverture (Lalonde, 2011).

Pour observer un éventuel impact de la mise en place des couverts végétaux sur les populations de carabes, il aurait été intéressant d'effectuer des prélèvements aux mêmes emplacements lors de la culture précédant et suivant l'implantation des couverts végétaux.

Finalement, un couvert végétal propice aux carabes semble devoir remplir les critères suivants : une couverture suffisamment dense pour constituer un abri efficace et ce principalement dès la fin de l'été et tout au long de l'hiver, une aération minimale au niveau du sol afin de permettre le déplacement et finalement une diversité végétale suffisamment élevée pour satisfaire les besoins alimentaires de la faune. Une attention toute particulière doit être portée sur le maintien des populations d'auxiliaires afin de progresser vers une lutte intégrée contre les ravageurs des cultures et se préparer ainsi à une limitation progressive des pesticides.

13.3. – Respirométrie

La respiration microbienne du sol est le résultat de la minéralisation de substances organiques. Les résultats obtenus pour ce critère permettent d'avoir une idée de l'activité globale des micro-organismes du sol, qui est considérée comme un attribut positif pour la fertilité de ce dernier (Voir point 4.4). Les prélèvements de sol pour les mesures de respirométrie ont été réalisés le 6 mars 2018, c'est-à-dire après roulage des couverts végétaux. Par conséquent, l'on considère ici seulement la respiration hétérotrophe (bactéries et champignons) et non pas la respiration autotrophe qui concerne les racines et les mycorhizes.

Selon la littérature, l'utilisation de couverts végétaux en interculture influence l'abondance et l'activité des micro-organismes, et la qualité de la matière organique

du sol. L'activité des micro-organismes dépend fortement des espèces végétales implantées. Les légumineuses produisent par exemple des résidus végétaux à faible rapport C/N (Voir point 3.5) et ainsi impactent positivement l'activité métabolique des micro-organismes (Martinez-Garcia *et al.*, 2018 ; Oddos, 2016). Dans un premier temps, une comparaison de la quantité de CO₂ émise par gramme de sol a été réalisée en fonction des cinq traitements. Cette dernière n'a pas montré de différence significative. Néanmoins, la Figure 31 laisse à croire que le traitement 10 espèces, suivi du 5 espèces, 2 espèces et moutarde, émettent une quantité de CO₂ plus élevée que le traitement sans couvert. Ces résultats pourraient concorder avec la littérature. L'ensemble des espèces végétales du mélange 10 espèces présente possiblement une combinaison de rapports C/N favorable à une activité biologique élevée. Néanmoins cela reste une hypothèse, les résultats n'étant pas statistiquement significatifs. Comme déjà mentionné au point 12.2, une analyse des rapports C/N des couverts végétaux aurait ici aussi été intéressante afin d'avoir une idée de leur potentiel de décomposition.

Des précautions sont à prendre à propos de l'interprétation des résultats des mesures de respirométrie. Ces derniers témoignent de l'activité microbienne qui est une représentation directe de la décomposition de la matière organique du sol. Or cette décomposition indique que deux procédés se déroulent simultanément : la minéralisation des nutriments mais également la perte de carbone organique (USDA, 2001). Par conséquent, un équilibre entre les aspects négatifs d'un faible taux de carbone dans le sol et la disponibilité en nutriments doit être trouvé. Toutefois, selon la littérature, l'utilisation de mélanges couverts végétaux semble être une approche favorable. Selon l'USDA (2012), un apport de résidus végétaux provenant d'espèces différentes contribue à maintenir une diversité de micro-organismes du sol. Or une population microbienne variée permet de renforcer la minéralisation des nutriments mais également la stabilisation de la matière organique du sol et la séquestration de carbone (Martinez-Garcia *et al.*, 2018).

Afin de rendre l'émission de CO₂ indépendante du stock de carbone organique, nous avons observé l'émission de CO₂ par rapport à la quantité de carbone organique présente dans les échantillons (Figure 32). Aucune différence significative n'a été observée entre les différents traitements pour cette variable étudiée (Tableau 24). Cela se justifie aisément par le fait que les autres facteurs pouvant influencer l'émission de CO₂ sont eux aussi standardisés. Premièrement, la texture du sol joue un rôle important dans la respiration du sol. Les particules d'un sol argileux tendent par exemple à protéger la matière organique des attaques enzymatiques en se liant aux molécules de celle-ci. Les pratiques culturales, telles que le labour, peuvent, elles, réduire la protection des composés organiques labiles en augmentant la porosité du sol et en améliorant ainsi la diffusion des gaz et de l'eau utiles pour les micro-organismes (Buisse, 2010). À cela s'ajoutent d'autres facteurs tels que la température,

l'humidité ou le pH (Voir point 4.4). Toutefois, comme mentionné dans la partie Matériel et méthodes, tous ces facteurs possèdent des caractéristiques semblables pour les cinq traitements car ceux-ci occupaient la même parcelle et possèdent ainsi le même historique.

Selon des travaux réalisés par Luan *et al.* (2018), les mélanges d'espèces végétales lors de l'implantation de couverts végétaux jouent également un rôle de tampon envers les fluctuations environnementales. Il a en effet été prouvé qu'un mélange de trois espèces végétales influence la stabilité de la matière organique du sol en diminuant la sensibilité de la respiration microbienne à la température. Rappelons que la température est la variable la plus influente du processus de respiration (Voir point 4.4). Cette hypothèse n'a toutefois pas pu être analysée lors de nos observations car la température sous laquelle étaient exposés les bocaux de sol a été maintenue à 28 degrés Celsius. Cette température correspond à la température préconisée afin d'observer une activité microbienne optimale mais ne correspond toutefois pas à la réalité du terrain.

La méthodologie de l'expérience réalisée dans le cadre de ce mémoire présente certaines limites qu'il semble important de mentionner. Tout d'abord, un milieu fermé tel que les bocaux contenant les échantillons de sol, ne permet pas de renouveler la teneur en oxygène. Cela pourrait éventuellement influencer l'activité des bactéries aérobies, bien que les bocaux aient dû être ouverts une fois par semaine afin d'effectuer les mesures de conductivité et renouveler ainsi pour partie l'oxygène. L'ouverture hebdomadaire des bocaux a également pu laisser échapper une certaine quantité de CO₂ qui ne sera pas absorbée par le NaOH et donc ne sera pas prise en compte. Le CO₂ peut également diffuser dans l'eau présente dans les échantillons de sol et, une fois encore, ne pas être pris en compte. Le tamisage du sol pourrait également être une source d'erreur car il modifie les conditions initiales du sol. La température maintenue à 28 degrés est également un facteur à prendre en compte ainsi que précisé. Un dernier point à considérer est la date de prélèvement des échantillons de sol. Ceux-ci ont été effectués peu de temps après le roulage des couverts, cependant une faible proportion des végétaux, et donc de la matière organique, n'a pas été détruite suite aux faibles gelées qui ont précédé.

13.4. – Lombrics, micro-organismes et Tea Bag Index (TBI)

Les travaux de Oddos (2016) suggèrent que la présence de vers de terre influence positivement l'activité microbienne. Les vers de terre facilitent en effet le travail de minéralisation des micro-organismes en fragmentant la matière organique dans un premier temps (Voir point 4). Aucune corrélation n'a toutefois été observée dans le cadre de ce mémoire (Tableau 26), cela s'explique peut-être par le fait qu'aucune des deux manipulations n'a montré de résultats significatifs.

Un lien aurait également pu être établi entre les mesures de respirométrie et de TBI, qui représente la vitesse de décomposition des résidus végétaux. Une fois encore, les deux expériences n'ont pas montré de différences significatives et aucune corrélation n'a pu être observée (Tableau 26).

14 – Bilan des mesures effectuées

Des différences significatives ont pu être observées entre les différents traitements pour les variables biomasse, couverture du sol et nombre total et diversité des carabes. En premier lieu, la biomasse semble être favorisée par des mélanges diversifiés de végétaux. En ce qui concerne la couverture du sol, les traitements 5 espèces, moutarde et 10 espèces présentent une couverture rapide du sol. Le nombre total et la diversité des carabes présentent, elles, des tendances différentes, où le traitement 2 espèces semble être le plus avantageux.

Il est toutefois important de ne pas oublier que les résultats ne dépendent pas seulement du nombre d'espèces végétales présentes dans les traitements, mais également des caractéristiques des espèces végétales elles-mêmes. À titre d'exemple, la couverture du sol du traitement 5 espèces ne dépend pas seulement du fait que le couvert soit composé de 5 espèces, mais également du fait que les espèces qui composent ce traitement présentent probablement des aspects spécifiques en terme de couverture du sol. Une étude approfondie de chaque espèce pourrait dès lors être intéressante.

Aucune différence significative n'a pu être observée pour le facteur « Densité ». Le surdosage (densité D2) est pratiqué afin de palier à un rendement plus faible en cas de mauvaises conditions météorologiques (Voir point 12.1). Des essais de densité D1 et D2, maintenus sous conditions de sécheresse par exemple, pourraient être envisagés afin d'évaluer les réels apports du surdosage.

Il semble opportun de rappeler les principales limites de la méthodologie expérimentale mise en place. Premièrement, avant l'implantation des couverts végétaux, la parcelle expérimentale était sous agriculture conventionnelle, c'est-à-dire labourée et sans couverts végétaux. La durée d'expérimentation a ensuite été de relativement courte durée. Certaines variables étudiées, telles que l'activité des micro-organismes ou la population de carabes, n'ont peut-être pas eu le temps de se mettre en place. Une étude sur le long terme, sous techniques culturales simplifiées (TCS), serait probablement plus représentative des apports des différents mélanges de couverts végétaux. Un autre point important est la distance entre les différentes bandes de traitement. Des bandes de traitement de superficie plus élevée permettraient d'éviter d'éventuelles interactions avec les traitements avoisinants. Finalement, le nombre de répétitions, limité par la quantité de travail, a dans certains

cas été relativement faible et n'a probablement pas permis une représentation optimale de la réalité.

Pour finir, une multitude de variables auraient pu être étudiées. L'humidité environnante que les couverts apportent au sol ou encore l'effet répulsif de certaines espèces végétales (trèfle, moutarde) sur les limaces (Archambeaud *et al.*, 2016) pourraient être sujet d'étude. Néanmoins, le temps de réalisation de ce mémoire nous a limité à quelques-unes de ces variables.

Conclusion et perspectives

Les services écosystémiques représentent les biens communs apportés par l'écosystème, tels que la production d'énergie, la régulation de la qualité de l'eau ou le support des cycles de nutriments (Finney, 2016). Une augmentation de ces services écosystémiques, tout en atténuant les dégradations environnementales que génèrent les pratiques agricoles, est aujourd'hui devenue indispensable au maintien d'une agriculture qui doit subvenir aux besoins d'une population en pleine expansion. Les agriculteurs se tournent aujourd'hui de plus en plus vers une agriculture de conservation qui se veut plus raisonnée. Celle-ci repose sur une forte réduction voire un abandon du travail du sol, l'implantation de couverts végétaux en période d'interculture et une rotation de cultures diversifiées.

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à l'implantation de couverts végétaux et plus particulièrement aux mélanges de couverts végétaux. L'association de différentes espèces végétales est en effet préconisée afin d'accumuler les effets positifs de chacune d'entre elles mais également de diminuer la pression de facteurs défavorisants tels que les conditions pédoclimatiques ou les ravageurs de culture. Cinq traitements de couverts végétaux ont été installés afin d'être étudiés et comparés. Un premier traitement dans lequel rien n'a été ensemencé, mais qui a tout de même été colonisé par des repousses d'escourgeon de la culture précédente, a été mis en place. Une monoculture de moutarde, couvert conventionnel, a également été semée. Finalement, un mélange 2 espèces, composé d'avoine et de trèfle, et des mélanges 5 et 10 espèces par ajout successif d'espèces aux deux précédentes, ont été implantés. Ces traitements ont été semés à deux densités différentes, D1 et D2. La densité D2 correspond à un surdosage et est pratiquée afin de palier à une baisse de rendement en cas de conditions culturales défavorables. Aucune différence significative n'a été observée entre ces deux densités, probablement suite au fait que les conditions ont été relativement favorables durant la période d'implantation.

Les analyses de couverture du sol ont montré des résultats favorables pour les traitements 5 espèces, moutarde et 10 espèces. Il a été démontré que ceux-ci recouvrent 50% du sol après 24, 27 et 28 jours respectivement. Or un rapide recouvrement du sol permet un contrôle plus efficace contre l'érosion, le ruissellement et l'apparition d'adventices. Les analyses concernant la biomasse ont, elles, démontré qu'un nombre d'espèces différentes plus élevé dans un mélange amène à une biomasse plus importante. La quantité de biomasse produite par les couverts végétaux reflète leur efficacité dans le rôle de protection du sol, d'apport de matière organique et d'éléments nutritifs, de lutte contre les adventices et de lixiviation du sol.

Finalement, les mélanges de 5 et 10 espèces semblent être les plus avantageux en termes de couverture du sol et de biomasse produite.

Concernant l'étude de la biologie du sol, les prélèvements de vers de terre n'ont tout d'abord pas montré de résultats significatifs. Cela est probablement principalement dû à une méthodologie expérimentale difficile à mettre en œuvre. Ensuite, bien que la représentation graphique de l'émission de CO₂ par gramme de sol en fonction du temps laisse à penser que les traitements 10 espèces, 5 espèces, 2 espèces et moutarde présentent des résultats plus élevés que le traitement sans couvert, l'ANOVA n'a pas montré de différence significative pour les mesures de respirométrie non plus. La diversité et le nombre total de carabes ont eux montré des valeurs significativement plus élevées pour le traitement 2 espèces. Les carabes sont, d'une part, intéressés par une végétation relativement dense pour être abrités, et d'autre part suffisamment éparse afin de pouvoir se déplacer sans trop de difficulté. L'importance des carabes réside dans leur rôle de prédateurs d'un nombre important de ravageurs, tels que les pucerons, les cicadelles ou les limaces. Une remarque générale sur le dispositif expérimental de l'étude de la biologie du sol porte sur la durée des essais. Les essais ont en effet été de courte durée et les populations d'organismes vivants n'ont peut-être pas eu le temps de se mettre en place sur la parcelle. Une étude sur plus long terme serait plus représentative.

Ce mémoire ne permet finalement pas de définir un couvert végétal idéal. Les mélanges de 5 et 10 espèces présentent de meilleurs résultats pour la couverture du sol et la biomasse, néanmoins ils ne représentent pas de bons candidats pour accueillir une diversité élevée de carabes, peut-être suite à une production de biomasse trop élevée. Le choix d'un couvert doit être réfléchi en fonction des objectifs recherchés, mais également en fonction du site où il doit être implanté. Certaines espèces telles que le sarrasin ou le radis sont par exemple plus résistantes aux conditions de sécheresse. Le niveau de reliquats d'azote des parcelles est aussi un facteur important à considérer. Un mélange moutarde/phacélie nécessite par exemple un niveau élevé d'azote, à l'inverse de mélanges composés de légumineuses (Archambeaud *et al.*, 2016). Il faut également ajouter à cela la facilité d'implantation et de destruction et le coût des semences. Les semences de moutarde sont par exemple réputées comme étant bon marché, tandis que la phacélie ou la vesce commune présentent des coûts assez élevés. Il s'agit finalement de trouver un compromis entre tous ces facteurs déterminants.

Bibliographie

- Allard, D., 2018. Influence de la composition spécifique de couverts végétaux sur les paramètres physiques et chimiques du système sol-plante. Travail de fin d'études en bioingénieur, sous la direction de Pierre Bertin, UCL.
- Amghar, F., Kadi-Hanifi, H., 2004. Effet du pâturage sur la biodiversité et l'état de la surface du sol dans cinq stations à Alfa du Sud Algérois. Zaragoza : CIHEAM, p. 399-402. URL <http://om.ciheam.org/om/pdf/c62/04600194.pdf> (consulté le 23/06/2018).
- Archambeaud, M., Thomas, F., 2016. Les couverts végétaux, gestion pratique de l'interculture. Collection Agri production. 2^e édition.
- Audic, T., 2015. Cours d'Agronomie. Les couverts végétaux : Choix, intérêts, freins agronomiques et économiques.
- Bengtsson, J., Ahnstrom, J., Weibull, A.C., 2005. The effects of organic agriculture on biodiversity and abundance – a metaanalysis. *Journal of Applied Ecology*, 42, 261-269.
- Bertin, P., 2016 (a). Cours de Systèmes agraires LBIRA2109, UCL.
- Bertin, P., 2016 (b). Cours de Elements of agroecology LBRAI2010, UCL.
- Bertrand, C., Burel, F., Baudry, J., 2015. Spatial and temporal heterogeneity of the crop mosaic influences carabid beetles in agricultural landscapes. *Landscape Ecol.* DOI 10.1007/s10980-015-0259-4.
- Boeken, M., Desender, K., Drost, B., Van Gijzen, T., Koese, B., Muilwijk, J., Turin, H., Vermeulen, R., 2002. De Loopkevers van Nederland & Vlaanderen (Coleoptera : Carabidae).
- Boukria, A., 2010. Généralités sur les lombriciens. URL <http://thesis.univ-biskra.dz/1354/4/Chap2.pdf> (consulté le 29/07/2018).
- Bouthier, A., Labreuche, J., Trochard, R., 2017. Des effets variés sur le fonctionnement des sols. Arvalis – Institut du végétal. URL <https://www.arvalis-infos.fr/des-effets-varies-sur-le-fonctionnement-des-sols-@/view-23264-arvarticle.html> (consulté le 23/03/2018).
- Bowman, G., Shirley, C., Cramer, C., 2000. Benefits of cover crops. In *Managing Cover Crops Profitably*. Sustainable Agriculture Network, 9-11.
- Briat, J-F., Job, D., 2017. Les sols et la vie souterraine : Des enjeux majeurs en agroécologie.
- Brose, U., 2003. Bottom-up control of carabid beetle communities in early successional wetlands : mediated by vegetation structure or plant diversity ? *Oecologia*, 135, 407-413. DOI 10.1007/s00442-003-1222-7.

- Bruno, J.F., Cardinale, B.J., 2008. Cascading effects of predator richness. *Frontiers in Ecology and the Environment*. Vol. 6, Issue 10. DOI 10.1890/070136.
- Büchi, L., Mouly, P., Amossé, C., Bally, C., Wendling, M., Charles, R., 2016. Méthode non destructive d'estimation de la biomasse de couverts végétaux. *Recherche Agronomique Suisse* 7 (3) : 136–143. URL file:///C:/Users/Utilisateur/Downloads/Bchietal_RSA_2016.pdf (consulté le 03/04/2018).
- Buyse, P., Aubinet, M., 2010. La respiration hétérotrophe dans les sols agricoles : description des facteurs importants et comparaison de modèles semi-mécanistes existants. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2010 14(4), 707-717. URL <http://www.pressesagro.be/base/text/v14n4/707.pdf>.
- Cadillon, A., Fontaine, L., Fourrié, L., Mangin, M., Prieur, L., Guichard, P., Célette, F., Lefèvre, V., Pottier, M., Bayle, J., Salitot, G., Gayraud, P., Ménétrier, P., Lecat, A., Arnaud, F., Arino, J., 2012. Couvert végétal pendant l'interculture en AB : Caractéristiques des espèces. ITAB. URL http://www.itab.asso.fr/downloads/Fiches-techniques_culture/fiches-expeces-engraisverts-vsept2013-web.pdf (consulté le 25/04/2018).
- Cardinale, B.J., Matulich, K.L., Hooper, D.U., Byrnes, J.E., Duffy, E., Gamfeldt, L., Balvanera, P., O'Connor, M.I., Gonzalez, A., 2011. The functional role of producer diversity in ecosystems. *American Journal of Botany* 98(3), 572–592. DOI 10.3732/ajb.1000364.
- Chambre de l'agriculture de l'Isère, 2017. Le guide des couverts végétaux en interculture.
- Chambre de l'agriculture région Nord-Pas-de-Calais, 2013. Les carabes, de précieux auxiliaires. *Agricultures & Territoires*. URL https://nord-pas-de-calais.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Hauts-de-France/028_Inst-Nord-Pas-de-Calais/Telechargements/Biodiversite/Les_carabes_de_precieux_auxiliaires.pdf (consulté le 26/07/2018).
- Clermont-Dauphin, C., Blanchart, E., Loranger-Merciris, G., Meynard, J-M., 2014. Cropping systems to improve soil biodiversity and ecosystem services : the outlook and lines of research. In *Sustainable Agriculture Reviews* 14, 117-158.
- Crémer, S., 2015. Forces et faiblesses des intercultures fourragères. *Fourrages Mieux* asbl. URL http://www.fourragesmieux.be/Documents_telechargeables/15_11_12_Forces_et_faiblesses_des_intercultures_fourrageres02.pdf (consulté le 26/07/2018).
- CTIC, SARE & ASTA (2016). 2015-2016 Annual Report : Cover Crop Survey. North Central Sustainable Agriculture Research and Education Program and Conservation Technology Innovation Center.
- Davin, P., 1996. Vie microbienne du sol et production végétale. URL <http://www.jardinencommun.be/wp-content/uploads/2015/04/le-sol-.pdf> (consulté le 15/05/2018).
- Delmelle, P., Delvaux, B., 2016. Cours de Sciences du sol LBIR1336, UCL.

- Demotes-Mainard, S., Bertheloot, J., Boumaza, R., Huché-Thélier, L., Guéritaine, G., Guérin, V., Andrieu, B., 2013. Rose bush leaf and internode expansion dynamics: analysis and development of a model capturing interplant variability. *Frontiers in Plant Science* 4. DOI 10.3389/fpls.2013.00418.
- Derpsch, R., Friedrich, T., FAO, 2009. Global Overview of Conservation Agriculture Adoption.
- Desender, K., Dekoninck, W., Maes, D., Crevecoeur, L., Dufrêne, M., Jacobs, M., Lambrechts, J., Pollet, M., Stassen, E., Thys, N., 2008. Een nieuwe verspreidingsatlas van de loopkevers en zandloopkevers (Carabidae) in België. Instituut voor Natuur – en Bosonderzoek.
- Destain, J-P., Reuter, V., Goffart, J-P., 2010. Les cultures intermédiaires pièges à nitrate (CIPAN) et engrais verts : protection de l'environnement et intérêt agronomique. Vol. 14. Numéro spécial 1, 73-78.
- Draye, X., 2016. Cours de Productions végétales LBIRA2108, UCL.
- Draye, X., El Ghouch, A., Govaerts, B., 2016. Cours de Biométrie LBIRA2101, UCL.
- Dufey, J., Halen, H., Frankart, R., 1986. Evolution de la stabilité structurale du sol sous l'influence des racines de trèfle (*Trifolium pratense* L.) et de ray-grass (*Lolium multiflorum* Lmk.). Observations pendant et après culture. *Agronomie*, EDP Sciences, 6 (9), 811-817.
- Eisenhauer, N., Straube, D., & Scheu, S., 2008. Efficiency of two widespread non-destructive extraction methods under dry soil conditions for different ecological earthworm groups. *European Journal of Soil Biology*, 44, 141–145.
- Encyclopaediae Universalis, 2018 (a). Battance, pédologie. URL <https://www.universalis.fr/encyclopedia/battance-pedologie/> (consulté le 05/04/2018).
- Encyclopaediae Universalis, 2018 (b). Rhizosphère. URL <https://www.universalis.fr/encyclopedia/rhizosphere/> (consulté le 05/04/2018).
- Encyclopaediae Universalis, 2018 (c). Symbiotique. URL <https://www.universalis.fr/dictionnaire/symbiotique/> (consulté le 15/04/2018).
- Encyclopaediae Universalis, 2018 (d). Oligophage. URL <https://www.universalis.fr/dictionnaire/oligophage/> (consulté le 17/04/2018).
- Euben, R., Vancutsem, F., IRBAB asbl, 2017. Interculture : Quel couvert choisir? Publication. URL <http://www.irbab-kbivb.be/wp-content/uploads/2017/07/interculture.pdf> (consulté le 25/04/2018).
- FAOSTAT, 2013. URL <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx> (consulté le 13/03/2018).
- Finney, D., White, C., Kaye J., 2016. Biomass production and carbon/nitrogen ratio influence ecosystem services from cover crop mixtures. *Agronomy Journal*, Volume 108, Issue 1. DOI 10.2134/agronj15.0182.
- Frasier, L., Quiroga, A., Noellemeyer, E., 2016. Effect of different cover crops on C and N cycling in sorghum NT systems. *Sc. of the Total Environment* 562, 628–639. DOI 10.1016/j.scitotenv.2016.04.058.

- Gabb32, 2012. Agriculture du Carbone. Synthèse de 2 journées de rencontre et échanges entre agriculteurs du Sud-Ouest.
- García-González, I., Hontoria, C., Gabriel, J., Alonso-Ayuso, M., Quemada, M., 2018. Cover crops to mitigate soil degradation and enhance soil functionality in irrigated land. *Geoderma*, 322, 81–88. DOI 10.1016/j.geoderma.2018.02.024.
- Gitton, E., 2011. Couverts végétaux : dossier thématique. Chambre d'agriculture de Dordogne.
- Gunn, A., 1996. The use of mustard to estimate earthworm populations. *Pedobiologia*, 36, 65-67 ref.2. URL <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19921968055> (consulté le 20/05/2018).
- Herman, J.L., Arlotti, D., 2018. Impact des pratiques culturales sur la présence des carabes et des araignées. Centre Wallon de Recherches Agronomiques. URL <http://www.gembloux.ulg.ac.be/phytotechnie-temperee/appo/MAJ%20INDEX/reunion%20APPO%2029%20janvier%202018/2018%2001%2029%20AG%20APPO%20HERMAN%20ET%20ARLOTTI.pdf> (consulté le 30/07/2018).
- Institut de recherche Agroscope de Changins, 2015. Travail du sol, fertilisation et Couverts végétaux. Agronomie, Écologie et Innovation. TCS N°83. URL <https://agriculture-de-conservation.com/sites/agriculture-de-conservation.com/IMG/pdf/recherche-tcs-83.pdf> (consulté le 25/07/2018).
- Jager, M., De Reffye, P., Barthélémy, D., Houllier, F., 2016. Architecture et croissance des plantes : Modélisation et applications. URL <https://books.google.be/books?id=p2rxDQAAQBAJ&pg=PT223&lpg=PT223&dq=interception+de+lumi%C3%A8re+et+production+biomasse&source=bl&ots=AfIF3pb7EA&sig=xeGpcPMFWOKxKyGTFipQ0KzHYcE&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwimr7ruucHcAhWj4YUKHXOIvAQ6AEwAXoECAgQAQ#v=onepage&q=interception%20de%20lumi%C3%A8re%20et%20production%20biomasse&f=false> (consulté le 29/07/2018).
- Jaswinder, S., Sharanpreet, S., Adarsh, P., 2015. Extraction of earthworm from soil by different sampling methods : a review. *Environ Dev Sustain*. DOI 10.1007/s10668-015-9703-5.
- Keuskamp, J., Dingemans, B., Lehtinen, T., Sarneel, J., Hefting, M., 2013. Tea Bag Index : a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. *Methods in Ecology and Evolution*. DOI 10.1111/2041-210X.12097.
- Kotze, J., O'Hara, R., 2003. Species decline – but why ? Explanations of carabid beetle (Coleoptera, Carabidae) declines in Europe. *Oecologia* 135, 138–148. DOI 10.1007/s00442-002-1174-3
- Kouadio, A., Djaby, B., Duveiller, G., Jarroudi, M., Tychon, B., 2012. Cinétique de décroissance de la surface verte et estimation du rendement du blé d'hiver. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 16(2), 179-191. URL <http://www.pressesagro.be/base/text/v16n2/179.pdf> (consulté le 23/03/2018).

- Labreuche, J., Laurent, F., Roger-Estrade, J., 2014. Faut-il travailler le sol? Acquis et innovations pour une agriculture durable. Arvalis Institut du végétal.
- Labreuche, J., 2015. Choisissez votre couvert selon quatre critères simples. ARVALIS– Institut du végétal. URL <https://www.arvalis-infos.fr/choisir-son-couvert-selon-quelques-criteres-simples-@/view-10538-arvarticle.html> (consulté le 15/04/2018).
- Lalonde, O., 2011. Évaluation de l'abondance relative et de la richesse spécifique des carabes associées à différents systèmes culturaux et travaux du sol. Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université Laval, 77. URL <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.427.8770&rep=rep1&type=pdf> (consulté le 01/08/2018).
- Lamandé, M., Hallaire, V., Curmi, P., Pérès, G., Cluzeau, D., 2003. Changes of pore morphology, infiltration and earthworm community in a loamy soil under different agricultural managements. *Catena* 54, 637 – 649. DOI 10.1016/S0341-8162(03)00114-0.
- Lindroth, C.H., 1974. Handbooks for the identification of british insects – Coleoptera Carabidae. Vol. IV - Part. 2.
- Luan, J., Liu, S., Wang, J., Chang, S.X., Liu, X., Lu, H., Wang, Y., 2018. Tree species diversity promotes soil carbon stability by depressing the temperature sensitivity of soil respiration in temperate forests. *Science of The Total Environment*, 645, 623-629. DOI 10.1016/j.scitotenv.2018.07.036.
- MacMillan, T., Benton, T.G., 2014. Engage farmers in research, a new wave of small-scale agricultural innovation will boost and protect the planet. *Nature* 509, 25-27.
- Martinez-Garcia, L.B., Korthals, G., Brussaard, L., Bracht Jorgensen, H., De Deyn, G.B., 2018. Organic management and cover crop species steer soil microbial community structure and functionality along with soil organic matter properties. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 263, 7-17. DOI 10.1016/j.agee.2018.04.018
- Mazoyer, M., Roudart, L., 2002. Histoire des agricultures du monde : Du néolithique à la crise contemporaine.
- McGeoch M. 1998. The selection, testing and application of terrestrial insects as bioindicators. *Biological Reviews* 73, 181–201. DOI 10.1111/j.1469-185X.1997.tb00029.x.
- Ministère de la transition écologique et solidaire, 2014. Observation et statistiques. URL <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/272/1122/biodiversite-sols.html> (consulté le 28/04/2018).
- Minitab, 2017. Une comparaison des méthodes de corrélation de Pearson et de Spearman. URL <https://support.minitab.com/fr-fr/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/correlation-and-covariance/a-comparison-of-the-pearson-and-spearman-correlation-methods/> (consulté le 26/06/2018).

- Oddos, L., 2016. Effet de la composition du couvert végétal en interaction ou non avec des vers de terre endogés sur la disponibilité en azote du sol et les performances des cultures. Mémoire de fin d'études. École Nationale Supérieure des Sciences Agronomiques de Bordeaux Aquitaine.
- Pelosi, C., 2008. Modélisation de la dynamique d'une population de vers de terre *Lumbricus terrestris* au champ. Sciences de la Terre. AgroParisTech. URL <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00336523/document> (consulté le 31/07/2018).
- Petchey, O.L., Gaston, K.J., 2006. Functional diversity : back to basics and looking forward. *Ecology Letters*, 9, 741-758. DOI 10.1111/j.1461-0248.2006.00924.x.
- Pfiffner, L., 2012. Les vers de terre sont les architectes de nos sols fertiles. BIOactualites.be. URL <http://www.bioactualites.ch/cultures/sol/general/ver-de-terre.html> (consulté le 01/05/2018).
- Portail Wallonie, 2014. Assainissement et protection des sols. URL <http://dps.environnement.wallonie.be/home/legislation/agw-pgda-13062014.html> (consulté le 06/07/2018).
- Portail Wallonie, 2016. CARBIOSOL - Carbone organique total des Sols – Série. URL <http://geoportail.wallonie.be/catalogue/47e4ea34-fe00-4712-b795-4a85fdab7dd7.html> (consulté le 23/05/2018).
- Pousset, J., Bureau, J.M., 2014. Assolements et rotations des cultures. Choisir, répartir, ordonner et associer les cultures. Collection Agri production.
- Protect'eau asbl, 2018. Couverts végétaux : Formulaire de recherche. URL <https://protecteau.be/fr/cipan> (consulté le 16/04/2018).
- Quel est cet animal, 2010. URL <https://quelestcetanimal-lagalerie.com/coleopteres/carabidae/> (consulté le 06/05/2018).
- Quéré, L., 2010. La destruction des couverts végétaux. Agritèque, Chambres d'Agriculture de Bretagne. Site web Synagri. URL [http://www.chambre-agriculture-finistere.fr/ca1/PJ.nsf/TECHPJPARCLEF/11978/\\$File/TERRA205_V_E35D_024.pdf?OpenElement](http://www.chambre-agriculture-finistere.fr/ca1/PJ.nsf/TECHPJPARCLEF/11978/$File/TERRA205_V_E35D_024.pdf?OpenElement) (consulté le 15/05/2018).
- Ramanauskienė, J., Semaškienė, R., Jonavičienė, A., Ronis, A., 2018. The effect of crop rotation and fungicide seed treatment on take-all in winter cereals in Lithuania, *Crop Protection* 110, 14-20. DOI 10.1016/j.cropro.2018.03.011.
- Ramirez-Garcia, J., Gabriel, J-L., Alonso-Ayuso, M., Quemada, M., 2014. Quantitative characterization of five cover crop species. *The Journal of Agricultural Science* 153, 1174-1185. DOI 10.1017/S0021859614000811.
- Rasmont, P., Barbier, Y., 2000. La faune des terrains industriels charbonniers. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*, 69, 289-307.
- Riddick, E., Capinera, J., Hangay, G., 2008. Ground Beetle (Coleoptera: Carabidae) Feeding Ecology. *Encyclopedia of Entomology*. DOI 10.1007/978-1-4020-6359-6_1201.

- Roberts, D., Mattoo, A., 2018. Sustainable Agriculture - Enhancing Environmental Benefits, Food Nutritional Quality and Building Crop Resilience to Abiotic and Biotic Stresses. ID United States Department of Agriculture, Agricultural Research Services. DOI 10.3390/agriculture8010008.
- Rouabah, A., Plantureux, S., Lasserre-Joulin, F., 2015. Effets de la gestion des bandes enherbées sur le contrôle biologique des ravageurs de cultures Rôle de la diversité fonctionnelle des carabes (Coleoptera : *Carabidae*) et de la structure végétale. Université de Lorraine.
- Siemann, E., Tilman, D., Haarstad, J., Ritchie, M., 1998. Experimental tests of the dependence of arthropod diversity on plant diversity. *The American Naturalist*, 152, 738-750. DOI 10.1086/286204.
- Schaller, N., 2013. Agriculture de conservation. Centre d'Etudes et de Prospective. Analyse N° 61.
- Schröder, P., Beckers, B., Daniels, S., Gnädinger, F., Maestri, E., Marmioli, N., Mench, M., Millan, R., Obermeier, M., Oustriere, N., Persson, T., Poschenrieder, C., Rineau, F., Rutkowska, B., Schmid, T., Szulc, W., Witters, N., Sæbø, A., 2017. Intensify production, transform biomass to energy and novel goods and protect soils in Europe - A vision how to mobilize marginal lands. *Sc. of the Total Environment*. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.10.209.
- Scopel, E., Triomphe, B., Affholder, F., Antonio Macena Da Silva, F., Corbeels, M., Humberto Valadares Xavier, J., Lahmar, R., Recous, S., Bernoux, M., Blanchart, E., De Carvalho Mendes, L., De Tourdonnet, S., 2012. Conservation agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, performances and impacts. A review. *INRA and Springer-Verlag. Agron. Sustain. Dev.* 33, 113–130 DOI 10.1007/s13593-012-0106-9.
- Statistica (Concepts Fondamentaux en Statistique), 2016. Statistiques Élémentaires : Corrélations. URL <http://www.statsoft.fr/concepts-statistiques/statistiques-elementaires/correlations.php#introduction> (consulté le 23/05/2018).
- Stephen, M., Wallace, E., 2018. Patterns of cover crop use, adoption, and impacts among Indiana farmers. *Journal of crop improvement*, 32, 373-386. DOI 10.1080/15427528.2018.1432515.
- Tete, K.E., Charpentier, S., Baveye, P., Professeur, Chenu, C., Jardé, E., Walter, C., 2014. Dynamique intra-annuelle de la minéralisation du carbone organique dans les sols minéraux hydromorphes et à l'échelle du versant. Thèse Agrocampus Ouest, Université Européenne de Bretagne. URL file:///C:/Users/Utilisateur/Downloads/These_ETETE.pdf (consulté le 06/07/2018).
- Thomas, F., 2005. Couverts végétaux : Développer des sols performants, encourager la diversité biologique, recycler et produire de l'azote. *Techniques Culturelles Simplifiées*, N°33. URL https://agriculture-de-conservation.com/sites/agriculture-de-conservation.com/IMG/pdf/TCS33_dossier_couverts.pdf (consulté le 27/07/2018).

- Tiemann, L., Grandy, A., Atkinson, E., Marin-Spiotta, E., et McDaniel, M. (2015). Crop rotational diversity enhances belowground communities and functions in an agroecosystem. *Ecology Letters*, 18, 761–771. DOI 10.1111/ele.12453.
- Tosti, G., Benincasa, P., Farneselli, M., Pace, R., Tei, F., Guiducci, M., Thorup-Kristensen, K., 2012. Effects of pure and mixed barley – hairy vetch winter cover crops on maize and processing tomato N nutrition. *European Journal of Agronomy* 43, 136–146.
- United States Department of Agriculture (USDA), 2001. Soil quality test kit guide. Agricultural Research Service.
- United States Department of Agriculture (USDA), 2012. Farming in the 21st Century. A practical approach to improve soil health. Washington.
- Valckx, J., Govers, G., Hermy, M., Muys, B., 2011. Chapter 2 : Optimizing Earthworm Sampling in Ecosystems. Project « Framework for assessing sustainability levels in Belgian agricultural systems-SAFE ».
- Vasseur, C., Joannon, A., Aviron, S., Burel, F., Meynard, J-M., Baudry, J., 2012. The cropping systems mosaic : How does the hidden heterogeneity of agricultural landscapes drive arthropod populations? *Agric. Ecosys. Environ.* DOI 10.1016/j.agee.2012.08.013.
- Weykmans, S., 2008. Les couverts végétaux offrent aux vers de terre le gîte... et le couvert. Synthèse rédigée d'après le TFE de Lies Snauwaert (K.U. Leuven). ASBL Greenotec. URL <http://www.greenotec.be/pages/recherche/cultures-intermediaires-infotechnique/vers-de-terre.html> (consulté le 24/03/2018).
- Wikipédia, 2018 (a). NRCS. URL <https://en.wikipedia.org/wiki/NRCS> (consulté le 22/03/2018).
- Wikipédia, 2018 (b). Allélopathie. URL <https://fr.wikipedia.org/wiki/All%C3%A9lopathie> (consulté le 10/04/2018).
- Wikipédia, 2018 (c). *Sclerotinia sclerotiorum*. URL https://fr.wikipedia.org/wiki/Sclerotinia_sclerotiorum (consulté le 15/04/2018).
- Wikipédia, 2018 (d). Turricules. URL <https://fr.wikipedia.org/wiki/Turricule> (consulté le 15/04/2018).
- Wikipédia, 2018 (e). Colony-Forming Unit. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Colony-forming_unit (consulté le 20/04/2018).
- Wikipédia, 2018 (f). Déchaumage. URL <https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9chaumage> (consulté le 20/04/2018).
- Wikipédia, 2018 (g). Sous-solage. URL <https://fr.wikipedia.org/wiki/Sous-solage> (consulté le 20/04/2018).

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.

Présenté par Adeline Lefèvre

Résumé Les agriculteurs se tournent aujourd'hui de plus en plus vers une agriculture de conservation qui repose sur trois piliers centraux : un travail du sol réduit, l'implantation de couverts végétaux et une rotation de cultures diversifiées. Dans ce mémoire, nous nous intéressons à l'utilisation des couverts végétaux, et plus particulièrement aux mélanges d'espèces végétales au sein de ces derniers. L'association de différentes espèces végétales est préconisée afin d'accumuler les effets positifs de chacune d'entre elles mais également de diminuer la pression de facteurs défavorables tels que les conditions pédoclimatiques ou les ravageurs de culture.

L'objectif de ce mémoire est d'observer le développement de différents types de couverts végétaux ainsi que leur influence sur les paramètres biologiques du sol, et d'ensuite pouvoir comparer les résultats obtenus pour chaque type de couvert. Cinq traitements de couverts végétaux ont été mis en place et semés à deux densités différentes : un traitement sans couvert, un couvert moutarde et des mélanges de 2, 5 et 10 espèces.

Il a dans un premier temps été démontré que les traitements moutarde, 5 et 10 espèces recouvrent rapidement le sol et que la quantité de biomasse produite est positivement corrélée au nombre d'espèces différentes dans un couvert. Concernant les analyses portant sur la biologie du sol, les prélèvements de vers de terre et les mesures de respirométrie n'ont pas donné de résultats significatifs. Le nombre total et la diversité des carabes montrent, quant à eux, des valeurs significativement plus élevées pour le traitement 2 espèces. Des sources d'erreur dues à la méthodologie ont toutefois été observées pour chacune des analyses effectuées. De plus, la courte durée d'essai, la distance de quatre mètres séparant les différentes bandes de traitements et un faible nombre de répétitions ont probablement eu une influence non négligeable sur les résultats.

Aucune différence significative n'a été observée entre les deux densités étudiées. La densité D2 correspond à un surdosage et est pratiquée afin de palier à une baisse de rendement en cas de conditions culturales défavorables. Or, les conditions ont été favorables durant la période d'implantation.

Finalement, ce mémoire ne permet pas de définir un couvert végétal idéal. Les mélanges de 5 et 10 espèces présentent de meilleurs résultats pour la couverture du sol et la biomasse, néanmoins ils ne représentent pas de bons candidats pour accueillir une diversité élevée de carabes. Il s'agit alors de trouver un compromis dans le choix du couvert, en fonction des objectifs recherchés, du site cultivé, des facilités d'implantation ou encore du prix des semences.