

Faculté des bioingénieurs

Évaluation des services écosystémiques rendus par les couverts hivernaux en fonction de leur composition et du travail du sol

Auteur.e.s

Nina Avramović

Gregory Meuris

Promoteur

Pierre Bertin (SST/ELI/ELIA)

Lecteurs

Xavier Draye (SST/ELI/ELIA)

Hugues Falys (SST/AGRO)

Année Académique 2021 - 2022

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

Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce mémoire.

Nous voudrions tout d’abord remercier particulièrement notre promoteur, le professeur Pierre Bertin pour son encadrement au cours de l’année, ses conseils qui ont contribué à alimenter notre réflexion, ses corrections rapides et rigoureuses et surtout le temps consacré lors de nos nombreuses entrevues improvisées.

Nous remercions le professeur Xavier Draye pour sa patience et le temps consacré à répondre à nos nombreuses questions concernant le plan expérimental et les analyses statistiques.

Nous remercions Hugues Falys, responsable de la ferme de Marbaix pour sa disponibilité lors de nos questionnements concernant les aspects techniques de certaines mesures.

Nous remercions chaleureusement Thomas Dagbert et Pierre van Thorre pour leur aide précieuse sur le terrain, notamment lors de la pose des sachets de thé et des paniers à vers de terre. Ces mesures n’auraient pas été réalisables sans eux. Merci également à Thomas Lacroix et Olivier Imbrecht pour leur aide lors des carottages. Merci à Antoine Majerus de nous avoir aidé à confectionner les paniers à vers de terre. Nous remercions Lola Leveau et Joy van den Broek pour leur aide lors de la récupération des paniers à vers de terre. Merci à Marc Migon, responsable des serres, pour nous avoir prêté du matériel de mesure. Merci à Anne d’Hauwer d’avoir réalisé de nombreuses commandes de matériel pour nos prises de mesures.

Nous remercions la professeur Bernadette Govaerts qui nous a apporté son aide lors de notre réflexion autour des modèles statistiques plus complexes que nous devons traiter. Merci à Nicolas Biot pour son aide concernant le calcul des contrastes des interactions dans la partie «Résultats».

Nous tenons également à remercier Valentin Couvreur pour l’organisation des séminaires de mémoire qui nous ont permis de recevoir des commentaires constructifs.

Merci à Alice, Harold, Joachim, Grégoire et Caroline ayant également réalisé leur mémoire avec Pierre Bertin, pour les réflexions partagées lors des prises de mesures et de la rédaction du mémoire.

Enfin, un tout grand merci à la faculté Agro pour ces cinq belles années d’étude.

Merci de nous avoir permis de développer notre esprit critique et d'avoir su élargir nos horizons de connaissances. Nous en ressortons enrichis et plein de bons souvenirs en tête.

REMERCIEMENTS PARTICULIERS DE NINA

Bien évidemment, mes premiers remerciements vont à Greg. Quel duo de choc, je n'aurais pas pu rêver mieux comme acolyte ! Merci pour ta détermination, ton humour et surtout ta bienveillance. Ce fût un réel plaisir de partager cette aventure ensemble qui me laissera de nombreux souvenirs en tête.

Je tiens également à remercier ma famille et plus particulièrement mes parents qui m'ont donné l'opportunité de faire ces belles études. La tendresse et la confiance qu'ils m'ont apporté durant ces cinq années ont été d'un soutien énorme et m'ont permis de croire en moi et en mes capacités. Je leur remercie tendrement.

REMERCIEMENTS PARTICULIERS DE GREGORY

Tout d'abord je voudrais remercier Nina qui m'a accompagnée tout au long de ce mémoire. Merci pour tous les moments de complicité partagés et pour les souvenirs et les nombreuses anecdotes que cette aventure me laissera : les kilomètres à vélo, les fous rires, les heures passées au champ ou en laboratoire, les podcasts, ... Merci d'avoir partagé avec moi ta bonne humeur, ta motivation et ton envie de mener ce travail à bien.

Je voudrais également remercier mes proches qui m'ont apporté la force nécessaire à surmonter les obstacles.

Merci à Céline, ma compagne, pour m'avoir soutenu et encouragé durant cette année mais plus largement pendant toutes mes études universitaires.

Merci à ma mère, mon père et ma soeur qui m'ont toujours épaulé et qui, je le sais seront toujours là pour moi et cela dans les bons moments comme dans les mauvais.

Table des matières

1	État de l’art	2
1.1	Quête d’une agriculture durable	2
1.2	L’agriculture de conservation - un système cultural durable	3
1.2.1	1 ^{er} pilier de l’agriculture de conservation - La réduction du travail du sol	4
1.2.1.1	Le sol : structure, matière organique, vie biologique . . .	4
1.2.1.2	Le travail du sol et ses impacts	7
1.2.1.3	Les services écosystémiques des techniques culturales sim- plifiées	9
1.2.1.4	Désavantages des techniques culturales simplifiées	11
1.2.2	2 ^{ème} pilier de l’agriculture de conservation - Les couverts	12
1.2.2.1	Définitions	12
1.2.2.2	Les différents types de couverts	13
1.2.2.3	Les services écosystémiques apportés par les couverts . .	17
1.3	Gestion d’un couvert	23
2	Objectifs	26
3	Matériel et méthodes	27
3.1	Contexte de l’étude	27
3.2	Parcelle expérimentale	27
3.2.1	Caractéristiques de la parcelle	27
3.2.2	Historique de l’itinéraire technique de la parcelle	28
3.3	Design expérimental	28
3.4	Contraintes rencontrées	32
3.5	Mesures	33
3.5.1	Densité d’individus - Pourcentage de levée	34
3.5.2	Densité d’adventices	36
3.5.3	Taux de couverture du sol	36
3.5.4	Tea bag Index	37
3.5.5	Paniers à vers de terre	39
3.5.6	Biomasse aérienne	40
3.5.7	Biomasse racinaire	40
3.5.8	Pénétrométrie	41
3.6	Analyse des données	42
3.6.1	Modèles utilisés	42
3.6.2	Méthodes d’analyses statistiques employées	46

4	Résultats	49
4.1	Résultats de l'essai 1 - «Travail du sol»	49
4.1.1	Densité des espèces	49
4.1.2	Pourcentage de levée	51
4.1.3	Densité des adventices	53
4.1.4	Taux de couverture du sol	54
4.1.5	Taux de croissance du couvert	56
4.1.6	Décomposition de la matière organique par les microorganismes .	57
4.1.7	Décomposition de la matière végétale par les vers de terre	58
4.1.8	Biomasse aérienne	59
4.1.9	Biomasse racinaire	61
4.1.10	Résistance du sol à la pénétration	62
4.1.11	Corrélations	64
4.2	Résultats de l'essai 2 - «Type de couvert»	65
4.2.1	Densité des espèces	65
4.2.2	Pourcentage de levée	66
4.2.3	Densité des adventices	67
4.2.4	Taux de couverture du sol	69
4.2.5	Taux de croissance du couvert	70
4.2.6	Décomposition de la matière organique par les microorganismes .	71
4.2.7	Décomposition de la matière végétale par les vers de terre	72
4.2.8	Biomasse aérienne	73
4.2.9	Biomasse racinaire	74
4.2.10	Résistance du sol à la pénétration	74
4.2.11	Corrélations	75
4.3	Résultats de l'essai 3 - «Couvert mixte»	76
4.3.1	Densité des espèces	76
4.3.2	Pourcentage de levée	77
4.3.3	Densité des adventices	78
4.3.4	Taux de couverture du sol	80
4.3.5	Taux de croissance du couvert	80
4.3.6	Décomposition de la matière organique par les microorganismes .	81
4.3.7	Décomposition de la matière organique par les vers de terre	81
4.3.8	Biomasse aérienne	81
4.3.9	Biomasse racinaire	82
4.3.10	Résistance du sol à la pénétration	82
4.3.11	Corrélations	82
4.4	Résumé des résultats	83

5	Discussion	84
5.1	Conséquence de l'été pluvieux sur notre expérience	84
5.2	Discussion des résultats par mesure	84
5.2.1	Densité d'individus et pourcentage de levée	85
5.2.2	Taux de couverture, taux de croissance et biomasse aérienne . . .	87
5.2.3	Diversité et densité des adventices	91
5.2.4	Décomposition de la matière organique par les microorganismes .	94
5.2.5	Décomposition de la biomasse végétale par les vers de terre	95
5.2.6	Biomasse racinaire	96
5.2.7	Résistance du sol à la pénétration	97
5.3	Tendances observées	98
5.4	Et si c'était à refaire ... ?	99
6	Conclusions et perspectives	104
	Références	I
7	Annexes	I
A	Législations et aspects réglementaires de l'implantation d'un couvert végétal	I
B	Cartes des types de sol et des pentes	III
C	Annexes de l'essai 1	IV
C.1	Taux de couverture pour l'essai 1 - Cadre	IV
C.2	Taux de croissance pour l'essai 1 - Cadre	V
C.3	Taux de couverture pour l'essai 1 - Canopeo	V
C.4	Taux de croissance pour l'essai 1 - Canopeo	VII
C.5	Décomposition de la matière organique par les microorganismes pour l'essai 1	VIII
C.6	Corrélations pour l'essai 1	IX
D	Annexes de l'essai 2	XIII
D.1	Taux de couverture pour l'essai 2 - Cadre	XIII
D.2	Taux de couverture pour l'essai 2 - Canopeo	XIII
D.3	Taux de croissance pour l'essai 2 - Canopeo	XIV
D.4	Décomposition de la matière organique par les microorganismes pour l'essai 2	XV
D.5	Décomposition de la matière végétale par les vers de terre pour l'essai 2 .	XVI
D.6	Corrélations pour l'essai 2	XVII

E	Annexes de l'essai 3	XIX
E.1	Taux de couverture pour l'essai 3 - Cadre	XIX
E.2	Taux de couverture pour l'essai 3 - Canopeo	XIX
E.3	Taux de croissance pour l'essai 3 - Canopeo	XXI
E.4	Décomposition de la matière organique par les microorganismes essai 3 .	XXI
E.5	Taux de décomposition de la matière végétale par les vers de terre essai 3	XXII
E.6	Résistance du sol à la pénétration essai 3	XXII
E.7	Corrélations essai 3	XXII
F	Résumé des mesures	XXIV

Table des figures

1	Carte satellite et schéma de localisation de la parcelle expérimentale à Vieux-Sart, province de Brabant wallon, Belgique.	27
2	Dispositif expérimental de la parcelle, présentant les 5 sous-parcelles , les 27 bandes de couvert (dont une entourée en jaune), les 5 travées en pointillés (dont la première est marquée par une flèche blanche) et les 135 unités expérimentales (dont une entourée en rouge, celles appartenant à la première et à la dernière bande étant numérotées). .	29
3	Dispositif des traitements de la parcelle, présentant les 18 traitements de l'essai 1 («travail du sol», cadre mauve), les 12 traitements de l'essai 2 («type de couvert», cadre orange) et les 3 traitements de l'essai 3 («couvert mixte», cadre rose).	30
4	Disposition spatiale des mesures sur une unité expérimentale.	33
5	Courbes de dégradation du thé Green tea et du thé Rooibos.	38
6	Design expérimental de l'essai 1 présentant le facteur A «travail du sol», le facteur B «couvert» (en différentes couleurs), les 5 blocs (dont le bloc 1 entouré en jaune), les 15 sous-blocs (dont un entouré en turquoise), les 90 unités expérimentales (dont une entourée en blanc) et les travées (en pointillés)	43
7	Design expérimental de l'essai 2, présentant le facteur «couvert» (en différentes couleurs), les 5 blocs (dont le bloc 1 entouré en jaune) et les travées (en pointillés). . . .	45
8	Design expérimental de l'essai 3, réésentant le facteur «couvert» (en différentes couleurs), les 5 blocs (dont le bloc 1 entouré en rouge) et les travées (pointillés).	46
9	Nombre d'individus des espèces par m ² en fonction du type de semis et du travail du sol pour l'essai 1. En jaune est représenté le nombre de graines semées.	50
10	Pourcentage de levée des espèces en fonction du type de semis et du travail du sol pour l'essai 1. La ligne pointillée rouge correspond à 100% de pourcentage de levée. .	52
11	Nombre d'adventices en fonction du couvert et du travail du sol réalisé pour l'essai 1. Les temps 1 et 2 correspondent aux deux dates de recensement soit 22 et 44 jours après semis.	53
12	Évolution du taux de couverture du sol des couverts en fonction du temps et du travail du sol pour l'essai 1. Le temps est défini en fonction du nombre de jours après semis. .	55
13	Décomposition de la paille par les vers de terre en fonction du couvert et du travail du sol réalisé pour l'essai 1.	59
14	Biomasse aérienne sèche en fonction des couverts en fonction du travail du sol pour l'essai 1. La surface de prélèvement est d'1 m ²	60
15	Profondeur à laquelle la pression mesurée avec le pénétromètre atteint 21 bar en fonction de l'espèce semée et du travail du sol réalisé pour l'essai 1.	63
16	Densité d'individus en fonction du type de semis pour l'essai 2. En jaune est représenté le nombre de graines semées.	65
17	Pourcentage de levée des espèces en fonction du type de semis pour l'essai 2. La ligne pointillée rouge correspond à 100% de pourcentage de levée.	66

18	Densité d'adventices en fonction du couvert et du temps. Les temps 1 et 2 correspondent aux dates de recensements soit 22 et 44 jours après le semis.	68
19	Taux de couverture des couverts en fonction du temps pour l'essai 2. Le temps représente le nombre de jours écoulés depuis le semis. La ligne rouge en pointillés représente la date de destruction des couverts alternatifs par le froid.	69
20	Biomasse aérienne sèche en fonction de l'espèce semée pour l'essai 2. La surface de prélèvement est d'1 m ²	73
21	Nombre d'espèces par m ² en fonction du type de semis pour l'essai 3. Le type de semis est considéré comme couvert standard ou alternatif si l'espèce est semée en mélange de 4 espèces et comme couvert mixte si l'espèce est semée en mélange de 8 espèces. En jaune est représenté le nombre de graines semées pour les mélanges de 4 espèces. En rouge est représenté le nombre de graines semées pour les mélanges de 8 espèces. .	76
22	Pourcentage de levée en fonction du type de semis pour l'essai 3. Le type de semis est considéré comme couvert standard ou alternatif si l'espèce est semée en mélange de 4 espèces et comme couvert mixte si l'espèce est semée en mélange de 8 espèces.	78
23	Nombre d'adventices des couverts par m ² en fonction du temps pour l'essai 3. Les temps 1 et 2 correspondent aux dates de recensements soit 22 et 44 jours après le semis.	79
24	Taux de couverture en fonction du type de couvert pour l'essai 3. Le temps représente le nombre de jours écoulés depuis le semis. La ligne rouge en pointillés représente la date de destruction des couverts alternatifs par le froid.	80
25	Biomasse aérienne sèche en fonction du type de couvert pour l'essai 3. La surface de prélèvement est de 1 m ²	82
26	Zone vulnérable en Wallonie (Protect'eau 2022b).	II
27	Carte des types sols de la parcelle (Wallonmaps 2022b).	III
28	Carte des pentes de la parcelle (Wallonmaps 2022a)	III
29	Taux de couverture du sol, en fonction des couverts et du travail du sol, séparé par pas de temps et exprimé en jours depuis le semis pour l'essai 1. Les lettres sont attribuées et à lire séparément par pas de temps et type de travail du sol donc dans une même colonne sur les trois graphes.	IV
30	Taux de couverture des espèces en fonction du temps pour l'essai 1. Le temps représente le nombre de jours écoulés depuis le semis.	V
31	Taux de couverture du sol, en fonction des couverts et du travail du sol, séparé par pas de temps et exprimé en jours depuis le semis pour l'essai 1. Les lettres sont attribuées et à lire séparément par pas de temps et type de travail du sol donc dans une même colonne sur les trois graphes.	VI
32	Taux de stabilisation (S) de la litière en fonction du couvert et du travail du sol réalisé pour l'essai 1.	VIII
33	Taux de décomposition (k) de la matière organique en fonction du couvert et du travail du sol réalisé pour l'essai 1.	VIII
34	Biplot des 2 premières composantes de l'analyse en composantes principales pour l'essai 1. Les couleurs représentent les différents travaux du sol.	X

35	Biplot des deux premières composantes de l'analyse en composantes principales pour l'essai 1. Les couleurs représentent les différentes espèces.	XI
36	Heatmap des corrélations entre les variables de l'analyse multivariée pour l'essai 1. . .	XII
37	Taux de couverture du sol, séparé par pas de temps, exprimé en jours depuis semis pour l'essai 2. Les groupes ont été créés par pas de temps.	XIII
38	Taux de couverture des espèces en fonction du temps pour l'essai 2. Le temps représente le nombre de jours écoulés depuis le semis. La ligne pointillée représente la date de destruction du couvert alternatif par le froid.	XIII
39	Taux de couverture du sol, séparé par pas de temps, exprimé en jours depuis semis pour l'essai 2. Les groupes ont été créés par pas de temps.	XIV
40	Taux de stabilisation (S) de la matière organique en fonction de l'espèce semée pour l'essai 2.	XV
41	Taux de décomposition (k) de la matière organique en fonction de l'espèce semée pour l'essai 2.	XVI
42	Décomposition de la paille par les vers de terre en fonction du couvert pour l'essai 2. .	XVI
43	Heatmap des variables de l'analyse multivariée pour l'essai 2.	XVII
44	Biplot des deux premières composantes de l'analyse en composantes principales pour l'essai 2. Les couleurs représentent le type d'espèce.	XVIII
45	Taux de couverture du sol, séparé par pas de temps, exprimé en jours depuis semis pour l'essai 3. Les groupes ont été créés par pas de temps.	XIX
46	Taux de couverture en fonction du temps pour l'essai 3. Le temps représente le nombre de jours écoulés depuis le semis.	XX
47	Taux de couverture du sol, séparé par pas de temps, estimé en jours depuis semis. Les groupes ont été créés par pas de temps.	XX
48	Biplot des deux premières composantes de l'analyse en composantes principales pour l'essai 3.	XXIII
49	Heatmap des variables de l'analyse multivariée pour l'essai 3.	XXIV

Liste des tableaux

1	Calendrier des mesures et interventions	34
2	Densité de semis par espèces en fonction du type de semis.	35
3	Contrastes sur les facteurs fixes du nombre d'individus par m ² pour l'essai 1.	51
4	Contrastes sur les facteurs fixes du pourcentage de levée pour l'essai 1.	52
5	Contrastes sur les facteurs fixes de la densité d'adventices pour l'essai 1.	54
6	Contrastes des facteurs fixes pour le taux de croissance du couvert pour l'essai 1.	56
7	Contrastes sur les facteurs fixes pour le taux de stabilisation S de la litière pour l'essai 1.	57
8	Contrastes sur les facteurs fixes pour le taux de décomposition k de la matière organique pour l'essai 1.	58
9	Contrastes sur les facteurs fixes pour la décomposition de la paille par les vers de terre pour l'essai 1.	59
10	Contrastes sur les facteurs fixes pour la biomasse aérienne pour l'essai 1.	61
11	Contrastes sur les facteurs fixes pour la biomasse racinaire pour l'essai 1.	62
12	Contrastes sur les facteurs fixes pour la résistance du sol pour l'essai 1.	63
13	Contrastes sur les facteurs fixes pour la densité d'individus pour l'essai 2.	66
14	Contrastes sur les facteurs fixes pour le pourcentage de levée pour l'essai 2.	67
15	Contrastes sur les facteurs fixes de la densité d'adventices.	69
16	Contrastes sur les facteurs fixes du taux de croissance pour l'essai 2.	70
17	Contrastes sur l'effet fixe pour le taux de stabilisation S de la litière pour l'essai 2.	71
18	Contrastes de l'effet fixe pour le taux de décomposition k de la matière organique pour l'essai 2.	72
19	Contrastes de l'effet fixe pour la décomposition de la paille par les vers de terre pour l'essai 2.	73
20	Contrastes sur le facteur fixe pour la biomasse aérienne pour l'essai 2.	74
21	Contrastes sur le facteur fixe pour la résistance du sol pour l'essai 2.	75
22	Contrastes sur les facteurs fixes pour la densité d'individus pour l'essai 3.	77
23	Contrastes sur les facteurs fixes pour la densité d'individus pour l'essai 3.	78
24	Contrastes sur les facteurs fixes pour la densité d'adventices pour l'essai 3.	79
25	Contrastes sur le facteur fixe pour le taux de croissance pour l'essai 3.	81
26	Contrastes sur le facteur fixe pour la biomasse aérienne pour l'essai 3.	82
27	Groupes réalisés à l'aide des contrastes sur les interactions pour le taux de croissance pour l'essai 1.	V
28	Contrastes sur les facteurs fixes pour le taux de croissance pour l'essai 1.	VII
29	Groupes réalisés à l'aide des contrastes sur les interactions pour le taux de croissance pour l'essai 1.	VII
30	Légendes des variables de l'analyse multivariée.	IX
31	Contrastes sur les facteurs fixes pour le taux de croissance pour l'essai 2.	XV
32	Contrastes sur le facteur fixe pour le taux de croissance du couvert pour l'essai 3.	XXI
33	Contrastes sur le facteur fixe pour le taux de stabilisation S de la litière pour l'essai 3.	XXI

34	Contrastes sur le facteur fixe pour le taux de décomposition k de la matière organique pour l'essai 3.	XXI
35	Contrastes sur le facteur fixe pour le taux de décomposition de la matière végétale par les vers de terre pour l'essai 3.	XXII
36	Contrastes sur le facteur fixe pour la résistance du sol pour l'essai 3.	XXII
37	Résumé de l'ensemble des mesures par essai. A : avoine brésilienne ; P : phacélie ; R : radis chinois ; TA : trèfle d'Alexandrie ; SA : sarrasin ; SO : sorgho ; T : tournesol ; TP : trèfle de Perse ; NL_15 : non-labour depuis 15 ans ; NL_3 : non-labour depuis 3 ans ; L : labour	XXVI

Introduction

Ce mémoire comporte six parties.

La première partie « État de l’art » présente le contexte agricole dans lequel s’insère notre étude et aborde les problématiques qui ont motivé le choix de cette expérience.

La deuxième partie « Objectifs » définit explicitement l’objectif général du mémoire, duquel découle trois objectifs spécifiques, correspondant aux trois essais mis en place dans l’expérience.

La troisième partie « Matériel et méthodes » détaille les méthodes et démarches suivies afin de récolter et analyser les données de l’expérience. Les plans expérimentaux des trois essais y sont présentés.

La quatrième partie « Résultats » présente pour chaque essai expérimental les résultats obtenus. Un tableau récapitulatif de l’ensemble des résultats est disponible en annexe F.

La cinquième partie « Discussion » discute et interprète les résultats obtenus par mesure, et non par essai comme dans la partie « Résultats ». Une critique de la méthodologie appliquée y est réalisée. Diverses améliorations des protocoles expérimentaux sont ensuite proposées.

La sixième partie « Conclusions et perspectives » clôture le mémoire en mettant en exergue les résultats par rapport à la réalité du contexte agricole.

La quantité d’information étant conséquente, le travail est agrémenté d’annexes facilitant la lecture.

1 État de l’art

1.1 Quête d’une agriculture durable

À la sortie de la seconde guerre mondiale survient une révolution agricole dans les pays développés : la Révolution Verte. La Révolution Verte a eu pour conséquence une augmentation sans précédent de la production et de la productivité agricole. En a résulté une forte croissance démographique de la population mondiale, encore jamais observée auparavant. Cette révolution a permis de nettement augmenter les rendements de production agricole et ainsi de lutter contre les famines, autrefois liées à un déficit de production (Lichtfouse et al. 2009). On peut qualifier ce type d’agriculture d’«agriculture industrielle» dont les pratiques agricoles se traduisent par une utilisation massive d’intrants (engrais azotés et phosphatés, pesticides, eau), une mécanisation renforcée (travail du sol), une simplification des cultures (diminution des rotations, monocultures) et le développement de nouvelles variétés à hauts rendements *via* l’amélioration végétale (Evenson et Gollin 2003).

Malgré les bienfaits sociétaux apportés à l’époque, cette agriculture industrielle a généré et génère encore à présent de nombreuses externalités négatives pour l’environnement. Les écosystèmes naturels sont modifiés et perturbés par les surfaces agricoles. Ces perturbations induisent la dégradation des sols, une érosion de la biodiversité, la pollution de l’eau et de l’air, la déforestation et l’émission de gaz à effets de serres. Selon le rapport du GIEC de 2019, la part des émissions de gaz à effets de serres attribuables à l’agriculture est de 23%¹. Ce qui fait de l’agriculture l’une des activités humaines contribuant le plus au changement climatique (Masson-Delmotte et al. s. d.).

Ces préoccupations environnementales questionnent les voies de développement qu’empruntent les systèmes agricoles. Une transition vers des systèmes agricoles répondant à des enjeux environnementaux tout en considérant les enjeux de production est dès lors nécessaire. L’objectif est donc de diminuer les dommages causés sans diminuer le rendement.

L’Organisation de Coopération et de Développement Économique (OCDE) a défini le triple défi à relever par les systèmes alimentaires (OECD 2022) ;

1. Nourrir 9 milliards d’habitant.e.s sur la planète en 2050 tout en leur fournissant une alimentation saine et bon marché
2. Garantir un revenu digne aux agriculteur.rice.s. et autres acteur.rice.s de la chaîne alimentaire

1. «Le secteur AFOLU (agriculture, foresterie et autres usages des terres) est à l’origine d’environ 23 % de toutes les émissions anthropiques de gaz à effet de serre (de 2007 à 2016).» (Masson-Delmotte et al. s. d.)

3. Veiller à réaliser les points 1 et 2 tout en protégeant l'environnement ; c'est-à-dire par une utilisation plus efficiente des ressources en générant un impact plus faible sur l'environnement.

La quête est donc dirigée vers une agriculture durable, soit une agriculture qui répond aux besoins actuels sans compromettre la capacité des futures générations à répondre aux leurs (Lichtfouse et al. 2009). L'agriculture de demain devra répondre à ce triple défi, qui n'est réalisable que par la mise en place de systèmes plus résilients, efficaces, durables et inclusifs (OECD 2022).

De nombreux systèmes cultureux ont émergé ces dernières années en partie en réponse à cette conscientisation écologique et ont le potentiel nécessaire pour répondre à ces défis. Parmi eux on retrouve entre autres l'agriculture biologique, l'agroécologie et l'agriculture de conservation des sols. Certains de ces systèmes sont définis par un cahier des charges, d'autres par une série de principes ou de pratiques. Ces systèmes ont en commun de s'éloigner de l'agriculture conventionnelle afin de proposer un système plus respectueux de l'environnement.

1.2 L'agriculture de conservation - un système culturel durable

L'agriculture de conservation est un ensemble de pratiques culturelles dont les grands principes sont basés sur trois piliers : une perturbation mécanique minimale du sol *via* la réduction du travail du sol, une couverture permanente du sol et la diversification des espèces végétales *via* les rotations culturales (FAO 2021).

L'agriculture de conservation, aussi appelée agriculture de conservation des sols a pour objectif la protection des sols. Elle permet de prévenir la perte de terres arables tout en contribuant à la restauration des terres dégradées. Les pratiques culturelles en place vont influencer les aspects économiques, agronomiques et environnementaux de la gestion d'une culture (FAO 2021).

Concernant les aspects économiques et le coût des pratiques, il est difficile de prononcer une tendance claire entre l'agriculture de conservation et l'agriculture conventionnelle. D'une part, le travail réduit du sol permet un gain de temps et une réduction des coûts par une utilisation moindre d'engins agricoles et de carburant. L'implantation d'une culture de couverture du sol permet de réduire l'utilisation de fertilisants exogènes et de produits phytosanitaires grâce à l'autofertilité apportée et à la diminution de la pression des ravageurs. D'autre part, les coûts liés à l'utilisation d'herbicides peuvent être supérieurs en agriculture de conservation, car le non-labour ne permet pas d'enfouir les adventices. L'implantation de cultures de couverture implique également un coût supérieur dans l'achat des semences. N'oublions pas aussi qu'une culture de couverture,

comme toute culture, nécessite une préparation du lit de semences, ce qui implique l'utilisation d'engins agricoles et de carburant.

Concernant les aspects agronomiques, les pratiques de l'agriculture de conservation confèrent certains avantages. Les résidus de culture retournés au sol, plus abondants grâce à la couverture permanente du sol, augmentent la quantité de matière organique (Powlson, Whitmore et Goulding 2011). Cette matière organique induit une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau et des nutriments par la plante, une meilleure conservation de l'eau dans le sol et une amélioration de la structure du sol (Kassam, Friedrich et Derpsch 2019). En résultante, la productivité du sol est augmentée (FAO 2021). Cependant, l'effet de la réduction du travail du sol sur le rendement des cultures est très varié. Plusieurs études observent une augmentation, une diminution ou aucun effet sur les rendements dans les systèmes en agriculture de conservation comparés aux systèmes avec un travail du sol conventionnel. Cette variabilité pourrait être due à la différence de type de sol, aux conditions climatiques et édaphiques et aux techniques de gestion des cultures associées (Pittelkow et al. 2015 ; Triplett Jr. et Dick 2008).

Enfin, les aspects environnementaux sont des indicateurs de la durabilité du système agricole. En agriculture de conservation, on observe une réduction de l'érosion (Chabert et Sarthou 2020), une amélioration de la qualité de l'eau et de l'air, une biodiversité augmentée (Sommer et al. 2014) et enfin une séquestration du carbone dans le sol. Ce dernier point est particulièrement pertinent car c'est un point essentiel afin de diminuer la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

1.2.1 1^{er} pilier de l'agriculture de conservation - La réduction du travail du sol

1.2.1.1 Le sol : structure, matière organique, vie biologique

1. LA STRUCTURE D'UN SOL

La structure d'un sol est un critère caractérisant l'agencement des particules du sol les unes par rapport aux autres. Un indicateur souvent utilisé pour évaluer la structure d'un sol est la stabilité des agrégats (Bronick et Lal 2005). Les agrégats correspondent à des associations de molécules minérales et de matière organique. La fraction solide du sol est formée de particules minérales (issues de la minéralisation de la matière organique et de la météorisation des roches) et de particules organiques (provenant de la biomasse décomposée). La porosité du sol correspond au volume du sol qui est «vide» et qui est occupé par les organismes du sol, les racines, l'eau et l'air. L'ensemble des pores forme un réseau continu qui permet la circulation de l'eau et des minéraux (Calvet, Chenu et Houot 2021).

La structure d'un sol subit l'influence de facteurs à la fois structurants et destructurants. Ainsi, elle est en perpétuelle réorganisation et n'est pas figée dans le temps. Parmi les facteurs structurants, on retrouve les facteurs climatiques, l'activité biologique et le taux de matière organique.

Les facteurs climatiques tels que la température et l'humidité ont un effet sur la structuration du sol *via* les phénomènes d'alternance des gels/dégels et humectations/dessications (Biolders 2020 ; F. Thomas et Archambeaud 2016). L'effet de l'activité biologique et du taux de matière organique sur la structuration d'un sol seront décrits dans les paragraphes suivants.

Une bonne structure du sol est bénéfique pour l'infiltration et la rétention de l'eau, l'aération, l'émergence des graines et la pénétration par les racines (Calvet, Chenu et Houot 2021).

2. LA MATIÈRE ORGANIQUE D'UN SOL

La matière organique d'un sol provient de résidus animaux, végétaux et microbiens ; les résidus végétaux étant les plus abondants. Ces apports varient en fonction de nombreux critères : type de culture, pratiques culturales et conditions climatiques (Calvet, Chenu et Houot 2021).

La matière organique joue un rôle prépondérant dans le fonctionnement des sols *via* ses composantes physiques, biologiques et chimiques.

La composante physique de la matière organique concerne la structure du sol. La matière organique organise les agrégats en liant les particules minérales entre elles. Cela facilite la circulation de l'eau et de l'air dans le sol et stabilise la structure (Calvet, Chenu et Houot 2021). Un sol riche en matière organique comporte une plus grande quantité d'agrégats.

Concernant sa composante biologique, la matière organique fournit un habitat et de la nourriture aux microorganismes du sol.

La composante chimique concerne les réactions de biotransformation que subit la matière organique. Parmi celles-ci, nous retrouvons la minéralisation de la matière organique.

La minéralisation de la matière organique est une réaction catalysée par les microorganismes du sol permettant le passage de la forme organique à la forme inorganique. Cette réaction de biotransformation est contrôlée par de nombreux facteurs qui exercent

une influence sur la vitesse de minéralisation.

Parmi les différents facteurs, citons tout d'abord l'influence de la composition de la matière organique. Un faible rapport C/N indique une minéralisation rapide. En effet, au plus la concentration en azote est élevée, au plus la minéralisation est rapide. La structure du sol a elle aussi une influence. Des matières organiques protégées dans des agrégats stables ont tendance à avoir une vitesse de minéralisation réduite (Bernard et al. 2022).

Aussi, les facteurs du milieu exercent une forte influence. Une température élevée stimule l'activité des microorganismes jusqu'à atteindre des valeurs extrêmes où l'activité est alors inhibée. On observe la même tendance avec l'humidité du sol. Un climat chaud et humide a tendance à favoriser la minéralisation. Sous nos climats, deux pics de minéralisation ont lieu durant l'année ; ces pics correspondent aux moments où humidité et chaleur sont réunies, c'est-à-dire au printemps et en automne (F. Thomas et Archambeaud 2016).

Le sol constitue le plus grand stock de carbone organique à la surface de la terre. Ce stock est le résultat de l'accumulation et de la minéralisation de la matière organique. La variation de ce stock de carbone organique exerce une influence considérable sur la qualité et la fertilité du sol. On utilise la teneur en carbone organique d'un sol pour quantifier la teneur en matière organique, avec un facteur de conversion. Celui-ci dépend du type de couvert végétal et des conditions de température et d'humidité. Comme vu précédemment, la minéralisation est favorisée par des conditions humides et chaudes. À l'inverse, l'accumulation du carbone dans les sols est plus élevée dans les régions froides (zones boréales) (Calvet, Chenu et Houot 2021).

3. LA VIE BIOLOGIQUE D'UN SOL

L'activité biologique contribue activement au fonctionnement des sols. Le sol est un milieu très hétérogène qui implique donc une diversité importante de communautés par la création de nombreuses niches écologiques (Ettema et Wardle 2002 ; Tiedje et al. 2001). L'abondance et la diversité de ces organismes sont dépendantes du type de sol, du climat, des espèces végétales et des activités anthropiques. La diversité des organismes du sol est primordiale. La disparition d'une espèce peut influencer l'ensemble du système (Ruiter, Neutel et Moore 1998).

Les organismes du sol peuvent être classés en différents groupes selon leur taille et leur nature. On distingue alors la microflore (bactéries et mycètes), la macroflore (végétaux), la microfaune (protozoaires et nématodes), la mésofaune (petits arthropodes, arachnides, mollusques) et la macrofaune (vers de terre, arthropodes, etc.) (Swift, Heal

et Anderson 1979 ; Wall, Adams et Parsons 2001). Tous ces organismes forment un réseau d'interaction complexe comprenant des interactions entre individus et entre individus et leur environnement. La matière organique est d'abord transformée en plus petites particules par la macrofaune et la mésofaune. La microflore transforme ensuite la matière organique en matière minérale qui servira de nutriments à la macroflore (Barrios 2007).

Premièrement, les vers de terre, faisant partie de la macrofaune, ont un rôle essentiel de décomposeur. Ils permettent d'incorporer la matière organique de surface dans les horizons plus profonds. Il existe trois classes principales de vers de terre : les épigés, les endogés et les anéciques. Les vers de terre épigés dégradent la matière organique de surface et l'incorporent dans les horizons peu profonds. Les endogés vivent dans les horizons intermédiaires où se trouve la biomasse racinaire en décomposition et la majeure partie de la matière organique. Ils creusent des galeries qui deviennent des habitats pour les bactéries et des zones d'infiltration pour l'eau, l'air et les racines. Les vers de terre anéciques jouent un rôle similaire mais ils transportent et répartissent la matière organique de la surface aux horizons profonds et creusent de plus larges galeries (Coleman, Crossley et Hendrix 2004 ; Lavelle et Spain 2002). Les vers de terre sont donc également considérés comme des organismes structurant le sol.

Deuxièmement, la microflore joue un rôle essentiel dans le recyclage des nutriments *via* leur rôle dans la décomposition de la matière organique et le cycle de l'azote. Les bactéries fixatrices d'azote peuvent être divisées en deux groupes : celles qui ont une relation de symbiose avec les plantes et celles qui vivent de manière indépendante. Il existe une diversité bien plus grande de bactéries du sol mais leur rôle reste encore méconnu pour bon nombre d'entre elles.

Enfin, les végétaux -la macroflore-, participent à l'amélioration de la structure du sol. Les systèmes racinaires pivotants permettent de pénétrer le sol en profondeur et les systèmes racinaires fasciculés augmentent l'adhésion entre agrégats dans les horizons peu profonds (Johan Six, Feller et al. 2002).

1.2.1.2 Le travail du sol et ses impacts

Le travail du sol consiste à déplacer ou fragmenter la couche superficielle du sol (0-5 à 0-90 cm) par des moyens mécaniques pour la mise en place des cultures (Biielders 2020).

Le travail du sol effectué peut être primaire ou secondaire. Dans le cas d'un travail du sol primaire, l'objectif est de créer une large distribution de mottes et de fissurer le sol. Le labour est une opération de travail du sol primaire qui vise à retourner le sol à l'aide d'une charrue. Le travail du sol secondaire consiste en la préparation du lit de semences, le nivellement de la surface du sol et l'incorporation d'engrais.

La mise en place d'un travail du sol a de multiples objectifs (Biielders 2020).

Premièrement, le travail du sol a pour but d'en améliorer la structure afin de favoriser la germination des graines et le développement racinaire. Le travail du sol le rend plus meuble et permet à la racine de mieux s'y développer. Il permet également un réchauffement plus rapide du sol, une amélioration de l'aération et une amélioration de l'infiltration d'eau (Biielders 2020 ; Hobbs, Sayre et R. Gupta 2008).

Aussi, on s'intéresse fortement à la capacité d'enfouissement liée au travail du sol. En enfouissant la terre, on enfouit également les adventices, les engrais, les résidus de culture et d'autres types d'amendements. Cela permet de désherber, de limiter les pertes d'éléments minéraux par ruissellement et volatilisation et de favoriser la décomposition des résidus de culture (Biielders 2020 ; Hobbs, Sayre et R. Gupta 2008).

Enfin, le retournement de la terre par le travail du sol (dans le cas du labour) permet d'exposer le sol aux agents climatiques pour leurs effets améliorants. Par exemple, un labour d'hiver permet d'exposer des gros blocs de sol aux effets gel/dégel, ce qui a pour effet de fragmenter le sol et ainsi obtenir un sol plus meuble au printemps (Biielders 2020 ; Hobbs, Sayre et R. Gupta 2008).

Malgré ses intérêts à court terme très attractifs, le travail intensif du sol, et le labour en particulier, montrent de nombreux désavantages sur le long terme concernant les aspects structuraux, biologiques et environnementaux.

Concernant son impact sur la stabilité structurale du sol, le labour expose le sol à l'air libre en le retournant. Cela a pour conséquence une accélération accrue de l'oxydation de la matière organique et donc une dilution du stock de carbone organique du sol (Calvet, Chenu et Houot 2021).

Le labour affecte directement la perméabilité du sol à différentes profondeurs du profil : en surface, par la croûte de battance résultant de l'absence de couverture ; dans les 30 premiers centimètres par la semelle de labour formée par pression du soc sur la couche de terre sous-jacente ; sur tout le profil par la compaction due au passage des engins lourds. Un sol compacté par le labour a un réseau de pores dégradé et donc une moins bonne circulation de l'eau et des éléments minéraux. De plus, la croûte de battance augmente le risque d'érosion et de ruissellement en empêchant l'infiltration de l'eau.

Les impacts biologiques sont également nombreux. Le labour perturbe directement certains organismes du sol en les tuant *via* le passage de la charrue (Bouthier et al.

2014). L'ensemble des caractéristiques du sol qui a été perturbé par le labour (porosité, température, humidité, aération, taux de matière organique, pénétrabilité des racines) impacte inévitablement l'habitat des organismes. Le labour affecte négativement l'abondance ainsi que la composition des populations de vers de terre. Les plus affectés sont les vers de terres anéciques, creusant de longues galeries verticales, détruites par le passage de la charrue (Birkás et al. 2004).

Notons aussi l'impact environnemental du labour. Le travail mécanique du sol, en exposant la terre à l'oxygénation, laisse le sol se réchauffer et ainsi active la minéralisation. Cette minéralisation accrue va faire remonter du carbone dans l'atmosphère sous forme de CO_2 et ainsi engendrer des pertes de carbone du sol.

Ces pratiques qui impactent la qualité et la fertilité de nos sols sont remises en questions par de nombreux.ses agriculteur.rice.s, agronomes, chercheur.euse.s depuis plusieurs années maintenant. C'est ainsi que les techniques culturales simplifiées -techniques de réduction du travail du sol- ont émergé dans les systèmes agricoles.

1.2.1.3 Les services écosystémiques des techniques culturales simplifiées

Comme décrit plus haut dans la définition de l'agriculture de conservation par la FAO, un des trois piliers consiste en la réduction du travail du sol. Lorsqu'on parle de techniques de réduction de travail du sol on parlera de techniques culturales simplifiées (TCS). Les TCS fournissent divers services écosystémiques.

1. STRUCTURER LE SOL

L'impact le plus important concerne évidemment la structure du sol. Les TCS réduisent la déstructuration du sol en profondeur. En non-travail du sol, on observe aussi une réduction de la déstructuration des horizons de surface. Comparé au travail conventionnel, les sols en agriculture de conservation ont une meilleure stabilité, en partie grâce à la plus grande proportion d'agrégats grossiers (Loaiza Puerta et al. 2018). On observe aussi une densité apparente plus élevée du sol dans les premiers horizons. Cela engendre donc des sols plus compacts en surface (Kay et VandenBygaart 2002). Les TCS permettent en général de réduire le nombre de passages des machines agricoles et donc de diminuer l'effet de compaction qui y est lié.

2. AUGMENTER LE STOCK DE CARBONE ORGANIQUE

Les TCS augmentent la quantité de biomasse des résidus présents en surface, ceux-ci n'étant pas ou peu enfouis. Ces résidus vont non seulement couvrir le sol mais aussi fournir de la matière organique (Triplett Jr. et Dick 2008). Les sols cultivés en TCS montrent, à long terme, des stocks plus élevés en matière organique dans les premiers

horizons de sol. Cependant cette tendance ne s'applique pas à l'ensemble du profil, dont le stock reste inchangé (Frye et Blevins 1997, 1997 ; Kay et VandenBygaart 2002).

3. RÉDUIRE L'ÉROSION ET LE RUISSELLEMENT

Les TCS ont démontré une efficacité remarquable dans la diminution des pertes de sol par rapport à un sol labouré (Harrold et Edwards 1974). Ces diminutions sont fortement en lien avec la couverture du sol (qui réduit la battance) et l'apport de matière organique (qui stabilise les agrégats et diminue le risque d'érosion) (Maetens, J. Poesen et Vanmaercke 2012). Les résidus de végétation diminuent le ruissellement et donc le transport des particules de sol par un effet barrière : les plantes forment une barrière végétale qui empêche l'eau de ruisseler en surface. De même pour les résidus racinaires qui permettent de maintenir une stabilité au niveau des gros agrégats (Triplett Jr. et Dick 2008).

4. CONSERVER L'EAU DU SOL

La diminution du ruissellement augmente la quantité d'eau infiltrée dans le sol. On observe une meilleure conservation de l'eau dans les sols traités en TCS. La conservation dépend du stock d'eau et des flux d'infiltration, de drainage et d'évaporation. Les TCS augmentent généralement l'infiltration de l'eau dans le sol, à certaines exceptions près. Les résidus de culture laissés en surface permettent de réduire les flux d'évaporation de l'eau (Subbulakshmi, Saravanan et Subbian 2009).

5. CONSERVER LES NUTRIMENTS DU SOL

Comme vu précédemment, la matière organique joue un rôle essentiel dans la structure du sol et dans la conservation de l'eau. Elle a également un rôle la conservation des nutriments. Les sols enrichis en matière organique ont une meilleure capacité d'échange cationique (CEC) et donc une meilleure capacité à retenir les nutriments du sol (Baker et al. 2006). De plus, les systèmes en non-labour diminuent la minéralisation de la matière organique en diminuant l'exposition aux agents climatiques.

6. SÉQUESTER LE CARBONE DANS LES SOLS ET RÉDUIRE LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

La diminution du travail du sol est un des moteurs pour la diminution d'émissions de CO₂ dans l'agriculture. En effet, le travail du sol favorise l'oxydation de la matière organique en gaz carbonique. Holland (2004) a démontré que la conversion de l'agriculture conventionnelle vers l'agriculture de conservation réduisait significativement la quantité d'émissions de CO₂. West et Post (2002) ont mesuré une augmentation de la sé-

questration de carbone organique de $0,57 \pm 0,14$ tonnes de C ha⁻¹.an⁻¹ sur le long terme.

Les TCS réduisent significativement les émissions de NO₂ sur le long terme (après 10 ans) et particulièrement en conditions humides (Johan Six, Ogle et al. 2004). En revanche, Johan Six, Ogle et al. (2004) mesurent une augmentation d'émissions de NO₂ durant les 10 premières années. D'autre part, Kessel et al. (2013) ne mesurent aucune différence significative avec le travail conventionnel.

7. FAVORISER LES ORGANISMES DU SOL

La réduction de la perturbation du sol et l'apport de matière organique favorisent l'abondance et la diversité de la plupart des groupes d'individus du sol. Comparé au travail conventionnel, Capelle, Schrader et Brunotte (2012) observent une plus grande abondance, biomasse et diversité de vers de terre en non-labour. Ils observent également une augmentation de la biomasse microbienne dans les dix premiers centimètres du sol en non-labour. Cette tendance disparaît dans les horizons plus profonds et s'inverse même en faveur du travail conventionnel entre vingt et trente centimètres (Capelle, Schrader et Brunotte 2012). Des études ont montré que la quantité et l'activité des microorganismes du sol dans un régime de travail du sol réduit étaient supérieures dans les dix premiers centimètres de sol à celles d'un régime labouré (Bouthier et al. 2014). On trouve donc généralement une tendance en faveur de la réduction du travail du sol pour favoriser l'abondance et parfois la diversité du biote.

1.2.1.4 Désavantages des techniques culturales simplifiées

Un des plus gros défis en ce qui concerne les pratiques de réduction de travail du sol est la gestion des adventices. Les TCS ont l'effet d'augmenter l'abondance et la diversité des adventices (Murphy et al. 2006 ; Travlos et al. 2018). Ces pratiques, seules, requièrent donc une utilisation accrue des herbicides qui ont pour effet, à long terme, d'induire une résistance chez les populations d'adventices rendant la lutte de moins en moins efficace (Burgos et al. 2013). L'utilisation des herbicides a pour effet de sélectionner les individus résistants mais il a aussi été démontré que le travail du sol, même réduit, sélectionne certaines espèces d'adventices (Derksen et al. 1993). C'est une des raisons pour lesquelles les TCS doivent être combinées à d'autres techniques culturales comme la sélection d'espèces plus compétitives ou l'utilisation de techniques de gestion des cultures comme les couverts ou le paillage.

1.2.2 2^{ème} pilier de l'agriculture de conservation - Les couverts

1.2.2.1 Définitions

Justes, Beaudoin et al. (2012) définissent l'interculture comme «La période, dans la rotation culturale, qui se situe entre la récolte d'une culture principale et le semis de la suivante». La durée de l'interculture varie en fonction des dates de récolte et de semis des cultures principales. Une culture intermédiaire est un couvert végétal implanté durant la période d'interculture. Le couvert végétal n'est pas destiné à être récolté. Il va être détruit avant l'implantation de la culture principale et sa biomasse sera restituée au sol (Justes, Beaudoin et al. 2012).

1. HISTORIQUE

Les objectifs et la terminologie que l'on donne aux couverts ont évolué en parallèle au cours du temps.

Dans les années 1970, lors de l'implantation d'un couvert d'interculture, on parle alors d'engrais vert. Ici, le couvert est implanté dans un but de fertilisation et de structuration du sol. Les légumineuses, utilisées comme engrais vert sont capables de fixer l'azote atmosphérique *via* leur symbiose avec les microorganismes de type *Rhizobium*. Une fois la plante retournée au sol après la période d'interculture, cet azote va pouvoir servir d'engrais pour la culture suivante (F. Thomas et Archambeaud 2016).

C'est à partir des années 1980 que survient une prise de conscience vis-à-vis de la pollution des cours d'eau par les nitrates. Les conséquences de l'agriculture industrielle commencent à se manifester et la problématique devient de l'ordre de la santé publique. Parmi les mesures mises en place pour lutter contre cette pollution, il y a l'implantation de couverts intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN). La fonction du couvert devient alors de piéger les nitrates et d'améliorer la qualité des eaux. Les légumineuses sont alors bannies de l'interculture, pensant alors faussement que leur implantation amènerait des nitrates en excès dans les sols. Or, les légumineuses prélèvent également les nitrates dans la solution de sol, bien qu'elles soient moins efficaces que les crucifères et les graminées. En réalité, la capacité de fixation de l'azote de la légumineuse diminue si celle-ci est placée dans un milieu riche en azote (F. Thomas et Archambeaud 2016).

Ces dernières années, on se rend compte de plus en plus que les services rendus par les couverts vont bien plus loin que le rôle de CIPAN et d'engrais vert. En effet, un grand nombre de services agroécosystémiques sont rendus par les couverts, ceux-ci seront décrits plus loin (F. Thomas et Archambeaud 2016).

2. LÉGISLATIONS ET ASPECTS RÉGLEMENTAIRES

Depuis ces prises de conscience, différentes législations au niveau européen et wallon sont mises en place afin de réglementer la pollution des nitrates dans les eaux souterraines et de surface. L'explication détaillée de celles-ci est disponible en annexe A.

1.2.2.2 Les différents types de couverts

Un grand nombre d'espèces peut être utilisé dans l'implantation de couverts. Dans cette partie sont décrites les grandes familles dans lesquelles l'on retrouve la plupart des espèces implantées en couvert d'interculture. Dans chacune de ces familles sont spécifiées les espèces avec lesquelles nous avons travaillé dans le cadre de notre expérience.

1. LA FAMILLE DE BRASSICACÉES

La famille des brassicacées, anciennement appelée crucifères, est composée de 3200 espèces dicotylédones. On retrouve dans cette famille les moutardes, radis, colza, navets et choux. Pour les intercultures d'hiver, des espèces annuelles à cycle long sont utilisées. Les graines de brassicacées sont petites, le semis est facile et la levée est rapide. Cette implantation rapide induit une couverture rapide du sol et donc une production rapide de biomasse. Ces caractéristiques sont directement corrélées au besoin important des brassicacées en azote. Les plantes de cette famille sont réputées pour leur système racinaire pivotant. Celui-ci agit sur la structure du sol en profondeur et permet un meilleur captage des ressources. En effet, bien que les besoins en azote soient assez importants, ces plantes ont la capacité d'en mobiliser rapidement grâce à leur pivot, ce qui est bénéfique pour leur croissance (F. Thomas et Archambeaud 2016). Pour ces raisons, les brassicacées vont très bien en association avec les légumineuses. La brassicacée mobilise rapidement l'azote disponible dans le sol, ce qui va stimuler la légumineuse à effectuer la fixation atmosphérique de l'azote. Par leur couverture rapide du sol et leur forte mobilisation de l'azote du sol, les plantes de cette famille se mettent rapidement en compétition avec les adventices.

Les brassicacées contiennent des glucosinolates dans leurs tissus. Ces métabolites peuvent se dégrader en isothiocyanates, alors libérés dans le sol. Ceux-ci ont des propriétés biocides et agissent comme composés bioactifs. C'est donc une forme d'allélopathie où les composés vont agir sur les microorganismes du sol. Cela peut être bénéfique lors d'infestation mais dommageable pour les communautés microbiennes intéressantes (Reau et al. 2005).

Les brassicacées recyclent efficacement le soufre, le potassium, le phosphore et le calcium.

— **Radis chinois** - *Raphanus longipinnatus* sp.

Le radis chinois est une plante bisannuelle qui se distingue par son pivot allongé dont une partie dépasse du sol. Ce pivot lui permet une exploration en profondeur et lui confère un rôle structurant. La racine est riche en éléments minéraux et la redistribution de ceux-ci est efficace lors de la culture suivante. L'espèce est gélive aux alentours de -4°C. Le radis chinois mobilise l'azote rapidement et en grande quantité. Il concurrence donc fortement les adventices au démarrage (F. Thomas et Archambeaud 2016).

2. LA FAMILLE DES GRAMINÉES

Les graminées sont des plantes herbacées monocotylédones comprenant 12 000 espèces. Elles vont jouer un rôle dans la restructuration du sol en surface (dans les 15 à 20 premiers centimètres) grâce à leur système racinaire fasciculé dense. Leur fort pouvoir captant permet un bon recyclage des éléments minéraux. Le rapport C/N des plantes de cette famille est assez élevé. Cela apporte beaucoup de carbone à la culture suivante mais cela augmente également le risque de faim en azote (F. Thomas et Archambeaud 2016). Un grand point d'attention lors de l'implantation d'une graminée est le risque de transmissions de maladies d'une céréale à une autre. Il est d'ailleurs fortement déconseillé d'implanter des graminées dans un couvert précédant une culture céréalière.

— **Avoine brésilienne** - *Avena strigosa*

L'avoine brésilienne ou avoine rude, tient son nom du fait que cette espèce a été sélectionnée en Amérique latine, bien qu'elle soit originaire d'Europe. Cette plante annuelle lève facilement et fournit une bonne production de biomasse, mais recouvre moins rapidement le sol que les brassicacées. Ayant un rapport C/N assez élevé, le risque de faim en azote est présent et la plante prend du temps à se décomposer pour la culture suivante (F. Thomas et Archambeaud 2016).

— **Sorgho** - *Sorghum bicolor x sudanense*

Le sorgho est une graminée estivale annuelle originaire d'Afrique subsaharienne. Planté en couvert, il est plus adapté à une interculture de fin d'été. Assez sensible au photopériodisme, il est nécessaire de l'implanter suffisamment tôt (mi-juillet à fin juillet) pour un bon développement lors de l'installation. Implantée dans de bonnes conditions, cette graminée fournira rapidement une abondante biomasse. Après son installation, la plante est réputée pour mobiliser rapidement et en grande quantité l'eau et les nutriments, notamment par son système racinaire fasciculé et fin. Le sorgho est extrêmement sensible au froid, il est totalement

gélif et ne passe pas l'hiver (F. Thomas et Archambeaud 2016). Le sorgho exsude de la sorgoléone qui a des propriétés allélopathiques utiles pour la lutte contre les adventices. (Duke et al. 2000).

3. LA FAMILLE DES LÉGUMINEUSES (FABACÉES)

Les légumineuses ont la grande particularité d'être capable de fixer l'azote atmosphérique de l'air *via* les bactéries *Rhizobium* avec lesquelles elles sont en symbiose. Ces bactéries sont présentes naturellement dans les nodules racinaires des légumineuses. Les *Rhizobium* vont transformer l'azote atmosphérique en azote directement assimilable pour la plante. En contrepartie de l'azote reçu des *Rhizobium*, la plante fournit des hydrates de carbones aux bactéries, résultat de la photosynthèse et source d'énergie.

La légumineuse va, dans ses premiers stades de développement, prélever l'azote disponible dans la solution de sol, et ensuite capter l'azote atmosphérique grâce aux *Rhizobium*. La majorité de l'azote total accumulé dans une plante légumineuse est de l'azote atmosphérique. La plante prélève l'azote du sol en fonction de la quantité d'azote disponible dans la solution de sol et la capacité d'absorption de la plante. Dans certaines conditions, les légumineuses captent autant que les non légumineuses. Il existe une grande diversité de légumineuses et chacune possède des performances différentes au niveau du piégeage de nitrate, d'apport d'azote ou de biomasse. Il faut choisir la légumineuse de son couvert en fonction de l'objectif, en gardant à l'esprit que chaque espèce a des aptitudes différentes. Certaines légumineuses sont très performantes mais pas bien adaptées à des mélanges en couvert car trop compétitives (Gebhard et al. 2013).

L'autonomie des légumineuses pour l'azote leur permet une gestion efficace des adventices nitrophiles. Enfin, une fois retournée au sol, une plante légumineuse permettra de diminuer le rapport C/N, permettant de lutter contre le risque de faim en azote.

— Trèfle de Perse - *Trifolium resupinatum*

Le trèfle de Perse est une plante adaptée à un couvert estival. C'est pourtant à l'origine une plante rustique de montagne résistante au froid et à la sécheresse. Cette espèce est exigeante en termes de semis (ITAB 2012b).

— Trèfle d'Alexandrie - *Trifolium alexandrinum*

Le trèfle d'Alexandrie est une plante annuelle apportant une couverture rapide et une biomasse importante si les conditions de développement sont optimales. Cette légumineuse aime pousser sur sol fertile et humide et peut produire jusqu'à 3-4 t.MS.ha⁻¹. C'est également une plante mellifère qui attire les pollinisateurs.

Le trèfle d’Alexandrie est exigeant en termes de semis (ITAB 2012b).

4. AUTRES FAMILLES

Les plantes présentées ici appartiennent à des familles contenant peu ou pas d’espèces cultivées. L’introduction de ces plantes dans un couvert permet donc d’améliorer la diversité au sein de la rotation et ainsi de réduire significativement le risque d’échanges de maladies d’une plante à l’autre.

— **Tournesol** - *Helianthus annuus*

Le tournesol est une plante annuelle estivale appartenant à la famille des Astéracées. Adaptée à des conditions chaudes et sèches, elle est implantée dans des couverts estivaux précoces. Le tournesol est réputé pour mobiliser rapidement et en grande quantité les éléments minéraux. Il est néanmoins bien adapté à des associations, étant peu étouffant. Fortement gélif, il est facilement détruit par le froid (ITAB 2012b).

— **Sarrasin** - *Fagopyrum esculentum*

Le sarrasin est une plante annuelle estivale à cycle court appartenant à la famille des Polygonacées. Il est adapté dans des couverts estivaux précoces. L’espèce est rustique et a la capacité de bien pousser sur des sols pauvres en azote. Lors d’associations avec des mycorhizes, la plante réalisera une mobilisation de calcium et de phosphore. Néanmoins, le sarrasin est peu couvrant et en conséquence ne protège pas bien le sol. Son système racinaire peu développé ne permet pas de structurer le sol. Plante gélive, elle est détruite par l’hiver.

— **Phacélie** - *Phacelia tanacetifolia*

La phacélie est une plante annuelle appartenant à la famille des Hydrophyllacées. Elle a une très bonne capacité de mobilisation des éléments minéraux et peut produire beaucoup de biomasse si le sol est bien pourvu en azote ; on s’y intéresse donc particulièrement pour son côté «engrais vert». En mélange, elle est considérée comme plante «boucheuse de trous» car elle recouvre rapidement la surface. C’est également une plante mellifère qui va attirer les pollinisateurs. Cette espèce est sensible à la préparation du sol. Le lit de semences doit donc être fin (ITAB 2012b).

1.2.2.3 Les services écosystémiques apportés par les couverts

1. RÉDUIRE LE LESSIVAGE - CIPAN

L'azote du sol disponible pour les plantes provient d'une part de la décomposition des résidus organiques par les organismes du sol et d'autre part des intrants azotés lorsque des engrais sont utilisés. L'azote organique est décomposé et transformé en azote minéral présent sous deux formes, ammonium et nitrate. L'ammonium est rapidement métabolisé en ions nitrates par les bactéries. L'azote des engrais minéraux est directement apporté sous forme de nitrates d'ammonium ou d'urée. Ces ions sont très mobiles dans la solution du sol.

L'excès d'apport azoté, non utilisé par la culture, est rapidement lixivié vers les nappes phréatiques ou transporté dans les eaux de ruissellement. Il en résulte donc une perte d'azote dans le système qui se traduit en une perte économique importante pour l'agriculteur.rice. De plus, l'azote lixivié cause la pollution des nappes phréatiques et donc la détérioration de la qualité de l'eau et l'eutrophisation de certaines zones (K. Thorup-Kristensen, Magid et Jensen 2003).

Les couverts et plus particulièrement les cultures intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN) sont composés d'espèces ayant une bonne capacité d'absorption de l'azote du sol. Les deux mécanismes principaux sont l'absorption de l'azote présent dans la solution du sol et l'absorption de l'eau. Le premier appauvrit directement la solution du sol en ions nitrates et le second empêche la lixiviation des éléments par percolation en absorbant l'eau. Certaines espèces ayant un système racinaire plus profond, peuvent absorber les éléments pendant le phénomène de lixiviation (K. Thorup-Kristensen, Magid et Jensen 2003). L'utilisation de couverts pendant l'interculture est donc intéressante afin de diminuer les pertes en azote et par ailleurs améliorer la qualité de l'eau en diminuant la pollution par les nitrates (Sanchez et al. 2004; Scholberg et al. 2010) et cela principalement quand ils sont implantés pendant la période automne-hiver. Cette période correspond au pic de minéralisation automnal présenté plus tôt (Blomback et al. 2003).

Les graminées sont généralement utilisées dans les couverts afin de mobiliser l'azote excédentaire pendant l'interculture. Les crucifères sont encore plus efficaces que ces dernières (Aufhammer et al. 1992) car elles ont un système racinaire plus profond qui permet de puiser l'azote dans les horizons profonds (Kristian Thorup-Kristensen 2001).

L'azote ainsi prélevé sera alors disponible pour la croissance de la culture suivante lors de la minéralisation des résidus du couvert (Elers et Hartmann 1987). Cependant cet effet est très variable; certaines études ne trouvent aucun effet voir observent un large déficit en azote pour la culture suivante (G. S. Francis, Bartley et Tabley 1998;Muller

et al. 1989). Les CIPAN peuvent donc avoir un effet négatif sur le rendement de la culture suivante à cause d'un effet de compétition préemptif. Les couverts (sauf s'il y a présence de légumineuses) n'apportent pas d'azote au sol, ils ne font que retenir l'azote déjà stocké et il faut un certain temps après la destruction du couvert pour que l'azote soit minéralisé et mis à disposition de la culture suivante. La capacité du couvert à restituer de l'azote va donc dépendre de la date de destruction du couvert, de la date de semis, des propriétés du sol, du climat et des caractéristiques des espèces semées (K. Thorup-Kristensen, Magid et Jensen 2003).

Les CIPAN sont souvent combinés à des espèces ayant des bonnes performances en tant qu'engrais vert afin de palier au potentiel déficit d'azote pour la culture suivante.

2. FOURNIR DE L'AZOTE À LA CULTURE SUIVANTE - ENGRAIS VERT

Les couverts permettent de restituer de l'azote à la culture suivante après décomposition des résidus et sont donc considérés comme engrais verts.

Les légumineuses sont généralement des engrais verts plus efficaces que les non-légumineuses car elles ont la capacité de fixer l'azote atmosphérique (Ranells et Waggar 1996). Cependant, quand le système est riche en azote du sol ou que les besoins azotés sont comblés par l'apport d'intrants, cette différence devient négligeable (Kristian Thorup-Kristensen 2001).

Dans le cas d'un système pauvre en azote, les légumineuses restituent plus d'azote au sol que les non-légumineuses. La quantité restituée est variable car elle dépend non seulement de la biomasse sèche produite (Holderbaum et al. 1990) mais aussi de la quantité d'azote fixée. Cette dernière est très variable entre et au sein des études (30 à 150 kg d'N ha⁻¹.an⁻¹ selon l'espèce, l'année, les conditions de culture et les conditions environnementales) (Müller et Kristian Thorup-Kristensen 2001 ; Ranells et Waggar 1996 ; Torbert, Reeves et Mulvaney 1996).

La fertilisation azotée peut être conséquente ; presque aussi importante que la fertilisation avec des engrais minéraux. Cela permet donc de diminuer l'utilisation d'engrais (Decker et al. 1994).

3. RÉDUIRE L'ÉROSION ET LE RUISSELLEMENT

En agriculture de conservation, des méthodes de conservation des sols et de l'eau sont utilisées. Ces méthodes permettent d'une part de réduire le ruissellement et ainsi d'augmenter la quantité d'eau pouvant potentiellement s'infiltrer dans le sol et d'autre part de réduire les pertes de sol par érosion. Plusieurs mécanismes agissent de concert

afin de diminuer l'érosion et le ruissellement, ces derniers étant en interaction.

Le mécanisme principal agissant sur l'érosion est la diminution de surface de sol nu par couverture du sol : la couverture végétale diminue la force de l'impact des gouttes de pluie sur le sol (Bochet, Rubio et Poesen 1998 ; Víctor Hugo Durán Zuazo et Rodríguez Pleguezuelo 2008) et ainsi, améliore la stabilité des agrégats. Une bonne stabilité des agrégats augmente la part d'agrégats grossiers dans le sol et améliore l'infiltration de l'eau ce qui diminue le ruissellement. De plus, la couverture du sol empêche la formation d'une croûte de battance et réduit le ruissellement par effet barrière. Les plantes font barrière au ruissellement comparé à un sol nu (Lee et al. 2000 ; Martínez Raya, Zuazo et Martínez 2006 ; Van Dijk, Kwaad et Klapwijk 1996). Cet effet est fortement lié à la morphologie des espèces végétales (Van Dijk, Kwaad et Klapwijk 1996).

Enfin, les racines permettent de réduire le ruissellement et l'érosion par deux mécanismes. Premièrement, en absorbant l'eau stockée dans le sol, ce qui favorise l'infiltration de l'eau en surface par un effet «éponge» (Wainwright et al. 2002 ; Ziegler et Giambelluca 1998). Deuxièmement en augmentant la stabilité du sol par fixation des agrégats (De Baets et al. 2007 ; Gyssels et al. 2005).

L'érosion et le ruissellement sont deux phénomènes causant de lourdes pertes de rendement en détériorant plusieurs propriétés du sol dont sa capacité d'infiltration et de rétention d'eau et sa teneur en matière organique. Les dérèglements climatiques risquent d'accentuer cette problématique au niveau global étant donné l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes (Víctor Hugo Durán Zuazo et Rodríguez Pleguezuelo 2008).

En ce qui concerne la gestion de l'érosion et du ruissellement, les techniques de gestion des cultures et de la végétation (couvert, paillage, cultures en bandes) sont plus efficaces que les techniques de gestion des sols (réduction du travail du sol) (Maetens, J. Poesen et Vanmaercke 2012).

4. AMÉLIORER LA STRUCTURE DU SOL

Les couverts améliorent la structure du sol lors de leur croissance et après leur destruction de plusieurs manières (Hartwig et Ammon 2002).

Les couverts diminuent l'intensité de l'érosion, du ruissellement et de la battance et ainsi permettent de conserver la matière organique et la stabilité des agrégats. Les racines augmentent la stabilité des agrégats en exsudant des composés organiques dans la rhizosphère (Naveed et al. 2018).

En se décomposant, les couverts apportent de la matière organique au sol. Nous avons vu que la matière organique augmente la stabilité des agrégats (Kumar et Goh 1999).

Certaines espèces ont des systèmes racinaires qui permettent de diminuer la compaction du sol en surface. C'est souvent le cas pour les espèces avec un système racinaire pivotant. Ces espèces sont capables de pénétrer les sols compactés plus efficacement que les espèces à système racinaire fasciculé (Chen et R. R. Weil 2010). Cela permet de fracturer le sol et de faciliter la pénétration des racines de la culture suivante (R. Weil et Kremen 2007).

5. SÉQUESTRATION DE CARBONE

Les terres agricoles ont une grande capacité à stocker du carbone car ils en contiennent en général moins que les terres couvertes d'une végétation naturelle (Don, Schumacher et Freibauer 2011 ; Poeplau, Don et al. 2011). Cela est dû aux exportations d'une majorité de la matière végétale hors du système lors de la récolte.

Les couverts produisent de la biomasse comme toutes les cultures mais l'entièreté de cette biomasse est destinée à être retournée au sol. Ces cultures ont donc un fort potentiel de séquestration de carbone. Elles améliorent le bilan de carbone net en remplaçant une période de sol nu par une période supplémentaire de culture (Lal 2001). Cependant, si le carbone organique incorporé au sol est fortement assimilable par les microorganismes, le stock de carbone pourrait diminuer après la décomposition du couvert (Poeplau et Don 2015).

Poeplau et Don (2015) ont estimé, pour l'utilisation de couverts, une augmentation du carbone organique du sol (SOC) de $0,32 \text{ Mg de C ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ pendant les 50 premières années, et une augmentation du stock total de $16,7 \text{ Mg de C ha}^{-1}$, une fois la saturation du sol atteinte après environ 150 ans. Dans l'optique où l'utilisation des couverts serait adoptée globalement, cela équivaut à $0,12 \text{ Pg de C ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$. Cette quantité de carbone séquestré compenserait 8% des émissions de gaz carbonique engendrées par l'agriculture.

Par ailleurs, l'absorption de l'excès d'azote pourrait aussi diminuer l'émission d'autres gaz à effet de serre comme les NO_2 et NO_x (Poeplau et Don 2015).

La séquestration de carbone est donc une des solutions majeures afin de lutter contre l'augmentation du taux de gaz carbonique dans l'atmosphère et donc contre le réchauffement climatique.

6. RECYCLAGE DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX

Tout comme pour l'azote minéral, les couverts absorbent les autres nutriments du sol (P, K, S, Ca, Mg, Zn, Cu, Mn, Fe et oligoéléments) et empêchent leur lixiviation en profondeur (Fageria, Baligar et Bailey 2005). Les nutriments minéraux sont transformés en matière organique ce qui permet leur diffusion lente dans la matrice du sol après la décomposition du couvert. Ce phénomène correspond au recyclage des éléments minéraux.

Certaines espèces comme le sarrasin, les légumineuses, les brassicacées et les espèces ayant un taux élevé de mycorhization sont capables d'absorber de grande quantité de phosphore (Gahoonia, Asmar et al. 2000 ; Gahoonia et Nielsen 1997), en acidifiant le sol (Jones 1998) ou par le biais de champignons mycorhiziens. La disponibilité en phosphore pour la culture suivante en est accrue (Cavigelli et Thien 2003).

Pour le potassium, les couverts n'en améliorent pas la disponibilité dans les sols car il est rapidement diffusé par les résidus de culture. Toutefois, il a été montré que les pertes en ions K, Ca et Mg sont réduites dans le cas des couverts (Jäggli 1978).

Les couverts sont capables d'absorber le soufre en quantité fortement variables selon l'espèce utilisée, les crucifères étant généralement plus efficaces. Cela augmente considérablement la disponibilité du soufre pour la culture suivante (Eriksen et K. Thorup-Kristensen 2002).

7. LUTTE CONTRE LES ADVENTICES

L'implantation d'un couvert a le potentiel d'augmenter le contrôle des adventices de plusieurs manières : la compétition, l'ombrage et l'allélopathie. Cela même après décomposition pour ces deux derniers.

Les espèces à croissance rapide et à forte couverture du sol rendent les ressources en eau, lumière et nutriments plus rares pour les adventices. La combinaison de graminées ou crucifères avec des légumineuses est généralement assez efficace pour lutter contre les adventices (Blum et al. 1997 ; Boydston et Hang 1995). Des espèces en mélange occupent des niches écologiques différentes et peuvent donc mobiliser différemment les ressources afin d'affaiblir les adventices.

L'autre mécanisme est la diffusion de substances allélopathiques par les plantes vivantes ou leurs résidus. Par exemple, le sorgho contient de la sorgoléone et les crucifères contiennent des glucosinolates. Ces deux substances allélopathiques réduisent significativement la présence d'adventices (Angelini et al. 1998 ; Duke et al. 2000).

Les résidus de culture, s'ils sont laissés en paillage, permettent de diminuer le taux de germination des adventices en couvrant le sol et en empêchant donc la lumière de passer (Charles Mohler et Calloway 1992 ; C. Mohler et Teasdale 1993). De plus, les résidus de certaines espèces relâchent des substances allélopathiques qui ont pour effet d'inhiber la germination des adventices. Cet effet dépend fortement de la quantité de résidus produits (B. Chauhan, Gill et Preston 2006). La présence de résidus peut cependant être bénéfique pour l'émergence et le développement des adventices dans certains cas car ils apportent de la matière organique au sol et modifient les propriétés physiques (température et humidité) en faveur de celles-ci (Young et Cousens 1999). Le paillage offre aussi un habitat pour certaines espèces animales prédatrices des adventices et de leurs graines (Reader 1991).

Les rotations de cultures permettent généralement un meilleur contrôle des adventices par rapport aux monocultures (Liebman, Charles Mohler et Staver 2001). L'introduction d'un couvert dans la rotation renforce cet effet en ajoutant une culture supplémentaire, en plus de réduire la période de sol nu. Les monocultures ont pour effet de sélectionner une population d'adventices résistantes et adaptées au système dans lequel elle se trouvent (B. S. Chauhan, R. G. Singh et Mahajan 2012). À l'inverse, la diversification des cultures dans la rotation empêche un tel scénario en ne laissant pas aux adventices le temps de s'adapter à une culture. Dans certains cas, les rotations ont eu pour effet d'augmenter la diversité des adventices (Locke, Reddy et Zablotowicz 2002 ; Malik et S. Singh 1995), c'est pourquoi il est important de bien choisir les espèces utilisées.

8. RÉDUIRE LA PRESSION DES RAVAGEURS ET MALADIES

La diversité entre les plantes d'un couvert et entre les cultures d'une rotation favorise la présence de prédateurs naturels des différents ravageurs de cultures et d'agents pathogènes (insectes, mollusques, champignons, ...). La présence de matière végétale fournit un abri et des ressources qui attirent différents organismes utiles pour la lutte biologique (Jabbour et al. 2015). Leur biodiversité se voit augmentée au sein du système (Crowder et Snyder 2010 ; Lichtenberg et al. 2017). D'autant plus dans les systèmes où les couverts sont combinés à un travail du sol réduit (Douglas et Tooker 2012 ; Dunbar, O'Neal et Gassmann 2016). C'est pourquoi ces pratiques doivent être utilisées en même temps que des techniques de gestion intégrée des nuisibles. Cela implique de diversifier la rotation et d'utiliser les traitements chimiques avec modération (Stinner et House 2003).

La diversité des plantes crée aussi un effet de dilution. Les ravageurs et pathogènes ont plus de difficultés à trouver une plante hôte quand ils sont spécifiques à une ou plusieurs espèces de plantes (Keesing et al. 2010).

Via l'allélopathie, certaines espèces de plantes ont un effet suppressif sur les ravageurs et les pathogènes. Ces plantes relâchent des composés toxiques pour les insectes (Rafaraso et al. 2016) et les bactéries (Deberdt et al. 2015) agissant comme des biopesticides. Certaines crucifères ont un effet biofumigant contre les nématodes phytopathogènes (Aydin et Mennan 2018 ; Wang, Sipes et Schmitt 2002). Les mécanismes de suppression des nématodes sont encore peu connus et fortement dépendants de l'espèce végétale.

9. FAVORISER LA VIE MICROBIENNE ET LA FAUNE DU SOL

Les végétaux attirent les microorganismes par exsudation de composés organiques (acides aminés, acides organiques, sucres, ...). La diversité des plantes augmente la diversité des métabolites relâchés dans la matrice du sol et donc la diversité des microorganismes dans la rhizosphère. Parmi ceux-ci, on retrouve certains champignons et nématodes entomopathogènes permettant de lutter contre les insectes ravageurs (Rasman et al. 2005). On retrouve également les champignons mycorhiziens arbusculaires.

Rappelons que les couverts apportent de la matière organique qui stimule les populations de décomposeurs.

1.3 Gestion d'un couvert

Comme on a pu le voir précédemment, l'implantation d'un couvert d'interculture implique certains coûts (coût des semences, utilisation d'herbicides, préparation du lit de semences). Afin de compenser les coûts investis et tirer profit des bénéfices engendrés par les couverts, il est nécessaire de mettre en place une bonne gestion de celui-ci. C'est ainsi que le potentiel maximal des cultures de couverture sera atteint.

La bonne implémentation d'une culture de couverture n'est pas aisée car elle dépend fortement des conditions climatiques et des pratiques auxquelles elle est combinée. L'ensemble du système cultural doit donc être pris en compte. Plusieurs aspects à considérer dans la gestion de la culture de couverture sont présentés ci-dessous.

Tout d'abord, l'établissement d'un couvert est complémentaire avec les TCS. La levée des semences, la pénétration et l'ancrage des espèces végétales dans la matrice du sol et le contrôle des adventices en sont augmentés en comparaison aux deux pratiques prises isolément (F. Thomas et Archambeaud 2016).

Aussi, les espèces composant le couvert doivent être adaptées aux conditions climatiques et pédologiques et à la période de culture. Les espèces les plus appropriées sont

celles qui vont diminuer l'ensemble des contraintes que la mise en place d'un couvert peut amener. Elles doivent être tolérantes à de mauvaises conditions climatiques et à une faible préparation du lit de semences. De plus, elles doivent développer une biomasse et une couverture rapidement et doivent être faciles à détruire. Les espèces à petites graines sont généralement les plus faciles à semer car elles sont compatibles avec la plupart des semoirs (F. Thomas et Archambeaud 2016).

Concernant les mélanges d'espèces en couvert, certaines règles s'appliquent afin de favoriser au mieux la complémentarité des avantages accordés par chaque espèce. On mélangera les familles, les systèmes racinaires et les systèmes caulinaires afin d'assurer une diversité de services écosystémiques. Le nombre d'espèces dans le mélange est primordial. À partir de quatre espèces, les bénéfices de la diversité sont observés. À partir de huit espèces, le mélange obtenu devient utilisable dans un spectre plus large de conditions agricoles (F. Thomas et Archambeaud 2016).

Concernant les contraintes temporelles, les couverts doivent être semés le plus tôt possible pour avoir la meilleure efficacité et les meilleures conditions à leur développement (K. Thorup-Kristensen, Magid et Jensen 2003). En effet, au plus tôt le couvert est semé, au plus sa période de croissance sera longue. Ainsi, il pourra plus rapidement couvrir le sol et prélever les éléments nutritifs. Les espèces à germination et croissance rapide sont généralement préférées aux autres car elles permettent de compenser la courte durée de culture. Il est possible de semer sous couvert de la culture précédente mais cela risque de diminuer les rendements à cause de la compétition (Breland 1996).

Les effets principalement observés lors d'un retard de semis de couvert concernent la biomasse, les nutriments et les adventices (Cottney et al. 2022).

Les couverts semés plus tardivement (fin été - début automne) ont tendance à produire moins de biomasse. En effet, les conditions deviennent moins propices au bon développement des couverts à cause de la diminution de température et de la photopériode mais aussi l'augmentation de l'humidité qui rend le semis plus difficile.

Il y a aussi une diminution significative du prélèvement de l'azote du sol ce qui a pour effet de diminuer l'efficacité du couvert à réduire la lixiviation. C'est aussi le cas pour les autres nutriments comme le phosphore et le potassium. Certaines espèces comme la phacélie sont plus tolérantes et ont d'assez bonne performances pour produire de la biomasse et absorber les nutriments malgré le semis tardif (Cottney et al. 2022).

Enfin, le semis précoce permet un meilleur contrôle des adventices. Certaines espèces très compétitives pour les ressources et à croissance et couverture rapide peuvent se révéler très efficaces pour diminuer la pression des adventices (Sturm et al. 2017).

La date de destruction peut être planifiée dans le cas d'une destruction mécanique ou chimique mais cette date peut varier d'une année à l'autre si on laisse le couvert être détruit par le froid. Il est important de bien choisir la date de destruction du couvert et d'incorporation des résidus pour assurer une restitution optimale des éléments minéraux à la culture principale. La diffusion des nutriments est variable entre espèces et dépend des conditions climatiques, du travail du sol et de l'activité du microbiote. C'est pourquoi il faut détruire, incorporer et semer la culture suivante au bon moment (K. Thorup-Kristensen 1994).

Selon certains scénarios, les changements climatiques pourraient affecter les températures moyennes et la durée des épisodes de sécheresse d'ici 2100. En 2017, l'Europe subissait déjà une augmentation de la température moyenne entre 0,5 et 2°C par rapport à la température moyenne mesurée entre 1951 et 1981 (Our World in Data 2022). Selon les scénarios d'émissions élevées de gaz à effets de serre (RCP8.5), l'Europe centrale pourrait connaître une augmentation des périodes de sécheresse. Ce phénomène est encore plus prononcé dans le sud de l'Europe (Europe Environment Agency 2022). Ces dérèglements climatiques pourraient influencer le choix des espèces utilisées dans les couverts. Les espèces plus résistantes à la chaleur et au déficit hydrique comme le sorgho pourraient être intéressantes pour leur capacité à se développer dans des conditions plus chaudes et sèches. Le second avantage de telles espèces est leur caractère gélif prononcé. Ces couverts seront facilement détruits par l'hiver, même dans le cas de températures plus élevées.

2 Objectifs

Ce mémoire se décline en l'étude et le suivi de trois essais expérimentaux sur une parcelle en champ. Deux couverts végétaux sont testés ; un couvert standard tempéré composé de quatre espèces gélives et un couvert alternatif tropical composé de quatre espèces très gélives. Les espèces qui composent ces couverts sont également testées en culture pure.

L'objectif général de ce mémoire est d'évaluer les performances et caractéristiques des couverts hivernaux en fonction de leur composition et du travail du sol, dans le but d'aider au choix d'un couvert approprié. Cet objectif se divise en trois sous objectifs :

L'objectif de l'essai 1 «travail du sol» est de comparer les performances et caractéristiques d'un couvert standard tempéré et des espèces qui le composent sur différents travaux du sol. Les impacts du labour sont étudiés.

L'objectif de l'essai 2 «type de couvert» est de comparer les performances et caractéristiques d'un couvert standard tempéré et des espèces qui le composent avec les performances et caractéristiques d'un couvert alternatif tropical et des espèces qui le composent.

L'objectif de l'essai 3 «couvert mixte» est de comparer les performances et caractéristiques d'un couvert mixte composé du couvert standard tempéré et du couvert alternatif tropical aux performances et caractéristiques de ces deux couverts distincts.

Nos objectifs peuvent se traduire en 3 questions de recherche :

- Quels impacts ont le labour et le non-labour sur les performances et caractéristiques d'un couvert tempéré et des espèces qui le composent ?
- Quelles sont les performances et caractéristiques d'un couvert tropical et des espèces qui le composent par rapport aux performances et caractéristiques d'un couvert tempéré et des espèces qui le composent ?
- Quelles sont les performances et caractéristiques d'un couvert mixte composé d'espèces tempérées et tropicales ? Comment le nombre d'espèces d'un couvert influence les performances et caractéristiques du couvert ?

3 Matériel et méthodes

3.1 Contexte de l'étude

L'expérience que nous avons réalisée s'est déroulée sur une terre agricole appartenant à la Ferme de Marbaix, en agriculture de conservation des sols.

La ferme de Marbaix, ainsi que la ferme de Lauzelle, comptent parmi l'une des 25 plateformes technologiques de l'UCLouvain sous l'appellation de «Fermes universitaires». Ce centre d'expérimentation met à disposition des terres agricoles aux chercheurs.s.e.s de l'UCLouvain, leur permettant d'effectuer des essais dédiés aux grandes cultures, au maraîchage et à l'élevage (UCLouvain 2022).

3.2 Parcelle expérimentale

3.2.1 Caractéristiques de la parcelle

Nous avons travaillé sur les parcelles n° 30 et 35 du plan PAC 2021, aussi appelées parcelles «Maison du garde». Ces deux parcelles situées côte à côte sont considérées comme une seule et même parcelle dans le cadre de cette expérience. La parcelle expérimentale est située dans le village de Vieux-Sart dans la commune de Chaumont-Gistoux. La parcelle entière a une superficie de 3,5 hectares et notre essai occupe 32,4 ares de cette parcelle (Wallonmaps 2022a) (Figure 1).

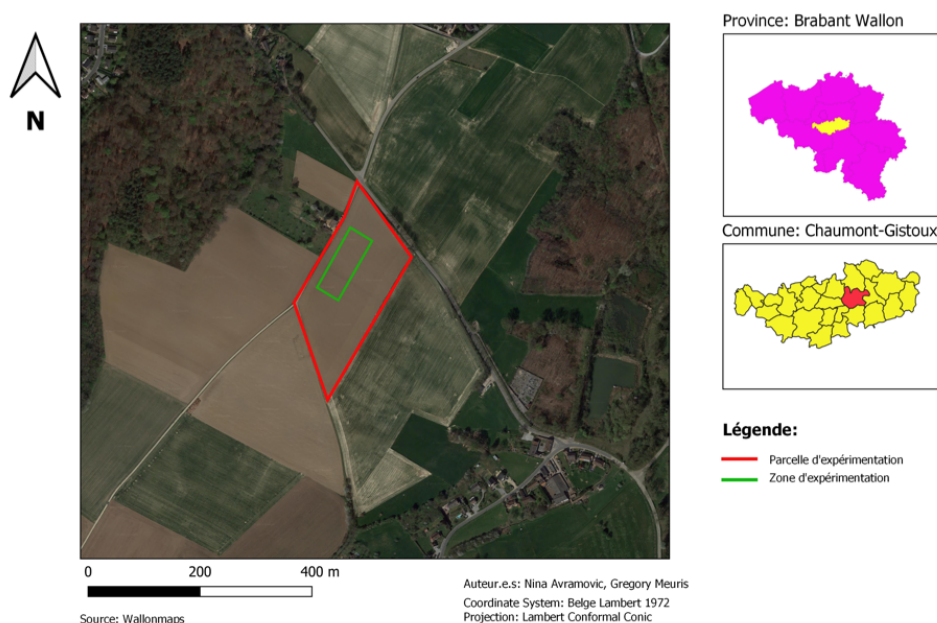


FIGURE 1 – Carte satellite et schéma de localisation de la parcelle expérimentale à Vieux-Sart, province de Brabant wallon, Belgique.

La parcelle est composée partout d'un sol limoneux à drainage naturel favorable (Annexe B, Figure 27). Elle est relativement plane, les pentes varient entre 0 et 5% (Annexe B, Figure 28). De plus, celle-ci n'est pas entourée de haies ou d'arbres pouvant influencer certains paramètres climatiques.

3.2.2 Historique de l'itinéraire technique de la parcelle

- **2019** : orge d'hiver et froment d'hiver (n° de parcelle 27 et 34) + couverture d'hiver (n° de parcelle 27)
- **2020** : pomme de terre et blé d'hiver (n° de parcelle 30 et 36)
- **2021** : épeautre d'hiver (n° de parcelle 30 et 35) + couverture d'hiver (n° de parcelle 30 et 35)

3.3 Design expérimental

Trois essais différents sont mis en place. L'essai 1 «travail du sol» compare un couvert gélif standard sur les trois traitements de travail du sol. L'essai 2 «type de couvert» compare le couvert standard avec un couvert alternatif très sensible au froid. L'essai 3 «couvert mixte» compare le couvert standard, le couvert alternatif et un couvert constitué du mélange des couverts standards et alternatifs.

La parcelle d'expérimentation est présentée et expliquée successivement en deux figures, la première pour présenter la disposition en sous-parcelles, bandes et unités expérimentales (Figure 2), la deuxième pour présenter les traitements des trois essais (Figure 3).

Pour l'ensemble de ces trois essais, la parcelle d'expérimentation est divisée en cinq sous-parcelles (Figure 2). Les sous-parcelles 1, 2, 3 et 4 contiennent six bandes chacune tandis que la sous-parcelle 5 en contient trois. Chaque bande contient un seul couvert, a une longueur de 40 m sur une largeur de 3 m et est traversée par cinq travées. Chaque bande contient cinq unités expérimentales. Avec 27 bandes et 5 répétitions par bande, il y a donc un total de 135 unités expérimentales.

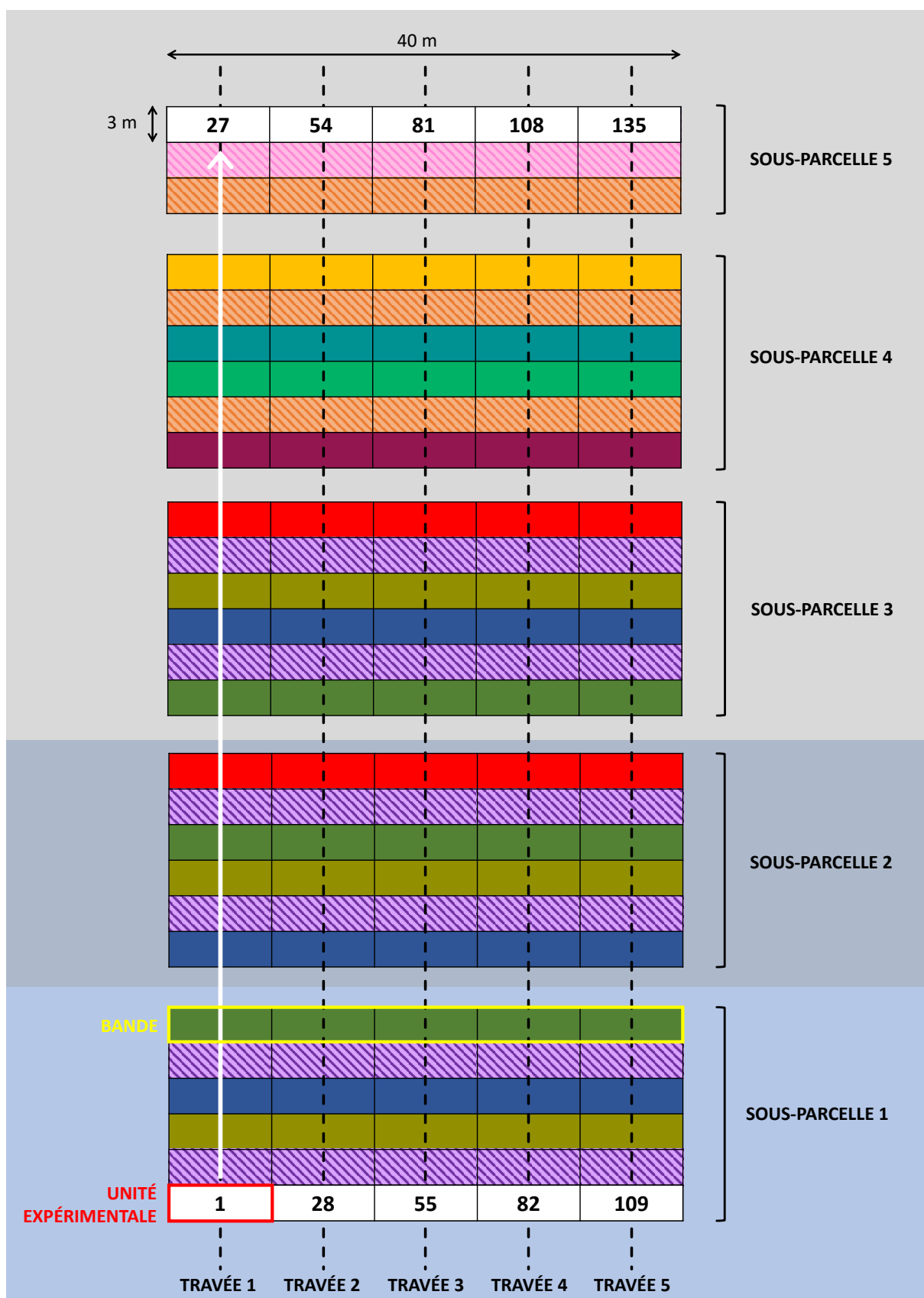


FIGURE 2 – Dispositif expérimental de la parcelle, présentant les 5 sous-parcelles, les 27 bandes de couvert (dont une entourée en jaune), les 5 travées en pointillés (dont la première est marquée par une flèche blanche) et les 135 unités expérimentales (dont une entourée en rouge, celles appartenant à la première et à la dernière bande étant numérotées).

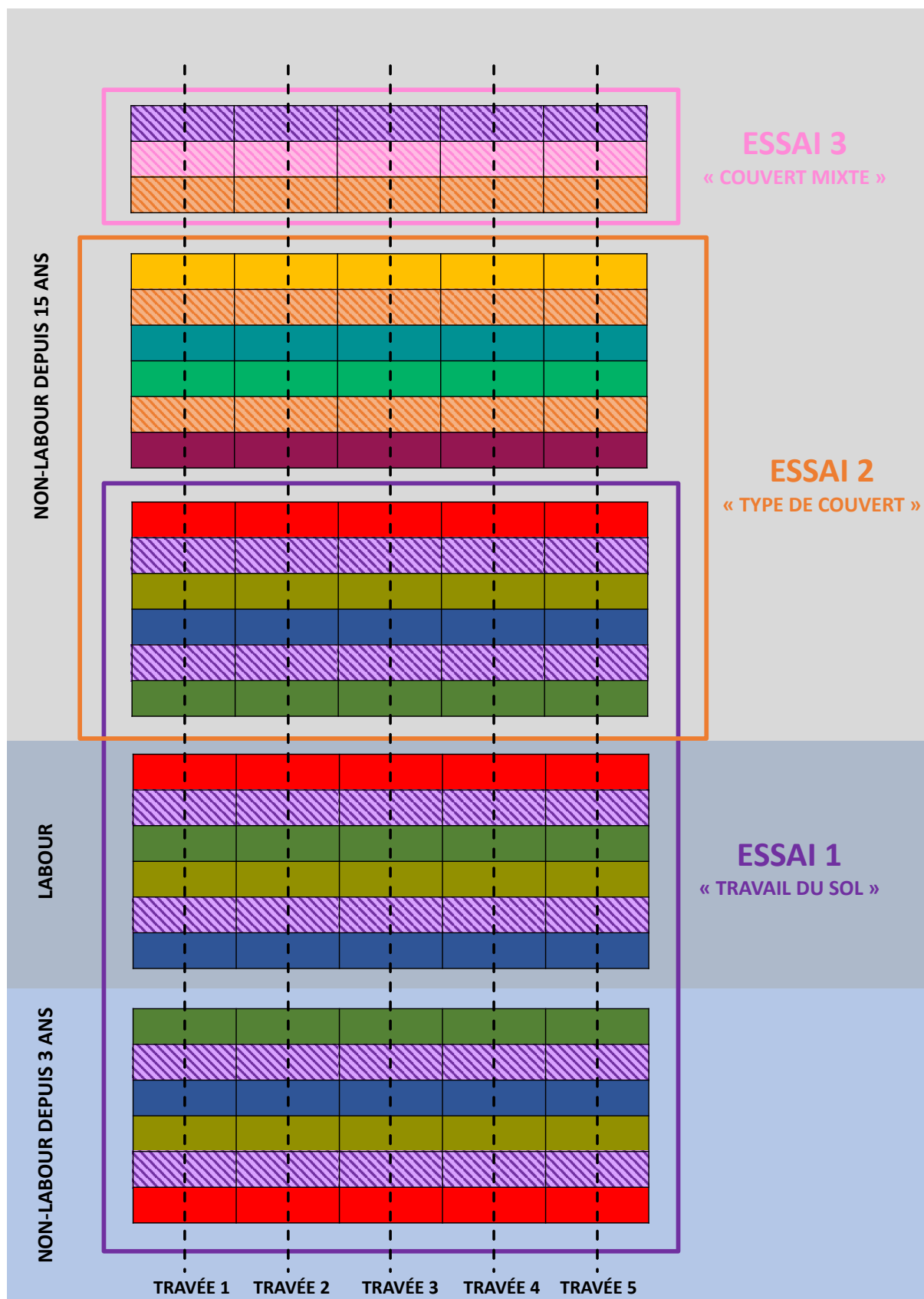


FIGURE 3 – Dispositif des traitements de la parcelle, présentant les 18 traitements de l'essai 1 («travail du sol», cadre mauve), les 12 traitements de l'essai 2 («type de couvert», cadre orange) et les 3 traitements de l'essai 3 («couvert mixte», cadre rose).

Le plan expérimental a été mis en place par les professeurs Pierre Bertin et Xavier Draye, avec validation de Hugues Falys, responsable des fermes universitaires, concernant les aspects techniques. Sur la figure 3, nous observons le plan expérimental expliqué selon les différents traitements. Trois traitements de travail du sol se retrouvent sur notre parcelle ; un non-labour depuis 3 ans (sous-parcelle 1), un labour récent (sous-parcelle 2) et un non-labour depuis 15 ans (sous-parcelles 3, 4 et 5). Deux types de couverts différents sont testés sur la parcelle : un couvert standard et un couvert alternatif.

Le couvert standard est constitué d'un mélange de 4 espèces gélives tempérées :

- Avoine brésilienne - *Avena strigosa*
- Radis chinois - *Raphanus sativus longipinnatus*
- Phacélie - *Phacelia tanacetifolia*
- Trèfle d'Alexandrie - *Trifolium alexandrinum*

Le couvert alternatif est constitué d'un mélange de 4 espèces gélives tropicales :

- Sarrasin - *Fagopyrum esculentum*
- Sorgho - *Sorghum bicolor x sorghum sudanense*
- Tournesol - *Helianthus annuus*
- Trèfle de Perse - *Trifolium resupinatum*

L'essai 1 «travail du sol» est installé sur les sous-parcelles 1 (non-labour depuis 3 ans), 2 (labour récent) et 3 (non-labour depuis 15 ans). L'essai 2 «type de couvert» est installé sur les sous-parcelles 3 et 4 (non-labour depuis 15 ans). L'essai 3 «couvert mixte» est installé sur la sous-parcelle 5 (non-labour depuis 15 ans)

Si l'on se concentre sur le plan expérimental au niveau des sous-parcelles, on observe que chaque espèce du mélange concerné a été semée une fois en pur au sein d'une sous-parcelle. Les bandes hachurées représentent les couverts en mélange ; ils sont positionnés de sorte que chaque bande en pur soit à côté d'une bande en mélange. Lors de l'analyse statistique, si des effets entre les bandes de couvert en mélange d'une même sous-parcelle sont observés, alors il sera plus sûr d'intégrer la bande de couvert en mélange (témoin) dans le contraste réalisé, afin de prendre en compte un éventuel gradient d'hétérogénéité spatiale. Ceci sera plus largement expliqué lors de l'explication des modèles statistiques utilisés.

Le plan expérimental a dû faire face à une contrainte spatiale et une contrainte technique. Premièrement, la parcelle utilisée ne comporte qu'une petite fraction étant encore labourée aujourd'hui. De ce fait, il n'était pas possible d'inclure des bandes de l'ensemble des espèces/couverts sur tous les traitements de travail du sol. Ainsi, seul le couvert standard a été testé sur les différents travaux du sol.

Deuxièmement, les traitements ne sont pas assignés aux unités expérimentales de manière aléatoire. En effet, chaque bande contient un seul type de couvert. Le semoir utilisé, n'étant pas un semoir à essais, ne permet pas d'alterner les couverts au sein d'une même bande de semis. Il faut vider et nettoyer soigneusement la trémie entre chaque changement de semences, ce qui devient vite rédhibitoire avec un grand nombre de parcelles.

3.4 Contraintes rencontrées

L'expérience a pris place sur une parcelle agricole, dans un cadre représentatif de la réalité. Le déroulement et la mise en place de l'expérience ont du faire face aux réalités du terrain et donc aux contraintes techniques, spatiales et météorologiques.

Le mois d'août 2021 a été caractérisé par des précipitations excédentaires en termes de quantité et de nombre de jours de précipitation par rapport à la moyenne (MIEVIS 2022a). À l'inverse, le mois de septembre 2021 a été caractérisé par des précipitations déficitaires en termes de quantité et de nombre de jours (MIEVIS 2022b).

Les fortes précipitations du mois d'août 2021 ont retardé la récolte de l'épeautre, culture qui précédait les couverts. Après la récolte, un seul déchaumage (au vibroculteur) a été réalisé par faute de temps. Le semis des couverts a alors été reporté au début du mois de septembre 2021. Ce retard de semis pourrait avoir eu un impact sur le développement des couverts.

Le retard de semis et le fait de n'avoir pu effectuer qu'un seul déchaumage ont causé la croissance de nombreuses repousses d'épeautre sur l'ensemble de la parcelle. L'épeautre a été présent durant toute la période d'expérimentation. Il est donc important de souligner la présence de cette espèce, non prévue dans le plan expérimental.

Mi-novembre, nous avons constaté la dégradation prématurée des espèces du couvert alternatif. Nous avons cependant continué à effectuer des mesures sur ces bandes de couvert, il sera donc important de tenir compte des conditions de prise de mesure lors de l'interprétation des résultats. Enfin, l'hiver n'a pas eu l'effet de détruire complètement le mélange standard.

La présence de toutes ces contraintes est prise en compte dans le traitement des données ainsi que dans l'interprétation des résultats obtenus.

3.5 Mesures

DISPOSITION SPATIALE DES MESURES

La disposition spatiale des différentes mesures au sein d'une unité expérimentale est représentée sur la figure 4. Pour rappel, les unités expérimentales sont toutes traversées par une travée. Parmi toutes les mesures effectuées, la plupart sont destructives.

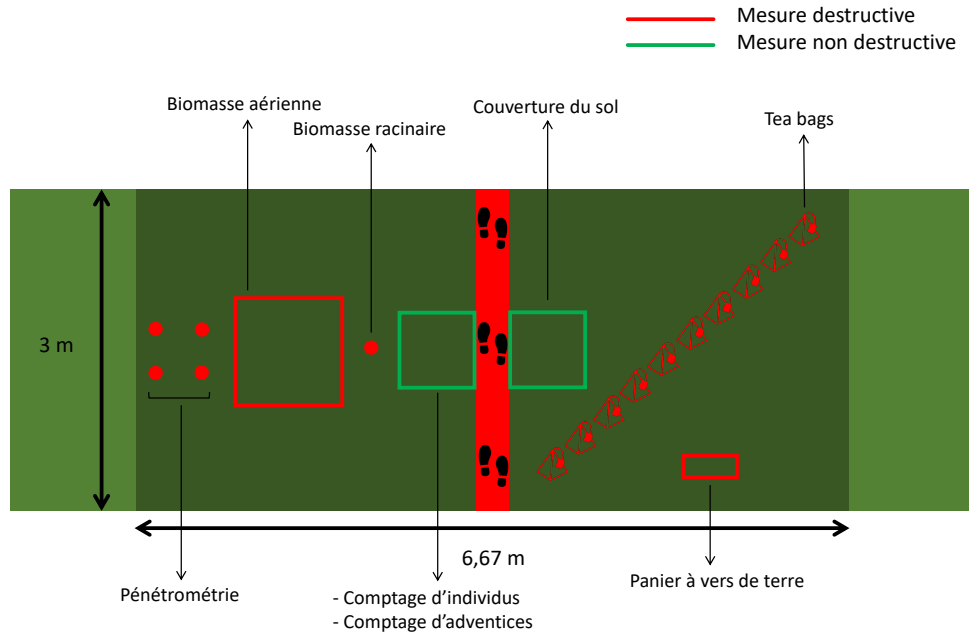


FIGURE 4 – Disposition spatiale des mesures sur une unité expérimentale.

CALENDRIER DES MESURES ET INTERVENTIONS

Les mesures ont été réalisées pour la plupart durant l'automne 2021. Plusieurs mesures ont dû être répétées plusieurs fois car leur évolution dans le temps était étudiée et d'autres ont été réalisées de façon ponctuelle. Certaines mesures, étant assez chronophages (telle que la récupération des sachets de thé), ont dû être effectuées sur plusieurs jours. Dans ces cas-là, nous prenons soin de travailler par travée afin de maîtriser un biais éventuel dû à la date de mesure.

TABLE 1 – Calendrier des mesures et interventions

Date	Mesures et interventions
6/09/2021	<i>Semis</i>
27/09/2021	Pourcentage de levée #1
28/09/2021	Comptage d’adventices #1
29/09/2021	Taux de couverture #1
7/10/2021	Taux de couverture #2
14/10/2021	Taux de couverture #3
19/10/2021	Pourcentage de levée #2
20/10/2021	Taux de couverture #4
20/10/2021	Comptage d’adventices #2
28/10/2021	Taux de couverture #5
4/11/2021	Pose des sachets de thé
20/11/2021	Pose des paniers à vers de terre
1/12/2021	Taux de couverture #6
8/12/2021	Prélèvement de la biomasse aérienne
3/01/2021	Taux de couverture #7
15/02/2021	Carottage
25/02/2021	Récupération des sachets de thé #1
25/02/2021	Récupération des paniers à vers de terre
1/03/2021	Récupération des sachets de thé #2
4/03/2021	Pénétrométrie
16/03/2021	<i>Pulvérisation de glyphosate</i>
19/03/2021	<i>Destruction du couvert par déchaumage</i>

3.5.1 Densité d’individus - Pourcentage de levée

1. But de la mesure

Le comptage des individus du couvert sur la parcelle permet d’évaluer le pourcentage de levée. Cette donnée permet par la suite d’évaluer la capacité des espèces et couverts à lever dans les conditions de l’étude.

Le semoir de la ferme, n’étant pas un semoir à essais, requiert une masse minimale de graines pour fonctionner correctement. Un surplus de graines a donc été placé dans la trémie. Ce surplus a été éliminé par après pour garder une densité de semis identique à celle calculée à l’origine.

Une densité de semis a été calculée pour chaque espèce végétale, cette densité varie selon que l’espèce soit semée en pur, en mélange de 4 espèces (couvert standard ou alternatif) ou en mélange de 8 espèces (couvert mixte) (Tableau 2). Cette densité de semis a été décidée par les soins de Marc De Toffoli à l’aide du logiciel Acacia, suivant les recommandations d’Arvalis.

TABLE 2 – Densité de semis par espèces en fonction du type de semis.

Densité de semis (kg/ha)			
Espèce	Pur	Mélange 4	Mélange 8
Avoine brésilienne	35	10	5
Phacélie	10	1	0,5
Radis chinois	10	5	2,5
Trèfle d’Alexandrie	15	10	5
Sarrasin	35	8	4
Sorgho	15	5	2,5
Tournesol	50	8	4
Trèfle de Perse	20	5	2,5

À partir de la densité de semis ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) et du poids des graines ($\text{kg} \cdot \text{nombre de graines}^{-1}$), la quantité de graines semées sur la surface d’observation a pu être calculée et comparée au nombre de pousses comptées afin de calculer le pourcentage de levée (Équations 1 et 2).

$$\text{Nombre de graines semées} \left(\frac{\text{graines}}{1/2\text{m}^2} \right) = \frac{\left(\frac{\text{Densité de semis} \left(\frac{\text{kg}}{\text{ha}} \right)}{\text{Poids de la graine} \left(\frac{\text{kg}}{\text{graine}} \right)} \right)}{20000} \quad (1)$$

$$\text{Pourcentage de levée (\%)} = \frac{\text{Nombre des pousses comptées} \left(\frac{\text{pousses}}{1/2\text{m}^2} \right)}{\text{Nombre de graines semées} \left(\frac{\text{graines}}{1/2\text{m}^2} \right)} \quad (2)$$

Ces calculs se basent sur l’hypothèse que le semis est homogène et donc qu’il y a autant de graines de chaque espèce dans chaque unité expérimentale pour les mêmes traitements (Tableau 2).

2. Protocole

Un cadre en bois de 70 cm x 70 cm est utilisé pour délimiter la zone à observer. Le nombre de pousses de chaque espèce est compté sur cette surface. Cette mesure a été réalisée deux fois, à 22 jours d’intervalle, le 27 septembre 2021 et le 19 octobre 2021 (Tableau 1).

La présence de repousses d’épeautre engendre un biais conséquent sur la mesure car celui-ci se confond avec l’avoine brésilienne du couvert standard. En effet, la distinction entre ces deux graminées est très difficile à faire dans leurs premiers stades de développement. Le grain d’épeautre est vêtu et génère deux pousses contrairement à l’avoine qui en génère une seule et a le grain nu. Il faut déraciner la plantule pour observer cette différence. Cependant, l’épeautre a souvent été confondu avec de l’avoine brési-

lienne dans les comptages. Un biais conséquent de comptage est donc à considérer pour l'avoine brésilienne.

3.5.2 Densité d'adventices

1. But de la mesure

La mesure consiste en l'identification et la quantification des différentes espèces d'adventices présentes sur la parcelle. L'objectif de cette mesure est *a posteriori* de mettre en évidence le rôle du travail du sol et du couvert en place dans la gestion des adventices. Cette mesure est répétée deux fois dans le temps (Tableau 1).

2. Protocole

Tout comme la mesure de la densité d'individus, un cadre en bois de 70 cm x 70 cm a été utilisé pour délimiter la zone à observer. Les différentes espèces d'adventices recensées sur cette superficie sont comptabilisées. La mesure a été réalisée deux fois, à 22 jours d'intervalle, le 28 septembre 2021 et le 20 octobre 2022 (Tableau 1).

3.5.3 Taux de couverture du sol

1. But de la mesure

La mesure du taux de couverture du sol permet d'évaluer le développement d'un couvert végétal et son évolution au cours du temps. La couverture rapide d'un sol permet une meilleure protection contre l'érosion et la battance et un meilleur contrôle des adventices.

2. Protocole

Cette mesure a été réalisée de deux manières différentes afin de pouvoir comparer les deux méthodes *a posteriori* et ainsi évaluer pour chacune les points forts et faibles.

La première méthode consiste en l'utilisation d'un cadre en bois de 70 cm x 70 cm composé de 100 carrés. Le test réalisé est binaire ; lorsqu'un carré est considéré comme rempli à plus de 50% par de la végétation, il est comptabilisé. Le résultat donne un pourcentage de la couverture végétale sur la portion de 70 cm x 70 cm de sol choisi en comptant le nombre de carrés couverts sur le nombre de carrés totaux. Le biais de l'utilisateur peut être assez élevé pour ce type de méthode. Les premières mesures ont donc été réalisées en binôme afin d'avoir une technique de comptage identique et non biaisée.

La seconde méthode se base sur l'utilisation de l'application Canopeo sur smartphone. Il suffit de prendre une photographie de la surface du sol et l'application en mesure le Green Area Index (GAI). Le GAI, à distinguer du Leaf Area Index (LAI) mesure la quantité de parties aériennes vertes (tiges et feuilles contrairement au LAI qui ne considère que les feuilles) par unité de surface. Le logiciel calcule le nombre de pixels considérés comme surface végétale et renvoie à partir de ça un pourcentage de la couverture du sol. Cette méthode est très efficace mais ne considère que la surface verte. Une tache de boue sur une feuille ou encore un brunissement des parties aériennes ne sont donc pas considérés comme de la couverture végétale. Cette méthode s'est donc avérée biaisée pour l'étude de la couverture de la phacélie qui brunit lors de son développement.

La mesure du taux de couverture du sol a été répétée 7 fois dans le temps (Tableau 1) entre le 29 septembre 2021 et le 3 janvier 2022 afin de pouvoir mesurer l'évolution du couvert végétal au cours du temps.

3.5.4 Tea bag Index

1. But de la mesure

Cette méthode a pour but d'évaluer la vitesse de dégradation de la matière organique par les microorganismes du sol. Elle a été développée par des chercheurs de l'université de Wageningen en 2013 et est à présent largement utilisée et confirmée au sein de la communauté scientifique. Nous avons effectué cette mesure dans le but d'observer d'éventuelles différences de dégradation entre les différents traitements de notre expérience.

La méthode du *Tea Bag Index* (TBI) consiste à enfouir des sachets de thé Lipton Green Tea et Lipton Rooibos dans le sol durant trois mois. Le thé, matériel végétal, va se dégrader durant cette période. La perte de poids liée à la décomposition permet par la suite de quantifier la dégradation de la matière organique par l'identification d'un facteur de stabilisation S de la litière et d'un taux de décomposition k de la matière organique.

Sur la figure 5, nous pouvons observer les courbes théoriques de dégradation des thés Green Tea et Rooibos. On constate que le thé Green Tea se décompose plus rapidement que le thé Rooibos. Lors de la récolte des sachets de thé après trois mois, les thés Rooibos sont toujours dans la première phase de décomposition tandis que les thés Green Tea sont déjà dans la phase de stabilisation. Chacun des thés va donc déterminer un paramètre indiquant une phase différente de la courbe de décomposition de la matière organique. La dégradation du Green Tea, assez rapide, détermine le facteur S . Après trois mois, la mesure des thés Green Tea correspond à la part de la matière organique stabilisée. La

dégradation du Rooibos, beaucoup plus lente, détermine le facteur k. Après trois mois, la mesure des thés Rooibos correspond au taux de dégradation initial de la matière organique.

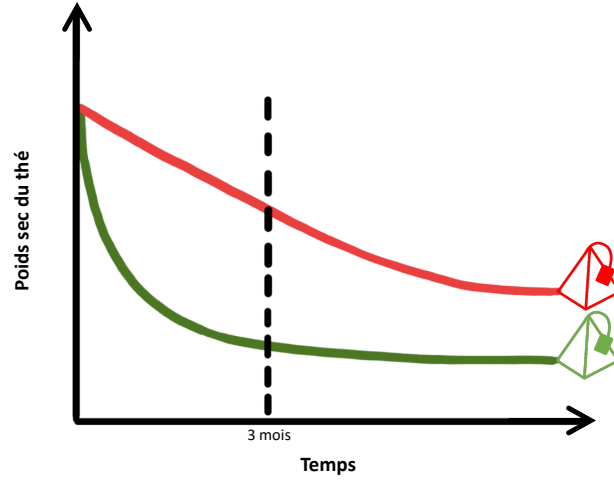


FIGURE 5 – Courbes de dégradation du thé Green tea et du thé Rooibos.

Les paramètres S et k sont déterminés par les équations suivantes : (Keuskamp et al. 2013)

$$W_r(t) = a_r e^{(-kt)} + (1 - a_r) \quad (3)$$

$$S = 1 - \frac{a_g}{H_g} \quad (4)$$

$$a_r = H_r(1 - S) \quad (5)$$

$$k = -\frac{\ln\left(\frac{W_r(t) - (1 - a_r)}{a_r}\right)}{t} \quad (6)$$

Où :

- t = temps d'incubation
- P_{ig} = poids initial du Green tea
- P_{fg} = poids final du Green tea
- a_g = fraction décomposable du Green tea = $\frac{P_{ig} - P_{fg}}{P_{ig}}$
- H_g = fraction hydrolysable du Green Tea = 0,842
- a_r = fraction décomposable prédite du Rooibos
- H_r = fraction hydrolysable du Rooibos = 0,552
- $W_r(t)$ = fraction massique restante du Rooibos après une incubation de temps t

2. Protocole

Au total, 1350 sachets de thé ont été enfouis dans le sol ; 675 sachets de thé Lipton Green Tea et 675 sachets de thé Lipton Rooibos. Ci-dessous le protocole utilisé (Keuskamp et al. 2013) :

1. Séchage à air ambiant des sachets de thé durant 48h afin de s’assurer qu’ils aient tous la même humidité relative.
2. Pesée des 1350 sachets de thé à la balance de précision (0,0001).
3. Pesée de 10 sachets en nylon vidés de leur thé pour obtenir la tare.
4. Le 4 novembre 2021, pose des sachets de thé sur la parcelle à une profondeur de 8 cm à l’aide d’une bêche. Dix sachets de thé ont été placés sur chaque unité expérimentale : 5 Lipton Green Tea et 5 Lipton Rooibos placés en alternance à 15 cm de distance les uns des autres. Ceux-ci sont placés en diagonale par rapport au sens de la parcelle afin d’apprécier au mieux l’hétérogénéité de celle-ci (Figure 4).
5. Récolte des sachets de thé 3 mois plus tard, le 4 février 2022.
6. Séchage à l’étuve à 65°C durant 72h.
7. Pesée du contenu des sachets de thé à la balance de précision (0,0001).

3.5.5 Paniers à vers de terre

1. But de la mesure

Cette mesure permet de quantifier la décomposition de la matière organique végétale présente à la surface du sol par les vers de terre (EcoBioSoil 2022). Des paniers remplis de paille sèche sont posés sur la parcelle durant 3 mois. La décomposition de la matière organique végétale est évaluée à partir de la différence de biomasse sèche entre la paille initialement posée dans le panier et la paille finalement récoltée 3 mois plus tard.

2. Protocole

Le protocole présenté ci-dessous a été adapté du protocole proposé par l’université de Rennes «Protocole participatif – paniers à vers de terre». Ce dernier quantifie la décomposition de la matière organique végétale par les vers de terre *via* l’observation de la formation de turricules et de cabanes à vers de terre et non *via* la différence de biomasse sèche dans le panier. Le choix de cette adaptation de protocole s’est basé sur les expériences menées précédemment par des pair.e.s. Il s’est avéré, dans leur étude, que l’observation des cabanes et turricules n’était pas représentative du service écosystémique étudié (Fockedey et Belin 2021).

1. Confection de 135 paniers (base + couvercle) d'une dimension de 30 cm x 50 cm x 10 cm, à l'aide d'un grillage d'une maille de 1 cm x 1 cm.
2. Pesée de 50 g de paille sèche par panier.
3. Coupe à ras du matériel végétal présent sur la zone de disposition du panier.
4. Pose d'un panier rempli de paille par unité expérimentale à la date du 20 novembre 2021. Chaque panier est accroché au sol *via* trois sardines en métal.
5. Récupération des paniers 3 mois plus tard à la date du 25 février 2022.
6. Séchage de la paille de chaque panier à l'étuve à 65°C durant 72h.
7. Pesée de la paille sèche à une précision 0,01.

3.5.6 Biomasse aérienne

1. But de la mesure

Le but de cette mesure est de déterminer la quantité brute de matière végétale restituée au sol comme engrais vert. La matière organique restituée après enfouissement du couvert servira d'éléments nutritifs pour les micro/macroorganismes du sol et jouera un rôle de fertilisant organique pour la culture suivante.

2. Protocole

Le prélèvement de biomasse aérienne a été réalisé le 8 décembre 2021. La date de récolte est cruciale car elle doit correspondre à un couvert arrivé au bout de son développement mais qui n'est pas encore entré en phase de sénescence. Cela a été le cas pour le couvert standard mais le mélange alternatif était malheureusement déjà détruit précocement. Cette mesure est réalisée sur chacune des 135 parcelles. Le protocole suivi a été le suivant :

1. Récolte d'1 m² de matière fraîche à l'aide de cisailles, mise dans un sachet microperforé.
2. Pesée de la matière fraîche.
3. Séchage à l'étuve à 70°C durant 72h (stabilisation de la masse des échantillons).
4. Pesée de la matière sèche.

3.5.7 Biomasse racinaire

1. But de la mesure

Les données de biomasse racinaire permettent de quantifier le développement des racines dans les différents horizons de sol et ainsi d'évaluer à quelles profondeurs se développent les racines en fonction des différents traitements.

2. Protocole

Une carotte de sol par unité expérimentale a été prélevée à l'aide d'un tracteur équipé d'une tarière. La tarière est un cylindre permettant de prélever une carotte de sol de 2 cm de diamètre sur une profondeur de 90 cm. Chaque carotte est divisée en trois échantillons équivalents de 30 cm de long.

Les échantillons de sol sont ensuite nettoyés avec un jet d'eau sur un tamis à maillage fin afin de ne garder que les racines. Les racines ont été conservées en chambre froide. Elles ont ensuite été séchées à l'étuve puis pesées.

3.5.8 Pénétrométrie

1. But de la mesure

Le but est de mesurer la résistance du sol afin d'évaluer sa compaction et la présence d'une éventuelle semelle de labour.

2. Protocole

La mesure se fait avec un pénétromètre. Cet instrument est muni d'une tige en métal et d'un manomètre. Le manomètre mesure la pression en bar nécessaire pour faire progresser la tige métallique dans le sol. Une fois la tige enfoncée, la pression est évaluée tous les 10 cm.

Cette mesure est peu précise car le cadrant du manomètre ne comporte que trois graduations (à 7, 14 et 21 bar) et le pénétromètre ne peut pas aller au-delà de 21 bar ce qui oblige l'arrêt de la mesure lorsque ce seuil est dépassé. Ainsi la pression a été mesurée tous les dix centimètres, jusqu'à ce que la pression excède les 21 bar. La mesure est effectuée au centre de la parcelle entre la mesure de biomasse et l'emplacement des sachets de thé (Figure 4).

Dans chaque unité expérimentale, quatre répétitions ont été réalisées mais seule la plus cohérente a été gardée. Le sol est un milieu très hétérogène, il arrivait donc d'avoir des trous le long du profil de sol, ce qui empêchait une bonne appréciation de la résistance du sol. Le choix de la mesure à conserver a été fait en fonction de celle qui se rapprochait le plus de la moyenne des quatre mesures.

3.6 Analyse des données

L'analyse et le traitement statistiques des données récoltées sur le terrain ont été effectués avec les logiciels Microsoft Excel et R. Celles-ci sont basées sur les cours LBIRA2110 «Modélisation et exploration des données multivariées» et LBRAI2222 «Compléments de biométrie et plans expérimentaux», donnés par Bernadette Govaerts et Xavier Draye. Certaines analyses statistiques plus complexes non vues aux cours sont basées sur des recherches personnelles approfondies.

L'analyse de nos données doit être considérée selon le spectre des trois essais testés sur la parcelle. En effet, chaque essai a son propre design expérimental, ce qui implique donc des analyses statistiques adaptées aux plans mis en place.

3.6.1 Modèles utilisés

1. Essai 1 «Travail du sol» - *Split plot design*

Le plan expérimental de l'essai 1 «travail du sol» prend la forme d'un *split plot design* (Figure 6). Le plan comporte cinq blocs complets (en jaune sur la Figure 6). Chaque bloc comporte trois sous-blocs (en turquoise sur la Figure 6) auxquels sont appliqués les trois niveaux du facteur A ; le facteur «travail du sol» (non-labour depuis 15 ans, non-labour depuis 3 ans, labour). Chaque sous-bloc contient six unités expérimentales (en blanc sur la Figure 6), auxquelles sont appliquées les six niveaux du facteur B : le facteur «couvert» (couvert standard deux fois, avoine brésilienne, phacélie, radis chinois, trèfle d'Alexandrie). Il y a donc un total de $6 \times 3 = 18$ traitements. Ce type de plan expérimental prend en compte un potentiel gradient d'hétérogénéité spatiale en prenant en compte l'effet bloc dans le modèle. La hiérarchisation des sous-blocs aux blocs contrôle l'hétérogénéité.

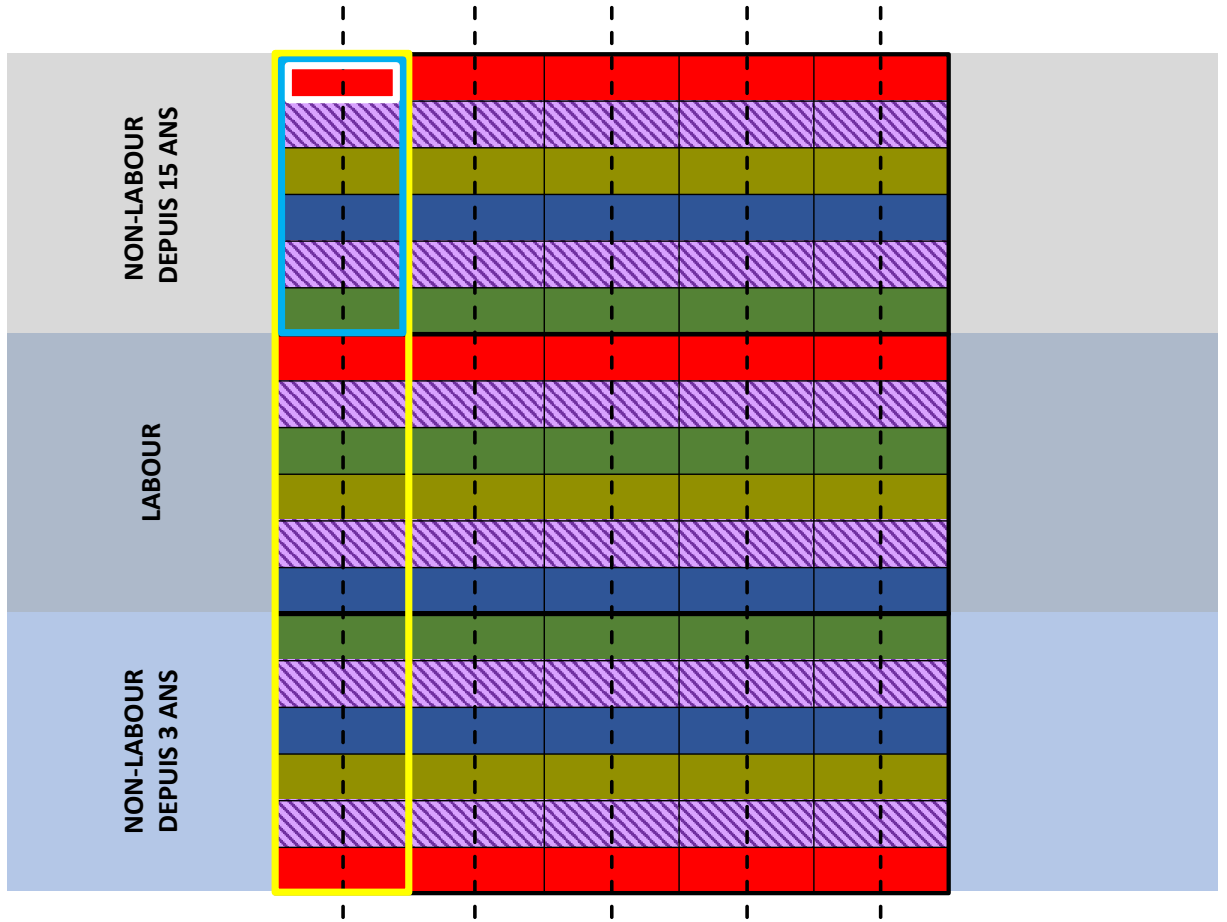


FIGURE 6 – Design expérimental de l’essai 1 présentant le facteur A «travail du sol», le facteur B «couvert» (en différentes couleurs), les 5 blocs (dont le bloc 1 entouré en jaune), les 15 sous-blocs (dont un entouré en turquoise), les 90 unités expérimentales (dont une entourée en blanc) et les travées (en pointillés)

Le plan expérimental contient donc deux facteurs aléatoires et deux facteurs fixes :

- Facteur aléatoire «bloc» : 5 blocs
- Facteur aléatoire «sous-bloc» : 3 blocs hiérarchisés au facteur bloc
- Facteur fixe «travail du sol» = Facteur A (3 niveaux) (j)
- Facteur fixe «couvert» = Facteur B (6 niveaux) (k)

Un ou plusieurs facteurs fixes seront parfois rajoutés au modèle en fonction de la mesure effectuée (effet temps, type de semis, etc.).

Le modèle utilisé pour analyser les données provenant de ce design expérimental est le suivant :

$$y_{ijk} = \mu + b_i + w_{j(i)} + \alpha_j + \beta_k + (\alpha\beta)_{jk} + e_{ijk} \quad (7)$$

$$e_{ijk} \sim iN(0, \sigma^2)$$

$$b_i \sim iN(0, \sigma_b^2)$$

$$w_{j(i)} \sim iN(0, \sigma_w^2)$$

$$i = 1, \dots, m$$

$$j = 1, \dots, t_A$$

$$k = 1, \dots, t_B$$

Avec :

- y_{ijk} = réponse de la variable quantitative dans le bloc i du sous-bloc j ayant reçu la combinaison des niveaux j de A et k de B
- μ = moyenne générale de la population des échantillons
- b_i = l'effet du bloc i , exprimé en différence de la moyenne générale
- $w_{j(i)}$ = l'effet du sous-bloc j , exprimé en différence de la moyenne du bloc i
- α_j = l'effet du niveau j de A, exprimé en différence de la moyenne générale
- β_k = l'effet du niveau k de B, exprimé en différence de la moyenne générale
- $(\alpha\beta)_{jk}$ = l'effet d'interaction entre les niveaux j de A et k de B
- e_{ijk} = l'erreur résiduelle entre la valeur observée y_{ijk} et sa valeur attendue.

On remarque une particularité dans notre facteur «couvert». Celui-ci comporte six niveaux, or il ne comprend que cinq couverts (le couvert standard, l'avoine brésilienne, la phacélie, le radis chinois et le trèfle d'Alexandrie). Comme expliqué plus haut, deux bandes de couvert standard ont été semées par bloc. Le plan n'est donc techniquement pas balancé. Dans le *split plot design*, nous allons considérer ces deux bandes de couvert standard comme deux couverts distincts pour l'établissement du modèle. On veillera néanmoins à systématiquement vérifier si une différence existe entre ces deux bandes pour une même mesure. Si c'est le cas, on prendra en compte cet effet spatial dans le calcul de nos contrastes lors de la comparaison d'autres couverts entre eux.

2. Essai 2 «Type de couvert» - *Randomized complete block design*

Le plan expérimental de l'essai 2 «type de couvert» prend la forme d'un plan en blocs aléatoires complets (*Randomized complete block design RCBD*). Ici, la différence avec un plan en blocs aléatoires complets classique est que les traitements au sein d'un bloc ne sont pas assignés aux différentes unités expérimentales de manière aléatoire. Selon les bonnes pratiques expérimentales, cela aurait dû être le cas. Pour rappel, ceci est la conséquence de l'utilisation d'un semoir standard. Néanmoins, les blocs ici sont bien des facteurs aléatoires et non fixes, on considère donc tout de même ce plan comme un plan en blocs aléatoires complets. Nous avons cinq blocs. Chaque bloc est complet et comprend l'ensemble des traitements. Il n'y a pas de répétition au sein d'un bloc, le nombre de répétitions de chaque traitement correspond au nombre de blocs.

Le *blocking* permet de séparer la variance résiduelle en deux composantes : la variance entre unités d'un même bloc (intra-bloc) et la variance entre les blocs (inter-bloc). Ainsi,

lors de la comparaison des différents traitements au sein d'un même bloc, la variance résiduelle est plus faible, ce qui améliore la précision de notre modèle.

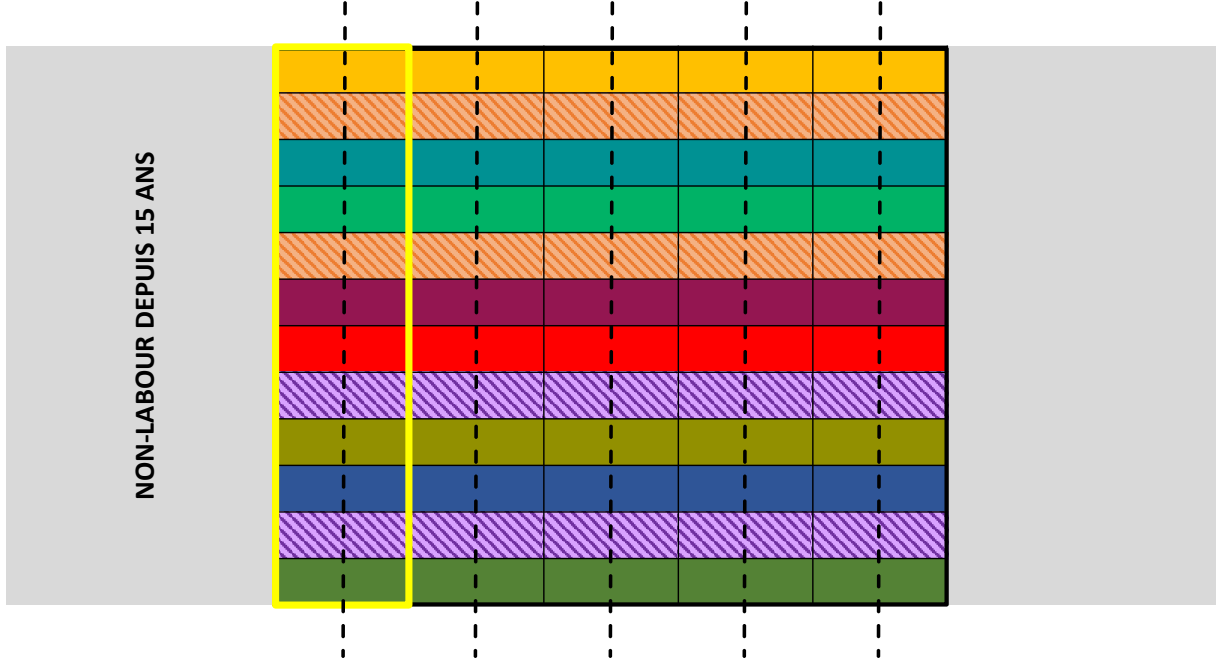


FIGURE 7 – Design expérimental de l'essai 2, présentant le facteur «couvert» (en différentes couleurs), les 5 blocs (dont le bloc 1 entouré en jaune) et les travées (en pointillés).

Notre plan expérimental contient donc un facteur aléatoire et un facteur fixe :

- Facteur aléatoire «bloc» : 5 blocs
- Facteur fixe «couvert» = Facteur traitement j

Un ou plusieurs facteurs fixes seront parfois rajoutés au modèle en fonction de la mesure effectuée (effet temps, type de semis, etc.).

Le modèle utilisé pour analyser les données provenant de ce design expérimental est le suivant :

$$y_{ij} = \mu + b_i + \alpha_j + e_{ij} \quad (8)$$

$$e_{ij} \sim iN(0, \sigma^2)$$

$$b_i \sim iN(0, \sigma_b^2)$$

$$i = 1, \dots, n$$

$$j = 1, \dots, t$$

$$N = n.t$$

Avec :

- y_{ij} = réponse de la variable quantitative dans le bloc i ayant reçu le traitement j
- μ = moyenne générale de la population des échantillons
- b_i = l'effet du bloc i , exprimé en différence de la moyenne générale
- α_j = l'effet du traitement j , exprimé en différence de la moyenne générale
- e_{ij} = l'erreur résiduelle entre la valeur observée y_{ij} et sa valeur attendue

3. Essai 3 "Couvert mixte" - *Randomized complete block design*

Tout comme l'essai 2 «type de couvert», le plan expérimental de l'essai 3 «couvert mixte» prend la forme d'un plan en blocs aléatoires complets. Ici, la particularité est qu'un potentiel gradient d'hétérogénéité du haut vers le bas (effet ligne) est confondu avec l'effet du traitement. Nous ne saurons donc pas distinguer l'un de l'autre. L'effet comprend donc le traitement et un potentiel gradient d'hétérogénéité spatiale.

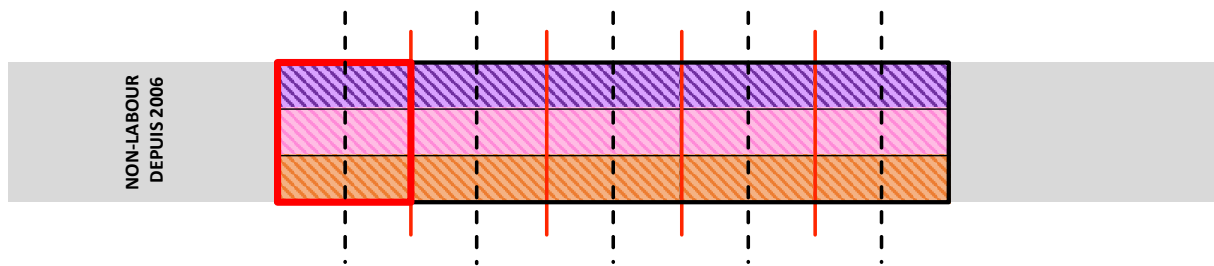


FIGURE 8 – Design expérimental de l'essai 3, représentant le facteur «couvert» (en différentes couleurs), les 5 blocs (dont le bloc 1 entouré en rouge) et les travées (pointillés).

Le modèle utilisé pour analyser les données provenant de ce design expérimental est le même que pour l'essai 2 «type de couvert».

3.6.2 Méthodes d'analyses statistiques employées

HYPOTHÈSES DE NORMALITÉ ET D'ÉGALITÉ DES VARIANCES

Les modèles utilisés pour chaque essai sont des modèles linéaires mixtes. L'utilisation de modèles linéaires implique la vérification de certaines hypothèses afin de pouvoir réaliser des analyses ANOVA :

1. Normalité de la distribution : la distribution de l'échantillon doit suivre une loi normale. Ceci est vérifié graphiquement *via* l'alignement des points sur le QQ plot des résidus et analytiquement *via* le test de Shapiro.

2. Indépendance des échantillons : les échantillons sont supposés avoir été prélevés aléatoirement et indépendamment. Ceci est assuré par le design du plan expérimental.
3. Égalité des variances – Homoscédasticité : les variances des résidus des populations des différents groupes sont supposées égales. Ceci est vérifié *via* le test d'homogénéité des variances de Levene.

L'hypothèse d'indépendance des échantillons est considérée comme correcte pour l'ensemble de nos données. L'hypothèse de normalité a été validée pour l'ensemble de nos données *via* le test de Shapiro. L'hypothèse d'égalité des variances n'est cependant pas validée pour l'ensemble de nos données. Nous nous retrouvons dans un cas d'hétéroscédasticité pour certaines mesures. Pour ces cas particuliers, nous ne pouvons donc pas traiter ces données à partir d'un modèle linéaire mixte et nous ne pouvons donc pas faire d'ANOVA.

MODÈLE UTILISÉ POUR LES DONNÉES DE COMPTAGE

Les données qui contiennent de l'hétéroscédasticité sont toutes des données de comptage, cela correspond aux mesures de densité d'individus, pourcentage de levée et densité d'adventices.

Le type de distribution de ces trois mesures est assez classique des données de comptage. Ces mesures vont donc être approchées avec un modèle différent afin de prendre en compte leur dispersion particulière. Les données sont traitées *via* un modèle linéaire généralisé à effets mixtes et plus précisément *via* un modèle binomial négatif car nous avons observé de la sur-dispersion de nos données.

La distribution binomiale négative est notée $NB(\mu, \theta)$ où μ est la moyenne et θ le paramètre de dispersion. Un faible paramètre de dispersion signifie une grande variance.

TEST F SUR LES FACTEURS FIXES - ANOVA

Les ANOVA réalisées dans les résultats portent sur 1, 2 ou 3 facteurs. Le principe de l'ANOVA est de décomposer la dispersion des données en la part assignable à chaque facteur, la part assignable aux interactions entre les niveaux de ces facteurs et la part résiduelle, qui n'est pas expliquée.

Ensuite, l'analyse de la variance permet, *via* le calcul de la statistique F, de tester l'égalité des moyennes des différents niveaux de chaque facteur et de tester l'égalité des moyennes des effets d'interaction entre les différents niveaux des différents facteurs. L'objectif est de savoir si chaque facteur et chaque interaction a un effet significatif sur

la réponse Y . Dans le cas où la p -valeur est inférieure à $\alpha = 0.05$, alors l'hypothèse H_0 d'égalité des moyennes est rejetée et le facteur ou l'interaction testée a un effet significatif sur la réponse Y .

TEST DE WALD SUR LES FACTEURS FIXES

Dans les cas des modèles de binomiales négatives, le test réalisé sur les facteurs fixes du modèle est le test de Wald. Ce test réalise l'équivalent du test F pour les modèles de binomiales négatives.

TESTS DE CONTRASTE

Dans l'éventualité où un facteur a un effet significatif sur la réponse Y , un test de contraste est réalisé. Il permet de comparer deux à deux les moyennes des différents niveaux du facteur. Le test de contraste teste l'hypothèse alternative H_1 contre l'hypothèse nulle H_0 :

- H_0 : les moyennes des deux niveaux du facteur testés sont égales
- H_1 : les moyennes des deux niveaux du facteur testés ne sont pas égales

Si la p -valeur est inférieure à $\alpha = 0.05$, alors l'hypothèse H_0 est rejetée et les moyennes des deux niveaux du facteur testés sont significativement différentes.

Une fois tous les contrastes réalisés, des groupes sont formés afin de rassembler les traitements non significativement différents. Tous les traitements appartenant à un même groupe reçoivent une ou plusieurs même(s) lettre(s). Des traitements n'ayant aucune lettre en commun sont donc considérés comme significativement différents.

La méthode de Tukey permet de faire des tests de comparaisons multiples tout en contrôlant le taux d'erreur lié à la multiplicité des tests. Cette méthode va donc adapter sa p -valeur en ajustant le niveau de confiance de chaque test réalisé. Cela a pour conséquence que pour un grand nombre de tests réalisés, la méthode de Tukey peut nous renvoyer des p -valeurs supérieures à 0.05 qui sont en réalité significatives lorsqu'un contraste unique est réalisé. La correction de la p -valeur est donc parfois trop forte, ce qui peut nous faire passer à côté de certains résultats. Pour cela, tous les contrastes ont été calculés un à un manuellement, excepté les contrastes des interactions car cela n'est pas possible manuellement, le vecteur des interactions à comparer entre elles étant bien trop grand. Il faut donc bien considérer que les groupes formés considérant toutes les interactions ont été créés à partir d'une méthode plus conservative.

4 Résultats

EXPLICATIONS PRÉLIMINAIRES

Dans cette partie sont présentées les analyses descriptives et statistiques des données récoltées sur le terrain et en laboratoire. Ces résultats sont présentés un à un pour chaque essai. Une synthèse des résultats des trois essais est présentée en annexe F.

Pour rappel, deux bandes de couvert en mélange se trouvent dans chaque sous-parcelle des essais 1 et 2. Dans les tests effectués et les représentations graphiques, ces deux bandes sont toujours considérées comme indépendantes. Lorsqu'une différence significative entre ces deux bandes est mesurée, elle sera ignorée dans le cas où l'on connaît l'origine de la différence (erreur de manipulation, explication phytotechnique, etc.). Cette différence sera prise en compte dans le calcul des différents contrastes de la sous-parcelle en question si l'on ne sait pas retracer l'origine de la différence. Cela nous permet donc de prendre en compte une potentielle hétérogénéité spatiale dans le sens des bandes.

Les résultats sont systématiquement présentés de la manière suivante :

1. Représentation graphique des données et observation du comportement des données. Les lettres associées aux traitements correspondent aux groupes formés par les contrastes réalisés lorsque toutes les interactions sont considérées. Cela permet de comparer les traitements entre eux.
2. Vérification de la significativité de chaque facteur fixe du modèle pour expliquer le modèle.
3. Contrastes sur les effets fixes du modèle. Les lettres associées aux groupes formés considèrent les autres facteurs comme confondus.

Dans le cas où certains facteurs fixes n'ont pas d'effet significatif sur le modèle, nous avons décidé de ne pas les enlever du modèle. Ce n'est pas parce qu'il n'y a pas de différence significative qu'il n'y a pas de différence dans l'absolu. Enlever des facteurs à notre modèle augmenterait potentiellement la variance résiduelle, qu'on cherche à diminuer.

4.1 Résultats de l'essai 1 - «Travail du sol»

4.1.1 Densité des espèces

La variable quantitative pour cette mesure est le nombre d'individus d'une espèce sur $\frac{1}{2} \text{ m}^2$. Graphiquement, les données sont exprimées en individus par m^2 afin d'avoir une

2. surface du cadre en bois utilisé pour réaliser la mesure

représentation plus claire. Les statistiques ont cependant été réalisées sur les données initiales ($\frac{1}{2} \text{ m}^2$). Cette variable a été mesurée sur des bandes où le couvert en question était semé en pur et des bandes où le couvert était semé en mélange de quatre espèces (couvert standard).

On peut remarquer visuellement l'hétéroscédasticité dans les données sur la figure 9 où l'écart-type est plus grand quand le nombre d'individus comptés est élevé. Comme précisé plus tôt, ceci n'est pas étonnant pour des données de comptage.

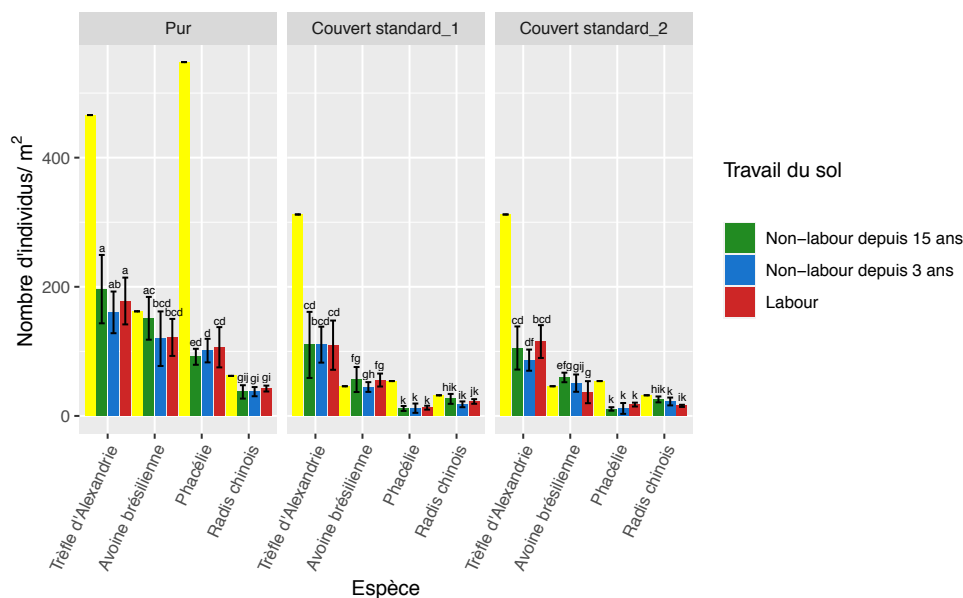


FIGURE 9 – Nombre d'individus des espèces par m^2 en fonction du type de semis et du travail du sol pour l'essai 1. En jaune est représenté le nombre de graines semées.

On constate sur la figure 9 une influence du type de semis -en pur ou en mélange- et de l'espèce sur le nombre d'individus par m^2 . En pur, le nombre d'individus d'une espèce est toujours supérieur à celui de cette même espèce dans le couvert en mélange (couvert standard). La quantité d'individus semble être la plus grande pour le trèfle d'Alexandrie suivie de l'avoine brésilienne, de la phacélie et du radis chinois. Le travail du sol semble avoir eu une légère influence sur le nombre d'individus, avec des valeurs généralement plus élevées en non-labour depuis 15 ans qu'en non-labour depuis 3 ans, les valeurs du labour semblent être intermédiaires.

Le test de Wald sur les facteurs fixes de notre modèle nous indique que les facteurs «travail du sol» ($p\text{-val} = 0,005073$), «espèce» ($p\text{-val} < 2,2 \cdot 10^{-16}$), «type de semis» ($p\text{-val} < 2,2 \cdot 10^{-16}$), le facteur d'interaction «travail du sol:espèce» ($p\text{-val} = 0,027026$), le facteur d'interaction «espece:type de semis» ($p\text{-val} < 2,2 \cdot 10^{-16}$) et le facteur d'interaction «travail du sol:espèce:type de semis» ($p\text{-val} = 0,024239$) ont tous un effet significatif sur

le modèle. Le facteur d'interaction «travail du sol:type de semis» ($p\text{-val} = 0,955779$) n'a pas d'effet significatif sur le modèle.

Les contrastes sur les facteurs «espèce», « travail du sol » et «type de semis» nous confirment les tendances observées sur la figure 9 (Tableau 3).

TABLE 3 – Contrastes sur les facteurs fixes du nombre d'individus par m^2 pour l'essai 1.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Avoine brésilienne	38,689	22,388	B
Phacélie	20,867	21,702	C
Radis chinois	13,756	5,253	C
Trèfle d'Alexandrie	65,089	24,54	A
Non-labour depuis 15 ans	36,75	30,748	A
Non-labour depuis 3 ans	32,3	25,499	B
Labour	34,75	28,035	AB
Couvert standard_1	24,583	21,577	B
Couvert standard_2	23,233	19,257	B
Pur	55,983	29,273	A

4.1.2 Pourcentage de levée

La variable quantitative pour cette mesure est le pourcentage de levée, soit le rapport du nombre de graines qui ont germé sur le nombre de graines qui ont été semées. Paradoxalement, certaines valeurs dépassent les 100% de levée. Cette erreur est probablement due au biais de comptage expliqué précédemment.

De l'hétéroscédasticité est également observée dans les données de pourcentage de levée. Le pourcentage de levée étant calculé à partir des données de densité d'individus, cela n'est donc pas étonnant.

L'observation de la figure 10 nous permet de distinguer une légère tendance à un pourcentage de levée supérieur en non-labour depuis 15 ans qu'en non-labour depuis 3 ans, les valeurs du labour semblent être intermédiaires. Le type de semis n'a pas l'air de fortement influencer le pourcentage de levée, sauf pour l'avoine brésilienne, avec un pourcentage de levée plus grand dans le couvert en mélange (couvert standard). Le pourcentage de levée semble être le plus grand pour l'avoine brésilienne, suivi du radis chinois, du trèfle d'Alexandrie et de la phacélie.

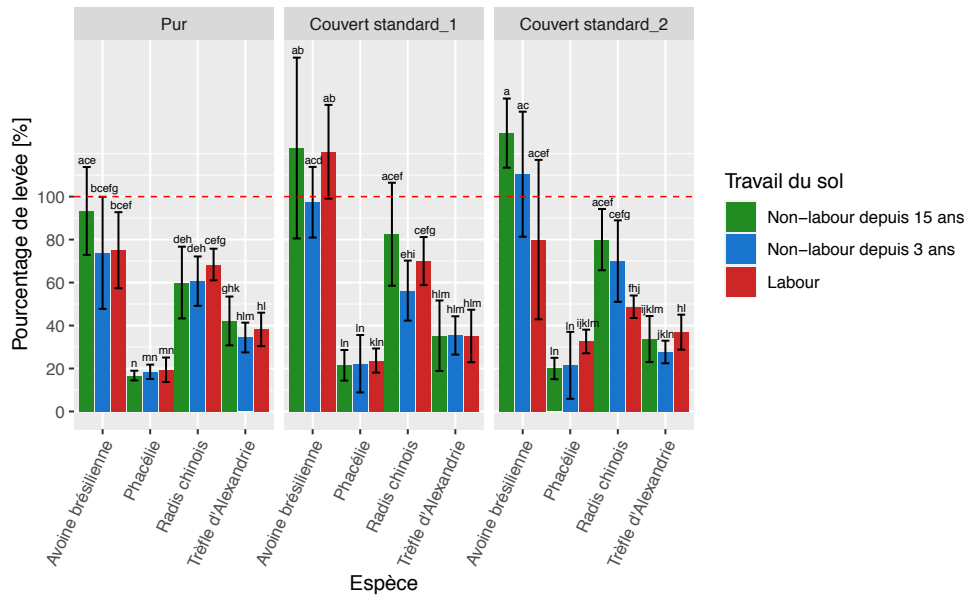


FIGURE 10 – Pourcentage de levée des espèces en fonction du type de semis et du travail du sol pour l’essai 1. La ligne pointillée rouge correspond à 100% de pourcentage de levée.

Le test de Wald sur les facteurs fixes de notre modèle nous indique que les facteurs «travail du sol» ($p\text{-val} = 0,020175$), «espèce» ($p\text{-val} < 2,2 \cdot 10^{-16}$), «type de semis» ($p\text{-val} < 0,001128$), le facteur d’interaction «travail du sol:espèce» ($p\text{-val} = 0,007487$), le facteur d’interaction «espèce:type de semis» ($p\text{-val} = 0,001012$) et le facteur d’interaction «travail du sol:espèce:type de semis» ($p\text{-val} = 0,004392$) ont tous un effet significatif sur le modèle. Le facteur d’interaction «travail du sol:type de semis» ($p\text{-val} = 0,398793$) n’a pas d’effet significatif sur le modèle.

Les contrastes sur les facteurs «espèce» et «type de semis» nous confirment les tendances observées sur la figure 10 (Tableau 4).

TABLE 4 – Contrastes sur les facteurs fixes du pourcentage de levée pour l’essai 1.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Avoine brésilienne	100,343	31,652	A
Phacélie	21,786	8,607	D
Radis chinois	66,282	16,93	B
Trèfle d'Alexandrie	35,429	9,966	C
Non-labour depuis 15 ans	61,443	41,791	A
Non-labour depuis 3 ans	52,351	33,119	B
Labour	54,086	31,55	AB
Couvert standard_1	60,233	40,174	A
Couvert standard_2	57,596	38,295	A
Pur	50,051	27,365	B

4.1.3 Densité des adventices

Les variables quantitatives étudiées sont la diversité des adventices et la densité d'adventices par $\frac{1}{2} \text{ m}^2$. Graphiquement, les données sont exprimées en individus par m^2 afin d'avoir une représentation plus claire. Les statistiques ont cependant été réalisées sur les données initiales ($\frac{1}{2} \text{ m}^2$).

La diversité des adventices en fonction des différents traitements est analysée à l'aide d'une analyse en composantes principales. Celle-ci ne donne pas de résultats concluants. La diversité des adventices ne dépend donc pas du travail du sol ou du couvert. Certaines adventices étaient présentes en quantité très faible sur la parcelle, c'est-à-dire moins d'une par m^2 en moyenne. Seules certaines espèces présentaient une densité plus élevée, soit plus de cinq par m^2 en moyenne (mouren (*Stellaria media*), morelle noire (*Solanum nigrum*) et chénopode blanc (*Chenopodium album*)).

Le reste des analyses a été réalisé sur la quantité totale d'adventices.

Sur la figure 11, on distingue une grande différence entre les travaux du sol. Il semble y avoir plus d'adventices dans le cas du non-labour depuis 15 ans que dans les autres travaux du sol. Le nombre d'adventices ne présente pas de tendance claire entre les deux pas de temps ou entre couverts. Le couvert standard semble tout de même avoir le moins d'adventices.

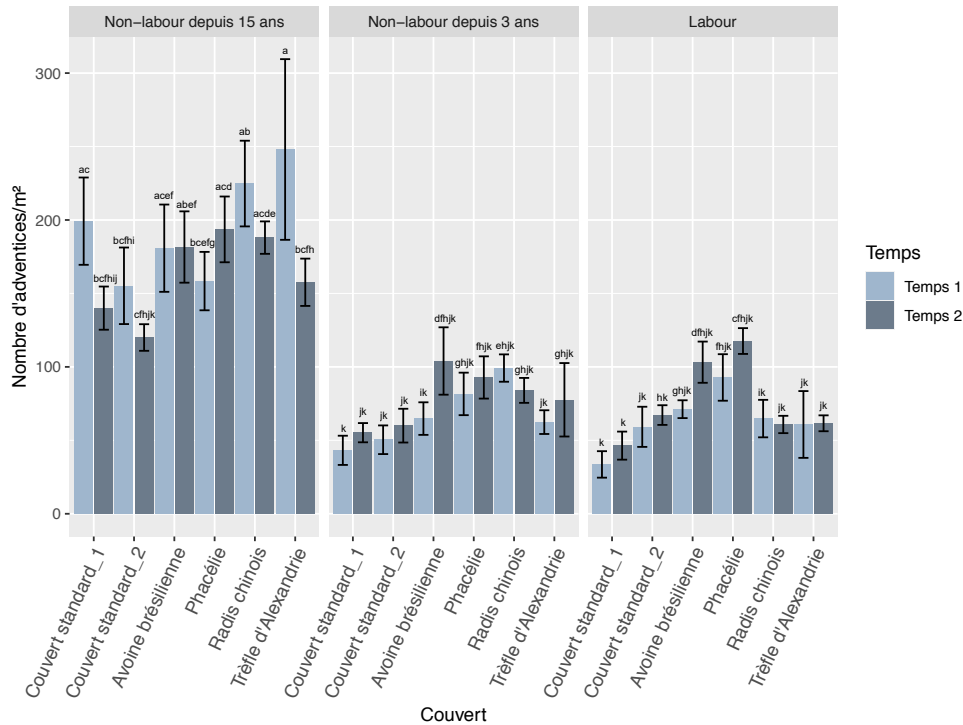


FIGURE 11 – Nombre d'adventices en fonction du couvert et du travail du sol réalisé pour l'essai 1. Les temps 1 et 2 correspondent aux deux dates de recensement soit 22 et 44 jours après semis.

Le test de Wald sur les facteurs fixes de notre modèle nous indique que les facteurs «travail du sol» ($p\text{-val} < 2,2 \cdot 10^{-16}$), «couvert» ($p\text{-val} < 3,168 \cdot 10^{-14}$), le facteur d'interaction «travail du sol:couvert» ($p\text{-val} = 1,974 \cdot 10^{-6}$), le facteur d'interaction «travail du sol:temps» ($p\text{-val} = 0,000475$) et le facteur d'interaction «couvert:temps» ($p\text{-val} = 0,040787$) ont tous un effet significatif sur le modèle. Le facteur «temps» ($p\text{-val} = 0,285939$) et le facteur d'interaction «travail du sol:couvert:temps» ($p\text{-val} = 0,514521$) n'ont pas d'effet significatif sur le modèle.

Les contrastes sur les effets «couvert», «travail du sol» et «temps» nous confirment les tendances observées sur la figure 11 (Tableau 5).

TABLE 5 – Contrastes sur les facteurs fixes de la densité d'adventices pour l'essai 1.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Couvert standard _1	43,1	34,3	B
Couvert standard _2	42,7	23,5	B
Avoine brésilienne	58,8	30,1	A
Phacélie	61,4	25,5	A
Radis chinois	60,1	34,8	A
Trèfle d'Alexandrie	55,7	44,7	A
Non-labour depuis 15 ans	89,5	30,4	A
Non-labour depuis 3 ans	36,5	15,7	B
Labour	35	15,7	B
Temps 1	54,2	38,9	A
Temps 2	53,1	27	A

4.1.4 Taux de couverture du sol

La variable quantitative étudiée est le taux de couverture du sol. Le taux de couverture du sol a été mesuré selon deux méthodes différentes (la méthode du cadre quadrillé et l'application Canopeo) à sept pas de temps différents. Ces deux méthodes présentent des résultats semblables. Ici seront présentés les résultats de la méthode du cadre quadrillé. Les résultats de la méthode «Canopeo» sont disponibles en annexe C.3.

Sur la figure 12, on peut distinguer une différence de taux de couverture en fonction du temps, du couvert et du type de travail du sol. Le couvert standard et le trèfle d'Alexandrie semblent être les couverts les plus couvrants. À l'inverse, la phacélie et le radis chinois sont les couverts les moins couvrants. L'avoine brésilienne semble être assez sensible au travail du sol. Pour l'ensemble des couverts, c'est en non-labour depuis 15 ans qu'on observe les taux de couverture les plus élevés, suivi du labour. L'allure particulière de l'avoine brésilienne avec une faible couverture au début suivie d'une forte augmentation est typique de celle-ci. On observe que la phacélie et l'avoine brésilienne

sont les couverts qui se maintiennent le mieux.

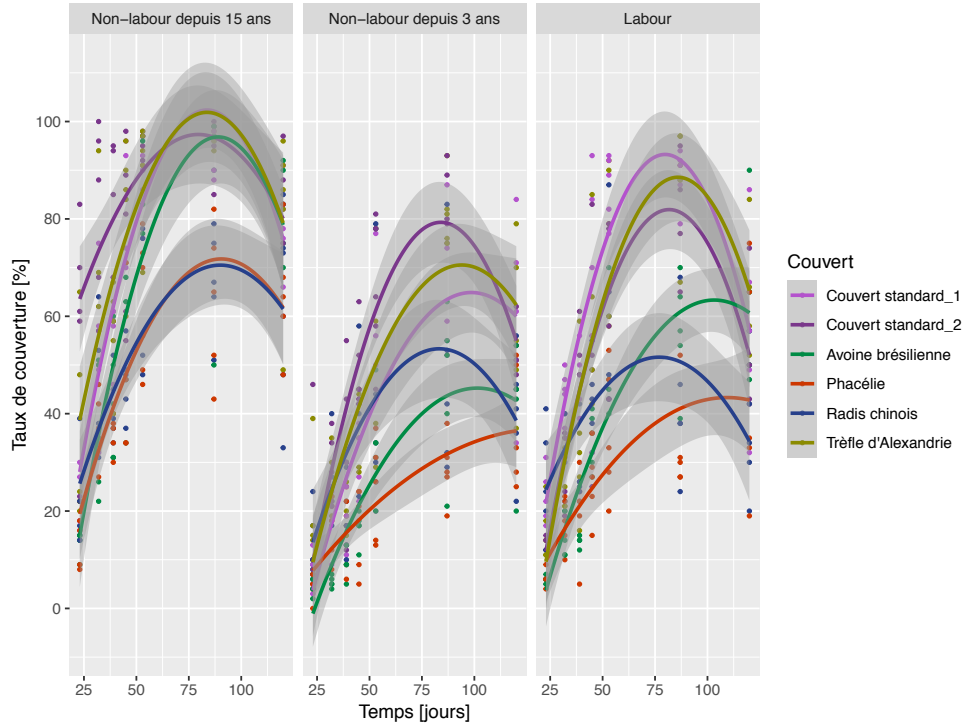


FIGURE 12 – Évolution du taux de couverture du sol des couverts en fonction du temps et du travail du sol pour l’essai 1. Le temps est défini en fonction du nombre de jours après semis.

Le test F sur les facteurs fixes de notre modèle nous indique que les facteurs «travail du sol» ($p\text{-val}=2,951.10^{-11}$), «couvert» ($p\text{-val}=6,537.10^{-11}$), «temps» ($p\text{-val}<2,2.10^{-16}$), et les facteurs d’interactions «travail du sol:couvert» ($p\text{-val}=0,0003653$) et «couvert:temps» ($p\text{-val}=0,0002257$) ont tous un effet significatif sur le modèle. Les facteurs d’interactions «travail du sol:temps» ($p\text{-val}=0,7630862$) et «travail du sol:temps:couvert» ($p\text{-val}=0,0805821$) ne montrent pas d’effet significatif sur le modèle.

Les contrastes à partir de toutes les interactions n’ont pas été réalisés car le facteur temps amplifie le nombre de groupes à former et cela complique fortement la compréhension des résultats. En effet, cela ne permet pas de comparer de manière cohérente les taux de couverture entre eux.

Afin de pouvoir comparer les taux de couverture des différents couverts, nous avons donc procédé par pas de temps. À chaque pas de temps, une ANOVA a été réalisée afin de comparer les couverts de différents travaux du sol entre eux. Les résultats de ces groupes sont observables en annexe C.1 (Figure 29).

Pour tous les pas de temps, le couvert standard et le trèfle d’Alexandrie sont les couverts les plus couvrants et ce, dès le début des mesures, soit un mois après semis. La phacélie et le radis chinois sont les couverts les moins couvrants. En comparant

les travaux du sol, on voit que les couverts en non-labour depuis 15 ans apportent généralement une meilleure couverture. Les deux autres travaux du sol ne présentent pas de différences marquées, les seuls couverts assez performants dans ces traitements sont le couvert standard et le trèfle d’Alexandrie.

4.1.5 Taux de croissance du couvert

La variable quantitative mesurée est le taux de croissance du couvert. Il a été mesuré selon l’évolution du taux de couverture dans le temps. La pente du taux de couverture du sol représente le taux de croissance du couvert. Des régressions linéaires ont été réalisées sur les valeurs de taux de couverture en fonction du temps pour chaque couvert dans chaque travail du sol. Seules les données jusqu’au maximum de couverture sont prises en compte, soit avant dégradation du couvert ; seuls les six premiers temps ont donc été utilisés. Cela nous a permis d’obtenir la pente soit le taux de croissance (en %) par jour. Une ANOVA a été effectuée sur le taux de croissance. Le taux de croissance ne correspond pas au taux de croissance de la plante mais à celui de la couverture du sol.

Le test F sur les facteurs fixes du modèle indique que les facteurs «travail du sol» ($p\text{-val} = 2,625.10^{-6}$), «couvert» ($p\text{-val} < 2,2.10^{-16}$) et le facteur d’interaction «travail du sol:couvert» ($p\text{-val} = 4,12.10^{-4}$) ont tous un effet significatif sur le modèle.

Les tableau 6 présente les valeurs de pentes. Les couverts avec les taux de croissance les plus élevés sont le couvert standard et le trèfle d’Alexandrie. La phacélie a le taux de croissance le plus faible. Les couverts en non-labour depuis 15 ans présentent les taux de croissance les plus élevés suivi du labour puis du non-labour depuis 3 ans (Tableau 6).

TABLE 6 – Contrastes des facteurs fixes pour le taux de croissance du couvert pour l’essai 1.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Couvert standard _1	1,1	0,305	A
Couvert standard _2	1,19	0,281	A
Avoine brésilienne	0,767	0,33	B
Phacélie	0,589	0,264	C
Radis chinois	1,799	0,194	B
Trèfle d’Alexandrie	1,12	0,266	A
Non-labour depuis 15 ans	1,22	0,268	A
Non-labour depuis 3 ans	0,686	0,257	C
Labour	0,874	0,286	B

Les contrastes sur les facteurs d’interactions sont représentés dans l’annexe C.2 (Tableau 29).

4.1.6 Décomposition de la matière organique par les microorganismes

Pour la décomposition de la matière organique par les microorganismes, les données mesurées sont la variation de poids du contenu en thé des sachets «Green Tea» et «Rooibos». Les équations 4 et 6 nous ont permis de calculer le taux de stabilisation S de la litière et le taux de décomposition k de la matière organique. Les variables quantitatives analysées ici sont donc S et k .

TAUX DE STABILISATION S DE LA LITIÈRE

Dans l'annexe C.5 (Figure 32), il ne semble pas y avoir de différences entre les couverts et les travaux du sol sur le taux de stabilisation S de la litière. Selon les groupes formés à partir des contrastes des interactions on voit qu'aucun traitement n'est significativement différent des autres hormis le couvert standard n°1 et le couvert standard n°2.

Le test F sur les facteurs fixes de notre modèle nous indique que le facteur «travail du sol» ($p\text{-val} = 0,6441$), «couvert» ($p\text{-val} = 0,2476$) et le facteur d'interaction «travail du sol:couvert» ($p\text{-val}=0,1681$) n'ont pas d'effet significatif sur le modèle.

Les contrastes sur les facteurs fixes nous confirment les tendances observées dans l'annexe C.5 (Figure 32).

TABLE 7 – Contrastes sur les facteurs fixes pour le taux de stabilisation S de la litière pour l'essai 1.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Couvert standard _1	0,286	0,12	B
Couvert standard _2	0,328	0,055	A
Avoine brésilienne	0,312	0,092	AB
Phacélie	0,32	0,134	AB
Radis chinois	0,305	0,137	AB
Trèfle d'Alexandrie	0,313	0,108	AB
Non-labour depuis 15 ans	0,304	0,147	A
Non-labour depuis 3 ans	0,308	0,101	A
Labour	0,32	0,073	A

TAUX DE DÉCOMPOSITION k DE LA MATIÈRE ORGANIQUE

Dans l'annexe C.5 (Figure 33), il ne semble y avoir d'effet ni des espèces ni du travail du sol sur le taux de décomposition k de la matière organique. Les contrastes sur l'ensemble des interactions nous indiquent une différence entre couvert standard n°2 et phacélie en non-labour depuis 15 ans.

Le test F sur les facteurs fixes de notre modèle nous indique que le facteur «couvert» ($p\text{-val} = 0,001546$) a un effet significatif sur le modèle. Le facteur «travail du sol» ($p\text{-val} = 0,278496$) et le facteur d'interaction «travail du sol:couvert» ($p\text{-val} = 0,083701$) n'ont pas d'effet significatif sur le modèle.

Les contrastes sur les facteurs fixes nous confirment les tendances observées dans l'annexe C.5 (Figure 33) (Tableau 8).

TABLE 8 – Contrastes sur les facteurs fixes pour le taux de décomposition k de la matière organique pour l'essai 1.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Couvert standard _1	0,009	0,004	AB
Couvert standard _2	0,01	0,005	A
Avoine brésilienne	0,009	0,004	B
Phacélie	0,008	0,005	B
Radis chinois	0,008	0,004	B
Trèfle d'Alexandrie	0,01	0,004	AB
Non-labour depuis 15 ans	0,01	0,004	A
Non-labour depuis 3 ans	0,008	0,004	A
Labour	0,009	0,005	A

4.1.7 Décomposition de la matière végétale par les vers de terre

Pour cette mesure, la variable quantitative observée est la quantité de paille décomposée par les vers de terre.

Sur la figure 13, on observe que la décomposition de la paille par les vers de terre semble plus élevée en non-labour depuis 15 ans que sous les autres travaux du sol. Si l'on se concentre sur les couverts, l'avoine semble, pour les 3 travaux du sol, avoir été le couvert sous lequel les vers de terres ont le plus décomposé la paille. Une anomalie est à noter. On remarque sur la figure 13 que certaines valeurs se situent en dessous de zéro. Pour rappel, 50 g de paille ont été placés dans chaque cage. Les valeurs de décomposition affichées sur la figure correspondent au poids initial (50 g) duquel on a soustrait le poids final du contenu en paille des paniers après trois mois. Pour certaines mesures, le poids final était supérieur au poids initial. Cela est probablement dû au fait qu'en récupérant la paille des cages, des résidus d'épeautre ont été emportés. Ce biais est systématique donc peut être négligé.

Le test F sur les facteurs fixes de notre modèle nous indique que les facteurs «travail du sol» ($p\text{-val} = 1,275 \cdot 10^{-8}$) et «couvert» ($p\text{-val} = 0,005035$) ont un effet significatif sur le modèle. Le facteur d'interaction «travail du sol:couvert» n'a pas d'effet significatif

(p-val = 0,922081).

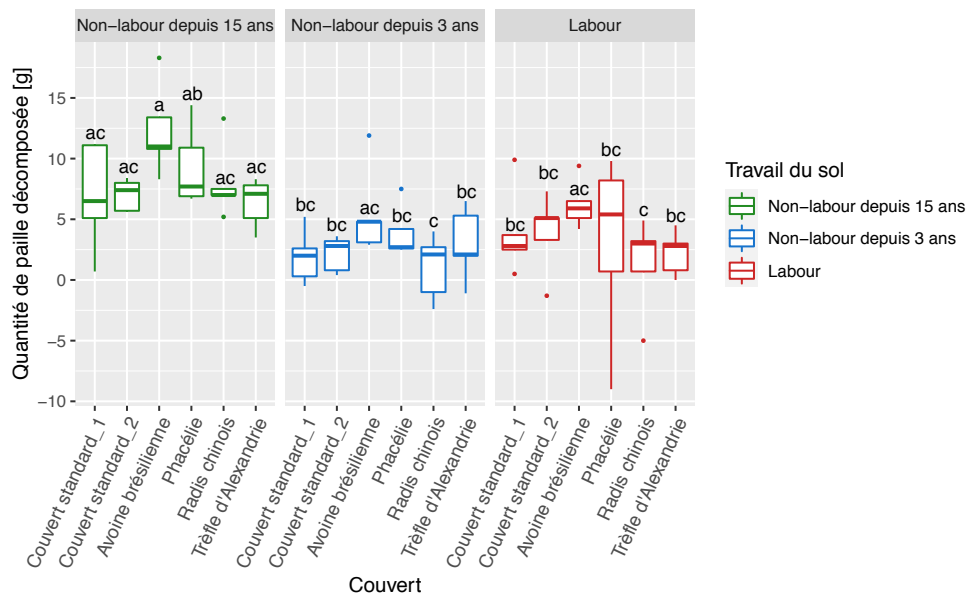


FIGURE 13 – Décomposition de la paille par les vers de terre en fonction du couvert et du travail du sol réalisé pour l’essai 1.

Les contrastes du facteur «couvert» et «travail du sol» nous confirment que les vers de terre ont significativement plus décomposé la paille sur les parcelles d’avoine brésilienne et en non-labour depuis 15 ans que dans les autres traitements (Tableau 9).

TABLE 9 – Contrastes sur les facteurs fixes pour la décomposition de la paille par les vers de terre pour l’essai 1.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Couvert standard _1	4,24	3,891	B
Couvert standard _2	4,36	2,9	B
Avoine brésilienne	8,027	4,386	A
Phacélie	5,413	5,389	B
Radis chinois	3,48	4,47	B
Trèfle d’Alexandrie	3,847	2,855	AB
Non-labour depuis 15 ans	8,33	3,545	A
Non-labour depuis 3 ans	2,92	2,807	B
Labour	3,43	4,067	B

4.1.8 Biomasse aérienne

Pour cette mesure, la variable quantitative observée est la biomasse sèche prélevée sur 1 m².

Sur la figure 14, on observe pour chaque couvert une tendance similaire : la biomasse sèche est plus élevée en non-labour depuis 15 ans que sur les deux autres travaux du sol. Si l'on se concentre sur les couverts, on remarque que le couvert standard et le trèfle d'Alexandrie semblent fournir une biomasse sèche plus élevée que les autres couverts.

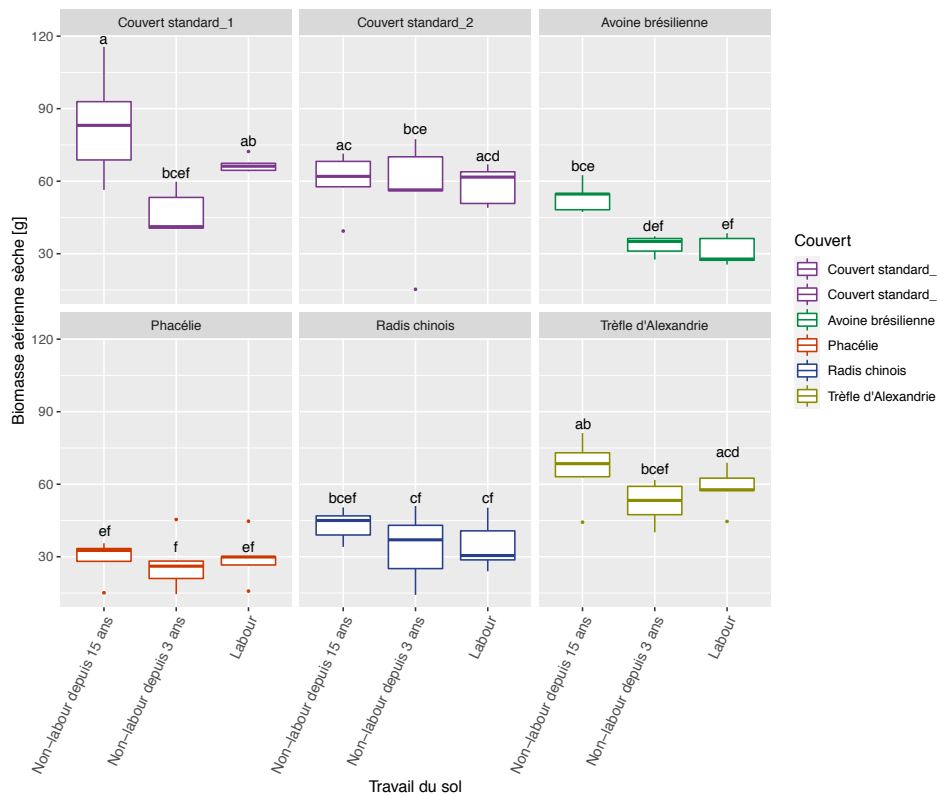


FIGURE 14 – Biomasse aérienne sèche en fonction des couverts en fonction du travail du sol pour l'essai 1. La surface de prélèvement est d'1 m².

Le test F sur les facteurs fixes de notre modèle nous indique que les facteurs «travail du sol» ($p\text{-val} = 5,628.10^{-5}$) et «couvert» ($p\text{-val} = 6,023.10^{-14}$) ont un effet significatif sur le modèle. Le facteur d'interaction «travail du sol:couvert» n'a pas d'effet significatif ($p\text{-val} = 0,0835$).

Les contrastes du facteur «couvert» et «travail du sol» nous confirment les tendances observées sur la figure 14 (Tableau 10).

TABLE 10 – Contrastes sur les facteurs fixes pour la biomasse aérienne pour l’essai 1.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Couvert standard _1	65,773	20,245	A
Couvert standard _2	57,760	15,258	A
Avoine brésilienne	39,347	11,558	B
Phacélie	28,467	9,435	C
Radis chinois	37,327	11,073	BC
Trèfle d’Alexandrie	58,860	11,544	A
Non-labour depuis 15 ans	55,777	21,083	A
Non-labour depuis 3 ans	41,503	16,290	B
Labour	46,487	17,073	B

4.1.9 Biomasse racinaire

Pour cette mesure, la variable quantitative observée est la biomasse racinaire se trouvant dans une carotte de sol de 30 cm de long sur 2 cm de diamètre, c’est-à-dire dans 94,2 cm³ de sol.

Il est important de noter que les données sur lesquelles nous travaillons pour cette mesure ne portent que sur les travées 1, 2 et 3. Pour rappel, une complication a réduit la taille de l’échantillonnage.

Le test F sur les facteurs fixes de notre modèle nous indique que le facteur «horizon» a un effet significatif sur le modèle ($p\text{-val} = 1,868.10^{-15}$). Les facteurs «travail du sol» ($p\text{-val} = 0,8514$) et «couvert» ($p\text{-val} = 0,4841$) n’ont pas d’effet significatif sur le modèle. Aucune interaction n’est significative dans le modèle : «travail du sol:couvert» ($p\text{-val} = 0,5418$), «travail du sol:horizon» ($p\text{-val} = 0,7413$), «couvert:horizon» ($p\text{-val} = 0,4828$) et «travail du sol:couvert:horizon» ($p\text{-val} = 0,9609$).

Les contrastes du tableau 11 nous présentent des écarts-types assez élevés partout. Aucune tendance ne ressort hormis une biomasse racinaire plus élevée dans les 30 premiers centimètres.

TABLE 11 – Contrastes sur les facteurs fixes pour la biomasse racinaire pour l’essai 1.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Couvert standard _1	0,011	0,011	A
Couvert standard _2	0,009	0,009	A
Avoine brésilienne	0,007	0,007	A
Phacélie	0,008	0,008	A
Radis chinois	0,006	0,006	A
Trèfle d’Alexandrie	0,011	0,011	A
Non-labour depuis 15 ans	0,009	0,013	A
Non-labour depuis 3 ans	0,009	0,017	A
Labour	0,007	0,01	A
0-30 cm	0,021	0,018	A
30-60 cm	0,002	0,003	B
60-90 cm	0,002	0,004	B

4.1.10 Résistance du sol à la pénétration

Pour cette mesure, la variable quantitative observée est la profondeur à laquelle la pression vaut 21 bar. Pour rappel, cette valeur de pression marque le moment où l’on stoppe la progression du pénétromètre dans le sol. Cette mesure représente donc la résistance du sol à la pénétration. Des valeurs élevées de profondeur indiquent une résistance faible, et *vice-versa*.

Sur la figure 15, la profondeur moyenne à laquelle la pression lue sur le pénétromètre atteint 21 bar est représentée pour chaque couvert dans chaque travail du sol. On observe qu’en non-labour depuis 15 ans, cette profondeur ne va jamais au-delà de 30 cm, tandis que le labour présente des profondeurs pouvant aller jusqu’à 50 cm pour certaines espèces. La tendance semble moins évidente concernant les différents couverts. La phacélie semble légèrement se démarquer, avec des profondeurs moins élevées pour les trois travaux du sol. Le trèfle d’Alexandrie et le radis chinois ont, eux, des profondeurs élevées pour les trois travaux du sol. Il est important de souligner le fait que les deux bandes de couvert standard en labour ont un écart assez élevé, ce qui pourrait indiquer un potentiel gradient d’hétérogénéité spatiale concernant la résistance du sol à cet endroit-là. On observe que les valeurs de non-labour depuis 15 ans sont relativement homogènes, ce qui n’est pas le cas pour les valeurs de labour et de non-labour depuis 3 ans qui varient fortement d’un couvert à l’autre.

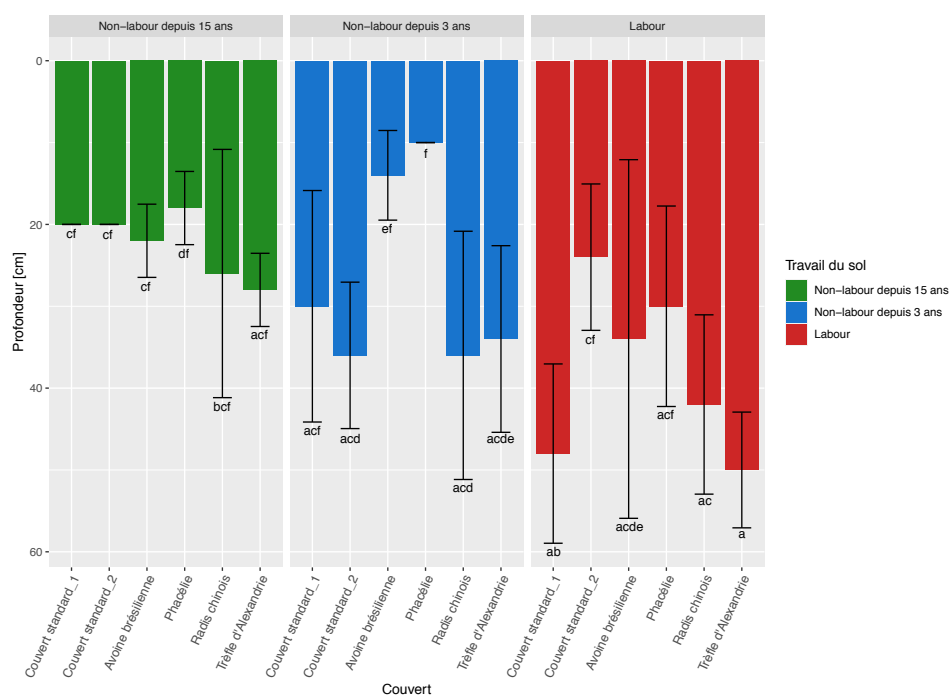


FIGURE 15 – Profondeur à laquelle la pression mesurée avec le pénétromètre atteint 21 bar en fonction de l'espèce semée et du travail du sol réalisé pour l'essai 1.

Le test F sur les facteurs fixes de notre modèle nous indique que le facteur «travail du sol» ($p\text{-val} = 0,001681$), le facteur «couvert» ($p\text{-val} = 1,256.10^{-5}$) et le facteur d'interaction «travail du sol:couvert» ($p\text{-val} = 0,005574$) ont un effet significatif sur le modèle.

Les contrastes nous indiquent que la résistance du sol est moins élevée en labour car on arrive à atteindre des horizons plus profonds. Au niveau des couverts, on observe que la résistance est plus élevée sous des couverts d'avoine brésilienne et de phacélie (Tableau 12).

TABLE 12 – Contrastes sur les facteurs fixes pour la résistance du sol pour l'essai 1.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Couvert standard _1	32,667	15,337	AB
Couvert standard _2	26,667	9,759	BC
Avoine brésilienne	23,333	14,96	CD
Phacélie	19,333	10,998	D
Radis chinois	34,667	14,573	AB
Trèfle d'Alexandrie	37,333	12,228	A
Non-labour depuis 15 ans	22,333	7,279	B
Non-labour depuis 3 ans	26,667	14,464	B
Labour	38	15,177	A

4.1.11 Corrélations

Les données de l'ensemble des mesures ont été compilées afin d'effectuer une analyse multivariée.

Dans l'analyse en composantes principales, les sept premières composantes permettent d'expliquer 82,71% de la variabilité des données. La première composante explique 52,7% de la variabilité des données à elle seule.

Dans l'annexe C.6 (Figure 34), on peut observer une corrélation positive entre le taux de couverture, le taux de croissance et la biomasse fraîche et sèche. Il y a également une corrélation forte entre la densité d'individus et la biomasse fraîche et sèche. Le pourcentage de levée est aussi corrélé positivement à la production de biomasse. Ces variables sont assez bien expliquées par la première dimension. De manière générale, le taux de couverture, le taux de croissance, la biomasse, la densité d'individus et le pourcentage de levée sont corrélés. La deuxième dimension est assez bien expliquée par le taux de stabilisation S de la litière et le taux de décomposition k de la matière organique, la résistance du sol, la densité d'adventices et la décomposition de la matière végétale par les vers de terre. La résistance du sol est assez bien corrélée à la décomposition de la matière végétale par les vers de terre.

On peut observer une distribution des points de gauche à droite en fonction du travail du sol. De gauche à droite on retrouve une tendance de non-labour depuis 3 ans, labour et non-labour depuis 15 ans. Les couverts en non-labour ont donc généralement de meilleures performances en ce qui concerne le taux de couverture, le taux de croissance, la production de biomasse, la densité d'individus et le pourcentage de levée. À l'inverse, les couverts en non-labour depuis 3 ans présentent généralement de mauvaises performances dans ces variables. Les couverts en labour sont assez fortement distribués le long de la première dimension, il est donc difficile de tirer une conclusion claire sur leurs performances.

Dans l'annexe C.6 (Figure 35), on peut observer une distribution des points de gauche à droite en fonction du couvert. À gauche on retrouve la phacélie, l'avoine brésilienne et le radis chinois tandis qu'à droite on retrouve les couverts standards et le trèfle d'Alexandrie. Le radis chinois est retrouvé principalement à gauche mais est fortement dispersé le long de la première dimension. Les couverts standards et le trèfle d'Alexandrie sont donc assez performants en ce qui concerne le taux de couverture, le taux de croissance, la production de biomasse, la densité d'individus et le pourcentage de levée.

Dans l'annexe C.6 (Figure 36), on peut observer les corrélations entre l'ensemble des variables. On observe une nouvelle fois une corrélation positive importante entre

les taux de couverture à chaque pas de temps, la biomasse fraîche et sèche, la densité d'individus, le taux de croissance et le pourcentage de levée.

4.2 Résultats de l'essai 2 - «Type de couvert»

4.2.1 Densité des espèces

Sur la figure 16, on constate une influence du type de semis -en pur ou en mélange- et de l'espèce sur la densité d'individus. La densité d'individus est plus élevée en pur qu'en mélange d'espèces, que ce soit pour le couvert standard ou alternatif. Dans le couvert standard en mélange, la densité d'individus est supérieure à celle du couvert alternatif en mélange. Néanmoins, le trèfle de Perse se démarque fortement avec une très grande densité d'individus.

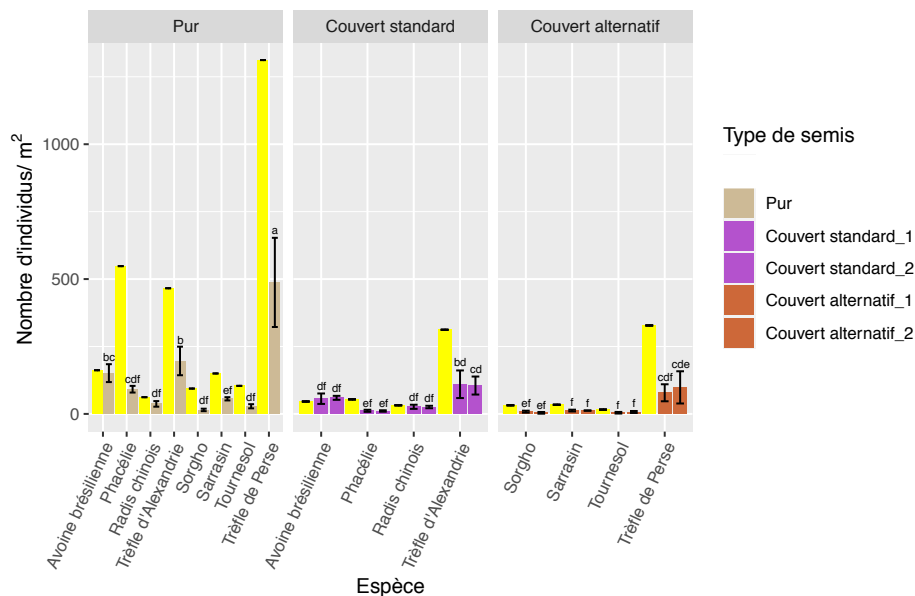


FIGURE 16 – Densité d'individus en fonction du type de semis pour l'essai 2. En jaune est représenté le nombre de graines semées.

Le test de Wald sur les facteurs fixes du modèle nous indique que les facteurs «espèce» ($p\text{-val} < 2,2 \cdot 10^{-16}$), «type de semis» ($p\text{-val} < 2,2 \cdot 10^{-16}$) et l'interaction «espèce:type de semis» ($p\text{-val} = 3,29 \cdot 10^{-12}$) ont tous un effet significatif sur le modèle.

Les contrastes du tableau 13 nous confirment les tendances observées sur la figure 16.

TABLE 13 – Contrastes sur les facteurs fixes pour la densité d’individus pour l’essai 2.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Avoine brésilienne	44,533	25,031	C
Phacélie	19	19,932	D
Radis chinois	14,867	4,565	DE
Trèfle d’Alexandrie	68,6	30,612	B
Sorgho	4,533	2,9	E
Sarrasin	13,467	10,796	DE
Tournesol	6,667	6,043	E
Trèfle de Perse	110,733	108,545	A
Pur	66,4	79,5	A
Couvert standard_1	25,6	23,1	B
Couvert standard_2	25,2	20,2	B
Couvert alternatif_1	13	17,3	C
Couvert alternatif_2	15,2	24,4	C

4.2.2 Pourcentage de levée

Sur la figure 17, on distingue une différence de pourcentage de levée entre les espèces. L’avoine brésilienne et le radis chinois semblent être les deux espèces qui ont le pourcentage de levée le plus élevé. Certaines valeurs dépassent les 100% de levée. Cette erreur est probablement due au biais de comptage expliqué précédemment. Les groupes présentés sur la figure 17 indiquent que les espèces semées en couvert ont des pourcentages de levée plus élevés que celles semées en pur. Les espèces du couvert standard ont un pourcentage de levée plus élevé que celles du couvert alternatif, particulièrement l’avoine brésilienne et le radis chinois.

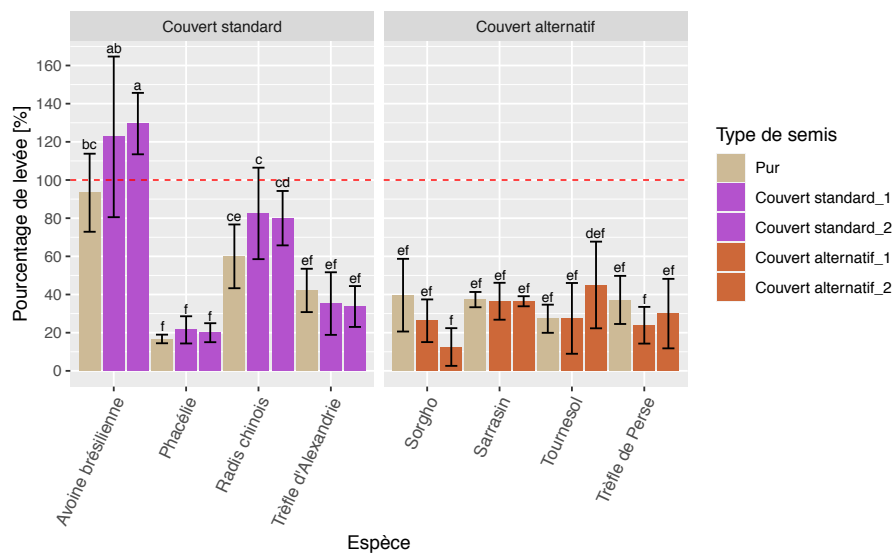


FIGURE 17 – Pourcentage de levée des espèces en fonction du type de semis pour l’essai 2. La ligne pointillée rouge correspond à 100% de pourcentage de levée.

Le test de Wald sur les facteurs fixes de notre modèle nous indique que le facteur «espèce» ($p\text{-val} < 2,2 \cdot 10^{-16}$) et le facteur d'interaction «espèce:type de semis» ($p\text{-val}=0,000164$) ont tous un effet significatif sur le modèle. En revanche le facteur «type de semis» ($p\text{-val}=0,082996$) n'a pas d'effet sur le modèle.

Les contrastes du tableau 14 nous confirment les tendances observées sur la figure 17.

TABLE 14 – Contrastes sur les facteurs fixes pour le pourcentage de levée pour l'essai 2.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Avoine brésilienne	115,168	31,041	A
Phacélie	19,399	5,222	D
Radis chinois	74,167	20,259	B
Trèfle d'Alexandrie	37,039	12,681	C
Sorgho	26,135	17,290	CD
Sarrasin	36,7598	5,782	C
Tournesol	33,269	18,298	CD
Trèfle de Perse	30,356	14,071	CD
Pur	44,2	25,2	B
Couvert standard_1	65,5	47,4	A
Couvert standard_2	65,8	45,5	A
Couvert alternatif_1	28,5	12,7	B
Couvert alternatif_2	31	18,7	B

4.2.3 Densité des adventices

Concernant la diversité des adventices, l'analyse en composantes principales ne donne pas de résultats concluants. La diversité des adventices n'est donc pas fonction du couvert. Les analyses ont donc été réalisées sur la densité d'adventices totale.

Sur la figure 18, il semble y avoir une plus grande densité d'adventices dans les couverts issus du couvert alternatif que dans les couverts issus du couvert standard. On ne distingue pas de différence entre le temps 1 et le temps 2. Le tournesol se démarque avec des valeurs moyennes plus élevées.

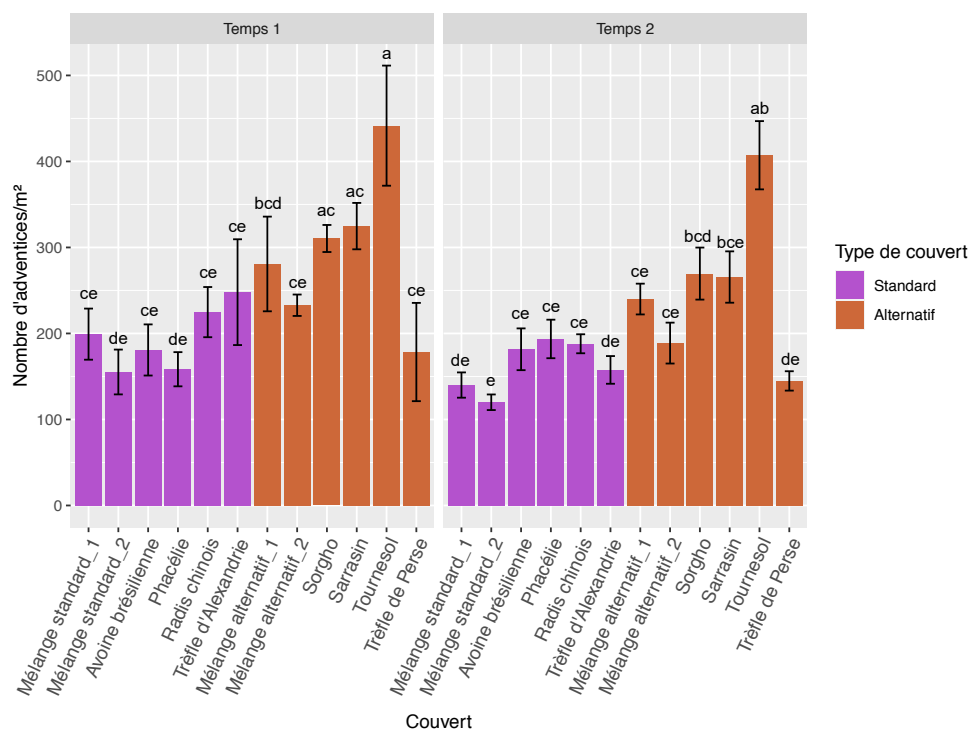


FIGURE 18 – Densité d'adventices en fonction du couvert et du temps. Les temps 1 et 2 correspondent aux dates de recensements soit 22 et 44 jours après le semis.

Le test de Wald sur les facteurs fixes du modèle indique que les facteurs «couvert» ($p\text{-val} < 2,2 \cdot 10^{-16}$) et «temps» ($p\text{-val} = 0,0002806$) ont un effet significatif sur le modèle. Le facteur d'interaction «couvert:temps» ($p\text{-val} = 0,4093250$) n'a pas d'effet significatif sur le modèle.

Les contrastes sur les facteurs fixes nous confirment les tendances observées sur la figure 11 et indiquent tout de même une densité plus élevée d'adventices au temps 1 qu'au temps 2 (Tableau 15).

TABLE 15 – Contrastes sur les facteurs fixes de la densité d’adventices.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Temps 1	122	54,6	A
Temps 2	104	43,2	B
Couvert standard_1	84,8	27,1	DE
Couvert standard_2	68,8	20,6	E
Avoine brésilienne	90,6	25,6	DE
Phacélie	88	22	DE
Radis chinois	103	22,9	CD
Trèfle d’Alexandrie	101	48,6	D
Couvert alternatif_1	130	40	BC
Couvert alternatif_2	105	21,3	CD
Sarrasin	148	31	B
Sorgho	145	25,1	B
Tournesol	212	54,3	A
Trèfle de Perse	80,8	39,8	D

4.2.4 Taux de couverture du sol

Sur la figure 19, on peut observer une différence de taux de couverture entre couverts. Le comportement des courbes de couverts issus du couvert alternatif n’est pas en adéquation avec la date de destruction du couvert alternatif. Ceci est dû à un biais de mesure qui sera développé dans la partie «Discussion». Les valeurs mesurées après cette date ne sont pas prises en compte dans le modèle.

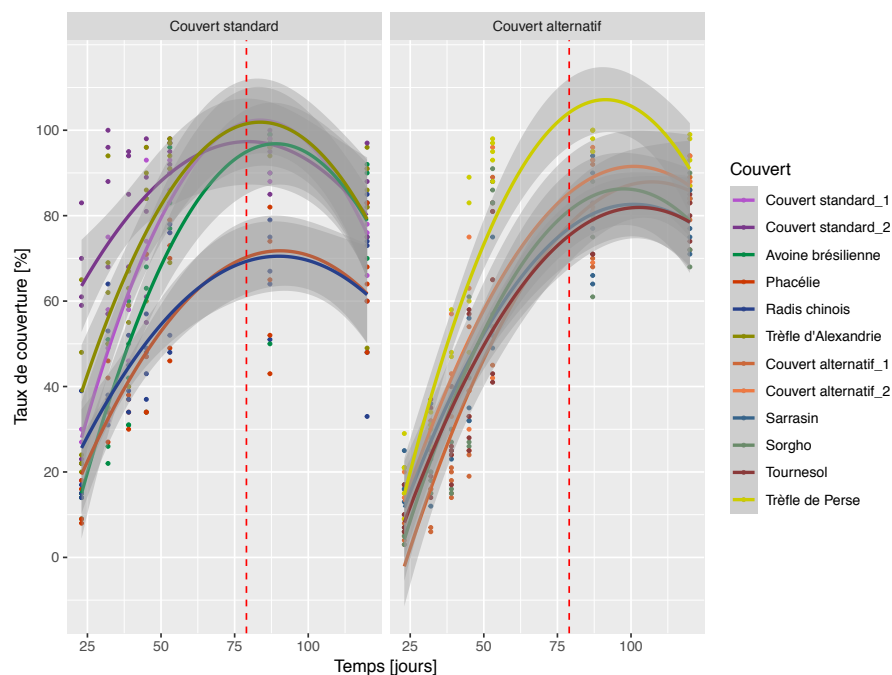


FIGURE 19 – Taux de couverture des couverts en fonction du temps pour l’essai 2. Le temps représente le nombre de jours écoulés depuis le semis. La ligne rouge en pointillés représente la date de destruction des couverts alternatifs par le froid.

Le test F sur les facteurs fixes de notre modèle nous indique que les facteurs «couvert» ($p\text{-val}=10^{-9}$), «temps» ($p\text{-val} < 2,2.10^{-16}$) et le facteur d'interaction «couvert:temps» ($p\text{-val}=0,0003148$) ont un effet significatif sur le modèle.

À chaque pas de temps, une ANOVA a été réalisée afin de comparer les couverts entre eux. Les résultats de ces groupes sont observables dans l'annexe D.1 (Figure 37).

4.2.5 Taux de croissance du couvert

Des régressions linéaires ont été réalisées sur les valeurs de taux de couverture en fonction du temps pour chaque couvert (sur les 5 premiers temps). Cela nous a permis d'obtenir la pente soit le taux de croissance (en %) par jour. Une analyse de la variance a été effectuée sur le taux de croissance.

Le test F sur le facteur fixe de notre modèle nous indique que le facteur «couvert» ($p\text{-val}=2,421.10^{-15}$) a un effet significatif sur le modèle.

Les contrastes du tableau 16 nous indiquent que le couvert standard est le couvert ayant le taux de croissance le plus élevé. À part pour le trèfle de Perse, les couverts issus du couvert alternatif ont le taux de croissance le moins élevé. Il y a une différence significative entre les deux bandes de couvert standard et les deux bandes de couvert alternatif.

TABLE 16 – Contrastes sur les facteurs fixes du taux de croissance pour l'essai 2.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Couvert standard_1	1,6	0,192	BC
Couvert standard_2	1,97	0,263	A
Avoine brésilienne	1,33	0,258	DE
Phacélie	1,09	0,178	FG
Radis chinois	1,13	0,169	EF
Trèfle d'Alexandrie	1,71	0,248	B
Couvert alternatif_1	0,784	0,125	H
Couvert alternatif_2	1,1	0,204	FG
Sarrasin	0,988	0,129	FGH
Sorgho	0,961	0,151	FGH
Tournesol	0,91	0,149	G
Trèfle de Perse	1,4	0,093	CD

4.2.6 Décomposition de la matière organique par les microorganismes

TAUX DE STABILISATION S DE LA LITIÈRE

Dans l'annexe D.4 (Figure 40), nous n'observons pas de grandes différences de taux de stabilisation entre les couverts. Il y a une différence significative entre les deux bandes de couvert standard. Le sarrasin, le tournesol et le couvert standard n°2 ont des taux de stabilisation plus élevés que le couvert standard n°1 et le trèfle d'Alexandrie.

Le test F sur le facteur fixe nous indique que le facteur «couvert» ($p\text{-val}=0,02456$) a un effet significatif sur le modèle.

Les contrastes du tableau 17 nous confirment les tendances observées dans l'annexe D.4 (Figure 40).

TABLE 17 – Contrastes sur l'effet fixe pour le taux de stabilisation S de la litière pour l'essai 2.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Couvert standard_1	0,238	0,193	C
Couvert standard_2	0,348	0,062	A
Avoine brésilienne	0,314	0,106	AB
Phacélie	0,315	0,184	AB
Radis chinois	0,328	0,132	AB
Trèfle d'Alexandrie	0,28	0,149	BC
Couvert alternatif_1	0,315	0,118	AB
Couvert alternatif_2	0,303	0,088	ABC
Sarrasin	0,354	0,135	A
Sorgho	0,323	0,062	AB
Tournesol	0,367	0,04	A
Trèfle de Perse	0,327	0,045	AB

TAUX DE DÉCOMPOSITION K DE LA MATIÈRE ORGANIQUE

La figure 41 de l'annexe D.4 ne nous permet pas d'observer de différence de taux de décomposition de la matière organique entre les couverts issus du couvert standard et ceux issus du couvert alternatif. Le couvert standard n°2 se démarque avec un taux élevé de décomposition et la phacélie avec un faible taux de décomposition.

Le test F sur le facteur fixe nous indique que le facteur «couvert» ($p\text{-val}=0,000231$) a un effet significatif sur le modèle.

Les contrastes du tableau 18 nous confirment les tendances observées sur la figure 41 de l'annexe D.4.

TABLE 18 – Contrastes de l’effet fixe pour le taux de décomposition k de la matière organique pour l’essai 2.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Couvert standard_1	0,009	0,003	BCDE
Couvert standard_2	0,011	0,004	A
Avoine brésilienne	0,011	0,004	AB
Phacélie	0,007	0,003	E
Radis chinois	0,01	0,005	ABC
Trèfle d’Alexandrie	0,01	0,005	AB
Couvert alternatif_1	0,008	0,003	DE
Couvert alternatif_2	0,009	0,004	BCDE
Sarrasin	0,01	0,0058	ABC
Sorgho	0,008	0,004	CDE
Tournesol	0,009	0,003	ABCDE
Trèfle de Perse	0,011	0,043	AB

4.2.7 Décomposition de la matière végétale par les vers de terre

Dans l’annexe D.5 (Figure 42), nous ne distinguons pas de différence de décomposition de la paille par les vers de terre entre les différents couverts. Certains couverts semblent se démarquer légèrement comme l’avoine brésilienne et le trèfle de Perse.

Le test F sur le facteur fixe de notre modèle nous indique que le facteur «couvert» ($p\text{-val}=0,04877$) a un effet significatif sur le modèle.

Les contrastes du tableau 19 nous confirment les tendances observées dans l’annexe D.5 (Figure 42).

TABLE 19 – Contrastes de l'effet fixe pour la décomposition de la paille par les vers de terre pour l'essai 2.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Couvert standard_1	6,92	4,415	AB
Couvert standard_2	7,02	1,301	AB
Avoine brésilienne	12,36	3,779	A
Phacélie	9,32	3,303	A
Radis chinois	8	3,089	A
Trèfle d'Alexandrie	6,36	2,009	AB
Couvert alternatif_1	5,52	4,782	AB
Couvert alternatif_2	6,4	3,624	AB
Sarrasin	8,1	5,314	A
Sorgho	5,06	4,594	AB
Tournesol	8,8	3,965	A
Trèfle de Perse	2,66	4,592	B

4.2.8 Biomasse aérienne

La figure 20 nous indique une nette différence entre la biomasse sèche fournie par les couverts issus du couvert standard et ceux issus du couvert alternatif, excepté pour le trèfle de Perse qui se démarque.

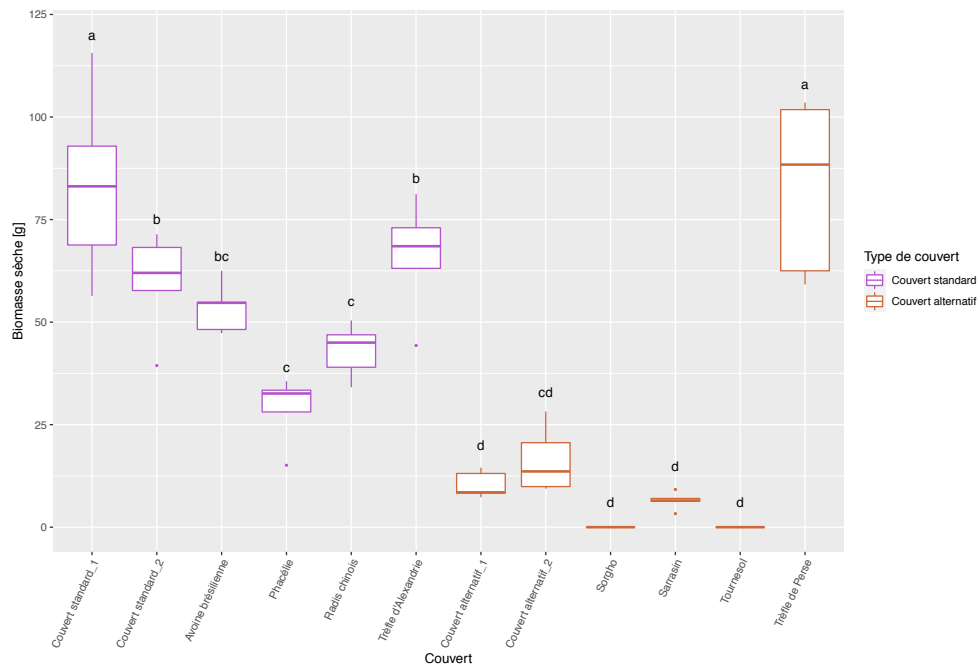


FIGURE 20 – Biomasse aérienne sèche en fonction de l'espèce semée pour l'essai 2. La surface de prélèvement est d'1 m².

Le test F sur le facteur fixe de notre modèle nous confirme que le facteur «couvert» ($p\text{-val} = 2,2 \cdot 10^{-16}$) a un effet significatif sur le modèle.

Les contrastes du tableau 20 nous indiquent plusieurs choses. La plupart des couverts issus du couvert standard ont fourni significativement plus de biomasse que la plupart des couverts issus du couvert alternatif. On remarque également que le sorgho et le tournesol n'ont fourni aucune biomasse, ces couverts étant complètement morts au moment de la prise de mesure.

TABLE 20 – Contrastes sur le facteur fixe pour la biomasse aérienne pour l'essai 2.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Couvert standard_1	59,74	12,555	A
Couvert standard_2	7,02	1,301	B
Avoine brésilienne	53,5	6,137	BC
Phacélie	28,96	8,214	C
Radis chinois	43,08	6,503	C
Trèfle d'Alexandrie	66,02	13,8358	B
Couvert alternatif_1	10,34	3,229	D
Couvert alternatif_2	16,34	7,999	CD
Sarrasin	6,46	2,11	D
Sorgho	0	0	D
Tournesol	0	0	D
Trèfle de Perse	83,08	21,151	A

4.2.9 Biomasse racinaire

Les complications concernant cette mesure, expliquées précédemment, ne nous ont malheureusement pas permises de traiter les données de l'essai 2.

4.2.10 Résistance du sol à la pénétration

Le test F sur le facteur fixe de notre modèle nous indique que le facteur «couvert» ($p\text{-val}=0,3591$) n'a pas d'effet significatif sur le modèle.

Les contrastes du tableau 21 nous indiquent en effet une certaine homogénéité au sein des couverts.

TABLE 21 – Contrastes sur le facteur fixe pour la résistance du sol pour l'essai 2.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Couvert standard_1	20	0	AB
Couvert standard_2	20	0	AB
Avoine brésilienne	22	4,472	AB
Phacélie	18	4,472	B
Radis chinois	26	15,166	AB
Trèfle d'Alexandrie	28	4,472	AB
Couvert alternatif_1	22	4,472	AB
Couvert alternatif_2	30	17,321	AB
Sarrasin	22	8,364	AB
Sorgho	22	4,472	AB
Tournesol	20	0	AB
Trèfle de Perse	30	1,142	A

4.2.11 Corrélations

Dans l'analyse en composantes principales, les huit premières composantes permettent d'expliquer 81,39% de la variance des données. La première composante explique 35,76 % de la variabilité des données.

Dans l'annexe D.6 sur la figure 44, on peut observer une corrélation positive entre le taux de couverture, la densité d'individus, le pourcentage de levée et la biomasse fraîche et sèche. Ces variables sont assez représentatives de la première dimension. La deuxième dimension est assez bien expliquée par le taux de stabilisation S de la litière et le taux de décomposition k de la matière organique, la résistance du sol, la densité d'adventices, le taux de croissance et la décomposition de la matière organique par les vers de terre. La résistance du sol est assez bien corrélée à la décomposition de la paille par les vers de terre. Le taux de croissance est corrélé négativement à la densité d'adventices au temps 2 (44 jours après semis).

On peut observer une distribution des points de gauche à droite en fonction du couvert. Les couverts alternatifs sont plus présents du côté gauche mais quelques points se trouvent sur la droite de la figure : ils correspondent majoritairement au trèfle de Perse. Les couverts standards sont largement distribués le long de la première dimension. Les couverts alternatifs semblent moins performants en termes de taux de couverture, biomasse produite, densité d'individus et pourcentage de levée qui sont les composantes fortement liées à l'axe 1.

Plus en détail, on peut observer une distribution des points de gauche à droite en fonction de l'espèce. À gauche on retrouve la phacélie, le sorgho, le sarrasin, le tournesol, le couvert alternatif et le radis chinois. À droite on retrouve le couvert standard,

l'avoine brésilienne, le trèfle de Perse et le trèfle d'Alexandrie. Ces couverts sont donc assez performants en ce qui concerne le taux de couverture, la production de biomasse, la densité d'individus et le pourcentage de levée. En revanche, les autres couverts sont peu performants pour ces variables.

Dans l'annexe D.6 sur la figure 43, on peut observer les corrélations entre l'ensemble des variables. On observe une nouvelle fois une corrélation positive entre les taux de couverture à chaque pas de temps, la biomasse fraîche et sèche, la densité d'individus et le pourcentage de levée.

4.3 Résultats de l'essai 3 - «Couvert mixte»

4.3.1 Densité des espèces

On observe une plus grande densité du trèfle d'Alexandrie et du trèfle de Perse par rapport aux autres couverts (Figure 21). Les espèces du couvert standard semblent être plus abondantes que les espèces du couvert alternatif et du couvert mixte.

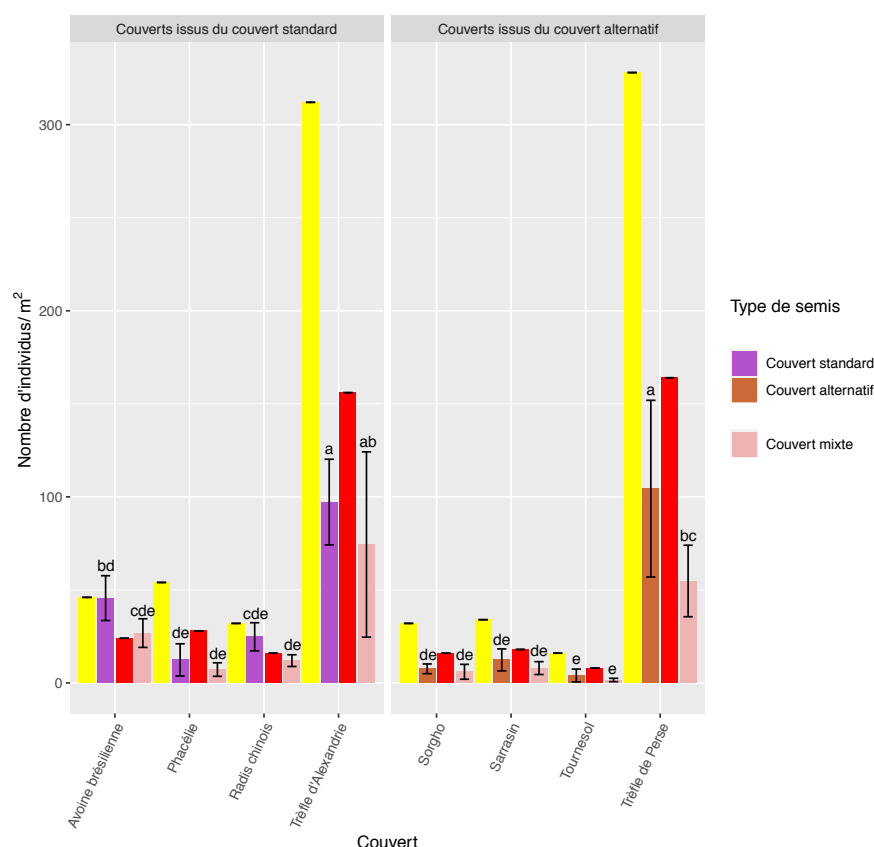


FIGURE 21 – Nombre d'espèces par m^2 en fonction du type de semis pour l'essai 3. Le type de semis est considéré comme couvert standard ou alternatif si l'espèce est semée en mélange de 4 espèces et comme couvert mixte si l'espèce est semée en mélange de 8 espèces. En jaune est représenté le nombre de graines semées pour les mélanges de 4 espèces. En rouge est représenté le nombre de graines semées pour les mélanges de 8 espèces.

Le test de Wald sur les facteurs fixes de notre modèle nous indique que les facteurs «espèce» ($p\text{-val} < 2,2 \cdot 10^{-16}$) et «type de semis» ($p\text{-val} = 2,281 \cdot 10^{-8}$) ont un effet significatif sur le modèle. Le facteur d'interaction «espèce:type de semis» ($p\text{-val} = 0,8399$) n'a pas d'effet significatif sur le modèle.

Les contrastes du tableau 22 nous confirment les tendances observées sur la figure 21.

TABLE 22 – Contrastes sur les facteurs fixes pour la densité d'individus pour l'essai 3.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Avoine brésilienne	18,1	6,871	B
Phacélie	4,9	3,414	C
Radis chinois	9,2	4,341	C
Trèfle d'Alexandrie	42,9	19,244	A
Sarrasin	5,1	2,558	C
Sorgho	3,4	1,647	C
Tournesol	1,4	1,35	C
Trèfle de Perse	39,8	21,503	A
Couvert standard	22,5	17,846	A
Couvert alternatif	16,05	24,132	B
Couvert mixte	11,925	15,371	B

4.3.2 Pourcentage de levée

Sur la figure 22, on distingue une différence entre type de semis et espèces. Le couvert standard semble présenter des pourcentages de levée supérieurs au couvert alternatif. L'avoine brésilienne et le radis chinois semblent encore être les espèces ayant le pourcentage de levée le plus élevé.

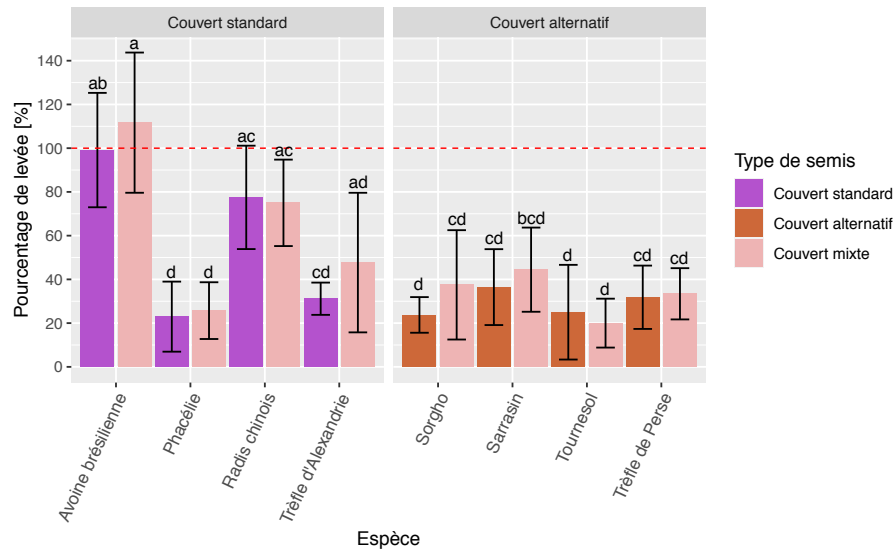


FIGURE 22 – Pourcentage de levée en fonction du type de semis pour l’essai 3. Le type de semis est considéré comme couvert standard ou alternatif si l’espèce est semée en mélange de 4 espèces et comme couvert mixte si l’espèce est semée en mélange de 8 espèces.

Le test de Wald sur les facteurs fixes de notre modèle nous indique que le facteur «espèce» ($p\text{-val} < 2,2 \cdot 10^{-16}$) a un effet significatif sur le modèle. Le facteur «type de semis» ($p\text{-val} = 0,3697$) et le facteur d’interaction «espèce:type de semis» ($p\text{-val} = 0,6147$) n’ont pas d’effet significatif sur le modèle.

Les contrastes du tableau 23 nous confirment les tendances observées sur la figure 22.

TABLE 23 – Contrastes sur les facteurs fixes pour la densité d’individus pour l’essai 3.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Avoine brésilienne	105,398	28,365	A
Phacélie	24,34	13,818	CD
Radis chinois	76,25	20,582	B
Trèfle d’Alexandrie	40,455	17,78	CD
Sarrasin	30,625	18,969	C
Sorgho	22,5	16,457	D
Tournesol	39,422	23,512	CD
Trèfle de Perse	32,62	12,445	CD
Couvert standard	57,7	37,2	A
Couvert alternatif	29,3	15,8	B
Couvert mixte	49,4	34,8	AB

4.3.3 Densité des adventices

L’analyse en composantes principales ne donne pas de résultats concluants. La diversité des adventices n’est pas fonction du couvert. Les analyses ont donc été faites sur

la densité d'adventices totale.

Sur la figure 23, on observe une différence de densité d'adventices entre couverts. Il semble y avoir une densité d'adventices plus élevée dans le couvert alternatif que dans le couvert standard. Le couvert mixte semble se situer entre les deux.

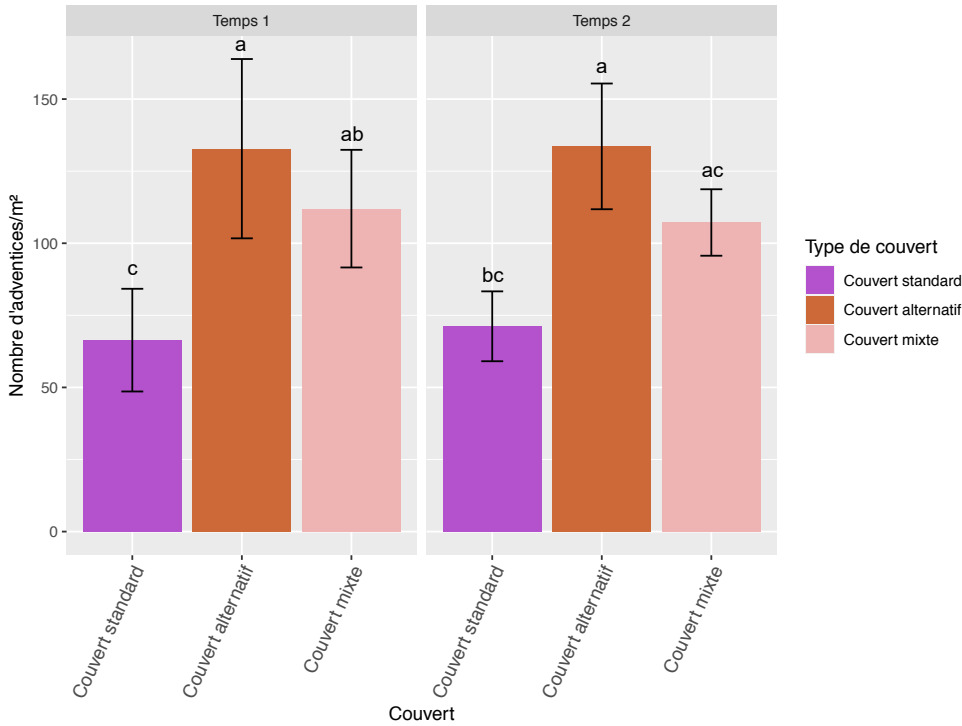


FIGURE 23 – Nombre d'adventices des couverts par m² en fonction du temps pour l'essai 3. Les temps 1 et 2 correspondent aux dates de recensements soit 22 et 44 jours après le semis.

Le test de Wald sur les facteurs fixes de notre modèle nous indique que le facteur «couvert» ($p\text{-val} < 2,565 \cdot 10^{-6}$) a un effet significatif sur le modèle. Le facteur «temps» ($p\text{-val} = 0,8765$) et le facteur d'interaction «couvert:temps» ($p\text{-val} = 0,9326$) n'ont pas d'effet significatif sur le modèle.

Les contrastes du tableau 24 nous confirment les tendances observées sur la figure 23.

TABLE 24 – Contrastes sur les facteurs fixes pour la densité d'adventices pour l'essai 3.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Couvert standard	34,4	14,4	B
Couvert alternatif	66,6	25,3	A
Couvert mixte	54,8	15,7	B
Temps 1	51,9	26,3	A
Temps 2	52	19,8	A

4.3.4 Taux de couverture du sol

Sur la figure 24, on distingue une différence de taux de couverture entre couverts. Le comportement de la courbe du couvert alternatif n'est pas en adéquation avec la date de destruction par le froid. Cela est dû à un biais dans la mesure du taux de couverture. Cela sera expliqué dans la partie «Discussion». Les valeurs mesurées par après ne sont donc pas prises en compte dans le modèle. Le couvert standard semble avoir un taux de couverture plus élevé que les autres couverts.

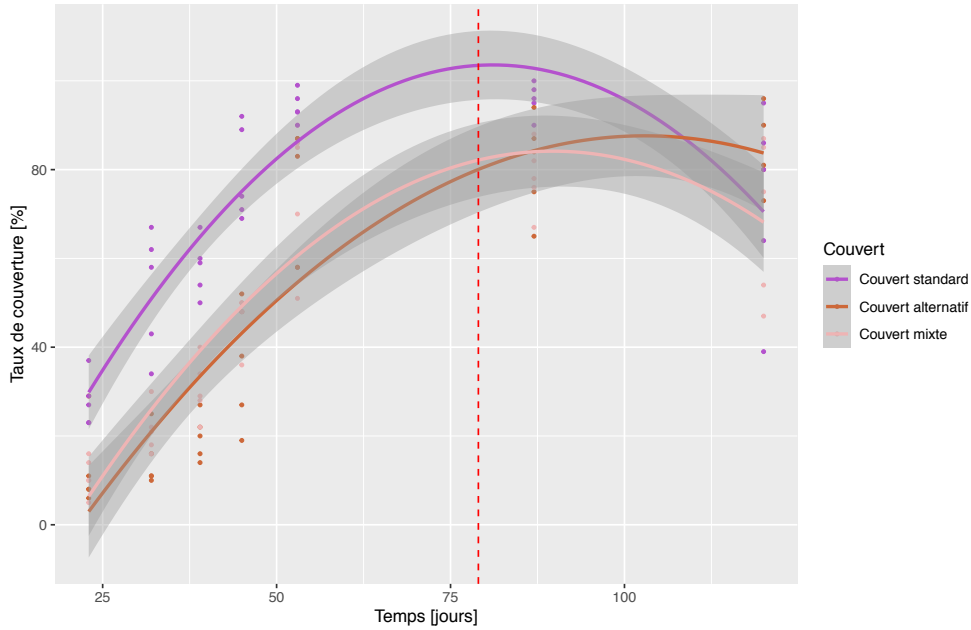


FIGURE 24 – Taux de couverture en fonction du type de couvert pour l'essai 3. Le temps représente le nombre de jours écoulés depuis le semis. La ligne rouge en pointillés représente la date de destruction des couverts alternatifs par le froid.

Le test F sur le facteur fixe de notre modèle nous indique que le facteur «temps» ($p\text{-val} < 2,2 \cdot 10^{-16}$) a un effet significatif sur le modèle. Le facteur fixe «couvert» ($p\text{-val} = 0,1243$) n'a pas d'effet significatif sur le modèle.

À chaque pas de temps, une ANOVA a été réalisée afin de comparer les couverts entre eux. Les résultats de ces groupes sont observables dans l'annexe E.1 (Figure 45) qui est à lire par pas de temps.

4.3.5 Taux de croissance du couvert

Le test F sur le facteur fixe de notre modèle nous indique que le facteur «couvert» ($p\text{-val} = 2,004 \cdot 10^{-7}$) a un effet significatif sur le modèle.

Les contrastes du tableau 25 nous indiquent que le couvert standard a un taux de croissance plus élevé que le couvert alternatif et le couvert mixte.

TABLE 25 – Contrastes sur le facteur fixe pour le taux de croissance pour l'essai 3.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Couvert standard	1,66	0,107	A
Couvert alternatif	0,902	0,111	B
Couvert mixte	1,05	0,101	B

4.3.6 Décomposition de la matière organique par les microorganismes

TAUX DE STABILISATION S DE LA LITIÈRE

Le test F sur le facteur fixe de notre modèle nous indique que le facteur «couvert» (p-val=0,7473) n'a pas d'effet significatif sur le modèle. Il n'y a pas de différence significative de taux de stabilisation S entre les trois couverts (Annexe E.4 Tableau 33).

TAUX DE DÉCOMPOSITION K DE LA MATIÈRE ORGANIQUE

Le test F sur le facteur fixe de notre modèle nous indique que le facteur «couvert» (p-val=0,6982) n'a pas d'effet significatif sur le modèle. Il n'y a pas de différence significative de taux de décomposition k entre les trois couverts (Annexe E.4 Tableau 34).

4.3.7 Décomposition de la matière organique par les vers de terre

Le test F sur le facteur fixe de notre modèle nous indique que le facteur «couvert» (p-val = 0,427) n'a pas d'effet significatif sur le modèle. Il n'y a pas de différence significative de décomposition de la paille par les vers de terre entre les 3 types de couvert (Annexe E.5 Tableau 35).

4.3.8 Biomasse aérienne

Sur la figure 25, on observe que le couvert standard fournit plus de biomasse que le couvert alternatif. Le couvert mixte produit une biomasse intermédiaire (Tableau 26).

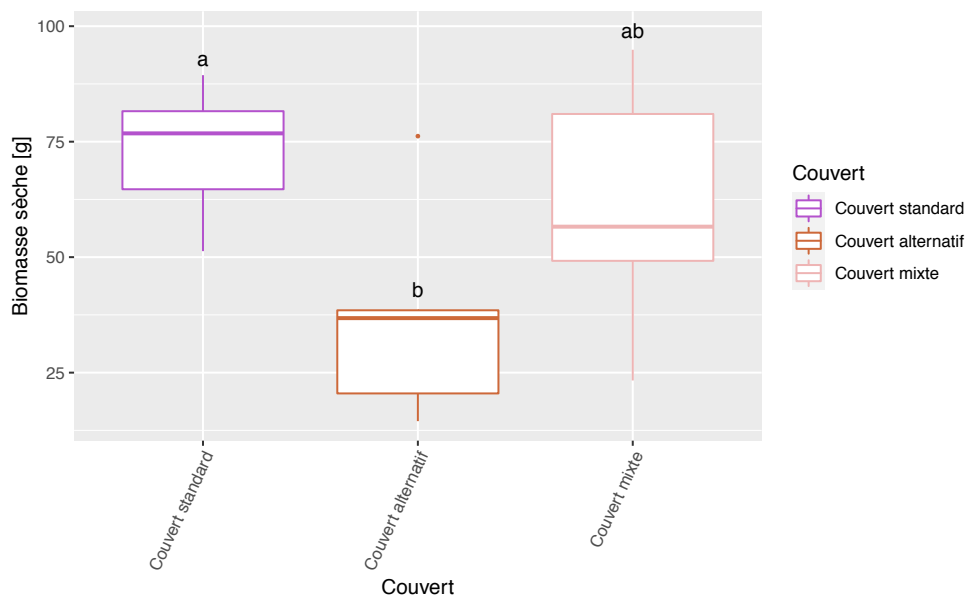


FIGURE 25 – Biomasse aérienne sèche en fonction du type de couvert pour l’essai 3. La surface de prélèvement est de 1 m².

Le test F sur le facteur fixe de notre modèle nous indique que le facteur «couvert» ($p\text{-val} = 0,0406$) n’a pas d’effet significatif sur le modèle. Néanmoins, les tests de contrastes nous indiquent que le couvert standard a fourni significativement plus de biomasse que le couvert alternatif.

TABLE 26 – Contrastes sur le facteur fixe pour la biomasse aérienne pour l’essai 3.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Couvert standard	72,76	14,974	A
Couvert alternatif	37,3	24,068	AB
Couvert mixte	61	27,969	B

4.3.9 Biomasse racinaire

Les complications concernant cette mesure, expliquées précédemment, ne nous ont malheureusement pas permises de traiter les données de l’essai 3.

4.3.10 Résistance du sol à la pénétration

Le test F sur le facteur fixe de notre modèle nous indique que le facteur «couvert» ($p\text{-val} = 0,1613$) n’a pas d’effet significatif sur le modèle (Annexe E.6 Tableau 36).

4.3.11 Corrélations

Dans l’analyse en composantes principales, les cinq premières composantes permettent d’expliquer 85,13% de la variabilité des données. La première composante ex-

plique 40,23% de la variabilité des données.

Dans l'annexe E.7 (Figure 48), on peut observer une corrélation positive entre le taux de couverture, la densité d'individus, le pourcentage de levée et la biomasse fraîche et sèche. Ces variables sont corrélées négativement à la densité d'adventices au temps 2 (44 jours après semis). Toutes ces variables sont assez représentatives de la première dimension. La deuxième dimension est assez bien expliquée par le taux de stabilisation S de la litière, la résistance du sol, le nombre d'individus et la densité d'adventices au temps 1. Le taux de croissance est corrélé à la densité d'adventices au temps 1 (22 jours après semis).

On peut observer une distribution des points de gauche à droite en fonction du couvert. Le couvert standard est plus présent du côté gauche tandis que le couvert alternatif et mixte se trouvent du côté droit. Les couverts alternatif et mixte semblent donc moins performants en termes de taux de couverture, biomasse produite, la densité d'individus et pourcentage de levée.

Dans l'annexe E.7 (Figure 49), on peut observer les corrélations entre l'ensemble des variables. On observe une nouvelle fois une corrélation positive entre les taux de couverture à chaque pas de temps, la biomasse fraîche et sèche, la densité d'individus et le pourcentage de levée.

4.4 Résumé des résultats

Un tableau récapitulatif des résultats est disponible en annexe F.

5 Discussion

5.1 Conséquence de l'été pluvieux sur notre expérience

L'été 2021, précédant l'établissement du couvert, a été exceptionnellement pluvieux. La récolte de la culture précédente, l'épeautre, a dû être retardée car la moisson ne pouvait se faire dans ces conditions trop humides. Par faute de temps, un seul passage au vibroculteur a été réalisé. Cette opération a un but de déchaumage et de préparation du lit de semences. Dans de bonnes conditions, deux passages à la déchaumeuse sont conseillés afin d'assurer l'enfouissement des chaumes et limiter les repousses. La préparation du lit de semences a été réalisée sur une terre trop humide, les dents vibrantes n'ont pas permis de correctement casser les mottes de terre. Le semis a été réalisé tardivement le 6 septembre 2021, sur un lit de semences dont la terre n'était pas suffisamment fine.

Les conséquences de l'été pluvieux ont donc été un mauvais lit de semences, un semis tardif et de fortes repousses d'épeautre. Ces facteurs ont à eux seuls influencé l'ensemble de notre expérience par l'impact qu'ils ont eu sur le développement des couverts.

CONSÉQUENCE DU MAUVAIS LIT DE SEMENCES, DU RETARD DE SEMIS ET DES REPOUSSES D'ÉPEAUTRE

D'une part, une terre fine est un critère important pour une bonne germination des graines. Certaines espèces sont plus exigeantes que d'autres concernant la qualité du semis et voient leur germination fortement impactée par une mauvaise préparation du lit de semences.

D'autre part, le retard de semis implique que le semis et le développement de la plante se réalisent dans des conditions de température, d'humidité et de photopériode non optimales. Cela a pour conséquence une mauvaise germination des graines (Toom et al. 2019). Le retard de semis a aussi laissé l'occasion à l'épeautre de germer et ainsi de rentrer en compétition avec nos cultures principales.

Une faible germination a pour conséquence un faible taux de couverture, une faible production de biomasse et une porte d'entrée pour les adventices.

5.2 Discussion des résultats par mesure

Les résultats vont être discutés chronologiquement, en dissociant les essais lorsque les hypothèses et observations pour chacun d'eux divergent et en les regroupant lorsque les hypothèses et observations convergent. Les résultats seront discutés sous la loupe des

éventuels biais ayant entaché la mesure. Enfin, une critique du protocole expérimental sera faite pour chaque mesure.

5.2.1 Densité d'individus et pourcentage de levée

Via la mesure de la densité d'individus et du pourcentage de levée, nous avons pu évaluer la capacité des espèces à lever dans les conditions de notre étude.

Il est difficile de comparer nos données de pourcentage de levée avec des données d'études précédentes car beaucoup de facteurs diffèrent entre les études. Néanmoins, une étude menée en laboratoire par Tribouillois et al. (2016) a déterminé la capacité germinative d'espèces de couverture en fonction de différentes valeurs de température et d'humidité. Les températures minimales, optimales et maximales de germination ont été évaluées pour chaque espèce étudiée. Les résultats montrent que le taux de germination augmente graduellement de la température minimale à optimale puis décline rapidement jusqu'à atteindre la température maximale. Pour l'ensemble des espèces semées dans nos essais, on constate que la température de germination a été inférieure à la température de germination optimale. Le semis a été réalisé le 6 septembre 2021, la moyenne de température pour le mois de septembre a été de 16,6°C or la gamme des températures de germination optimales de nos espèces se situe entre 21°C et 35°C (Tribouillois et al. 2016).

ESSAI 1 «TRAVAIL DU SOL»

Des différences significatives entre espèces, travail du sol et type de semis ont été observées pour la densité d'individus et le pourcentage de levée.

Concernant l'effet du type de semis, la densité de chaque espèce est plus élevée dans les cultures pures que dans le mélange. Cependant, le pourcentage de levée des espèces est significativement plus élevé quand elles sont semées dans le mélange que quand elles sont semées en pur. Leur capacité germinative semble soit inhibée par la forte densité de la même espèce, soit stimulée par le fait d'être accompagnée d'autres espèces.

Concernant l'effet du travail du sol, les tendances pour la densité d'individus et le pourcentage de levée sont les mêmes. Les valeurs sont plus élevées en non-labour depuis 15 ans qu'en non-labour depuis 3 ans. Le labour n'est significativement différent d'aucun des deux travaux du sol, il présente des résultats intermédiaires. La germination est influencée par un travail superficiel du sol (préparation du lit de semences) mais non pas un travail profond du sol (labour) (Biielders 2020). Il n'est donc pas étonnant de ne pas observer de différences entre les zones non-labourées et la zone labourée ayant subi un travail profond. Néanmoins, on peut se questionner sur la différence significative entre

le non-labour depuis 15 ans et le non-labour depuis 3 ans. Ce résultat est étonnant mais est à considérer avec précaution car cette mesure a été entachée de plusieurs biais (voir ci-dessous).

Concernant l'effet du type d'espèce, plus de graines ont été semées pour les espèces ayant un faible pourcentage de levée (la phacélie et le trèfle d'Alexandrie). Les résultats de pourcentage de levée nous indiquent une nette distinction entre les quatre espèces. Dans l'ordre nous avons les meilleures performances pour l'avoine brésilienne, suivie du radis chinois, du trèfle d'Alexandrie et enfin de la phacélie. Ces résultats concordent avec ceux de la littérature. L'avoine brésilienne est réputée pour lever facilement. Le radis est assez polyvalent quant à la qualité de son semis. Le trèfle d'Alexandrie et la phacélie exigent en revanche un semis de qualité, ces espèces ont plus souffert du mauvais lit de semences (F. Thomas et Archambeaud 2016).

ESSAI 2 «TYPE DE COUVERT»

En termes de densité d'individus, le trèfle de Perse, le trèfle d'Alexandrie et l'avoine brésilienne comptent significativement plus d'individus que le reste des espèces. Les deux espèces de trèfle ont un nombre d'individus semés bien supérieur aux autres espèces. Certaines valeurs de densité sont relativement faibles (de 4 à 6 pousses par m² pour le sorgho et le tournesol). Cela est indéniablement dû à la mauvaise germination causée par le retard de semis mais également à la faible densité de semis. Les graines de tournesol sont réputées appétentes pour les oiseaux, il se peut que la faible densité de tournesol soit également dûe aux attaques d'oiseaux.

En termes de pourcentage de levée, l'avoine brésilienne et le radis chinois ont un pourcentage de levée supérieur aux autres espèces dont le pourcentage de levée oscille autour de 20 à 30%, ce qui est relativement faible. Tout comme l'essai 1 «travail du sol», il y a une différence significative de pourcentage de levée entre les couverts semés en pur et le couvert standard, néanmoins cette tendance n'est pas vraie entre les couverts semés en pur et le couvert alternatif.

ESSAI 3 «COUVERT MIXTE»

Pour l'essai 3 «couvert mixte», nous observons que le pourcentage de levée des espèces dans le couvert standard est significativement supérieur au pourcentage de levée des espèces dans le couvert alternatif, ce qui était déjà le cas dans l'essai 2 «type de couvert». Le pourcentage de levée des espèces dans le couvert mixte n'est significativement différent d'aucun des deux couverts, il présente des résultats intermédiaires. De nouveau, l'avoine brésilienne et le radis chinois se démarquent avec un meilleur pourcentage de levée.

BIAIS DE LA MESURE

Il est important de considérer ces résultats avec précaution car certains biais ont entaché la mesure de pourcentage de levée et de comptage d'individus.

Premièrement, dans le calcul des pourcentages de levée, nous faisons l'hypothèse que le nombre de graines semées par traitement est homogène. Celui-ci a été calculé à partir de l'équation 1. Or, le semoir utilisé n'était pas un semoir à essais. Il se peut que le semis ait été hétérogène à certains endroits sur la parcelle, et que l'effet de l'hétérogénéité du semis soit confondu avec l'effet des traitements.

Deuxièmement, il y a eu un biais conséquent sur le comptage de l'avoine brésilienne à cause des repousses d'épeautre. Ces deux espèces étaient facilement confondables dans leurs premiers stades de développement.

5.2.2 Taux de couverture, taux de croissance et biomasse aérienne

En ce qui concerne le taux de couverture et le taux de croissance, les résultats sont similaires pour la méthode du cadre et la méthode Canopeo. Ils seront donc discutés comme un seul et même résultat.

L'analyse multivariée nous montre que le taux de couverture et la biomasse fraîche et sèche sont significativement corrélées dans tous les essais. Le taux de couverture, le taux de croissance et la biomasse sont corrélés à la densité d'individus et au pourcentage de levée dans l'essai 1 mais ce n'est pas le cas dans les essais 2 et 3.

ESSAI 1 «TRAVAIL DU SOL»

Des différences significatives entre couverts et travaux du sol ont été observées pour le taux de couverture, le taux de croissance et la biomasse aérienne.

Concernant le travail du sol, on observe un taux de couverture, un taux de croissance et une biomasse sèche plus élevés sur les parcelles en non-labour depuis 15 ans que sur les autres travaux du sol. Les couverts cultivés sur un sol en non-labour depuis 3 ans sont ceux qui ont le taux de couverture, le taux de croissance et la biomasse la plus faible. Les couverts en labour présentent des résultats intermédiaires pour le taux de couverture et le taux de croissance.

Concernant les couverts, les plus couvrants sont le trèfle d'Alexandrie et le couvert standard. Ce sont aussi les couverts qui produisent le plus de biomasse. L'avoine brési-

lienne cultivée en non-labour depuis 15 ans a également de bonnes performances pour ces paramètres. Cette dernière est moins performante quand elle est cultivée sur les autres traitements de travail du sol. La phacélie est le couvert le moins performant en termes de production de biomasse, taux de couverture et taux de croissance.

Les sols en non-labour sont moins déstructurés que les sols subissant un labour. Cela permet de conserver la qualité du sol. Une bonne qualité de sol permet d'avoir une meilleure infiltration et aération et des stocks plus élevés de nutriments, d'eau et de matière organique. Tous ces éléments sont bénéfiques pour la bonne croissance et le bon développement d'une culture (Bonfante, Terribile et Bouma 2019 ; Reicosky et al. 1995). Ces arguments pourraient expliquer le meilleur développement des couverts cultivés en non-labour depuis 15 ans. On ne remarque cependant pas les mêmes performances sur un sol non-labouré depuis 3 ans. Les bénéfices du non-labour pourraient donc ne se manifester qu'à long terme. Un couvert cultivé sur un sol en non-labour depuis 3 ans serait dans une phase de transition entre un sol labouré et un sol non-labouré depuis 15 ans. Il ne bénéficierait donc ni des avantages apportés par le labour, ni de ceux apportés par un non-labour de plus longue date.

Selon la littérature, le trèfle d'Alexandrie et l'avoine brésilienne sont effectivement des espèces qui produisent de grandes quantités de biomasse et assurent une bonne couverture du sol (ITAB 2022). Le couvert standard est composé d'une bonne diversité d'espèces avec des systèmes foliaires différents permettant de couvrir le sol efficacement. Le trèfle d'Alexandrie, l'avoine brésilienne et le couvert standard peuvent donc se révéler efficaces pour séquestrer du carbone et enrichir le sol en matière organique. Cela permet aussi de protéger le sol de l'érosion et réduire le ruissellement et la battance. L'avoine brésilienne semble être sensible au travail du sol. Cette tendance n'est pas observée dans la littérature. L'hétérogénéité du terrain pourrait avoir eu un impact sur son développement. En ce qui concerne la phacélie, ses mauvaises performances sont surprenantes. La production de biomasse et la capacité à couvrir le sol rapidement sont des caractéristiques qui lui sont reconnues. La phacélie n'est pas une espèce particulièrement gélive, elle est même assez résistante au gel et tolérante à un semis tardif (Cottney et al. 2022). Comme dit précédemment, la phacélie est cependant très exigeante en termes de semis. Cela pourrait donc être la principale cause du mauvais développement de la phacélie. Selon nos observations visuelles, la phacélie est l'espèce ayant été la moins affectée par l'hiver. Elle semble s'être développée davantage vers la fin de l'expérience. Cependant nous ne pouvons affirmer cette hypothèse car cela n'a pas été mesuré.

Le trèfle d'Alexandrie et le couvert standard ont produit les biomasses certes les plus élevées dans le cadre de cette étude mais celles-ci sont très faibles par rapport aux valeurs moyennes attendues. Si nous extrapolons la biomasse mesurée pour la convertir en $t.MS.ha^{-1}$, nous obtenons pour le trèfle d'Alexandrie, des valeurs moyennes variant

entre 0,5 et 0,7 t.MS.ha⁻¹ selon le traitement de travail du sol. Les valeurs attendues dans des conditions normales sont de l'ordre de 1 à 3 t.MS.⁻¹ soit trois fois plus élevé (Agriconomie 2022). Cela confirme le mauvais développement des couverts. Comme vu précédemment, le retard de semis est la cause la plus probable de ce mauvais développement. Le retard de semis diminue la période de croissance du couvert et augmente considérablement le risque de mauvais développement.

ESSAI 2 «TYPE DE COUVERT»

Des différences significatives entre couverts ont été observées pour le taux de couverture, le taux de croissance et la biomasse aérienne.

En ce qui concerne les couverts, les plus couvrants sont le couvert standard, l'avoine brésilienne, le trèfle d'Alexandrie et le trèfle de Perse. Les couverts qui ont le taux de croissance le plus élevé sont le couvert standard et le trèfle d'Alexandrie. Étonnamment, le couvert alternatif, le sorgho et le sarrasin ont des taux de couverture assez élevés. Les couverts pour lesquels la biomasse sèche est la plus élevée sont le couvert standard, le trèfle d'Alexandrie et le trèfle de Perse. En revanche, le sarrasin, le tournesol et le sorgho présentent les biomasses sèches les plus faibles. La biomasse est même nulle pour le sorgho et le tournesol. Les performances sont généralement meilleures pour les couverts issus du couvert standard que pour les couverts issus du couvert alternatif. La seule exception du couvert alternatif est le trèfle de Perse.

Le trèfle de Perse est, comme le trèfle d'Alexandrie et l'avoine brésilienne, réputé pour sa couverture du sol rapide et sa production de biomasse élevée (ITAB 2012b). Il serait donc performant pour apporter de la matière organique et protéger le sol de l'érosion et de la battance. Contrairement aux autres couverts issus du couvert alternatif, il est peu gélif et peut être semé plus tard, ce qui expliquerait ses performances (ITAB 2012b). Le trèfle de Perse est d'ailleurs le seul couvert issu du couvert alternatif à ne pas avoir été détruit en novembre par le froid. Il semble donc bien adapté à nos régions et à un climat tempéré pour cette période de l'année, ce qui n'est pas le cas des autres couverts issus du couvert alternatif.

Pour le sorgho, le sarrasin et le tournesol, les performances en termes de taux de couverture et taux de croissance semblent réfuter l'hypothèse que les couverts issus du couvert alternatif se sont moins bien développés. Cependant, les résultats obtenus pour ces paramètres ne concordent pas avec les résultats de biomasse. En réalité, le taux de couverture mesuré sur ces parcelles a été fortement biaisé par la présence de nombreuses adventices.

ESSAI 3 «COUVERT MIXTE»

Des différences significatives entre couverts ont été observées pour le taux de couverture, le taux de croissance et la biomasse aérienne.

Le couvert standard a le taux de couverture, le taux de croissance et la production de biomasse les plus élevées des couverts. Le couvert mixte et le couvert alternatif ont des taux de couverture et de croissance similaires. En ce qui concerne la production de biomasse, le couvert mixte présente une performance intermédiaire entre le couvert alternatif et le couvert standard. Il n'est pas significativement moins performant que le couvert standard mais pas significativement plus performant que le couvert alternatif.

Comme expliqué précédemment, le couvert standard est composé d'espèces adaptées à nos régions et moins sensibles au gel que le couvert alternatif. Le couvert standard a donc connu une meilleure croissance et un meilleur développement. Le couvert mixte a probablement produit une biomasse et assuré une couverture intermédiaire grâce à la présence d'espèces du couvert standard. À l'inverse, le couvert alternatif ne contenait que des espèces très gélives sauf le trèfle de Perse. Cependant, le trèfle de Perse était semé en faible quantité en mélange à 8 espèces par rapport au semis en mélange à 4 espèces (Tableau 2). Il n'a donc pas pu compenser la dégradation des autres espèces du couvert alternatif. Cette hypothèse semble assez cohérente car le prélèvement de biomasse a été effectué après la dégradation du couvert alternatif. La seule biomasse restante dans le couvert mixte était donc celle des espèces du couvert standard et celle du trèfle de Perse. Dans le couvert alternatif, il restait probablement uniquement du trèfle de Perse mais en plus grande quantité que dans le mélange mixte.

CRITIQUE DU PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

La mesure du taux de couverture a été réalisée en fonction de la surface verte observée. Cependant cette mesure ne distingue pas uniquement les espèces végétales d'intérêt. Cela signifie que les repousses d'épeautre et les adventices ont été prises en compte dans l'évaluation de la surface verte. Un couvert, même s'il est composé majoritairement d'adventices aura donc un taux de couverture élevé. Nous avons constaté que les couverts de tournesol, sarrasin et sorgho étaient peu denses et très rapidement infestés d'adventices. Ce constat est la probable conséquence du retard de semis. Le mouton blanc formait un tapis végétal qui couvrait le sol. Nous obtenions donc des valeurs assez élevées de taux de couverture pour le mélange alternatif, même après sa destruction par le froid. Les mesures de biomasse aérienne ne concordent pas avec les mesures de taux de couverture car la biomasse prélevée n'est composée que des espèces étudiées. Cela confirme donc le biais important engendré par la couverture d'adventices.

5.2.3 Diversité et densité des adventices

DIVERSITÉ DES ADVENTICES

D'après les analyses multivariées, la diversité des adventices n'est pas significativement influencée par le travail du sol, le temps ou le couvert cultivé et cela dans tous les essais. Nous pouvons tout de même souligner la présence plus importante de certaines espèces (mouron blanc, morelle noire et chénopode blanc). La présence de ces adventices n'est visiblement pas due à l'effet du traitement. Elle pourrait alors être due à l'environnement, au climat et à la saison.

Ces trois espèces sont typiques d'Europe mais sont recensées sur la quasi-totalité du globe. Elles sont souvent retrouvées dans les lieux cultivés (Tela Botanica 2022). Le mouron blanc est une espèce qui germe de février à septembre, la morelle noire de mai à septembre et le chénopode blanc de février à octobre. Le chénopode blanc apparaît généralement dans les cultures de printemps et d'été mais peut apparaître dans les cultures d'hiver dans le cas d'été pluvieux. Il n'est donc pas surprenant d'observer ces adventices en grand nombre à cette période de l'année. Ce sont toutes des adventices nitrophiles qu'on retrouve généralement sur les sols riches en azote et en matière organique. Le mouron blanc est d'ailleurs un bioindicateur de sol riche en matière organique. Le mouron blanc et le chénopode blanc ont tous deux un impact négatif important sur les rendements (ITAB 2022 ; SERAIL 2022). Cela renforce l'hypothèse de l'effet des adventices sur la croissance des couverts. Les adventices n'étaient cependant pas les seules à perturber le couvert car il y avait de nombreuses repousses d'épeautre.

DENSITÉ DES ADVENTICES

La diminution du contrôle des adventices est généralement une des conséquences du retard de semis (Cottney et al. 2022). Il est difficile d'estimer l'effet qu'a eu le retard de semis sur la densité des adventices. Les différentes études consultées révèlent des densités d'adventices très variables selon le contexte de l'étude (Frick et A. G. Thomas 1992 ; V. Gupta 2020 ; Tuesca, Puricelli et Papa 2001). Cependant, le mauvais développement des couverts pourrait être la cause d'une densité anormalement élevée d'adventices dans notre contexte expérimental.

ESSAI 1 «TRAVAIL DU SOL»

Des différences significatives entre couverts et travaux du sol ont été observées pour la densité des adventices.

Concernant l'influence du travail du sol, les parcelles en non-labour depuis 15 ans ont

une densité plus élevée d'adventices que les autres travaux du sol. Toutefois, la densité d'adventices n'est pas significativement différente entre labour et non-labour depuis 3 ans.

Concernant l'influence du couvert, le couvert en mélange (couvert standard) a une plus faible densité d'adventices que les couverts semés en pur.

La première observation concorde avec la littérature. Le labour diminue la densité des adventices en enfouissant les graines dans le sol, ce qui limite leur germination (Biielders 2020). En non-labour, il n'y a pas d'enfouissement des graines d'adventices. La banque de graines en surface risque donc d'être plus importante. Toutefois, le non-labour depuis 3 ans étant récent, la banque de graines en surface est encore faible. L'augmentation de la densité d'adventices à la suite de la reconversion semble donc s'observer à plus long terme.

En ce qui concerne le couvert standard, sa grande densité d'individus et son taux de croissance et de couverture élevés lui confèrent un avantage compétitif et renforcent l'ombrage. Le trèfle d'Alexandrie possède des caractéristiques similaires mais n'est cependant pas performant dans le contrôle des adventices. Aussi, l'analyse en composantes principales et le graphe des corrélations ne montrent pas de corrélation significative entre ces paramètres et la densité d'adventices. On ne peut donc pas affirmer avec certitude que le contrôle des adventices par le couvert standard se fait grâce à l'ombrage ou à la compétition. Le couvert standard pourrait aussi être performant grâce à sa diversité d'espèces. Celui-ci bénéficierait d'une combinaison de mécanismes (compétition, allélopathie ou ombrage). Les couverts purs, n'utilisant que les mécanismes qui leur sont propres, seraient donc moins efficaces.

ESSAI 2 «TYPE DE COUVERT»

Des différences significatives entre couverts ont été observées pour la densité des adventices.

La densité d'adventices est plus élevée dans les couverts issus du couvert alternatif. Les couverts dans lesquels on retrouve les densités d'adventices les plus élevées sont le tournesol, le sorgho et le sarrasin. Seul le trèfle de Perse et le couvert alternatif présentent des densités d'adventices similaires voir plus faibles (pour le trèfle de Perse) que les couverts issus du couvert standard. Le couvert le plus efficace pour la gestion des adventices reste le couvert standard comme dans l'essai 1 « travail du sol ». Le couvert standard et les couverts issus de celui-ci semblent être plus performants dans le contrôle des adventices que le couvert alternatif et les couverts issus de celui-ci.

Le trèfle de Perse est moins gélif que le sorgho, le sarrasin et le tournesol. C'est une espèce qui a de bonnes performances pour couvrir le sol et produire de la biomasse et donc potentiellement de contrôler les adventices. Nos résultats confirment cette hypothèse car c'est en effet le couvert qui a les meilleures performances parmi les couverts issus du couvert alternatif dans ces paramètres, il est même plus performant que certains couverts issus du couvert standard.

Le mauvais développement des couverts a permis aux adventices de se développer facilement car il y a eu moins de pression sur les ressources. C'est particulièrement le cas pour le couvert alternatif qui a connu une croissance médiocre. Le mouron blanc est une plante envahissante qui forme un tapis dense sur le sol et qui exerce une forte compétition sur les espèces cultivées. Sa germination et sa croissance ne présentent aucune exigence, ce qui la rend très compétitive (SERAIL 2022). C'est en effet ce que nous avons observé lors de notre expérience.

ESSAI 3 «COUVERT MIXTE»

Des différences significatives entre couverts ont été observées pour la densité des adventices.

Le couvert alternatif a une plus grande densité d'adventices que le couvert standard et le couvert mixte. Il n'y a pas de différence de densité d'adventices entre ces deux derniers.

Le couvert standard semble être performant pour réduire le nombre d'adventices, nous l'observons dans tous les essais. Nous avons déjà vu précédemment que le couvert alternatif était quant à lui peu efficace. Le couvert mixte semble avoir un résultat intermédiaire entre les couverts standard et alternatif. Les contrastes des interactions montrent cependant qu'il n'est ni significativement moins performant que le couvert standard ni significativement plus performant que le couvert alternatif. Cela pourrait être dû à ses performances intermédiaires de taux de couverture et de production de biomasse.

Le taux de couverture 45 jours après semis est négativement corrélé avec la densité d'adventices 44 jours après semis. Cela pourrait expliquer l'effet de l'ombrage sur la densité d'adventices. Cependant nous n'observons pas cette corrélation pour les autres essais. Il n'est donc pas certain que cela soit dû à l'ombrage

CRITIQUE DU PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

La densité des adventices n'a été mesurée que 22 et 44 jours après semis ce qui n'est

pas représentatif de la durée de l'expérience qui s'est étalée sur 6 mois. Certains couverts étaient encore peu développés et les potentiels effets plus tardifs n'ont pas été observés. Selon la littérature, le radis chinois est efficace pour lutter contre les adventices grâce à l'allélopathie, l'avoine brésilienne est très compétitive, la phacélie apporte un bon taux de couverture qui crée de l'ombrage (ITAB 2012b). Ces éventuels effets n'ont pas pu être observés à cause de la précocité des dates de recensement. L'effet pourrait être devenu plus important dans la suite de l'expérience. Nous pourrions effectuer la même critique pour le couvert alternatif. Cependant nous savons que le couvert alternatif a été détruit par le froid à peine 79 jours après le semis. Nous pouvons donc affirmer avec certitude que celui-ci n'a pas été efficace dans la gestion des adventices sur toute la durée de l'expérience.

5.2.4 Décomposition de la matière organique par les microorganismes

Pour les trois essais, aucune différence significative intéressante n'a été observée concernant le taux de stabilisation S de la litière et le taux de décomposition k de la matière organique entre les différents traitements. Bien que certaines différences significatives soient observées entre couverts, aucune tendance ne ressort parmi les trois couverts. nous estimons que ces variations sont dues à l'hétérogénéité du terrain.

Nous estimons que l'échantillon était suffisamment large, avec 1350 sachets de thé implantés au total sur l'ensemble de la parcelle expérimentale. Le manque de significativité n'est donc sûrement pas dû à un nombre trop petit de répétitions par traitement.

Le fait qu'aucune tendance ne ressorte peut s'expliquer de plusieurs manières. Tout d'abord, les sachets de thé sont restés dans le sol durant trois mois et demi du 4 novembre 2021 au 25 février 2022. L'hiver est la période la moins propice pour étudier l'activité des microorganismes. Sous nos climats, les deux pics d'activité des microorganismes (et donc de minéralisation de la matière organique) correspondent au printemps et à l'automne où les conditions d'humidité et de chaleur sont réunies (F. Thomas et Archambeaud 2016). Aussi, il n'est pas très étonnant de ne pas observer de différence d'activité des microorganismes entre les différents travaux du sol avec cette méthode. L'influence la plus forte sur l'activité des microorganismes se trouve dans les facteurs du milieu : l'humidité et la température. Ces deux facteurs ont été identiques sur les différents travaux du sol au cours de l'expérience. La méthode du *Tea bags Index* a montré des différences significatives lorsque différents sols dans différents écosystèmes étaient testés (Keuskamp et al. 2013). Des études précédentes menées également sur une unique parcelle ont montré des résultats comparables aux nôtres ; aucune significativité entre les différents traitements (Mees 2021 ; Wilmus 2021 ; Vanhove 2018). Il se peut également que cette mesure ne soit pas assez sensible pour évaluer de manière précise la différence d'activité de microorganismes au sein d'un même milieu.

5.2.5 Décomposition de la biomasse végétale par les vers de terre

Cette mesure évalue l'activité des vers de terre à travers la quantification de la biomasse végétale décomposée par ceux-ci. On suppose qu'une activité élevée implique une abondance élevée de vers de terre.

ESSAI 1 «TRAVAIL DU SOL»

Les résultats de l'essai 1 «travail du sol» nous montrent un effet significatif du travail du sol et du couvert sur la décomposition de la paille par les vers de terre.

D'une part, la décomposition de la paille par les vers de terre a été significativement supérieure sur les parcelles en non-labour depuis 15 ans que sur les parcelles en labour et en non-labour depuis 3 ans. Ces résultats sont confirmés par les travaux de Capelle, Schrader et Brunotte (2012) qui observent une plus grande abondance, biomasse et diversité de vers de terre en réduction de travail du sol. En effet, le labour a un impact direct et indirect sur la réduction de la population de vers de terre (Biolders 2020). Il est intéressant de remarquer qu'il n'y a pas de différence significative entre les parcelles de labour et de non-labour depuis 3 ans. Cela nous laisse donc penser que l'effet du labour sur les populations de vers de terre a un impact sur le long terme, même plusieurs années après la reconversion. Les populations de vers de terre semblent donc prendre du temps à se rétablir de ces perturbations.

D'autre part, les résultats nous montrent que la décomposition de la paille par les vers de terre a été en moyenne significativement supérieure sur les couverts d'avoine brésilienne. Nous ne savons pas expliquer cette tendance, qui à notre connaissance, n'est pas mentionnée dans la littérature.

ESSAI 2 «TYPE DE COUVERT»

Les résultats de l'essai 2 «type de couvert» ne montrent pas de différence de décomposition de la biomasse végétale par les vers de terre en fonction des différents couverts. Contrairement aux observations de l'essai 1, l'avoine brésilienne ne se démarque pas, malgré une tendance observée. Les tendances observées ne nous mènent pas à suggérer des hypothèses car les écarts-types sont grands et les groupes formés relativement homogènes.

ESSAI 3 «COUVERT MIXTE»

Les résultats de l'essai 3 «couvert mixte» ne montrent pas de différence de décomposition de la biomasse végétale par les vers de terre en fonction des différents couverts.

LIMITES

Malgré les différences significatives observées, il est nécessaire de réaliser que les valeurs de décomposition observées sont relativement faibles (varient entre 2 et 12 g). Nous ne remettons pas en question les différences observées mais nous soulignons le fait qu'il y a manifestement assez peu d'activité des vers de terre sur notre parcelle et donc une faible quantité de vers de terre. Cette observation peut être expliquée de différentes manières.

Premièrement, nous sommes sur une parcelle agricole qui a longtemps été labourée. Comme nous l'avons vu, le labour est une pratique ayant un impact considérable sur les populations de vers de terre. Bien qu'une partie de la parcelle soit en non-labour depuis 15 ans, les vers de terre se reproduisent au rythme de huit cocons par an, ce qui est relativement faible (Piffner s. d.). Si la population de base était assez faible, il est normal que cela prenne de nombreuses années pour atteindre une grande population de vers de terre dans les sols.

Deuxièmement, les paniers ont été posés du 20 novembre 2021 au 25 février 2022. Or il est préconisé de placer les paniers dès les mois de septembre-octobre et de les récupérer vers les mois de mars-avril. Nous avons été contraints de les placer tardivement car il a fallu construire les 135 paniers, ce qui a été très chronophage. Nous avons dû les récupérer tôt également car le couvert allait être détruit mécaniquement.

5.2.6 Biomasse racinaire

Le seul effet démontré par l'analyse statistique sur la biomasse racinaire est l'effet d'horizon de sol. La biomasse racinaire est plus élevée dans les 30 premiers centimètres du sol que dans les 60 suivants.

Cette observation semble assez évidente étant donné que les racines croissent depuis la surface du sol. On s'attend donc à un gradient de biomasse de la surface vers la profondeur (bien que ce ne soit pas automatique). Aucun effet du travail du sol et de l'espèce n'a été observé. Toutefois, les résultats de l'analyse de la biomasse racinaire peuvent être remis en cause par plusieurs facteurs.

Premièrement, des complications ont entraîné la réduction de la taille de l'échantillon. Le nettoyage des échantillons de sols afin d'en extraire les racines est très chronophage et a contraint la diminution du nombre de répétitions de cinq à trois par traitement pour cette mesure. Cela diminue la fiabilité de nos résultats. Cela réduit aussi l'appréciation de l'hétérogénéité du terrain étant donné que les données manquantes correspondent à

deux travées entières. De plus, quatre échantillons étaient manquants dans l'échantillonnage déjà réduit. Les données n'étaient donc pas balancées.

Deuxièmement, la mesure de la biomasse racinaire se fait sur les racines prélevées dans un échantillon de 94,2 cm³ de sol. La surface de prélèvement correspond à un disque de deux centimètres de diamètre soit à 3,14 cm². Cette surface est très réduite et il est très peu probable d'avoir un échantillon représentatif d'une unité expérimentale, particulièrement pour les espèces comme le radis chinois pour lesquels la densité de semis est faible. En effet, en prélevant un échantillon de 3,14.10⁻⁴ m² aléatoirement sur la surface expérimentale qui comprend en moyenne 28 radis chinois par m², il est très peu probable de prélever les racines de cette espèce. D'autant plus que les systèmes racinaires pivotants sont généralement peu étalés horizontalement par rapport au plan du sol. Il en est de même pour les autres espèces bien que leur densité soit plus élevée. En outre, les échantillons de biomasse prélevés n'ont pas été analysés de manière qualitative afin d'évaluer les espèces dont les racines sont retrouvées dans l'échantillon. Il est fortement probable qu'une partie importante de la biomasse racinaire appartienne aux nombreuses adventices qui tapissaient le sol. La mesure n'est donc pas représentative de la réelle biomasse racinaire des espèces étudiées, ce qui remet en question la pertinence d'une telle mesure.

5.2.7 Résistance du sol à la pénétration

Dans l'essai 1 «travail du sol», des différences significatives entre couverts et travaux du sol ont été observées pour la résistance du sol. En revanche, les couverts ne semblent pas influencer la résistance du sol dans les essais 2 «type de couvert» et 3 «couvert mixte».

Concernant le travail du sol, le sol était moins résistant et donc plus facile à pénétrer sur les sols en labour qu'en non-labour.

Concernant les couverts, les sols où étaient cultivés le trèfle d'Alexandrie, le radis chinois et le couvert standard étaient les moins résistants dans l'essai 1 «travail du sol». Les sols où étaient cultivés la phacélie étaient les plus résistants à la pénétration sur les deux essais «travail du sol» et «type de couvert».

Le labour permet d'ameublir le sol alors que le non-labour est souvent lié à un sol plus compacté (Biielders 2020). Il n'est donc pas étonnant d'avoir une résistance du sol plus faible sous un sol labouré. La mesure au pénétromètre n'a pas permis de détecter une éventuelle semelle de labour. La pénétration du sol dépassait en moyenne les 30 centimètres pour la quasi-totalité des couverts en labour. Or une semelle de labour, s'il y en a une, devrait se trouver entre 25 et 35 centimètres de profondeur. Il est probable

qu'il n'y ait pas de semelle de labour dans la bande labourée dû aux qualités intrinsèques du sol et des labours réalisés dans de bonnes conditions.

La question est maintenant de savoir si les couverts peuvent avoir exercé une influence sur la résistance du sol. Les espèces composant les couverts ont des systèmes racinaires différents. Pivotant pour le radis chinois et le trèfle d'Alexandrie et fasciculé pour les autres espèces. Les systèmes racinaires pivotants sont généralement robustes et permettent une bonne structuration du sol, surtout dans le cas du radis chinois qui a la capacité de fracturer le sol et d'en diminuer la compaction (Chen et R. R. Weil 2010 ; R. Weil et Kremen 2007). L'effet du système racinaire sur la résistance du sol est cependant incertain pour plusieurs raisons. La longueur moyenne des racines des différentes espèces utilisées ne concorde pas avec la résistance amoindrie en profondeur. Le radis chinois forme une racine pivotante mesurant jusqu'à 35-45 centimètres de long, or la résistance du sol est diminuée dans les horizons plus profonds. Le trèfle d'Alexandrie forme des racines peu profondes soit jusqu'à 15-20 centimètres de profondeur, il est donc peu probable qu'il ait un effet sur la structure du sol au-delà de cette profondeur. Le trèfle d'Alexandrie n'est pas une espèce réputée pour exercer une influence sur la structure du sol, il est plutôt considéré comme peu structurant. De plus, le mauvais développement du couvert peut laisser penser que les racines du radis et du trèfle d'Alexandrie n'ont pas atteint leur longueur maximale respective, ce qui décrédibilise encore la théorie de l'effet des racines sur la résistance du sol dans le cas de cette étude. D'autre part, on observe en labour une différence de résistance du sol entre les deux bandes de couvert standard ce qui indique un effet de l'hétérogénéité du terrain. La résistance du sol dans la partie labourée est probablement influencée par l'hétérogénéité du terrain et non pas par les couverts cultivées. Pour ces raisons, on ne peut pas affirmer que l'effet mesuré soit lié aux espèces et à leur système racinaire.

CRITIQUE DU PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

La mesure de la résistance du sol avec le pénétromètre «manuel» est peu précise. Le nombre de graduations sur le manomètre ne permettait pas d'avoir une bonne appréciation de la pression nécessaire à la pénétration. De plus, les profils de sol sont généralement très hétérogènes (présence de cavités, cailloux, résidus) ce qui crée un biais si l'on veut mesurer la pression en fonction de la profondeur.

5.3 Tendances observées

Concernant le travail du sol, la tendance générale est en faveur du non-labour depuis 15 ans et en défaveur du non-labour depuis 3 ans. Le labour ayant des performances intermédiaires ou équivalentes au non-labour depuis 3 ans. La transition du labour au

non-labour ne semble tirer des bénéfices qu'à long terme. À court terme, les performances se voient affectées. Il y a une exception pour le contrôle des adventices et la résistance du sol.

Concernant les couverts en pur, la tendance générale est en faveur du trèfle d'Alexandrie, de l'avoine brésilienne et du trèfle de Perse. En général, les couverts issus du couvert standard sont plus performants que les couverts issus du couvert alternatif. Cependant, l'ensemble des couverts a été affecté par le retard de semis, les performances se voient diminuées.

Concernant les couverts en mélange, la tendance générale est en faveur du couvert standard et en défaveur du couvert alternatif. Le couvert mixte présente des performances intermédiaires.

Les différences entre les bandes de couvert standard ou alternatif en mélange méritent d'être soulignées. Elles apparaissent dans une mesure de l'essai 1 (taux de stabilisation S) et plusieurs mesures de l'essai 2 (taux de croissance, taux de stabilisation, taux de décomposition k et biomasse aérienne). Ces différences sont donc récurrentes dans l'essai 2 et sont toujours observées sur la parcelle en non-labour depuis 15 ans. Ces différences pourraient être dues à l'hétérogénéité du terrain et/ou à la distribution hétérogène des repousses d'épeautre. Nous avons observé visuellement que les repousses d'épeautre étaient abondantes dans cette zone de la parcelle.

5.4 Et si c'était à refaire ... ?

Au cours des six mois d'expérimentation au champ et des mois d'analyse des résultats qui ont suivi, de nombreuses interpellations et remises en question quant aux protocoles expérimentaux et conditions d'expérimentation ont éveillé notre intérêt. De potentielles pistes d'amélioration sont présentées ici afin de mettre à profit notre expérience pour d'éventuelles expérimentations futures similaires à la nôtre.

REMARQUE GÉNÉRALE

Ayant réalisé ce mémoire à deux, nous nous rendons compte du potentiel énorme d'un travail réalisé en équipe. Cela permet d'augmenter la taille du plan expérimental mis en place mais également de multiplier le nombre de mesures possibles. Néanmoins, nous avons parfois eu le sentiment que, pour certaines mesures, la quantité avait dépassé la qualité. En effet, certaines mesures auraient mérité d'être approfondies et d'autres rajoutées. Néanmoins ce n'était pas réalisable étant donné la quantité de mesures que nous avions. Si la même expérience au champ était à refaire, nous pensons qu'il serait intéressant de diviser les mesures à réaliser entre un plus grand nombre d'étudiant.e.s

afin que chacun.e approfondisse les quelques méthodes dont il ou elle est responsable. L'ensemble des résultats pourrait ensuite être mis en commun entre tous les étudiant.e.s. Le potentiel pour avoir des résultats pertinents serait grandement augmenté. De plus, les étudiant.e.s pourraient s'entraider lors des mesures très chronophages afin de les réaliser plus vite et plus efficacement.

ÉVALUATION DE LA DENSITÉ D'INDIVIDUS ET LE POURCENTAGE DE LEVÉE

Si la mesure était à refaire, il serait intéressant de penser à un dispositif de quantification des repousses de la culture précédente sur la parcelle. Des corrélations entre ces données et les autres variables mesurées permettraient sûrement de mieux expliquer certaines hétérogénéités observées au sein de la parcelle.

Dans le cas d'un semis tardif forcé, un faible pourcentage de levée peut être anticipé et les densités de semis devraient alors être revues à la hausse afin d'assurer un plus grand taux de couverture.

Pour l'étude du pourcentage de levée, il serait intéressant d'effectuer le comptage des individus ayant germé dès le premier jour après semis. Puis à des intervalles très courts entre chaque comptage au début de la levée. Les comptages pourraient ensuite être plus espacés. Cela permettrait de tracer des courbes d'évolution du pourcentage de levée de chaque espèce et ainsi mieux comprendre les phénomènes les impactant. Un compte rendu des conditions météorologiques (température et humidité) chaque jour y serait corrélé. Une expérience intéressante serait de comparer des bandes de couverts semés à des moments différents. Comme on a pu le voir dans le cas de notre expérience, le retard de semis d'une culture est très impactant sur son développement, cela mérite d'être étudié plus en profondeur dans le cas spécifique des cultures de couverture. Cela permettrait d'évaluer quelles espèces de couverture gardent de bonnes performances malgré le retard de semis.

ÉVALUATION DE LA DIVERSITÉ ET DENSITÉ DES ADVENTICES

Le comptage d'adventices devrait se faire sur l'ensemble de la durée d'expérience, à intervalles réguliers, afin de pouvoir mieux apprécier la variation de diversité et de densité des adventices dans le temps. Des mesures regroupées durant une partie de la durée d'expérimentation ne permettent pas de tenir compte des variations et du potentiel effet suppressif (ou non) des couverts.

ÉVALUATION DU TAUX DE COUVERTURE

Que ce soit avec la méthode du cadre ou avec l'utilisation de l'application Canopeo,

le taux de couverture est biaisé par le fait qu'on observe la surface verte en confondant toutes les espèces végétales. C'est problématique dans le cas où il y a un grand nombre d'espèces végétales non-étudiées (repousses et adventices). L'utilisation de Canopeo est assez efficace et comparable à la méthode du cadre. L'utilisation de Canopeo devrait être privilégiée pour l'estimation de la couverture «absolue», c'est-à-dire la couverture du sol par toutes les espèces. Cette méthode est très rapide, facile d'utilisation et permet un très grand nombre de répétitions. De plus, cela permet de diminuer le biais de l'expérimentateur qui peut être élevé avec la méthode du cadre. En revanche, il est possible en utilisant la méthode du cadre de faire une approximation de la couverture «réelle» c'est-à-dire la couverture du sol par les espèces d'intérêt. L'objectif serait alors de ne prendre en compte comme «couvert» que les cases étant remplies à plus de 50% par les espèces d'intérêt. Ces deux méthodes sont complémentaires et permettent d'apporter deux informations intéressantes. La différence entre couverture «absolue» et «réelle» permettrait d'avoir une appréciation de la densité d'espèces non-étudiées. Cette dernière pourrait être corrélée avec la densité d'adventices ou de repousses.

Enfin, le taux de couverture devrait être mesuré dès les premiers jours après semis (moins de 10 jours) afin d'observer le démarrage de croissance du couvert.

ÉVALUATION DE LA BIOMASSE RACINAIRE

La méthode actuelle ne permet pas d'estimer efficacement la biomasse racinaire des couverts d'intérêt. Le volume de l'échantillon est trop faible et la méthode de prélèvement prend le risque de ne prélever aucune racine, surtout quand la densité de semis est faible. De plus, il y a une forte possibilité que les échantillons soient pollués par la biomasse racinaire des espèces non-étudiées. Pour une estimation plus efficace de la biomasse racinaire, il faudrait prélever des échantillons de sol d'un volume plus élevé. Cette mesure doit être couplée à une mesure qualitative afin d'identifier la composition des espèces végétales de l'échantillon. Sans cela, il est presque impossible de connaître la provenance des racines.

Il n'existe pas actuellement de méthode simple et efficace qui permette d'apprécier avec exactitude la biomasse racinaire. Les mesures demandent généralement beaucoup de temps et d'énergie ce qui rend cette mesure incompatible avec un grand nombre d'autres mesures ou un trop grand nombre de répétitions/traitements. Les mesures les plus efficaces semblent être le carottage ou la méthode des monolithes³ (Chopart 2004). La méthode de carottage doit se faire sur un diamètre plus grand (ex : 8 cm) afin de diminuer le biais. L'estimation de la biomasse racinaire pourrait se limiter à une profon-

3. Prélèvement d'un cube de sol de 25 centimètres de côté. Les racines sont ensuite prélevées, nettoyées, séchées et pesées. Cette méthode ne permet pas de faire un grand nombre d'échantillons. De plus, il faut que le sol soit prélevé dans des conditions assez sèches pour éviter une compaction trop forte du bloc lors du prélèvement. Cela rendrait plus difficile le prélèvement des racines.

leur maximale de 30 centimètres étant donné que c'est la zone où l'on trouve le plus de racines. Le prélèvement des horizons plus profonds augmente considérablement la quantité de travail et d'échantillons sans augmenter proportionnellement l'approximation de la biomasse racinaire avec la méthode actuelle. En se limitant à cette région, on prend le risque d'avoir un biais sur la biomasse racinaire mais on réduit considérablement la quantité de travail ce qui permettrait d'effectuer plus d'échantillons dans l'horizon de surface si une plus grande précision est souhaitée. Si le temps et les moyens le permettent, il est vivement recommandé d'effectuer la mesure sur les différentes profondeurs pour pouvoir augmenter la précision de la mesure, surtout si les cultures se sont bien développées.

ÉVALUATION DE L'ACTIVITÉ DES MICROORGANISMES

Nous remettons en question la pertinence de cette mesure dans les conditions de notre expérience. En effet, comme dit précédemment, des différences significatives pour ce protocole sont observées lorsque différentes parcelles dans différentes conditions sont étudiées. Néanmoins, si la volonté est d'évaluer l'activité des microorganismes en fonction des espèces composant le mélange, alors cette mesure peut tout de même être mise en place. Elle devrait cependant être adaptée. Il serait plus intéressant d'effectuer cette expérience au printemps après la destruction du couvert et le retour de celui-ci au sol. Cela permettrait alors d'évaluer une éventuelle différence dans l'activité des microorganismes entre les espèces composant le mélange.

ÉVALUATION DE LA DÉCOMPOSITION DE LA MATIÈRE VÉGÉTALE PAR LES VERS DE TERRE

Nos observations nous mènent à remettre en question le protocole expérimental de cette mesure et l'améliorer pour des expériences futures. Nous estimons que dans le cadre de l'étude d'un couvert végétal, deux choses nous intéressent à propos de l'activité des vers de terre.

Premièrement, l'évaluation de la décomposition de la matière végétale (*via* la paille) par les vers de terre avant la dégradation du couvert est intéressante pour évaluer l'activité des vers de terre. Elle permet de faire l'hypothèse que là où l'activité des vers de terre est la plus forte avant destruction du couvert, elle le sera aussi lors de l'incorporation des résidus du couvert par les vers de terre après dégradation.

Deuxièmement, l'incorporation des résidus du couvert par les vers de terre après la dégradation du couvert nous semble d'autant plus pertinente à évaluer. Un protocole expérimental différent serait alors mis en place. Juste avant la dégradation mécanique, une biomasse fraîche équivalente à la surface de la taille du panier serait prélevée sur chaque parcelle. Après pesée, les échantillons de biomasse seraient placés dans chaque

panier puis les paniers posés sur chaque parcelle. Avant le semis de la culture suivante, les paniers seraient retirés et le contenu de biomasse fraîche à nouveau pesé. La variable étudiée serait donc la décomposition de biomasse fraîche par les vers de terre. Contrairement au protocole utilisé classiquement, on pourrait évaluer l'appétence des vers de terre pour chaque couvert. Ces deux types de protocoles sont donc à mettre en place en fonction du temps disponible.

ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE DU SOL À LA PÉNÉTRATION

Cette mesure est assez simple et rapide et ne demande pas d'être réalisée dans la même journée. Nous avons observé que l'hétérogénéité du terrain jouait un rôle important dans la résistance du sol. Il serait intéressant d'effectuer un plus grand nombre de répétitions au sein de chaque unité expérimentale (supérieur à 4) mais de se limiter à la mesure de la profondeur atteignable sans dépasser les 21 bars de pression. Le pénétromètre n'étant pas précis, ne permet pas d'évaluer efficacement la résistance du sol le long du profil. De plus, le profil est souvent très hétérogène ce qui crée un biais lors de la mesure. L'utilisation d'un pénétromètre plus précis faisant des relevés le long du profil de sol pourrait être une bonne alternative. Cela permettrait aussi de réduire le nombre de répétitions nécessaires.

6 Conclusions et perspectives

À présent, il est important de considérer tous les enseignements tirés de l'expérience réalisée et de les remettre dans le contexte agricole actuel. Ces enseignements peuvent être mis à disposition des agriculteur.rice.s afin de les aider à améliorer la gestion de leur couvert. Les événements climatiques extrêmes de ces dernières années nous confirment une fois de plus qu'il est nécessaire de repenser la conception des cultures en fonction des conditions du milieu. Les couverts d'interculture n'échappent pas à la règle.

Nous savons aujourd'hui que les couverts sont utiles pour fournir d'autres services écosystémiques que la simple couverture du sol. Néanmoins, il ne suffit pas de semer un couvert pour en récolter les bénéfices. Comme toute autre culture, les cultures de couverture méritent qu'on s'y intéresse et qu'on leur accorde de l'importance afin de pouvoir profiter de leurs bénéfices potentiels. Dans ce mémoire nous avons pu confirmer ou infirmer les performances et caractéristiques des couverts pour plusieurs paramètres dans un contexte particulier. Nous avons souligné que la réussite d'un couvert et les performances qui en découlent dépendent de plusieurs facteurs. Ces facteurs sont importants à prendre en compte dans l'établissement d'un couvert.

Premièrement, le choix des espèces. Les espèces doivent être adaptées aux conditions climatiques. Il est important de sélectionner les espèces composant le couvert en fonction des conditions de température, d'humidité et de photopériode de l'expérience afin de favoriser un développement optimal de la plante. Le choix des espèces doit aussi être adapté à la gestion du couvert. Nous avons mis en exergue l'importance de la date de semis, de la préparation du sol et de la densité de semis. Pour chaque événement climatique contraignant (fortes pluies, sécheresse) il faudrait alors adapter le choix des espèces et leur densité de semis.

Deuxièmement, il est préférable de faire des associations d'espèces que de semer des couverts purs. La diversité d'un couvert lui confère un avantage non négligeable en termes de polyvalence et de résilience. Les mélanges d'espèces permettent d'avoir diverses performances et caractéristiques et sont moins affectés par le mauvais développement d'une espèce. Dans le cas de notre étude, les espèces les mieux adaptées sont le trèfle d'Alexandrie, l'avoine brésilienne et le trèfle de Perse.

Troisièmement, l'influence du travail du sol. Les couverts cultivés sur un sol labouré ou non-labouré depuis 15 ans montrent de bonnes performances. S'il y a une volonté de transition en non-labour, les techniques culturales devraient être repensées pour pallier les déficits de performances durant la durée de la transition. Les adventices pourraient par exemple être contrôlées grâce aux autres techniques de gestion intégrée des cultures. Il faut être conscient.e que la transition est lente et que les effets bénéfiques tirés de

celle-ci peuvent prendre plusieurs années avant d'être effectifs.

La grande question est donc de savoir : est-ce que l'investissement financier est proportionnel aux bénéfices engendrés ? Car, n'oublions pas que la gestion améliorée des couverts implique un certain coût : l'achat des semences, le coût lié aux passages par des machines agricoles, etc. Notre étude ne nous permet pas d'évaluer l'impact économique d'un tel investissement dans l'implantation de couverts par rapport aux bénéfices engendrés par ceux-ci. Il serait donc intéressant d'approfondir ces sujets car ils concernent directement les agriculteur.rice.s.

Références

- Abdalla, M. et al. (juin 2013). « Conservation tillage systems : a review of its consequences for greenhouse gas emissions ». In : *Soil Use and Management* 29.2. Publisher : John Wiley & Sons, Ltd, p. 199-209. ISSN : 0266-0032. DOI : 10.1111/sum.12030. URL : <https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/sum.12030> (visité le 15/05/2022).
- Abdalla, Mohamed et al. (2019). « A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity ». en. In : *Global Change Biology* 25.8. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/gcb.14644>, p. 2530-2543. ISSN : 1365-2486. DOI : 10.1111/gcb.14644. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.14644> (visité le 04/04/2022).
- Addo-Danso, Shalom D., Cindy E. Prescott et Andrew R. Smith (jan. 2016). « Methods for estimating root biomass and production in forest and woodland ecosystem carbon studies : A review ». en. In : *Forest Ecology and Management*. Special Section : Forests, Roots and Soil Carbon 359, p. 332-351. ISSN : 0378-1127. DOI : 10.1016/j.foreco.2015.08.015. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112715004405> (visité le 02/06/2022).
- Agriconomie (2022). *Agriconomie*. fr_BE. URL : https://www.agriconomie.be/fr_BE/ (visité le 03/06/2022).
- Akiyama, Kohki, Ken-ichi Matsuzaki et Hideo Hayashi (juin 2005). « Plant sesquiterpenes induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi ». eng. In : *Nature* 435.7043, p. 824-827. ISSN : 1476-4687. DOI : 10.1038/nature03608.
- Angelini, L. et al. (1998). « Antigerminative activity of three glucosinolate-derived products generated by mirosinase hydrolysis ». en. In : *undefined*. URL : <https://www.semanticscholar.org/paper/Antigerminative-activity-of-three-products-by-Angelini-Lazzeri/0fc013ed16ca3a46df589918374cf8879ab3b94c> (visité le 05/05/2022).
- Arvalis (2022a). *Bien choisir son couvert d'interculture en 2018*. URL : <https://www.arvalis-infos.fr/quelques-elements-cles-pour-reussir-son-couvert-@/view-27884-arvarticle.html> (visité le 06/04/2022).
- (2022b). *Le radis chinois, plus facile à détruire que le fourrager*. URL : <https://www.arvalis-infos.fr/les-principales-caracteristiques-du-radis-chinois-@/view-10387-arvarticle.html> (visité le 06/04/2022).

- Arvalis (2022c). *Mélanges d'espèces de couverts : quelles règles ?* URL : <https://www.arvalis-infos.fr/melanges-d-especes-de-couverts-des-synergies-entre-legumineuses-et-non-legumineuses-@/view-10539-arvarticle.html> (visité le 06/04/2022).
- Aufhammer, W. et al. (déc. 1992). « Interplanting of non-legumes into faba bean (*Vicia faba* L.) to reduce the risk of nitrate contamination of the ground water ». In : *European Journal of Agronomy* 1, p. 59-69. DOI : 10.1016/S1161-0301(14)80002-6.
- Ayding, Gökhan et Sevilhan Mennan (nov. 2018). « Biofumigation Studies by Using *Raphanus sativus* and *Eruca sativa* as a Winter Cycle Crops to Control Root-knot Nematodes ». en. In : *Brazilian Archives of Biology and Technology* 61. Publisher : Instituto de Tecnologia do Paraná - Tecpar. ISSN : 1516-8913, 1678-4324. DOI : 10.1590/1678-4324-2018180249. URL : <http://www.scielo.br/j/babt/a/bW5CcHkxyT5mvy4SK6kdvPn/> (visité le 06/05/2022).
- Baker, C. J. et al., éd. (2006). *No-tillage seeding in conservation agriculture*. en. Wallingford : CABI. ISBN : 978-1-84593-116-2. DOI : 10.1079/9781845931162.0000. URL : <http://www.cabi.org/cabebooks/ebook/20073070355> (visité le 15/05/2022).
- Barrios, Edmundo (déc. 2007). « Soil biota, ecosystem services and land productivity ». en. In : *Ecological Economics*. Special Section - Ecosystem Services and Agriculture 64.2, p. 269-285. ISSN : 0921-8009. DOI : 10.1016/j.ecolecon.2007.03.004. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800907001693> (visité le 14/05/2022).
- Bernard, Laetitia et al. (2022). « Advancing the mechanistic understanding of the priming effect on soil organic matter mineralisation ». en. In : *Functional Ecology* 36.6. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/1365-2435.14038>, p. 1355-1377. ISSN : 1365-2435. DOI : 10.1111/1365-2435.14038. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1365-2435.14038> (visité le 11/06/2022).
- Bielders, Charles (2020). *Agriculture de précision, géomatique agricole et mécanisation*.
- Bielders, Charles et al. (2013). « Impact des techniques culturales sur le taux de carbone organique du sol et la stabilité des agrégats dans la province du Hainaut (projet Interreg IV Prosensols) ». fr. In : Number : UCL - Université Catholique de Louvain. URL : <https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/fr/object/boreal%3A127301?current=object/boreal%3A127301> (visité le 12/05/2022).
- Birkás, M et al. (août 2004). « Tillage effects on compaction, earthworms and other soil quality indicators in Hungary ». en. In : *Soil and Tillage Research*. Soil Quality

- as an Indicator of Sustainable Tillage Practices 78.2, p. 185-196. ISSN : 0167-1987. DOI : 10.1016/j.still.2004.02.006. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198704000406> (visité le 12/05/2022).
- Blomback, Karin et al. (2003). « Simulations of soil carbon and nitrogen dynamics during seven years in a catch crop experiment ». en. In : *Agricultural Systems* 76.1. Publisher : Elsevier, p. 95-114. URL : <https://ideas.repec.org/a/eee/agisys/v76y2003i1p95-114.html> (visité le 10/04/2022).
- Blum, Udo et al. (déc. 1997). « Effects of clover and small grain cover crops and tillage techniques on seedling emergence of some dicotyledonous weed species ». en. In : *American Journal of Alternative Agriculture* 12.4. Publisher : Cambridge University Press, p. 146-161. ISSN : 1478-5498, 0889-1893. DOI : 10.1017/S0889189300007487. URL : <https://www.cambridge.org/core/journals/american-journal-of-alternative-agriculture/article/abs/effects-of-clover-and-small-grain-cover-crops-and-tillage-techniques-on-seedling-emergence-of-some-dicotyledonous-weed-species/F0CFC2F8E74D377D43FBB2430A6AE18D> (visité le 05/05/2022).
- Bochet, E, J. L Rubio et J Poesen (juin 1998). « Relative efficiency of three representative matorral species in reducing water erosion at the microscale in a semi-arid climate (Valencia, Spain) ». en. In : *Geomorphology* 23.2, p. 139-150. ISSN : 0169-555X. DOI : 10.1016/S0169-555X(97)00109-8. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X97001098> (visité le 29/04/2022).
- Bonfante, Antonello, Fabio Terribile et Johan Bouma (jan. 2019). « Refining physical aspects of soil quality and soil health when exploring the effects of soil degradation and climate change on biomass production : an Italian case study ». English. In : *SOIL* 5.1. Publisher : Copernicus GmbH, p. 1-14. ISSN : 2199-3971. DOI : 10.5194/soil-5-1-2019. URL : <https://soil.copernicus.org/articles/5/1/2019/> (visité le 11/06/2022).
- Boosalis Jr., M. G. et Ben Doupnik (sept. 1976). « Management of Crop Diseases in Reduced Tillage Systems¹ ». In : *Bulletin of the Entomological Society of America* 22.3, p. 300-302. ISSN : 0013-8754. DOI : 10.1093/besa/22.3.300. URL : <https://doi.org/10.1093/besa/22.3.300> (visité le 15/05/2022).
- Boswell, E. P. et al. (jan. 1998). « Winter wheat cover cropping, VA mycorrhizal fungi and maize growth and yield ». en. In : *Agriculture, Ecosystems & Environment* 67.1, p. 55-65. ISSN : 0167-8809. DOI : 10.1016/S0167-8809(97)00094-7. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880997000947> (visité le 06/05/2022).

- Bouthier et al. (jan. 2014). « Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique ». In : ISBN : 978-2-7592-2193-6.
- Boydston, Rick A. et Ann Hang (déc. 1995). « Rapeseed (*Brassica napus*) Green Manure Crop Suppresses Weeds in Potato (*Solanum tuberosum*) ». en. In : *Weed Technology* 9.4. Publisher : Cambridge University Press, p. 669-675. ISSN : 0890-037X, 1550-2740. DOI : 10.1017/S0890037X00024039. URL : <https://www.cambridge.org/core/journals/weed-technology/article/abs/rapeseed-brassica-napus-green-manure-crop-suppresses-weeds-in-potato-solanum-tuberosum/550E87BAF6193BE028F78907DE0B47B3> (visité le 05/05/2022).
- Breland, Tor Arvid (mars 1996). « Green Manuring with Clover and Ryegrass Catch Crops Undersown in Small Grains : Crop Development and Yields ». In : *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science* 46.1. Publisher : Taylor & Francis _eprint : <https://doi.org/10.1080/09064719609410944>, p. 30-40. ISSN : 0906-4710. DOI : 10.1080/09064719609410944. URL : <https://doi.org/10.1080/09064719609410944> (visité le 12/05/2022).
- Bronick, C. J. et R. Lal (jan. 2005). « Soil structure and management : a review ». en. In : *Geoderma* 124.1, p. 3-22. ISSN : 0016-7061. DOI : 10.1016/j.geoderma.2004.03.005. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706104000898> (visité le 14/05/2022).
- Burgos, Nilda R. et al. (mars 2013). « Review : Confirmation of Resistance to Herbicides and Evaluation of Resistance Levels ». en. In : *Weed Science* 61.1. Publisher : Cambridge University Press, p. 4-20. ISSN : 0043-1745, 1550-2759. DOI : 10.1614/WS-D-12-00032.1. URL : <https://www.cambridge.org/core/journals/weed-science/article/review-confirmation-of-resistance-to-herbicides-and-evaluation-of-resistance-levels/F5255786E60FC02AE8ECD8FDE3A33149> (visité le 15/05/2022).
- Calvet, Raoul, Claire Chenu et Sabine Houot (2021). *Les matières organique des sols*. Français. France Agricole. ISBN : 978-2-85557-744-9.
- Capelle, Christine van, Stefan Schrader et Joachim Brunotte (mai 2012). « Tillage-induced changes in the functional diversity of soil biota – A review with a focus on German data ». en. In : *European Journal of Soil Biology* 50, p. 165-181. ISSN : 1164-5563. DOI : 10.1016/j.ejsobi.2012.02.005. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1164556312000246> (visité le 14/05/2022).
- Carné-Carnavalet, Christian de (2021). *Biologie du sol et agriculture durable*. Français. France Agricole. ISBN : 978-2-85557-733-3.

- Cassart, Pauline (2021). « Contrainte de la certification bio en Agriculture de Conservation en Wallonie dans un contexte de changements climatiques ». Thèse de doct. UCLouvain. (Visité le 01/06/2022).
- Cavigelli, Michel A. et Steve J. Thien (2003). « Phosphorus Bioavailability following Incorporation of Green Manure Crops ». en. In : *Soil Science Society of America Journal* 67.4. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2136/sssaj2003.1186>, p. 1186-1194. ISSN : 1435-0661. DOI : 10.2136/sssaj2003.1186. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj2003.1186> (visité le 05/05/2022).
- Chabert, Ariane et Jean-Pierre Sarthou (avr. 2020). « Conservation agriculture as a promising trade-off between conventional and organic agriculture in bundling ecosystem services ». en. In : *Agriculture, Ecosystems & Environment* 292, p. 106815. ISSN : 0167-8809. DOI : 10.1016/j.agee.2019.106815. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880919304323> (visité le 11/06/2022).
- Chan, K. Y (jan. 2001). « An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity — implications for functioning in soils ». en. In : *Soil and Tillage Research* 57.4, p. 179-191. ISSN : 0167-1987. DOI : 10.1016/S0167-1987(00)00173-2. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198700001732> (visité le 12/05/2022).
- Chauhan, Bhagirath, Gurjeet Gill et C. Preston (jan. 2006). « Tillage system effects on weed ecology, herbicide activity and persistence : A review ». In : *Australian Journal of Experimental Agriculture - AUST J EXP AGR* 46. DOI : 10.1071/EA05291.
- Chauhan, Bhagirath Singh, Ravi Gopal Singh et Gulshan Mahajan (août 2012). « Ecology and management of weeds under conservation agriculture : A review ». en. In : *Crop Protection* 38, p. 57-65. ISSN : 0261-2194. DOI : 10.1016/j.cropro.2012.03.010. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261219412000646> (visité le 05/05/2022).
- Chen, Guihua et Ray R. Weil (juin 2010). « Penetration of cover crop roots through compacted soils ». en. In : *Plant and Soil* 331.1, p. 31-43. ISSN : 1573-5036. DOI : 10.1007/s11104-009-0223-7. URL : <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0223-7> (visité le 13/05/2022).
- Chopart, Jean-Louis (2004). *Les systèmes racinaires des cultures tropicales : rôle, méthodes d'étude in situ, développement, fonctionnement. Document de synthèse.* French. Rapp. tech. CIRAD-CA. URL : <http://agritrop.cirad.fr/524973/> (visité le 02/06/2022).

- Clements, David R. et al. (juin 1996). « Tillage Effects on Weed Seed Return and Seed-bank Composition ». en. In : *Weed Science* 44.2. Publisher : Cambridge University Press, p. 314-322. ISSN : 0043-1745, 1550-2759. DOI : 10.1017/S0043174500093942. URL : <https://www.cambridge.org/core/journals/weed-science/article/abs/tillage-effects-on-weed-seed-return-and-seedbank-composition/E5C9ABB61CD89E7354AE095750524810> (visité le 02/06/2022).
- Coleman, David C., D. A. Jr. Crossley et Paul F. Hendrix (2004). « Fundamentals of soil ecology ». In : Place : Amsterdam ; Publisher : Elsevier Academic Press,
- Cornelissen, J. H. C. et K. Thompson (1997). « Functional leaf attributes predict litter decomposition rate in herbaceous plants ». en. In : *New Phytologist* 135.1. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1046/j.1469-8137.1997.00628.x>, p. 109-114. ISSN : 1469-8137. DOI : 10.1046/j.1469-8137.1997.00628.x. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1469-8137.1997.00628.x> (visité le 06/05/2022).
- Cotrufo, M. Francesca et al. (2013). « The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization : do labile plant inputs form stable soil organic matter? » en. In : *Global Change Biology* 19.4. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/gcb.12113>, p. 988-995. ISSN : 1365-2486. DOI : 10.1111/gcb.12113. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.12113> (visité le 06/05/2022).
- Cottney, Paul et al. (fév. 2022). « How Cover Crop Sowing Date Impacts upon Their Growth, Nutrient Assimilation and the Yield of the Subsequent Commercial Crop ». en. In : *Agronomy* 12.2. Number : 2 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 369. ISSN : 2073-4395. DOI : 10.3390/agronomy12020369. URL : <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/2/369> (visité le 13/05/2022).
- Crowder, David W. et William E. Snyder (sept. 2010). « Eating their way to the top? Mechanisms underlying the success of invasive insect generalist predators ». en. In : *Biological Invasions* 12.9, p. 2857-2876. ISSN : 1573-1464. DOI : 10.1007/s10530-010-9733-8. URL : <https://doi.org/10.1007/s10530-010-9733-8> (visité le 05/05/2022).
- De Baets, S. et al. (mai 2007). « Root characteristics of representative Mediterranean plant species and their erosion-reducing potential during concentrated runoff ». en. In : *Plant and Soil* 294.1, p. 169-183. ISSN : 1573-5036. DOI : 10.1007/s11104-007-9244-2. URL : <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9244-2> (visité le 29/04/2022).

- Deberdt, Péninna et al. (2015). « *Crotalaria spectabilis* and *Raphanus sativus* as Previous Crops Show Promise for the Control of Bacterial Wilt of Tomato Without Reducing Bacterial Populations ». en. In : *Journal of Phytopathology* 163.5. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/jph.12333>, p. 377-385. ISSN : 1439-0434. DOI : 10.1111/jph.12333. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jph.12333> (visité le 06/05/2022).
- Decker, A. Morris et al. (1994). « Legume Cover Crop Contributions to No-Tillage Corn Production ». en. In : *Agronomy Journal* 86.1. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2134/agronj1994.00021962008600010024x>, p. 126-135. ISSN : 1435-0645. DOI : 10.2134/agronj1994.00021962008600010024x. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronj1994.00021962008600010024x> (visité le 28/04/2022).
- Demotes-Mainard, Sabine et al. (2013). « Rose bush leaf and internode expansion dynamics : analysis and development of a model capturing interplant variability ». In : *Frontiers in Plant Science* 4. ISSN : 1664-462X. URL : <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2013.00418> (visité le 05/04/2022).
- Derksen, Douglas A. et al. (sept. 1993). « Impact of Agronomic Practices on Weed Communities : Tillage Systems ». en. In : *Weed Science* 41.3. Publisher : Cambridge University Press, p. 409-417. ISSN : 0043-1745, 1550-2759. DOI : 10.1017/S0043174500052127. URL : <https://www.cambridge.org/core/journals/weed-science/article/abs/impact-of-agronomic-practices-on-weed-communities-tillage-systems/C25AE6F0CEC8E205993E7F11B1039EBF> (visité le 15/05/2022).
- Destain, Jean-Pierre, Véronique Reuter et Jean-Pierre Goffart (2010). « Les cultures intermédiaires pièges à nitrate (CIPAN) et engrais verts : protection de l'environnement et intérêt agronomique ». fr. In : *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, p. 6.
- Don, Axel, Jens Schumacher et Annette Freibauer (2011). « Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks – a meta-analysis ». en. In : *Global Change Biology* 17.4. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x>, p. 1658-1670. ISSN : 1365-2486. DOI : 10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x> (visité le 04/05/2022).
- Dong, L. Q. et K. Q. Zhang (oct. 2006). « Microbial control of plant-parasitic nematodes : a five-party interaction ». en. In : *Plant and Soil* 288.1, p. 31-45. ISSN : 1573-5036. DOI : 10.1007/s11104-006-9009-3. URL : <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9009-3> (visité le 14/05/2022).

- Douglas, Margaret R. et John F. Tooker (mars 2012). « Slug (Mollusca : Agriolimacidae, Arionidae) Ecology and Management in No-Till Field Crops, With an Emphasis on the mid-Atlantic Region ». In : *Journal of Integrated Pest Management* 3.1, p. C1-C9. ISSN : 2155-7470. DOI : 10.1603/IPM11023. URL : <https://doi.org/10.1603/IPM11023> (visité le 05/05/2022).
- Duke et al. (2000). « Natural products as sources of herbicides : current status and future trends ». en. In : *Weed Research* 40.1. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1046/j.1365-3180.2000.00161.x>, p. 99-111. ISSN : 1365-3180. DOI : 10.1046/j.1365-3180.2000.00161.x. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1365-3180.2000.00161.x> (visité le 05/05/2022).
- Dunbar, Mike W., Matthew E. O'Neal et Aaron J. Gassmann (août 2016). « Increased Risk of Insect Injury to Corn Following Rye Cover Crop ». In : *Journal of Economic Entomology* 109.4, p. 1691-1697. ISSN : 0022-0493. DOI : 10.1093/jee/tow101. URL : <https://doi.org/10.1093/jee/tow101> (visité le 05/05/2022).
- Durán Zuazo, V. H. et al. (mars 2008). « Harvest intensity of aromatic shrubs vs. soil erosion : An equilibrium for sustainable agriculture (SE Spain) ». en. In : *CATENA* 73.1, p. 107-116. ISSN : 0341-8162. DOI : 10.1016/j.catena.2007.09.006. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816207001476> (visité le 29/04/2022).
- Durán Zuazo, Víctor Hugo et Carmen Rocío Rodríguez Pleguezuelo (mars 2008). « Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. A review ». en. In : *Agronomy for Sustainable Development* 28.1, p. 65-86. ISSN : 1773-0155. DOI : 10.1051/agro:2007062. URL : <https://doi.org/10.1051/agro:2007062> (visité le 03/05/2022).
- EcoBioSoil (2022). *Protocole participatif - Paniers à Vers de Terre - EcoBioSoil*. fr. URL : <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page/protocole-participatif-paniers-a-vers-de-terre> (visité le 16/02/2022).
- Elers, B. et H.D. Hartmann (1987). « [Biological preservation of nitrate [in soils] during winter]. [German] ». deu. In : *VDLUFA Schriftenreihe*. ISSN : 0173-8712. URL : https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=%5BBiological+preservation+of+nitrate+%5Bin+soils%5D+during+winter%5D.+%5BGerman%5D&author=Elers+B.&publication_year=1987 (visité le 10/04/2022).
- Eriksen, J. et K. Thorup-Kristensen (août 2002). « The effect of catch crops on sulphate leaching and availability of S in the succeeding crop on sandy loam soil in Denmark ». en. In : *Agriculture, Ecosystems & Environment* 90.3, p. 247-254. ISSN : 0167-8809.

- DOI : 10.1016/S0167-8809(01)00214-6. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880901002146> (visité le 05/05/2022).
- Ettema, Christien H. et David A. Wardle (avr. 2002). « Spatial soil ecology ». en. In : *Trends in Ecology & Evolution* 17.4, p. 177-183. ISSN : 0169-5347. DOI : 10.1016/S0169-5347(02)02496-5. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169534702024965> (visité le 14/05/2022).
- Europe Environment Agency (2022). *Wet and dry - drought*. en. Page. URL : <https://www.eea.europa.eu/publications/europes-changing-climate-hazards-1/wet-and-dry-1/wet-and-dry-drought> (visité le 14/05/2022).
- European Comission (2022). *Nitrates - Water pollution - Environment*. URL : https://ec.europa.eu/environment/water/water-nitrates/index_en.html (visité le 08/04/2022).
- Evenson, R. E. et D. Gollin (mai 2003). « Assessing the Impact of the Green Revolution, 1960 to 2000 ». en. In : *Science* 300.5620, p. 758-762. ISSN : 0036-8075, 1095-9203. DOI : 10.1126/science.1078710. URL : <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1078710> (visité le 03/05/2022).
- Fageria, N.K., V. Baligar et Bryan Bailey (oct. 2005). « Role of Cover Crops in Improving Soil and Row Crop Productivity ». In : *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 36. DOI : 10.1080/00103620500303939.
- Fanin, Nicolas, Stephan Hättenschwiler et Nathalie Fromin (juin 2014). « Litter fingerprint on microbial biomass, activity, and community structure in the underlying soil ». en. In : *Plant and Soil* 379.1, p. 79-91. ISSN : 1573-5036. DOI : 10.1007/s11104-014-2051-7. URL : <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2051-7> (visité le 06/05/2022).
- FAO (nov. 2021). *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2021*. fr. FAO. ISBN : 978-92-5-135200-7. DOI : 10.4060/cb4476fr. URL : <http://www.fao.org/documents/card/fr/c/cb4476fr> (visité le 03/05/2022).
- (2022a). *Principes de l'agriculture de conservation / L'agriculture de conservation / Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture*. URL : <https://www.fao.org/conservation-agriculture/overview/conservation-agriculture-principles/fr/> (visité le 15/05/2022).
- (2022b). *Qu'est-ce que l'agriculture de conservation ? / L'agriculture de conservation / Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture*. URL : <https://www.fao.org/conservation-agriculture/overview/what-is-conservation-agriculture/fr/> (visité le 15/05/2022).

- Filion, M., M. St-Arnaud et J. A. Fortin (1999). « Direct interaction between the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* and different rhizosphere microorganisms ». en. In : *New Phytologist* 141.3. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1046/j.1469-8137.1999.00366.x>, p. 525-533. ISSN : 1469-8137. DOI : 10.1046/j.1469-8137.1999.00366.x. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1469-8137.1999.00366.x> (visité le 06/05/2022).
- Fockede, Aline et Xavier Belin (2021). « Etude de l'impact des pratiques agricoles sur les services écosystémiques à travers une recherche participative dans la région limoneuse et sablilimeuse du Brabant wallon ». Thèse de doct. (Visité le 17/03/2022).
- Francis, C. A., N. Jordan et al. (jan. 2011). « Innovative Education in Agroecology : Experiential Learning for a Sustainable Agriculture ». en. In : *Critical Reviews in Plant Sciences* 30.1-2, p. 226-237. ISSN : 0735-2689, 1549-7836. DOI : 10.1080/07352689.2011.554497. URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07352689.2011.554497> (visité le 05/05/2022).
- Francis, C. A. et P. Porter (jan. 2011). « Ecology in Sustainable Agriculture Practices and Systems ». In : *Critical Reviews in Plant Sciences* 30.1-2. Publisher : Taylor & Francis _eprint : <https://doi.org/10.1080/07352689.2011.554353>, p. 64-73. ISSN : 0735-2689. DOI : 10.1080/07352689.2011.554353. URL : <https://doi.org/10.1080/07352689.2011.554353> (visité le 05/05/2022).
- Francis, G. S., K. M. Bartley et F. J. Tabley (nov. 1998). « The effect of winter cover crop management on nitrate leaching losses and crop growth ». en. In : *The Journal of Agricultural Science* 131.3. Publisher : Cambridge University Press, p. 299-308. ISSN : 1469-5146, 0021-8596. DOI : 10.1017/S0021859698005899. URL : <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-agricultural-science/article/abs/effect-of-winter-cover-crop-management-on-nitrate-leaching-losses-and-crop-growth/3C5FFAFC570505A8649865787F0C917A> (visité le 10/04/2022).
- Frick, B. et A. G. Thomas (oct. 1992). « Weed surveys in different tillage systems in southwestern Ontario field crops ». In : *Canadian Journal of Plant Science* 72.4. Publisher : NRC Research Press, p. 1337-1347. ISSN : 0008-4220. DOI : 10.4141/cjps92-166. URL : <https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.4141/cjps92-166> (visité le 30/05/2022).
- Frye, W. W. et R. L. Blevins (1997). « Soil Organic Matter under Long-Term No-Tillage and Conventional Tillage Corn Production in Kentucky ». In : *Soil Organic Matter in Temperate Agroecosystems*. Num Pages : 8. CRC Press. ISBN : 978-0-367-81169-3.

- Fustec, Joëlle et al. (mars 2010). « Nitrogen rhizodeposition of legumes. A review ». en. In : *Agronomy for Sustainable Development* 30.1, p. 57-66. ISSN : 1773-0155. DOI : 10.1051/agro/2009003. URL : <https://doi.org/10.1051/agro/2009003> (visité le 28/04/2022).
- Gahoonia, Tara, Farouq Asmar et al. (juin 2000). « Root-released organic acids and phosphorus uptake of two barley cultivars in laboratory and field experiments ». en. In : *European Journal of Agronomy* 12.3, p. 281-289. ISSN : 1161-0301. DOI : 10.1016/S1161-0301(00)00052-6. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030100000526> (visité le 05/05/2022).
- Gahoonia, Tara et Niels Nielsen (déc. 1997). « Variation in root hairs of barley cultivars doubled soil phosphorus uptake ». en. In : *Euphytica* 98.3, p. 177-182. ISSN : 1573-5060. DOI : 10.1023/A:1003113131989. URL : <https://doi.org/10.1023/A:1003113131989> (visité le 05/05/2022).
- Gebhard, Claude-Alain et al. (2013). « Screening de légumineuses pour couverts - végétaux : azote et adventices ». fr. In : p. 10.
- George, E. (1992). « Contribution of mycorrhizal hyphal to nutrient and water uptake of plants ». en. In : *undefined*. URL : <https://www.semanticscholar.org/paper/Contribution-of-mycorrhizal-hyphal-to-nutrient-and-George/6a22f24d9fcc539328f5e43b6b4d60a13e38867b> (visité le 14/05/2022).
- Gérald, HUBER, SCHAUB Christiane et Service Environnement-Innovation (s. d.). « Avec le concours financier de : » fr. In : (), p. 46.
- Giller, Ken et al. (sept. 2005). « Soil biodiversity in rapidly changing tropical landscapes : scaling down and scaling up ». In : p. 295-318. ISBN : 978-0-521-60987-6. DOI : 10.1017/CB09780511541926.017.
- Griffon, Michel (2013). « Vers une septième révolution agricole ». fr. In : *Revue Projet* 332.1. Place : La Plaine Saint-Denis Publisher : C.E.R.A.S, p. 11-19. ISSN : 0033-0884. DOI : 10.3917/pro.332.0011. URL : <https://www.cairn.info/revue-projet-2013-1-page-11.htm> (visité le 06/06/2022).
- Gupta, Varsha (oct. 2020). « Weed flora dynamics and yield of mustard as influenced by tillage and weed management in pearl millet-mustard-cowpea cropping system ». In : 52, p. 254-258. DOI : 10.5958/0974-8164.2020.00049.0.
- Gyssels, G. et al. (juin 2005). « Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water : a review ». en. In : *Progress in Physical Geography : Earth and Environment* 29.2. Publisher : SAGE Publications Ltd, p. 189-217. ISSN : 0309-

1333. DOI : 10.1191/0309133305pp443ra. URL : <https://doi.org/10.1191/0309133305pp443ra> (visité le 29/04/2022).

Haas, Dieter et Christoph Keel (2003). « Regulation of antibiotic production in root-colonizing *Pseudomonas* spp. and relevance for biological control of plant disease ». eng. In : *Annual Review of Phytopathology* 41, p. 117-153. ISSN : 0066-4286. DOI : 10.1146/annurev.phyto.41.052002.095656.

Hamel, C. et al. (jan. 2005). « Negative feedback on a perennial crop : Fusarium crown and root rot of asparagus is related to changes in soil microbial community structure ». en. In : *Plant and Soil* 268.1, p. 75-87. ISSN : 1573-5036. DOI : 10.1007/s11104-004-0228-1. URL : <https://doi.org/10.1007/s11104-004-0228-1> (visité le 06/05/2022).

Harrold, L. L. et W. Edwards (1974). « No-Tillage System Reduces Erosion From Continuous Corn Watersheds ». In : DOI : 10.13031/2013.36871.

Hartwig, Nathan L. et Hans Ulrich Ammon (déc. 2002). « Cover crops and living mulches ». en. In : *Weed Science* 50.6. Publisher : Cambridge University Press, p. 688-699. ISSN : 0043-1745, 1550-2759. DOI : 10.1614/0043-1745(2002)050[0688:AIACCA]2.0.CO;2. URL : <https://www.cambridge.org/core/journals/weed-science/article/abs/cover-crops-and-living-mulches/B51858A135DE87C58B1AD55B521C6BC2#> (visité le 04/05/2022).

Hobbs, Peter R, Ken Sayre et Raj Gupta (fév. 2008). « The role of conservation agriculture in sustainable agriculture ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences* 363.1491. Publisher : Royal Society, p. 543-555. DOI : 10.1098/rstb.2007.2169. URL : <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2007.2169> (visité le 15/05/2022).

Hofmann, A. et al. (avr. 2009). « Root exudation of phloridzin by apple seedlings (*Malus X domestica* Borkh.) with symptoms of apple replant disease ». In : *Journal of Applied Botany and Food Quality* 82, p. 193-198.

Holderbaum, J. F. et al. (1990). « Fall-Seeded Legume Cover Crops for No-Tillage Corn in the Humid East ». en. In : *Agronomy Journal* 82.1. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2134/agronj1990.00021962008200010026x>, p. 117-124. ISSN : 1435-0645. DOI : 10.2134/agronj1990.00021962008200010026x. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronj1990.00021962008200010026x> (visité le 29/04/2022).

Holland, J. M. (juin 2004). « The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe : reviewing the evidence ». en. In : *Agriculture, Ecosystems & Environment* 103.1, p. 1-25. ISSN : 0167-8809. DOI : 10.1016/j.agee.2003.12.018. URL :

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880904000593>
(visité le 15/05/2022).

Hunt, H. W. et al. (fév. 1987). « The detrital food web in a shortgrass prairie ». en. In : *Biology and Fertility of Soils* 3.1, p. 57-68. ISSN : 1432-0789. DOI : 10.1007/BF00260580. URL : <https://doi.org/10.1007/BF00260580> (visité le 14/05/2022).

ITAB (2012a). *Annuelles germination de printemps*. fr.

— (2012b). *Green manure and cover crops in organic agriculture : guide to the choice of the species*. fr. Practice tool. Pages : 1-87 Publisher : ITAB - Institute for Organic Agriculture and Food ITAB - L'Institut de l'agriculture et de l'alimentation biologiques www.itab.asso.fr. URL : <https://orgprints.org/id/eprint/30573/> (visité le 02/06/2022).

— (2022). *Annuelles germination d'été*. URL : http://itab.asso.fr/downloads/desherb-meca/dm-brochure-adventices_6_ete.pdf (visité le 02/06/2022).

Jabbour, Randa et al. (août 2015). « Cover crop and tillage intensities alter ground-dwelling arthropod communities during the transition to organic production ». In : *Renewable Agriculture and Food Systems* -1, p. 1-14. DOI : 10.1017/S1742170515000290.

Jacobsen, Carsten Suhr et Mathis Hjort Hjelmsø (juin 2014). « Agricultural soils, pesticides and microbial diversity ». en. In : *Current Opinion in Biotechnology*. Energy biotechnology • Environmental biotechnology 27, p. 15-20. ISSN : 0958-1669. DOI : 10.1016/j.copbio.2013.09.003. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958166913006630> (visité le 14/05/2022).

Jäggli, F. (1978). « Sickerverluste an mineralstoffen ». In : *Mitteilungen für die Schweizerische Landwirtschaft* 26, p. 130-136.

Jakobsen, I., L. K. Abbott et A. D. Robson (1992). « External hyphae of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Trifolium subterraneum* L. » en. In : *New Phytologist* 120.3. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1469-8137.1992.tb01077.x>, p. 371-380. ISSN : 1469-8137. DOI : 10.1111/j.1469-8137.1992.tb01077.x. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1469-8137.1992.tb01077.x> (visité le 14/05/2022).

Janzen, H. H. et G. B. Schaalje (avr. 1992). « Barley response to nitrogen and non-nutritional benefits of legume green manure ». en. In : *Plant and Soil* 142.1, p. 19-30. ISSN : 1573-5036. DOI : 10.1007/BF00010171. URL : <https://doi.org/10.1007/BF00010171> (visité le 28/04/2022).

- Jones, David L. (août 1998). « Organic acids in the rhizosphere – a critical review ». en. In : *Plant and Soil* 205.1, p. 25-44. ISSN : 1573-5036. DOI : 10.1023/A:1004356007312. URL : <https://doi.org/10.1023/A:1004356007312> (visité le 05/05/2022).
- Justes, Eric, Nicolas Beaudoin et al. (2012). *Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques*. Other 2100450303. Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 60 p. DOI : 10.15454/hpbw-8e96. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03130201> (visité le 08/04/2022).
- Justes, Eric et Guy Richard (2017). « Contexte, concepts et définition des cultures intermédiaires multi-services ». In : *Innovations Agronomiques* 62. Publisher : INRAE, p. 1-15. DOI : 10.15454/1.5174017785695195E12. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01770348> (visité le 08/02/2022).
- Kabir, Z. et R. T. Koide (avr. 2000). « The effect of dandelion or a cover crop on mycorrhiza inoculum potential, soil aggregation and yield of maize ». en. In : *Agriculture, Ecosystems & Environment* 78.2, p. 167-174. ISSN : 0167-8809. DOI : 10.1016/S0167-8809(99)00121-8. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880999001218> (visité le 06/05/2022).
- Kabir, Zahangir (jan. 2005). « Tillage or no-tillage : Impact on mycorrhizae ». In : *Canadian Journal of Plant Science* 85.1. Publisher : NRC Research Press, p. 23-29. ISSN : 0008-4220. DOI : 10.4141/P03-160. URL : <https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.4141/p03-160> (visité le 15/05/2022).
- Kassam, A., T. Friedrich et R. Derpsch (jan. 2019). « Global spread of Conservation Agriculture ». In : *International Journal of Environmental Studies* 76.1. Publisher : Routledge _eprint : <https://doi.org/10.1080/00207233.2018.1494927>, p. 29-51. ISSN : 0020-7233. DOI : 10.1080/00207233.2018.1494927. URL : <https://doi.org/10.1080/00207233.2018.1494927> (visité le 11/06/2022).
- Kay, B. D et A. J VandenBygaart (juill. 2002). « Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter ». en. In : *Soil and Tillage Research*. Conservation Tillage and Stratification of Soil Properties 66.2, p. 107-118. ISSN : 0167-1987. DOI : 10.1016/S0167-1987(02)00019-3. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198702000193> (visité le 15/05/2022).
- Keesing, Felicia et al. (déc. 2010). « Impacts of biodiversity on the emergence and transmission of infectious diseases ». en. In : *Nature* 468.7324. Number : 7324 Publisher :

- Nature Publishing Group, p. 647-652. ISSN : 1476-4687. DOI : 10.1038/nature09575. URL : <https://www.nature.com/articles/nature09575> (visité le 06/05/2022).
- Kessel, Chris van et al. (2013). « Climate, duration, and N placement determine N₂O emissions in reduced tillage systems : a meta-analysis ». en. In : *Global Change Biology* 19.1. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1365-2486.2012.02779.x>, p. 33-44. ISSN : 1365-2486. DOI : 10.1111/j.1365-2486.2012.02779.x. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2486.2012.02779.x> (visité le 14/05/2022).
- Keuskamp, Joost A. et al. (2013). « Tea Bag Index : a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems ». en. In : *Methods in Ecology and Evolution* 4.11. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/2041-210X.12097>, p. 1070-1075. ISSN : 2041-210X. DOI : 10.1111/2041-210X.12097. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/2041-210X.12097> (visité le 16/02/2022).
- Kumar, K. et K. M. Goh (jan. 1999). « Crop Residues and Management Practices : Effects on Soil Quality, Soil Nitrogen Dynamics, Crop Yield, and Nitrogen Recovery ». en. In : *Advances in Agronomy*. Sous la dir. de Donald L. Sparks. T. 68. Academic Press, p. 197-319. DOI : 10.1016/S0065-2113(08)60846-9. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065211308608469> (visité le 04/05/2022).
- Kuntz, M. et al. (juill. 2013). « Influence of reduced tillage on earthworm and microbial communities under organic arable farming ». en. In : *Pedobiologia* 56.4, p. 251-260. ISSN : 0031-4056. DOI : 10.1016/j.pedobi.2013.08.005. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031405613000474> (visité le 31/05/2022).
- Lal, R. (jan. 2001). « World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon ». en. In : *Advances in Agronomy*. T. 71. Academic Press, p. 145-191. DOI : 10.1016/S0065-2113(01)71014-0. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065211301710140> (visité le 04/05/2022).
- Lavelle, P. et A. Spain (fév. 2002). *Soil Ecology*. en. Google-Books-ID : iCC1sOmFTSMC. Springer Science & Business Media. ISBN : 978-1-4020-0490-2.
- Lee, Kye-Han et al. (2000). « Multispecies Riparian Buffers Trap Sediment and Nutrients during Rainfall Simulations ». en. In : *Journal of Environmental Quality* 29.4. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2134/jeq2000.00472425002900040025x>, p. 1200-1205. ISSN : 1537-2537. DOI : 10.2134/jeq2000.00472425002900040025x. URL : <https://>

onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/jeq2000.00472425002900040025x (visité le 29/04/2022).

Lichtenberg, Elinor M. et al. (nov. 2017). « A global synthesis of the effects of diversified farming systems on arthropod diversity within fields and across agricultural landscapes ». eng. In : *Global Change Biology* 23.11, p. 4946-4957. ISSN : 1365-2486. DOI : 10.1111/gcb.13714.

Lichtfouse, Eric et al. (mars 2009). « Agronomy for sustainable agriculture. A review ». en. In : *Agronomy for Sustainable Development* 29.1, p. 1-6. ISSN : 1774-0746, 1773-0155. DOI : 10.1051/agro:2008054. URL : <http://link.springer.com/10.1051/agro:2008054> (visité le 02/05/2022).

Liebman, Matt, Charles Mohler et Charles P. Staver (2001). *Ecological Management of Agricultural Weeds*. Cambridge : Cambridge University Press. ISBN : 978-0-521-56068-9. DOI : 10.1017/CB09780511541810. URL : <https://www.cambridge.org/core/books/ecological-management-of-agricultural-weeds/26FC8424411DCC504C1C36972B1C6462> (visité le 05/05/2022).

Lindstrom et al., M.J. (1984). « Soil and Water Conservation ». In : p. 64-68.

Loaiza Puerta, Viviana et al. (août 2018). « Improvement of soil structure through organic crop management, conservation tillage and grass-clover ley ». en. In : *Soil and Tillage Research* 180, p. 1-9. ISSN : 0167-1987. DOI : 10.1016/j.still.2018.02.007. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198718300850> (visité le 15/05/2022).

Locke, Martin A., Krishna N. Reddy et Robert M. Zablotowicz (2002). « Weed management in conservation crop production systems ». en. In : *Weed Biology and Management* 2.3. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1046/j.1445-6664.2002.00061.x>, p. 123-132. ISSN : 1445-6664. DOI : 10.1046/j.1445-6664.2002.00061.x. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1445-6664.2002.00061.x> (visité le 05/05/2022).

Maetens, W., J. Poesen et M. Vanmaercke (oct. 2012). « How effective are soil conservation techniques in reducing plot runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean? » en. In : *Earth-Science Reviews* 115.1, p. 21-36. ISSN : 0012-8252. DOI : 10.1016/j.earscirev.2012.08.003. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825212001006> (visité le 29/04/2022).

Malik, Ram K. et Samunder Singh (sept. 1995). « Littleseed Canarygrass (*Phalaris minor*) Resistance to Isoproturon in India ». en. In : *Weed Technology* 9.3. Publisher : Cambridge University Press, p. 419-425. ISSN : 0890-037X, 1550-2740. DOI : 10.1017/S0890037X00023629. URL : <https://www.cambridge.org/core/journals/>

weed-technology/article/abs/littleseed-canarygrass-phalaris-minor-resistance-to-isoproturon-in-india/155F99E5EC843D8D2921B0542D31E78E (visité le 05/05/2022).

Martínez Raya, A., V. H. Durán Zuazo et J. R. Francia Martínez (2006). « Soil erosion and runoff response to plant-cover strips on semiarid slopes (SE Spain) ». en. In : *Land Degradation & Development* 17.1. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/ldr.674>, p. 1-11. ISSN : 1099-145X. DOI : 10.1002/ldr.674. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ldr.674> (visité le 29/04/2022).

Masson-Delmotte, Valérie et al. (s. d.). « Résumé à l'intention des décideurs ». fr. In : (), p. 39.

Mees, Olivier (2021). « Étude comparative entre un couvert végétal multi-espèces et des couverts purs des espèces constituant le mélange ». Thèse de doct. (Visité le 01/06/2022).

MIEVIS, Philippe (2022a). *Bilan climatologique d'août 2021*. fr-fr. URL : <https://www.meteobelgique.be/article/relevés-et-analyses/annee-2021/2454-bilan-climatologique-d-aout-2021> (visité le 17/05/2022).

— (2022b). *Bilan climatologique de septembre 2021*. fr-fr. URL : <https://www.meteobelgique.be/article/relevés-et-analyses/annee-2021/2456-bilan-climatologique-de-septembre-2021> (visité le 17/05/2022).

Mohler, C. et J. R. Teasdale (1993). « Response of weed emergence to rate of Vicia villosa Roth and Secale cereale L. residue ». en. In : *Weed Research* 33.6. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1365-3180.1993.tb01965.x>, p. 487-499. ISSN : 1365-3180. DOI : 10.1111/j.1365-3180.1993.tb01965.x. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-3180.1993.tb01965.x> (visité le 05/05/2022).

Mohler, Charles et M. Brett Calloway (1992). « Effects of Tillage and Mulch on the Emergence and Survival of Weeds in Sweet Corn ». In : *Journal of Applied Ecology* 29.1. Publisher : [British Ecological Society, Wiley], p. 21-34. ISSN : 0021-8901. DOI : 10.2307/2404343. URL : <https://www.jstor.org/stable/2404343> (visité le 05/05/2022).

Muller, J. C. et al. (1989). *Influence of catch crops on mineral nitrogen leaching and its subsequent plant use*. English. Rapp. tech. Elsevier Applied Science. URL : [https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Influence+of+catch+crops+on+mineral+nitrogen+leaching+and+its+subsequent+plant+use&author=Muller%](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Influence+of+catch+crops+on+mineral+nitrogen+leaching+and+its+subsequent+plant+use&author=Muller%20et+al.)

2C+J.C.+%28Institute+National+de+la+Recherche+Agronomique%2C+Chalons-Sur-Marne%2C+France%29&publication_year=1989 (visité le 10/04/2022).

Müller, Torsten et Kristian Thorup-Kristensen (jan. 2001). « N-Fixation of Selected Green Manure Plants in an Organic Crop Rotation ». In : *Biological Agriculture and Horticulture* 18, p. 345-363. DOI : 10.1080/01448765.2001.9754897.

Murphy, Stephen D. et al. (fév. 2006). « Promotion of weed species diversity and reduction of weed seedbanks with conservation tillage and crop rotation ». en. In : *Weed Science* 54.1. Publisher : Cambridge University Press, p. 69-77. ISSN : 0043-1745, 1550-2759. DOI : 10.1614/WS-04-125R1.1. URL : <https://www.cambridge.org/core/journals/weed-science/article/abs/promotion-of-weed-species-diversity-and-reduction-of-weed-seedbanks-with-conservation-tillage-and-crop-rotation/680B083F482ED622E9A7D1A74B40A41A> (visité le 15/05/2022).

Naveed, M. et al. (2018). « Rhizosphere-Scale Quantification of Hydraulic and Mechanical Properties of Soil Impacted by Root and Seed Exudates ». en. In : *Vadose Zone Journal* 17.1. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2136/vzj2017.04.0083>, p. 170083. ISSN : 1539-1663. DOI : 10.2136/vzj2017.04.0083. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/vzj2017.04.0083> (visité le 04/05/2022).

Nicol, Robert W. et al. (sept. 2003). « Ginsenosides stimulate the growth of soilborne pathogens of American ginseng ». eng. In : *Phytochemistry* 64.1, p. 257-264. ISSN : 0031-9422. DOI : 10.1016/s0031-9422(03)00271-1.

OECD (2022). *Les systèmes alimentaires et le triple défi*. en. URL : https://issuu.com/oecd.publishing/docs/les_syst_mes_alimentaires_et_le_triple_d_fi (visité le 05/05/2022).

Our World in Data (2022). *Surface temperature anomaly*. URL : <https://ourworldindata.org/grapher/hadcrut-surface-temperature-anomaly> (visité le 14/05/2022).

Pannkuk, Chris D., Robert I. Papendick et Keith E. Saxton (1997). « Fallow Management Effects on Soil Water Storage and Wheat Yields in the Pacific Northwest ». en. In : *Agronomy Journal* 89.3. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2134/agronj1997.00021962008900030004x>, p. 386-391. ISSN : 1435-0645. DOI : 10.2134/agronj1997.00021962008900030004x. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronj1997.00021962008900030004x> (visité le 06/05/2022).

Paustian, K. et al. (déc. 1997). « Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions ». English. In : *Soil Use & Management* 13.S4. Publisher : Wiley-Blackwell, p. 229-244.

ISSN : 0266-0032. DOI : 10.1111/j.1475-2743.1997.tb00594.x. URL : <https://abdn.pure.elsevier.com/en/publications/agricultural-soils-as-a-sink-to-mitigate-co2-emissions> (visité le 04/04/2022).

Pfiffner, Lukas (s. d.). « Vers de terre - Architectes des sols fertiles ». fr. In : (), p. 6.

Pittelkow, Cameron M. et al. (jan. 2015). « Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture ». en. In : *Nature* 517.7534. Number : 7534 Publisher : Nature Publishing Group, p. 365-368. ISSN : 1476-4687. DOI : 10.1038/nature13809. URL : <https://www.nature.com/articles/nature13809> (visité le 06/06/2022).

Poeplau, Christopher et Axel Don (fév. 2015). « Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis ». en. In : *Agriculture, Ecosystems & Environment* 200, p. 33-41. ISSN : 0167-8809. DOI : 10.1016/j.agee.2014.10.024. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880914004873> (visité le 05/04/2022).

Poeplau, Christopher, Axel Don et al. (2011). « Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone – carbon response functions as a model approach ». en. In : *Global Change Biology* 17.7. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1365-2486.2011.02408.x>, p. 2415-2427. ISSN : 1365-2486. DOI : 10.1111/j.1365-2486.2011.02408.x. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2486.2011.02408.x> (visité le 04/05/2022).

Pousset, Joseph (2014). *Assolements et rotations*. France Agricole. ISBN : 978-2-85557-343-4.

— (2017). *Engrais verts et fertilité des sols*. France Agricole. ISBN : 978-2-85557-535-3.

Powlson, D. S., A. P. Whitmore et K. W. T. Goulding (2011). « Soil carbon sequestration to mitigate climate change : a critical re-examination to identify the true and the false ». en. In : *European Journal of Soil Science* 62.1. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1365-2389.2010.01342.x>, p. 42-55. ISSN : 1365-2389. DOI : 10.1111/j.1365-2389.2010.01342.x. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2389.2010.01342.x> (visité le 11/06/2022).

Pozo, Maria J. et al. (mars 2002). « Localized versus systemic effect of arbuscular mycorrhizal fungi on defence responses to Phytophthora infection in tomato plants ». In : *Journal of Experimental Botany* 53.368, p. 525-534. ISSN : 0022-0957. DOI : 10.1093/jexbot/53.368.525. URL : <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.368.525> (visité le 06/05/2022).

- Protect'eau (2022a). *Protecteau » Couverts végétaux*. URL : <https://protecteau.be/fr/nitrate/agriculteurs/couvert> (visité le 08/04/2022).
- (2022b). *Protecteau » Zone vulnérable*. URL : <https://protecteau.be/fr/nitrate/agriculteurs/legislations/zone-vulnerable> (visité le 08/04/2022).
- Puigdefábregas, Juan (2005). « The role of vegetation patterns in structuring runoff and sediment fluxes in drylands ». en. In : *Earth Surface Processes and Landforms* 30.2. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/esp.1181>, p. 133-147. ISSN : 1096-9837. DOI : 10.1002/esp.1181. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/esp.1181> (visité le 29/04/2022).
- Rafaraso, L. S. et al. (mars 2016). « Effect of Cover Crop Residues on White Grubs and Adults of *Heteronychus bituberculatus* (Coleoptera : Dynastidae) and on the Damage They Cause to Upland Rice ». In : *African Entomology* 24.1. Publisher : Entomological Society of Southern Africa, p. 75-79. ISSN : 1021-3589, 0013-8789. DOI : 10.4001/003.024.0075. URL : <https://bioone.org/journals/african-entomology/volume-24/issue-1/003.024.0075/Effect-of-Cover-Crop-Residues-on-White-Grubs-and-Adults/10.4001/003.024.0075.full> (visité le 06/05/2022).
- Ranells, Noah N. et Michael G. Waggoner (1996). « Nitrogen Release from Grass and Legume Cover Crop Monocultures and Bicultures ». en. In : *Agronomy Journal* 88.5. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2134/agronj1996.00021962008800050015x>, p. 777-882. ISSN : 1435-0645. DOI : 10.2134/agronj1996.00021962008800050015x. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronj1996.00021962008800050015x> (visité le 28/04/2022).
- (1997). « Grass–Legume Bicultures as Winter Annual Cover Crops ». en. In : *Agronomy Journal* 89.4. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2134/agronj1997.00021962008900040019x>, p. 659-665. ISSN : 1435-0645. DOI : 10.2134/agronj1997.00021962008900040019x. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronj1997.00021962008900040019x> (visité le 28/04/2022).
- Rasmann, Sergio et al. (avr. 2005). « Recruitment of entomopathogenic nematodes by insect-damaged maize roots ». en. In : *Nature* 434.7034. Number : 7034 Publisher : Nature Publishing Group, p. 732-737. ISSN : 1476-4687. DOI : 10.1038/nature03451. URL : <https://www.nature.com/articles/nature03451> (visité le 06/05/2022).

- Reader, R.J. (1991). *Control of seedling emergence by ground cover : a potential mechanism involving seed predation*. URL : <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/b91-260> (visité le 05/05/2022).
- Reau, Raymond et al. (mai 2005). « Effets allélopathiques des Brassicacées via leurs actions sur les agents pathogènes telluriques et les mycorhizes : analyse bibliographique. Partie 1 ». fr. In : *Oléagineux, Corps gras, Lipides* 12.3, p. 261-271. ISSN : 1258-8210, 1950-697X. DOI : 10.1051/ocl.2005.0261. URL : <http://www.ocl-journal.org/10.1051/ocl.2005.0261> (visité le 06/04/2022).
- Reeleder, R. D. et al. (oct. 2006). « Impacts of tillage, cover crop, and nitrogen on populations of earthworms, microarthropods, and soil fungi in a cultivated fragile soil ». en. In : *Applied Soil Ecology* 33.3, p. 243-257. ISSN : 0929-1393. DOI : 10.1016/j.apsoil.2005.10.006. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092913930500209X> (visité le 31/05/2022).
- Reicosky, D. C. et al. (mai 1995). « Soil organic matter changes resulting from tillage and biomass production ». en. In : *Journal of Soil and Water Conservation* 50.3. Publisher : Soil and Water Conservation Society Section : Features, p. 253-261. ISSN : 0022-4561, 1941-3300. URL : <https://www.jswnonline.org/content/50/3/253> (visité le 11/06/2022).
- Rey, F (jan. 2003). « Influence of vegetation distribution on sediment yield in forested marly gullies ». en. In : *CATENA. Gully Erosion and Global Change* 50.2, p. 549-562. ISSN : 0341-8162. DOI : 10.1016/S0341-8162(02)00121-2. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816202001212> (visité le 29/04/2022).
- Ruiter, Peter C. de, Anje-Margriet Neutel et John C. Moore (nov. 1998). « Biodiversity in soil ecosystems : the role of energy flow and community stability ». en. In : *Applied Soil Ecology* 10.3, p. 217-228. ISSN : 0929-1393. DOI : 10.1016/S0929-1393(98)00121-8. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0929139398001218> (visité le 14/05/2022).
- Sanchez, Jose et al. (mai 2004). « Managing Soil Carbon and Nitrogen for Productivity and Environmental Quality ». In : *Agronomy Journal - AGRON J* 96. DOI : 10.2134/agronj2004.0769.
- Scheublin, Tanja R. et al. (juin 2010). « Characterisation of microbial communities colonising the hyphal surfaces of arbuscular mycorrhizal fungi ». en. In : *The ISME Journal* 4.6. Number : 6 Publisher : Nature Publishing Group, p. 752-763. ISSN : 1751-7370. DOI : 10.1038/ismej.2010.5. URL : <https://www.nature.com/articles/ismej20105> (visité le 06/05/2022).

- Scholberg, J. et al. (juin 2010). « Cover Crops for Sustainable Agrosystems in the Americas ». In : *Genetic Engineering, Biofertilisation, Soil Quality and Organic Farming*. T. 4. Journal Abbreviation : Genetic Engineering, Biofertilisation, Soil Quality and Organic Farming, p. 23-58. DOI : 10.1007/978-90-481-8741-6_2.
- Senapati, B. et al. (1999). « In-soil earthworm technologies for tropical agroecosystems ». en. In : *undefined*. URL : <https://www.semanticscholar.org/paper/In-soil-earthworm-technologies-for-tropical-Senapati-Lavelle/a7143bdae4e6ead4b8cd8324543d2abee00601f5> (visité le 14/05/2022).
- SERAIL (2022). *Adventices - Mouron des oiseaux*. URL : <https://ecophytopic.fr/sites/default/files/SERAIL%20-%20ADVENTICE%20%20-%20Mouron%20oiseaux.pdf> (visité le 02/06/2022).
- Six, J. et al. (2006). « Bacterial and Fungal Contributions to Carbon Sequestration in Agroecosystems ». en. In : *Soil Science Society of America Journal* 70.2. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2136/sssaj2004.0347>, p. 555-569. ISSN : 1435-0661. DOI : 10.2136/sssaj2004.0347. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj2004.0347> (visité le 05/04/2022).
- Six, Johan, Christian Feller et al. (2002). « Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage ». In : *Agronomie* 22.7-8. Publisher : EDP Sciences, p. 755-775. DOI : 10.1051/agro:2002043. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00885974> (visité le 14/05/2022).
- Six, Johan, Stephen M. Ogle et al. (2004). « The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practised in the long term ». en. In : *Global Change Biology* 10.2. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1529-8817.2003.00730.x>, p. 155-160. ISSN : 1365-2486. DOI : 10.1111/j.1529-8817.2003.00730.x. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1529-8817.2003.00730.x> (visité le 14/05/2022).
- Sommer, R. et al. (2014). « Fertilizer use should not be a fourth principle to define conservation agriculture ». In : *Field Crops Research* 169, p. 145-148. ISSN : 0378-4290. URL : https://www.academia.edu/22413610/Fertilizer_use_should_not_be_a_fourth_principle_to_define_conservation_agriculture (visité le 11/06/2022).
- Stinner, B et G House (nov. 2003). « Arthropods and Other Invertebrates in Conservation-Tillage Agriculture ». In : *Annual Review of Entomology* 35, p. 299-318. DOI : 10.1146/annurev.en.35.010190.001503.

- Sturm, Dominic J. et al. (mars 2017). « Do cover crop sowing date and fertilization affect field weed suppression ? » en-US. In : *Plant, Soil and Environment* 63 (2017).No. 2, p. 82-88. ISSN : 18059368. DOI : 10.17221/1/2017-PSE. URL : https://www.agriculturejournals.cz/web/pse.htm?type=article&id=1_2017-PSE (visité le 13/05/2022).
- Subbulakshmi, S., N. Saravanan et P. Subbian (2009). « CONVENTIONAL TILLAGE VS CONSERVATION TILLAGE - A REVIEW ». en. In : *Agricultural Reviews* 30.1, p. 56-63. URL : <https://arccjournals.com/journal/agricultural-reviews/> (visité le 15/05/2022).
- Swift, M. J., O. W. Heal et J. M. Anderson (1979). « Decomposition in terrestrial ecosystems ». English. In : *Studies in ecology (USA)*. ISBN : 9780520040014 Publisher : University of California Press. URL : https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Decomposition+in+terrestrial+ecosystems&author=Swift%2C+M.+J.&publication_year=1979 (visité le 14/05/2022).
- Tea Bags Index (2022). *The project – Teatime4Science*. en-US. URL : <http://www.teatime4science.org/about/the-project/> (visité le 09/02/2022).
- Tela Botanica (2022). *eFlore*. fr-FR. URL : <https://www.tela-botanica.org/eflore/> (visité le 29/05/2022).
- Therond, Olivier et Michel Duru (2019). « Agriculture et biodiversité : les services écosystémiques, une voie de réconciliation ? » In : *Innovations Agronomiques* 75. Publisher : INRAE, p. 29-47. DOI : 10.15454/gldz6i. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02154655> (visité le 02/05/2022).
- Thomas, Frédéric et Matthieu Archambeaud (2016). *Les couverts végétaux : Gestion pratique de l'interculture*. Français. 2ème. L'agroécologie en pratique 2. France Agricole. ISBN : 978-2-85557-479-0. (Visité le 13/05/2022).
- Thorup-Kristensen, K. (oct. 1994). « The effect of nitrogen catch crop species on the nitrogen nutrition of succeeding crops ». en. In : *Fertilizer research* 37.3, p. 227-234. ISSN : 1573-0867. DOI : 10.1007/BF00748941. URL : <https://doi.org/10.1007/BF00748941> (visité le 14/05/2022).
- Thorup-Kristensen, K., J. Magid et L. S. Jensen (jan. 2003). « Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones ». eng. In : *Advances in agronomy*. 79, p. 227-302. ISSN : 0065-2113. DOI : 10.1016/S0065-2113(02)79005-6. URL : [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(02\)79005-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)79005-6) (visité le 10/04/2022).

- Thorup-Kristensen, Kristian (mars 2001). « Are differences in root growth of nitrogen catch crops important for their ability to reduce soil nitrate-N content, and how can this be measured? » In : *Plant and Soil* 230, p. 185-195. DOI : 10.1023/A:1010306425468.
- Tiedje, J. M. et al. (2001). « Soil teeming with life : new frontiers for soil science. » en. In : *Sustainable management of soil organic matter*. Sous la dir. de R. M. Rees et al. Wallingford : CABI, p. 393-425. ISBN : 978-0-85199-465-9. DOI : 10.1079/9780851994659.0393. URL : <http://www.cabi.org/cabebooks/ebook/20073011463> (visité le 14/05/2022).
- Tinker, P. B. H. (avr. 2005). « Fundamentals of Soil Ecology. By D. C. Coleman, D. A. Crossley and P. F. Hendrix. Amsterdam ; Elsevier Academic Press (2004), pp. 386, US \$39.99 (paperback). ISBN 0-12-179726-0 ». en. In : *Experimental Agriculture* 41.2. Publisher : Cambridge University Press, p. 267-268. ISSN : 1469-4441, 0014-4797. DOI : 10.1017/S0014479704232616. URL : <https://www.cambridge.org/core/journals/experimental-agriculture/article/abs/fundamentals-of-soil-ecology-by-d-c-coleman-d-a-crossley-and-p-f-hendrix-amsterdam-elsevier-academic-press-2004-pp-386-us-3999-paperback-isbn-0121797260/62BA53B803B6100005833DE1676EEC2E> (visité le 14/05/2022).
- Toom, Merili et al. (2019). « The effect of sowing date on cover crop biomass and nitrogen accumulation ». en. In : Accepted : 2019-06-07T11:16:42Z. ISSN : 1406-894X. DOI : 10.15159/ar.19.164. URL : <https://dspace.emu.ee/handle/10492/5239> (visité le 02/06/2022).
- Torbert, H. Allen, Donald W. Reeves et Richard L. Mulvaney (1996). « Winter Legume Cover Crop Benefits to Corn : Rotation vs. Fixed-Nitrogen Effects ». en. In : *Agronomy Journal* 88.4. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2134/agronj1996.00021962008800040005x>, p. 527-535. ISSN : 1435-0645. DOI : 10.2134/agronj1996.00021962008800040005x. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronj1996.00021962008800040005x> (visité le 28/04/2022).
- Travlos, Ilias S. et al. (2018). « Weed-Species Abundance and Diversity Indices in Relation to Tillage Systems and Fertilization ». In : *Frontiers in Environmental Science* 6. ISSN : 2296-665X. URL : <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fenvs.2018.00011> (visité le 15/05/2022).
- Tribouillois, Hélène et al. (août 2016). « Determination of Germination Response to Temperature and Water Potential for a Wide Range of Cover Crop Species and Related Functional Groups ». en. In : *PLOS ONE* 11.8. Publisher : Public Library of Science, e0161185. ISSN : 1932-6203. DOI : 10.1371/journal.pone.0161185.

URL : <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0161185> (visité le 02/06/2022).

Triplett Jr., G. B. et Warren A. Dick (2008). « No-Tillage Crop Production : A Revolution in Agriculture! » en. In : *Agronomy Journal* 100.S3. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2134/agronj2007.0005c>, S-153-S-165. ISSN : 1435-0645. DOI : 10.2134/agronj2007.0005c. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronj2007.0005c> (visité le 14/05/2022).

Triplett Jr., G. B., W. H. Johnson et D. M. Van Doren Jr. (1963). « Performance of Two Experimental Planters for No-Tillage Corn Culture1 ». en. In : *Agronomy Journal* 55.4. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2134/agronj1963.00021962005500040036x>, p. 408-409. ISSN : 1435-0645. DOI : 10.2134/agronj1963.00021962005500040036x. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronj1963.00021962005500040036x> (visité le 15/05/2022).

Tuesca, D, E Puricelli et J C Papa (2001). « A long-term study of weed flora shifts in different tillage systems ». en. In : *Weed Research* 41.4. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1046/j.1365-3180.2001.00245.x>, p. 369-382. ISSN : 1365-3180. DOI : 10.1046/j.1365-3180.2001.00245.x. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1365-3180.2001.00245.x> (visité le 30/05/2022).

UCLouvain (2022). *Fermes universitaires de Louvain*. fr. URL : <https://uclouvain.be/fr/facultes/agro/ferm> (visité le 07/02/2022).

Van Dijk, P. M., F. J. P. M. Kwaad et M. Klapwijk (1996). « Retention of Water and Sediment by Grass Strips ». en. In : *Hydrological Processes* 10.8. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/%28SICI%291099-1085%28199608%2910%3A8%3C1069%3A%3AAID-HYP412%3E3.0.CO%3B2-4>, p. 1069-1080. ISSN : 1099-1085. DOI : 10.1002/(SICI)1099-1085(199608)10:8<1069::AID-HYP412>3.0.CO;2-4. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/%28SICI%291099-1085%28199608%2910%3A8%3C1069%3A%3AAID-HYP412%3E3.0.CO%3B2-4> (visité le 29/04/2022).

Vanhove, Paul (2018). « Classification des pratiques d'agriculteurs et relation avec les caractéristiques structurales et biologiques des sols en régions limoneuse et sablo-limoneuse de Wallonie ». Thèse de doct. (Visité le 01/06/2022).

Vian, J F, J Peigné et R Chaussod (2009). « Effets du mode de travail du sol sur les microorganismes à l'échelle du profil cultural ». fr. In : *Etude et Gestion des Sols*, p. 10.

- Vyn, Tony J. et al. (2000). « Cover Crop Effects on Nitrogen Availability to Corn following Wheat ». en. In : *Agronomy Journal* 92.5. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2134/agronj2000.925915x>, p. 915-924. ISSN : 1435-0645. DOI : 10.2134/agronj2000.925915x. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronj2000.925915x> (visité le 28/04/2022).
- Wainwright, John et al. (juill. 2002). « Hydrology–vegetation interactions in areas of discontinuous flow on a semi-arid bajada, Southern New Mexico ». en. In : *Journal of Arid Environments* 51.3, p. 319-338. ISSN : 0140-1963. DOI : 10.1006/jare.2002.0970. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140196302909705> (visité le 29/04/2022).
- Wall, Diana H., Gina Adams et Andrew N. Parsons (2001). « Soil Biodiversity ». en. In : *Global Biodiversity in a Changing Environment : Scenarios for the 21st Century*. Sous la dir. de F. Stuart Chapin, Osvaldo E. Sala et Elisabeth Huber-Sannwald. Ecological Studies. New York, NY : Springer, p. 47-82. ISBN : 978-1-4613-0157-8. DOI : 10.1007/978-1-4613-0157-8_4. URL : https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0157-8_4 (visité le 14/05/2022).
- Wallonmaps (2022a). *Carte des Principaux Types de Sols de Wallonie à 1/250000*. en. URL : <http://geoportail.wallonie.be/catalogue/64bbc088-367c-485c-bd7c-d2d08baedf9d.html> (visité le 07/02/2022).
- (2022b). *Relief de la Wallonie - Modèle numérique des pentes 2013-2014 classifié*. en. URL : <http://geoportail.wallonie.be/walonmap> (visité le 16/02/2022).
- Wang, Koon-Hui, Brent Sipes et D Schmitt (juin 2002). « Crotalaria as a cover crop for nematode management : A review ». In : *Nematropica* 32.
- Weil, Ray et Amy Kremen (2007). « Thinking across and beyond disciplines to make cover crops pay ». In : *Journal of the Science of Food and Agriculture* 87.4, p. 551-557. ISSN : 0022-5142. URL : https://www.academia.edu/23524150/Thinking_across_and_beyond_disciplines_to_make_cover_crops_pay (visité le 13/05/2022).
- West, Tristram O. et Wilfred M. Post (2002). « Soil Organic Carbon Sequestration Rates by Tillage and Crop Rotation ». en. In : *Soil Science Society of America Journal* 66.6. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2136/sssaj2002.1930>, p. 1930-1946. ISSN : 1435-0661. DOI : 10.2136/sssaj2002.1930. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj2002.1930> (visité le 15/05/2022).
- Wezel, Alexander et al. (jan. 2014). « Agroecological practices for sustainable agriculture. A review ». en. In : *Agronomy for Sustainable Development* 34.1, p. 1-20. ISSN :

1773-0155. DOI : 10.1007/s13593-013-0180-7. URL : <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0180-7> (visité le 04/04/2022).

Wilmus, Marie (2021). « Bilan en carbone et azote en culture maraîchère après prairie permanente : étude de trois espèces légumières ». Thèse de doct. UCLouvain. (Visité le 01/06/2022).

WWF (2022). *Le double enjeu de l'agriculture : la rémunération des agricultrices et le respect de l'environnement* / WWF Belgique. URL : <https://wwf.be/fr/publicatie/le-double-enjeu-de-lagriculture-la-remuneration-des-agricultrices-et-le-respect-de> (visité le 09/04/2022).

Wyss, E. et M. Glasstetter (déc. 1992). « Tillage treatments and earthworm distribution in a swiss experimental corn field ». en. In : *Soil Biology and Biochemistry* 24.12, p. 1635-1639. ISSN : 0038-0717. DOI : 10.1016/0038-0717(92)90162-Q. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003807179290162Q> (visité le 12/05/2022).

Yanai, Junta et al. (mars 1996). « Effects of inorganic nitrogen application on the dynamics of the soil solution composition in the root zone of maize ». en. In : *Plant and Soil* 180.1, p. 1-9. ISSN : 1573-5036. DOI : 10.1007/BF00015405. URL : <https://doi.org/10.1007/BF00015405> (visité le 05/05/2022).

Young, Ken et Roger Cousens (1999). « Factors affecting the germination and emergence of wild radish (*Raphanus raphanistrum*) and their effect on management options ». en. In : p. 4.

Ziegler, A. D. et T. W. Giambelluca (1998). « Influence of revegetation efforts on hydrologic response and erosion, Kaho'olawe Island, Hawai'i ». en. In : *Land Degradation & Development* 9.3. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/%28SICI%291099-145X%28199805/06%299%3A3%3C189%3A%3AAID-LDR272%3E3.0.CO%3B2-R>, p. 189-206. ISSN : 1099-145X. DOI : 10.1002/(SICI)1099-145X(199805/06)9:3<189::AID-LDR272>3.0.CO;2-R. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/%28SICI%291099-145X%28199805/06%299%3A3%3C189%3A%3AAID-LDR272%3E3.0.CO%3B2-R> (visité le 29/04/2022).

7 Annexes

A Législations et aspects réglementaires de l'implantation d'un couvert végétal

Différentes législations au niveau européen et wallon sont mises en place afin de réglementer la pollution des nitrates dans les eaux souterraines et de surface.

Au niveau européen, la Directive Nitrate a été adoptée le 12 décembre 1991. Cette directive veille à améliorer la qualité des eaux souterraines et de surface en Europe en réduisant la pollution de celles-ci par les nitrates issus des pratiques agricoles et en favorisant l'usage de bonnes pratiques agricoles (European Commission 2022). Cette directive impose aux États membres d'identifier des zones vulnérables sur leur territoire et d'y mettre en œuvre des actions pour atteindre les objectifs de la directive.

Au niveau wallon, la Directive Nitrate a été transposée en Programme de gestion durable de l'azote en agriculture (PGDA). Ce programme fixe pour l'ensemble du territoire wallon des conditions, normes et obligations. Pour les zones du territoire considérées comme zones vulnérables, des conditions supplémentaires sont fixées.

Les couverts végétaux vont être intégrés dans les législations car leur implantation permet de limiter la lixiviation des ions nitrates dans le sol, phénomène à forte occurrence si le sol est laissé nu durant l'interculture. L'obligation d'implanter des couverts végétaux en Wallonie survient dans 3 situations :

1. Après épandage d'azote organique (entre le 1^{er} juillet et le 15 septembre)

Une CIPAN doit alors être implantée avant le 15 septembre et jusqu'au 15 novembre minimum. La CIPAN ne peut être constituée qu'à 50% de légumineuses.

2. En zone vulnérable après une culture récoltée avant le 1^{er} septembre et qui sera suivie d'une culture implantée après le 1^{er} janvier

La zone vulnérable (représentée en vert sur la Figure 26) couvre des terres dont les teneurs en nitrate des eaux souterraines dépassent 50 mg/L, risquent potentiellement de dépasser ce seuil ou des terres sujettes à l'eutrophisation (Protect'eau 2022a).

Un couvert doit alors être implanté avant le 15 septembre et jusqu'au 15 novembre minimum. Il ne peut être constitué qu'à 50% de légumineuses.

3. En zone vulnérable après une culture de légumineuse récoltée avant le

1^{er} août et suivie d'une culture de froment.

Un couvert doit alors être implanté avant le 1^{er} septembre et jusqu'au 1^{er} octobre minimum. Il ne peut être constitué qu'à 50% de légumineuses.

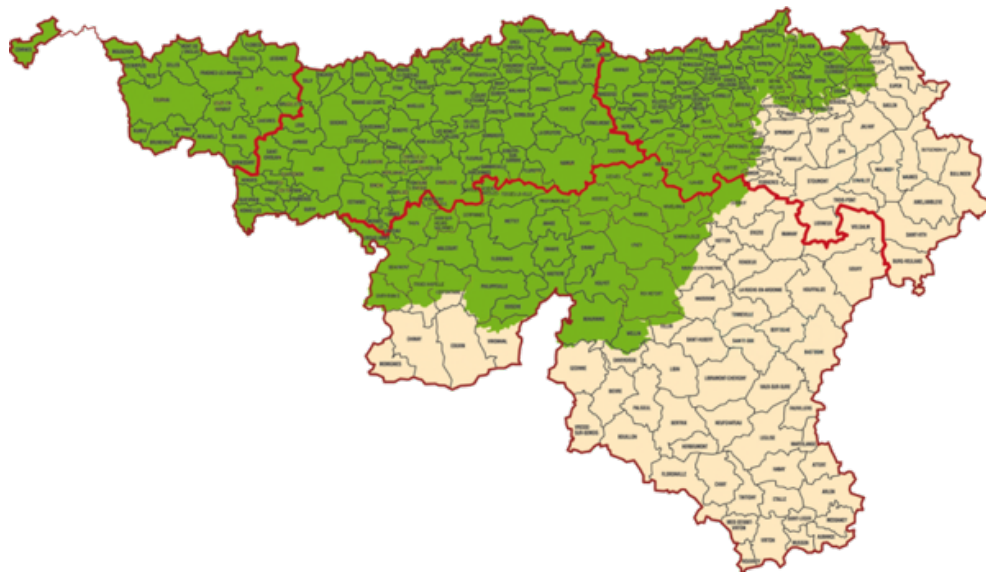


FIGURE 26 – Zone vulnérable en Wallonie (Protect'eau 2022b).

B Cartes des types de sol et des pentes

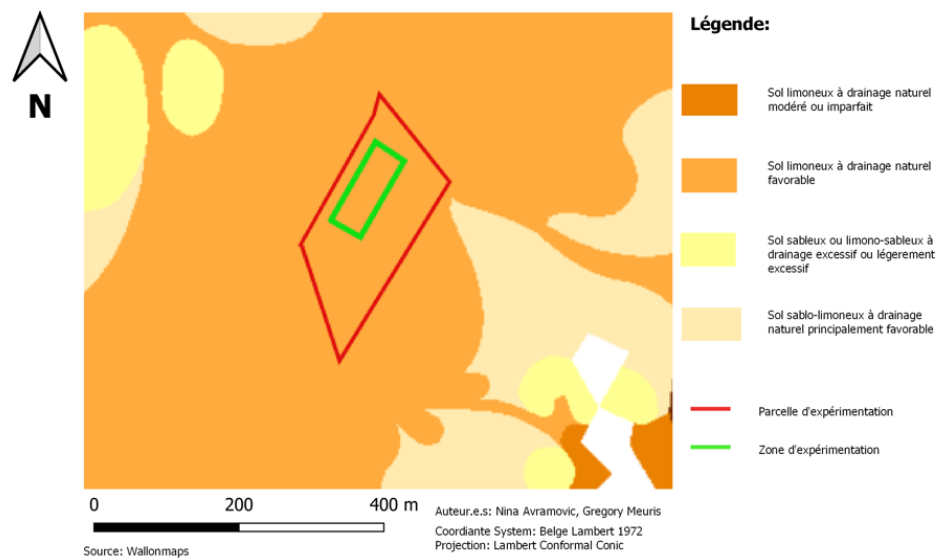


FIGURE 27 – Carte des types sols de la parcelle (Wallonmaps 2022b).

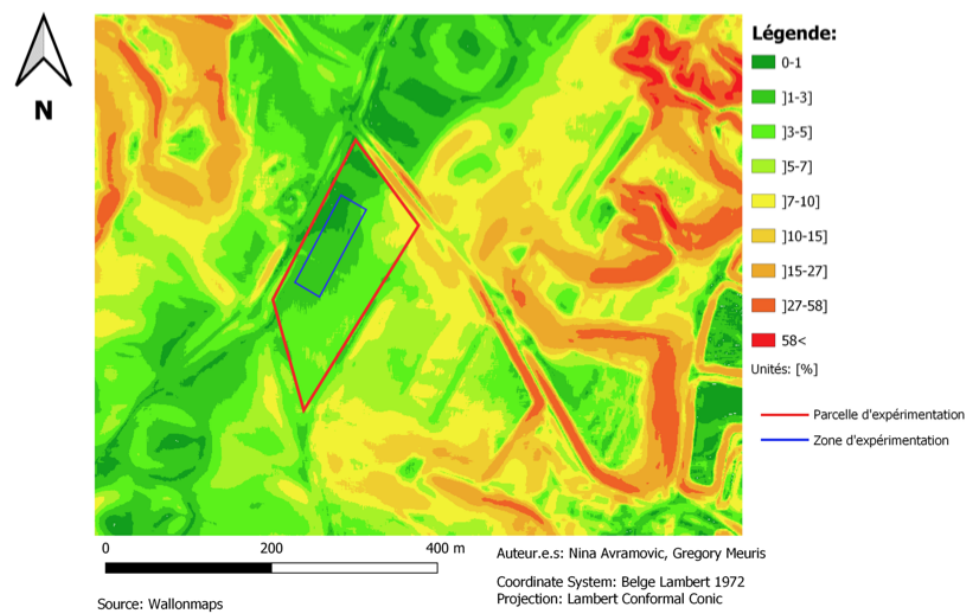


FIGURE 28 – Carte des pentes de la parcelle (Wallonmaps 2022a)

C Annexes de l'essai 1

C.1 Taux de couverture pour l'essai 1 - Cadre

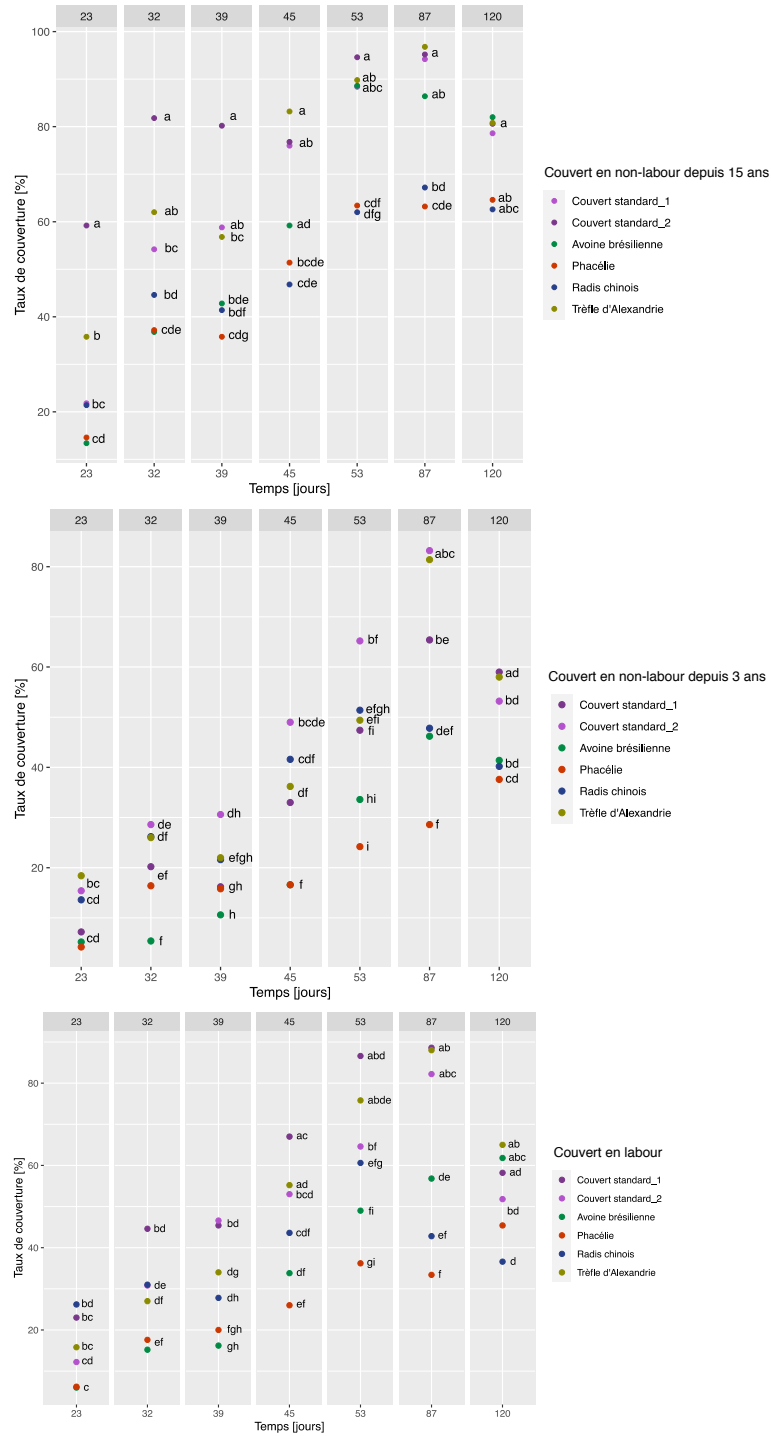


FIGURE 29 – Taux de couverture du sol, en fonction des couverts et du travail du sol, séparé par pas de temps et exprimé en jours depuis le semis pour l'essai 1. Les lettres sont attribuées et à lire séparément par pas de temps et type de travail du sol donc dans une même colonne sur les trois graphes.

C.2 Taux de croissance pour l'essai 1 - Cadre

TABLE 27 – Groupes réalisés à l'aide des contrastes sur les interactions pour le taux de croissance pour l'essai 1.

Non-labour depuis 15 ans	Non-labour depuis 3 ans	Labour
abc - Couvert standard_1	ghi - Couvert standard_1	ac - Couvert standard_1
a - Couvert standard_2	dfg - Couvert standard_2	df - Couvert standard_2
bde - Avoine brésilienne	ij - Avoine brésilienne	hi - Avoine brésilienne
efh - Phacélie	j - Phacélie	ij - Phacélie
dh - Radis chinois	hi - Radis chinois	ghi - Radis chinois
ab - Trèfle d'Alexandrie	fh - Trèfle d'Alexandrie	cdf - Trèfle d'Alexandrie

C.3 Taux de couverture pour l'essai 1 - Canopeo

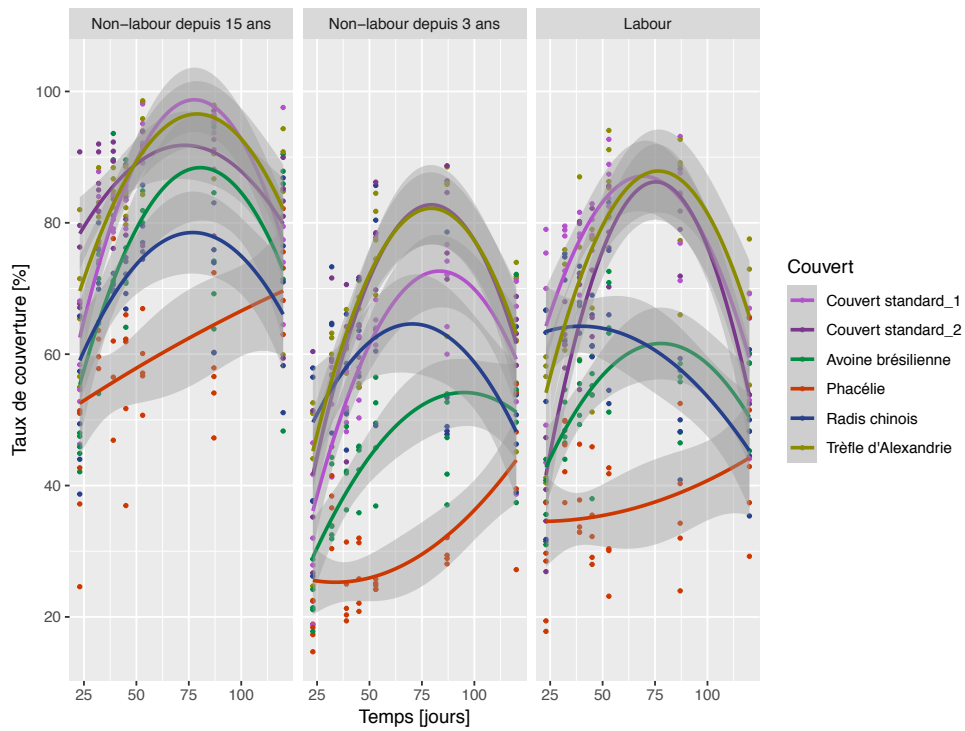


FIGURE 30 – Taux de couverture des espèces en fonction du temps pour l'essai 1. Le temps représente le nombre de jours écoulés depuis le semis.

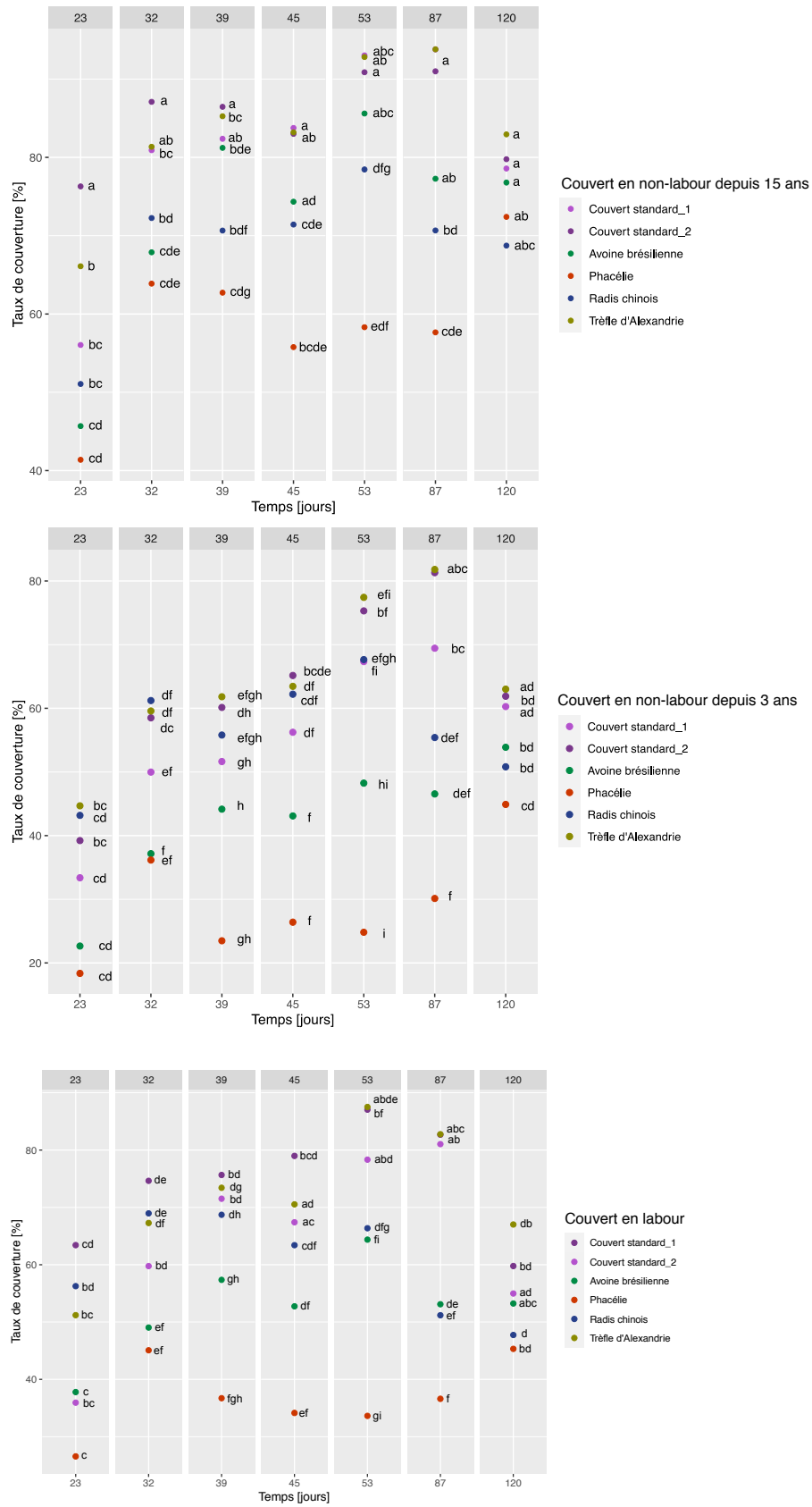


FIGURE 31 – Taux de couverture du sol, en fonction des couverts et du travail du sol, séparé par pas de temps et exprimé en jours depuis le semis pour l'essai 1. Les lettres sont attribuées et à lire séparément par pas de temps et type de travail du sol donc dans une même colonne sur les trois graphes.

C.4 Taux de croissance pour l'essai 1 - Canopeo

TABLE 28 – Contrastes sur les facteurs fixes pour le taux de croissance pour l'essai 1.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Couvert standard _1	1,35	0,223	A
Couvert standard _2	1,36	0,176	A
Avoine brésilienne	1,03	0,262	C
Phacélie	0,725	0,246	D
Radis chinois	1,14	0,139	B
Trèfle d'Alexandrie	1,4	0,145	A
Non-labour depuis 15 ans	1,39	0,209	A
Non-labour depuis 3 ans	0,98	0,284	C
Labour	1,13	0,284	B

TABLE 29 – Groupes réalisés à l'aide des contrastes sur les interactions pour le taux de croissance pour l'essai 1.

Non-labour depuis 15 ans	Non-labour depuis 3 ans	Labour
ab - Couvert standard_1	fg - Couvert standard_1	ac - Couvert standard_1
a - Couvert standard_2	def - Couvert standard_2	ce - Couvert standard_2
cd - Avoine brésilienne	h - Avoine brésilienne	g - Avoine brésilienne
g - Phacélie	i - Phacélie	hi - Phacélie
ce - Radis chinois	g - Radis chinois	eg - Radis chinois
a - Trèfle d'Alexandrie	ce - Trèfle d'Alexandrie	bcd - Trèfle d'Alexandrie

C.5 Décomposition de la matière organique par les microorganismes pour l'essai 1

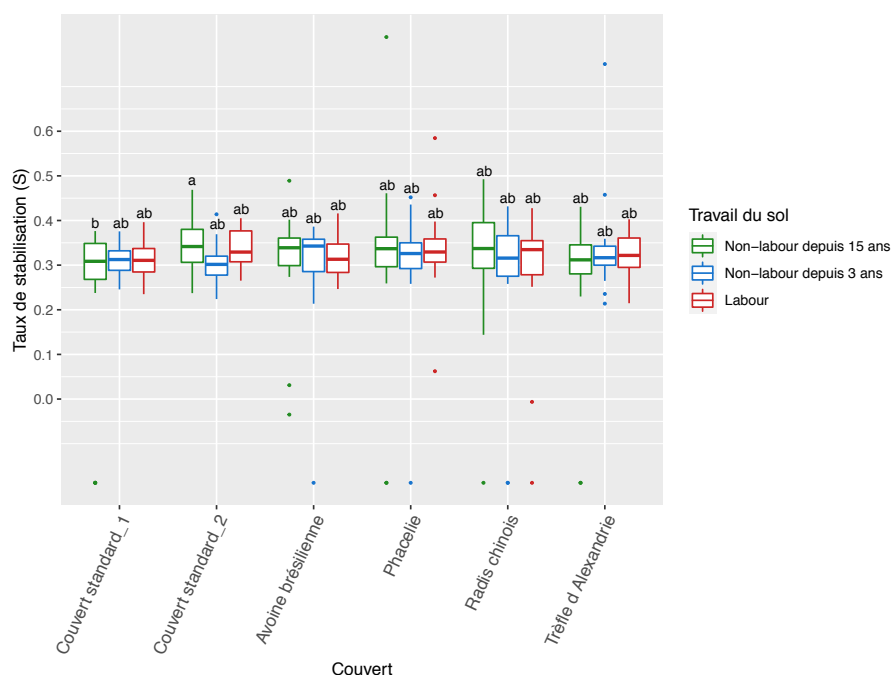


FIGURE 32 – Taux de stabilisation (S) de la litière en fonction du couvert et du travail du sol réalisé pour l'essai 1.

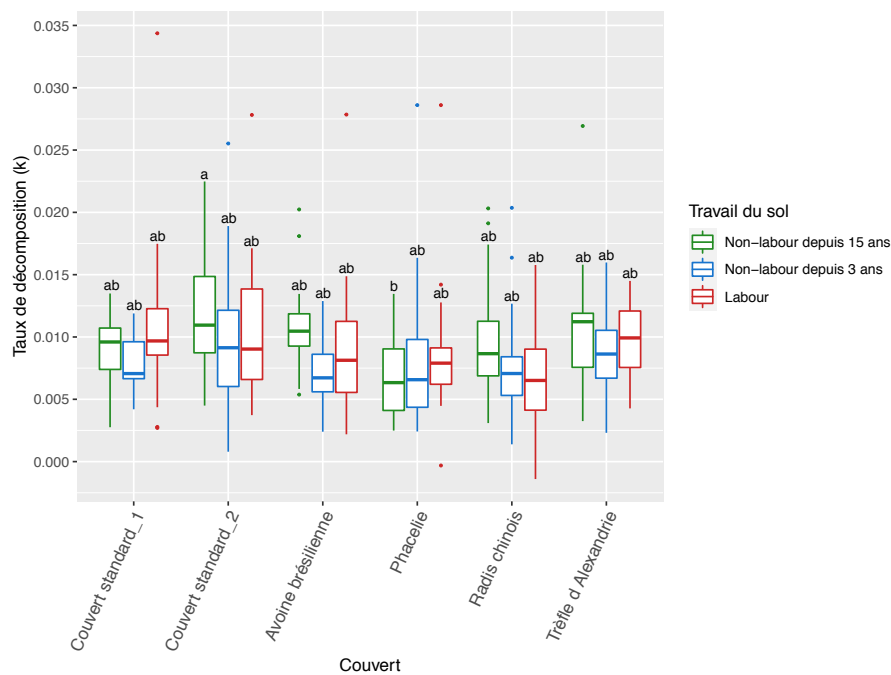


FIGURE 33 – Taux de décomposition (k) de la matière organique en fonction du couvert et du travail du sol réalisé pour l'essai 1.

C.6 Corrélations pour l'essai 1

TABLE 30 – Légendes des variables de l'analyse multivariée.

Nom	Mesure
n_indiv	Nombre d'individus par m^2
lev	Pourcentage de levée
adv_x	Nombre d'adventices au temps x
cadre_x	Taux de couverture au temps x (cadre)
canop_x	Taux de couverture au temps x (canopeo)
croiss_cadre	Taux de croissance (cadre)
croiss_canop	Taux de croissance (canopeo)
biomasse_F	Biomasse fraîche
biomasse_S	Biomasse sèche
decomp_vdt	Décomposition de la matière organique par les vers de terre
résistance	Résistance du sol
decomp_S	Taux de stabilisation de la litière (S)
decomp_k	Taux de décomposition de la matière organique (k)

PCA – Biplot

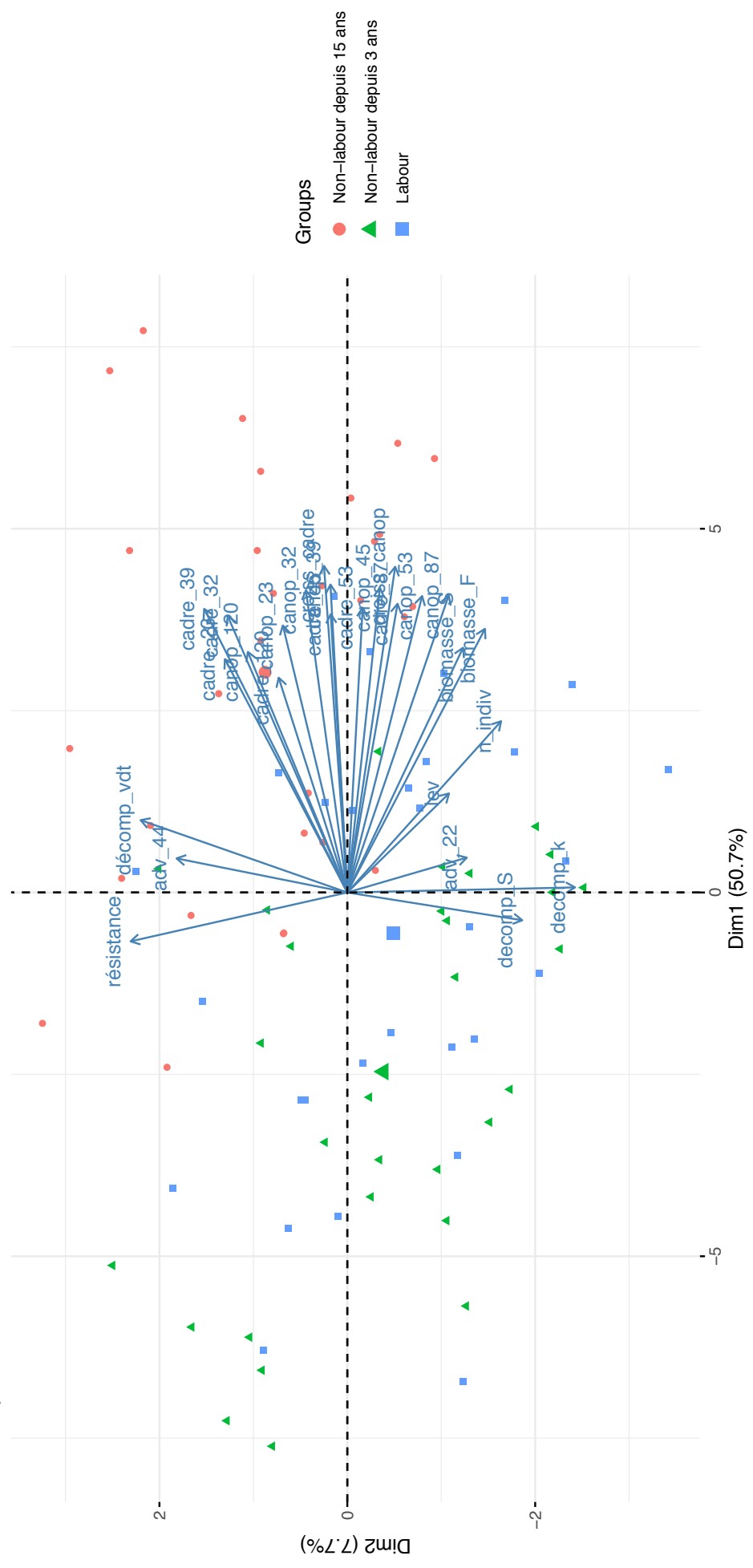


FIGURE 34 – Biplot des 2 premières composantes de l'analyse en composantes principales pour l'essai 1. Les couleurs représentent les différents travaux du sol.

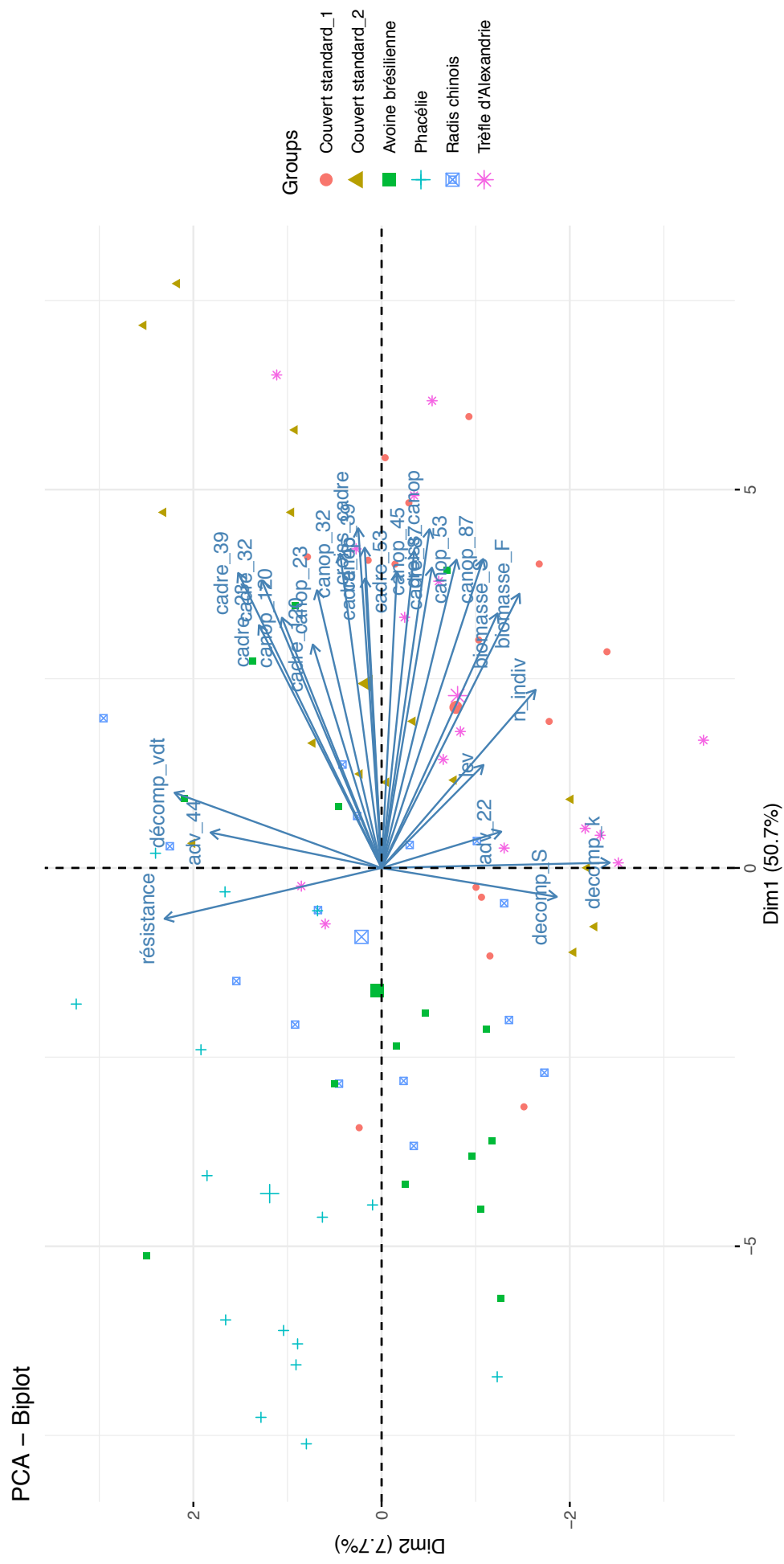


FIGURE 35 – Biplot des deux premières composantes de l'analyse en composantes principales pour l'essai 1. Les couleurs représentent les différentes espèces.

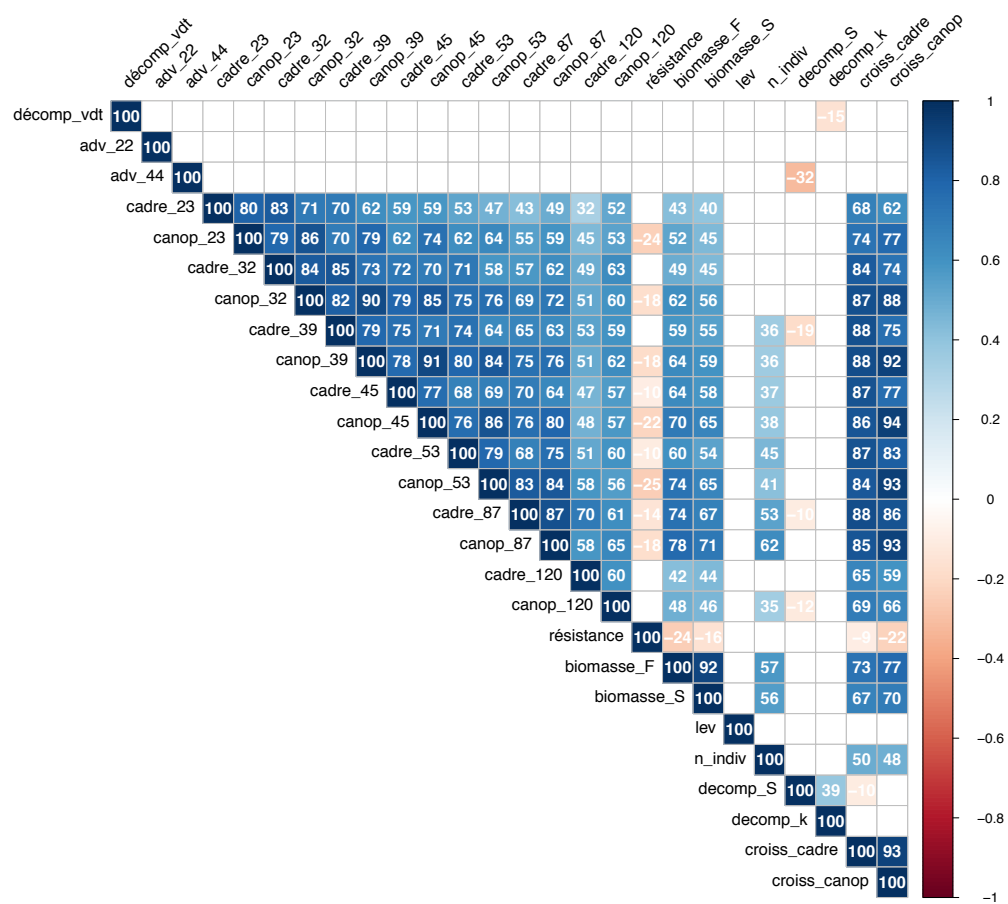


FIGURE 36 – Heatmap des corrélations entre les variables de l'analyse multivariée pour l'essai 1.

D Annexes de l'essai 2

D.1 Taux de couverture pour l'essai 2 - Cadre

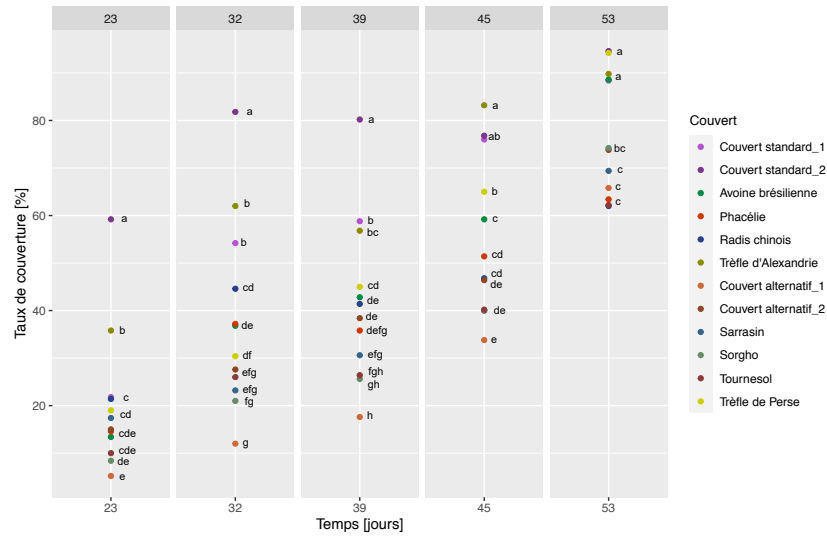


FIGURE 37 – Taux de couverture du sol, séparé par pas de temps, exprimé en jours depuis semis pour l'essai 2. Les groupes ont été créés par pas de temps.

D.2 Taux de couverture pour l'essai 2 - Canopeo

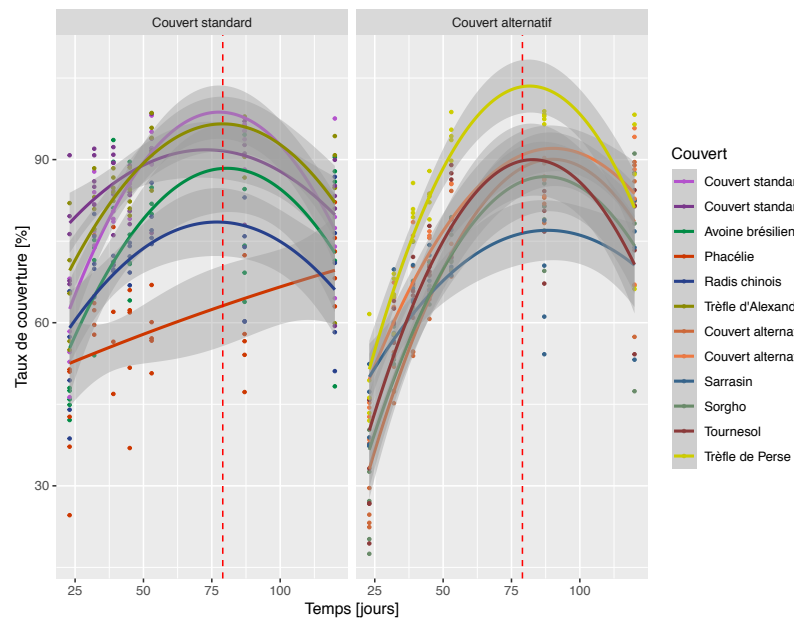


FIGURE 38 – Taux de couverture des espèces en fonction du temps pour l'essai 2. Le temps représente le nombre de jours écoulés depuis le semis. La ligne pointillée représente la date de destruction du couvert alternatif par le froid.

Sur la figure 38, on observe une influence du type d'espèce sur le taux de couverture. Le couvert standard, le trèfle de perse et le trèfle d'Alexandrie ont les taux de couverture les plus élevés.

Le test F sur les facteurs fixes de notre modèle nous indique que les facteurs «espèce» ($p\text{-val} < 2,2 \cdot 10^{-16}$), «temps» ($p\text{-val} < 2,2 \cdot 10^{-16}$) et le facteur d'interaction «temps : espèce» ($p\text{-val} = 4,417 \cdot 10^{-13}$) ont un effet significatif sur le modèle.

À chaque pas de temps, une ANOVA a été réalisée afin de comparer les espèces entre elles. Les résultats de ces groupes sont observables sur la figure 39, qui est à lire par pas de temps.

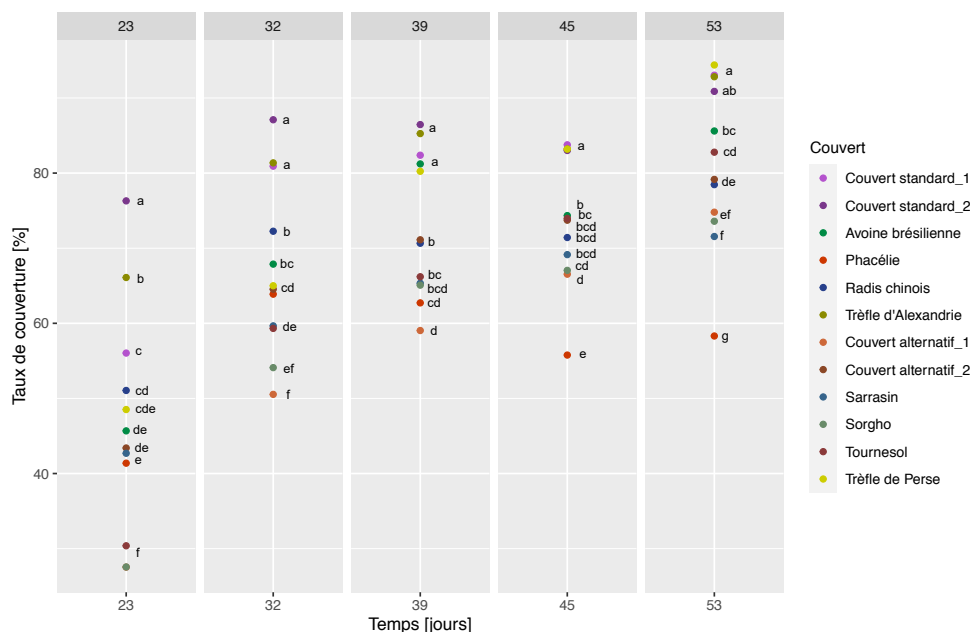


FIGURE 39 – Taux de couverture du sol, séparé par pas de temps, exprimé en jours depuis semis pour l'essai 2. Les groupes ont été créés par pas de temps.

D.3 Taux de croissance pour l'essai 2 - Canopeo

Comme pour l'essai 1, des régressions linéaires ont été réalisées sur les valeurs de taux de couverture en fonction du temps pour chaque espèce (sur les cinq premiers temps). Cela nous a permis d'obtenir la pente soit le taux de croissance (en %) par jour. Une analyse de la variance a été effectuée sur le taux de croissance.

Le test F sur le facteur fixe de notre modèle nous indique que le facteur « espèce » ($p\text{-val} < 2,2 \cdot 10^{-16}$) a un effet significatif sur le modèle.

Les contrastes sur le tableau 31 nous indiquent que le couvert standard et le trèfle d’Alexandrie ont les taux de croissance les plus élevés.

TABLE 31 – Contrastes sur les facteurs fixes pour le taux de croissance pour l’essai 2.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Couvert standard_1	2	0,066	AB
Couvert standard_2	2,08	0,118	A
Avoine brésilienne	1,81	0,126	CD
Phacélie	1,4	0,146	H
Radis chinois	1,72	0,03	DE
Trèfle d’Alexandrie	2,04	0,048	A
Couvert alternatif_1	1,46	0,1	H
Couvert alternatif_2	1,69	0,05	E
Sarrasin	1,56	0,058	FG
Sorgho	1,5	0,069	GH
Tournesol	1,63	0,064	EF
Trèfle de Perse	1,91	0,036	BC

D.4 Décomposition de la matière organique par les microorganismes pour l’essai 2

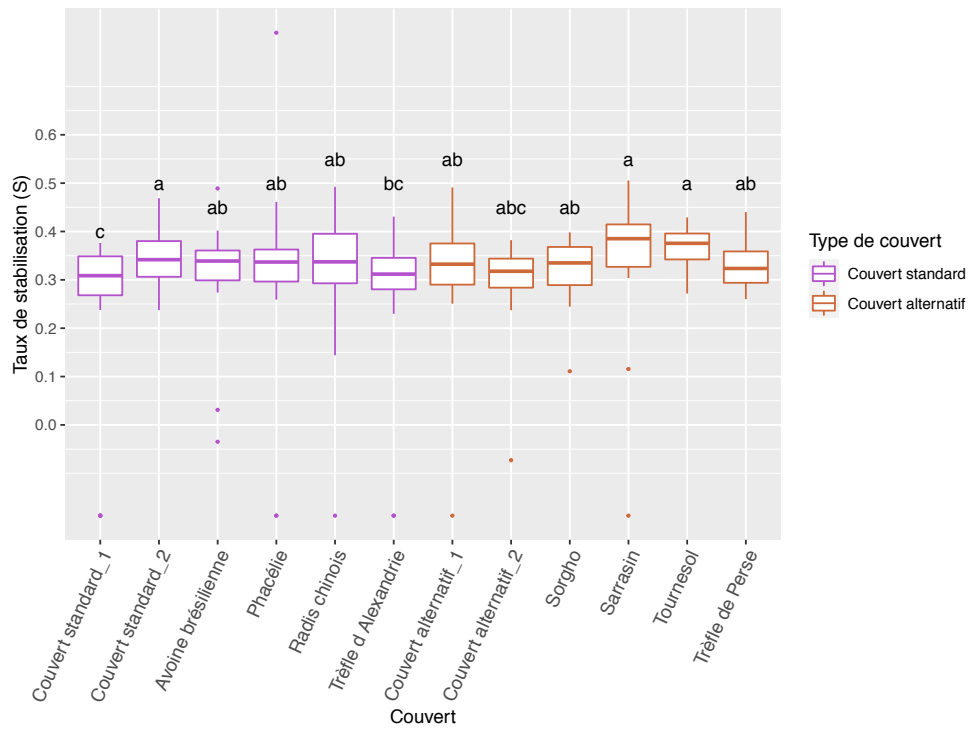


FIGURE 40 – Taux de stabilisation (S) de la matière organique en fonction de l’espèce semée pour l’essai 2.

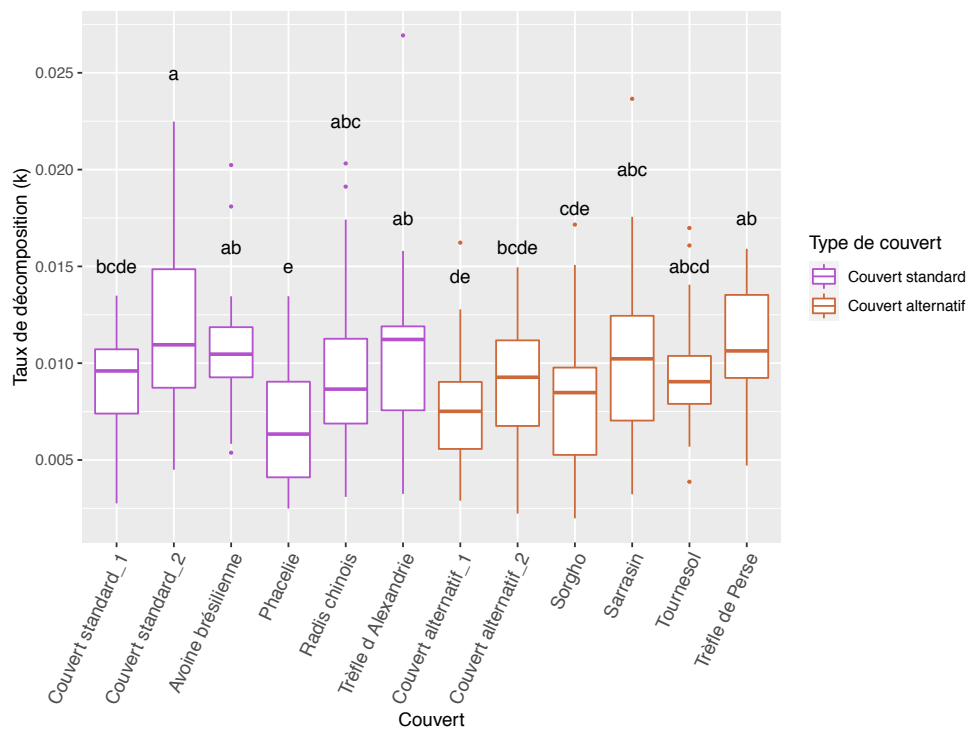


FIGURE 41 – Taux de décomposition (k) de la matière organique en fonction de l'espèce semée pour l'essai 2.

D.5 Décomposition de la matière végétale par les vers de terre pour l'essai 2

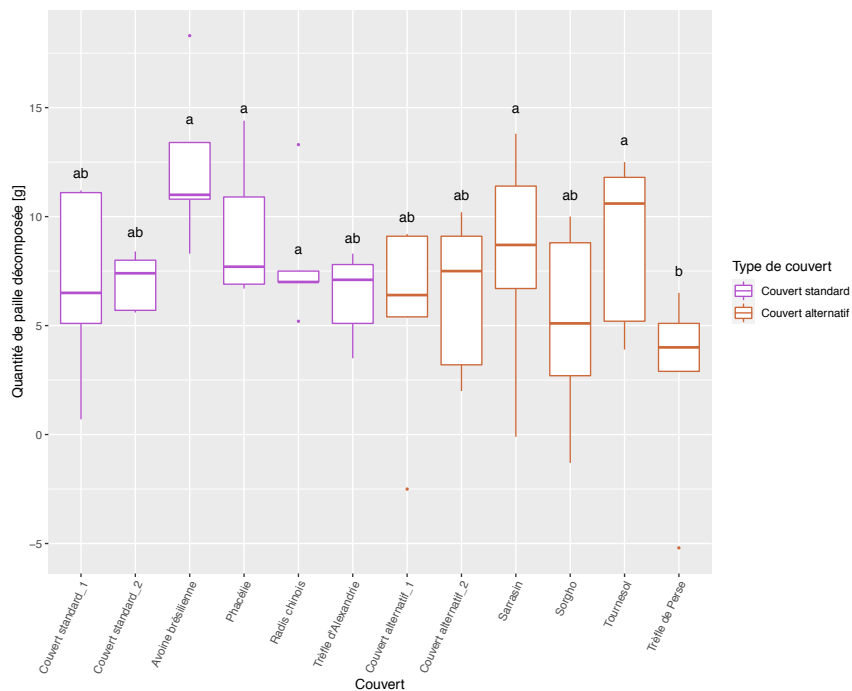


FIGURE 42 – Décomposition de la paille par les vers de terre en fonction du couvert pour l'essai 2.

D.6 Corrélations pour l'essai 2

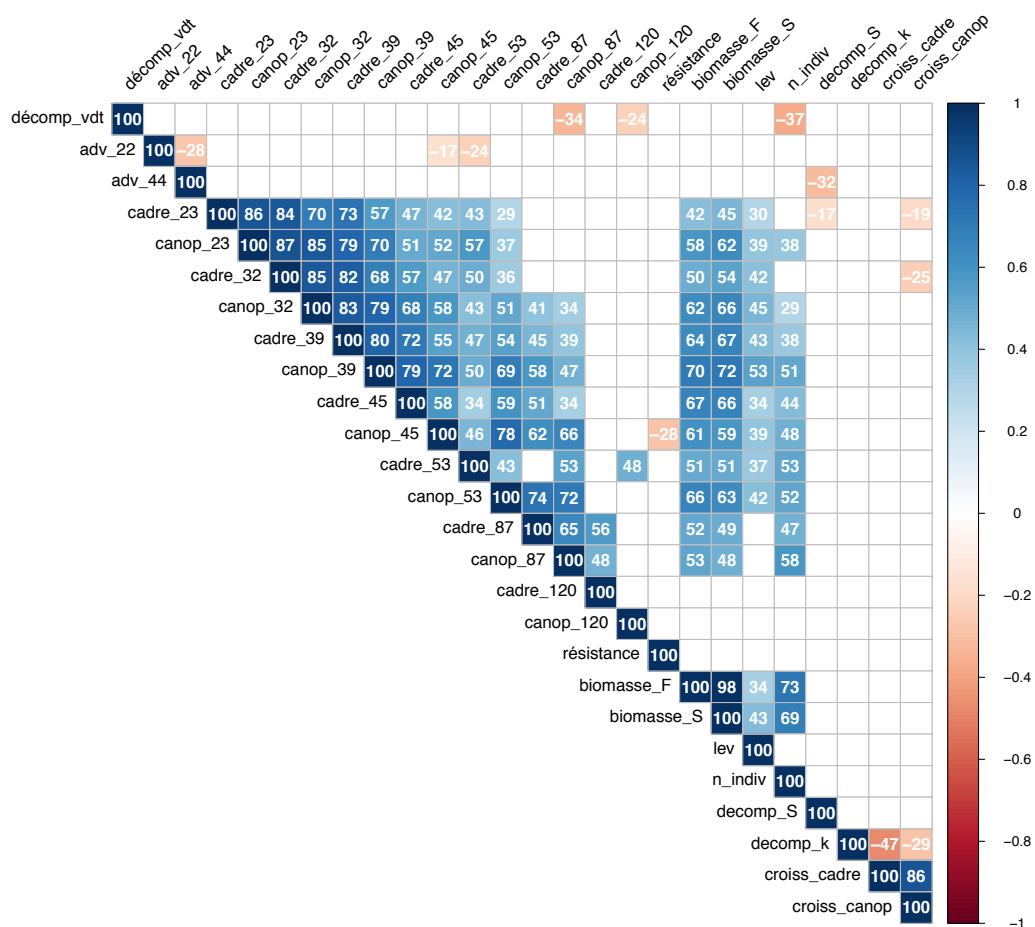


FIGURE 43 – Heatmap des variables de l'analyse multivariée pour l'essai 2.

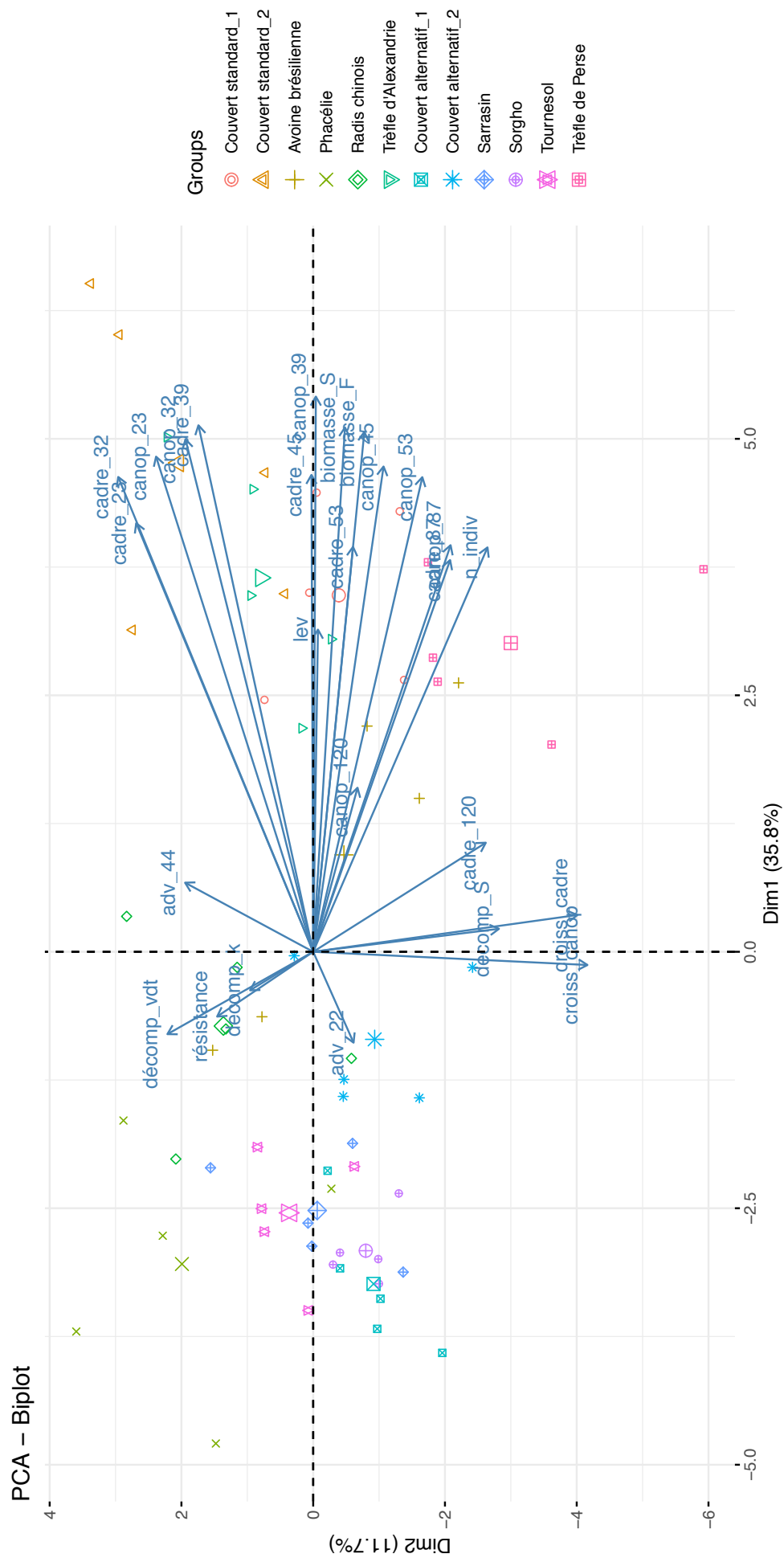


FIGURE 44 – Biplot des deux premières composantes de l'analyse en composantes principales pour l'essai 2. Les couleurs représentent le type d'espèce.

E Annexes de l'essai 3

E.1 Taux de couverture pour l'essai 3 - Cadre

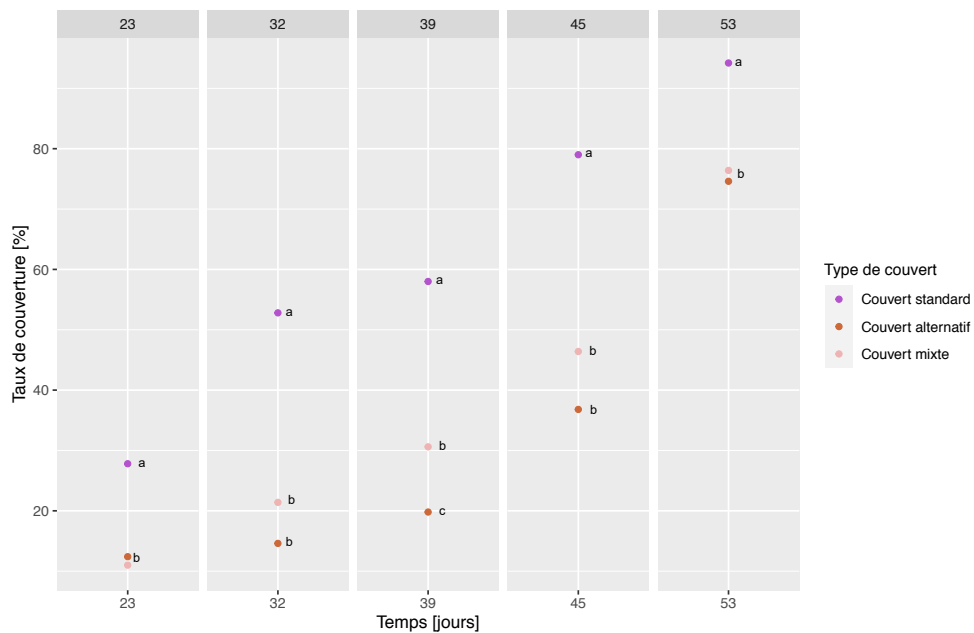


FIGURE 45 – Taux de couverture du sol, séparé par pas de temps, exprimé en jours depuis semis pour l'essai 3. Les groupes ont été créés par pas de temps.

E.2 Taux de couverture pour l'essai 3 - Canopeo

Sur la figure 46, on observe à nouveau que le couvert standard a un taux de couverture plus élevé que le couvert alternatif et le couvert mixte.

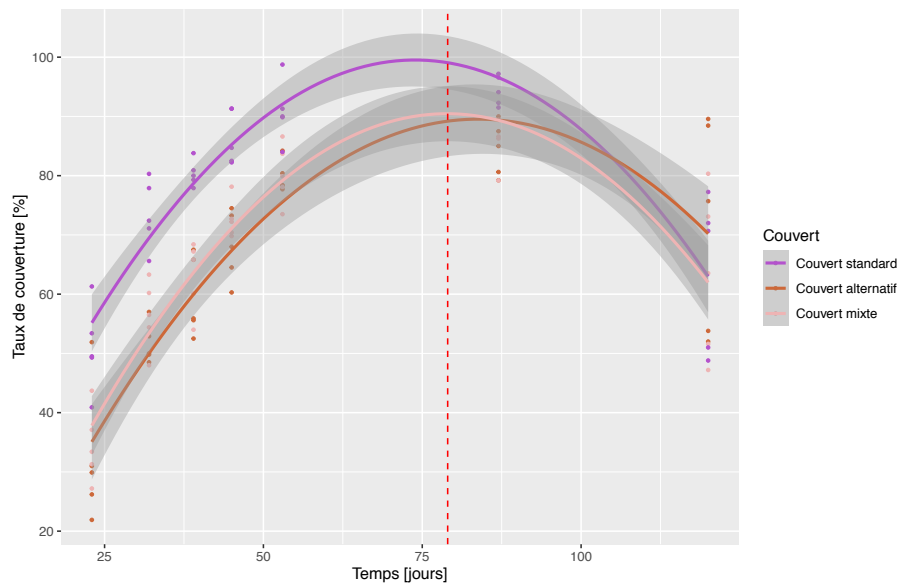


FIGURE 46 – Taux de couverture en fonction du temps pour l’essai 3. Le temps représente le nombre de jours écoulés depuis le semis.

Le test F sur les facteurs fixes de notre modèle nous indique que les facteurs «espèce» ($p\text{-val} = 0,0003339$) et «temps» ($p\text{-val} < 2,2.10^{-16}$) ont un effet significatif sur le modèle. Le facteur d’interaction «espèce : temps» ($p\text{-val} = 0,32189$) n’a pas d’effet significatif sur le modèle.

Sur la figure 47, on observe que le taux de couverture du couvert standard est plus élevé à chaque pas de temps.

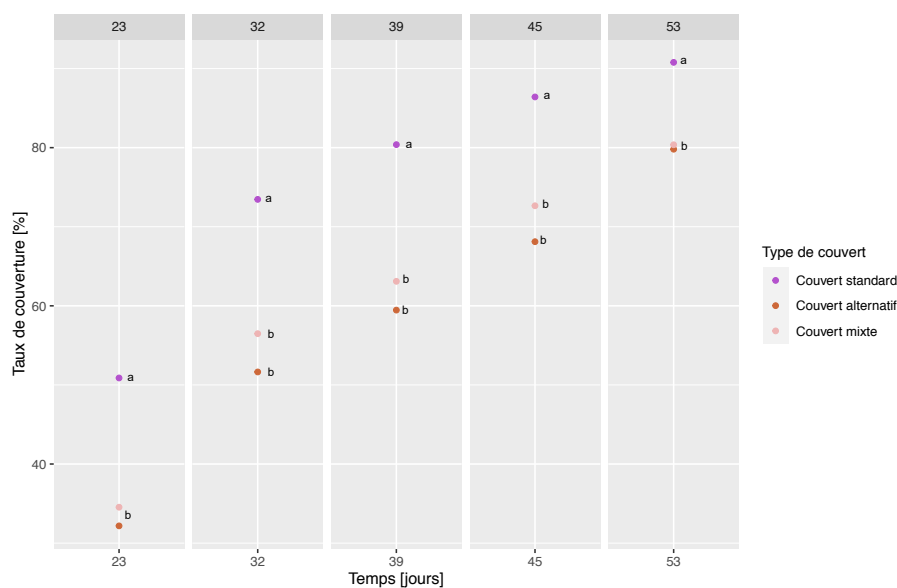


FIGURE 47 – Taux de couverture du sol, séparé par pas de temps, estimé en jours depuis semis. Les groupes ont été créés par pas de temps.

E.3 Taux de croissance pour l'essai 3 - Canopeo

Le test F sur le facteur fixe de notre modèle nous indique que le facteur « couvert » ($p\text{-val} = 1,249.10^{-5}$) a un effet significatif sur le modèle.

Les contrastes du tableau 32 nous indiquent que le couvert standard a un taux de croissance plus élevé que le couvert alternatif et le couvert mixte.

TABLE 32 – Contrastes sur le facteur fixe pour le taux de croissance du couvert pour l'essai 3.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Couvert standard	1,94	0,081	A
Couvert alternatif	1,52	0,067	B
Couvert mixte	1,59	0,047	B

E.4 Décomposition de la matière organique par les microorganismes essai 3

TABLE 33 – Contrastes sur le facteur fixe pour le taux de stabilisation S de la litière pour l'essai 3.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Couvert standard	0,344	0,061	A
Couvert alternatif	0,325	0,117	A
Couvert mixte	0,338	0,068	A

TABLE 34 – Contrastes sur le facteur fixe pour le taux de décomposition k de la matière organique pour l'essai 3.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Couvert standard	0,011	0,004	A
Couvert alternatif	0,01	0,005	A
Couvert mixte	0,01	0,004	A

E.5 Taux de décomposition de la matière végétale par les vers de terre essai 3

TABLE 35 – Contrastes sur le facteur fixe pour le taux de décomposition de la matière végétale par les vers de terre pour l'essai 3.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Couvert standard	7,14	0,371	A
Couvert alternatif	9,36	2,797	A
Couvert mixte	6,64	5,426	A

E.6 Résistance du sol à la pénétration essai 3

TABLE 36 – Contrastes sur le facteur fixe pour la résistance du sol pour l'essai 3.

	Moyenne	Écart-type	Groupe
Couvert standard	20	0	A
Couvert alternatif	26	8,944	A
Couvert mixte	20	0	A

E.7 Corrélations essai 3

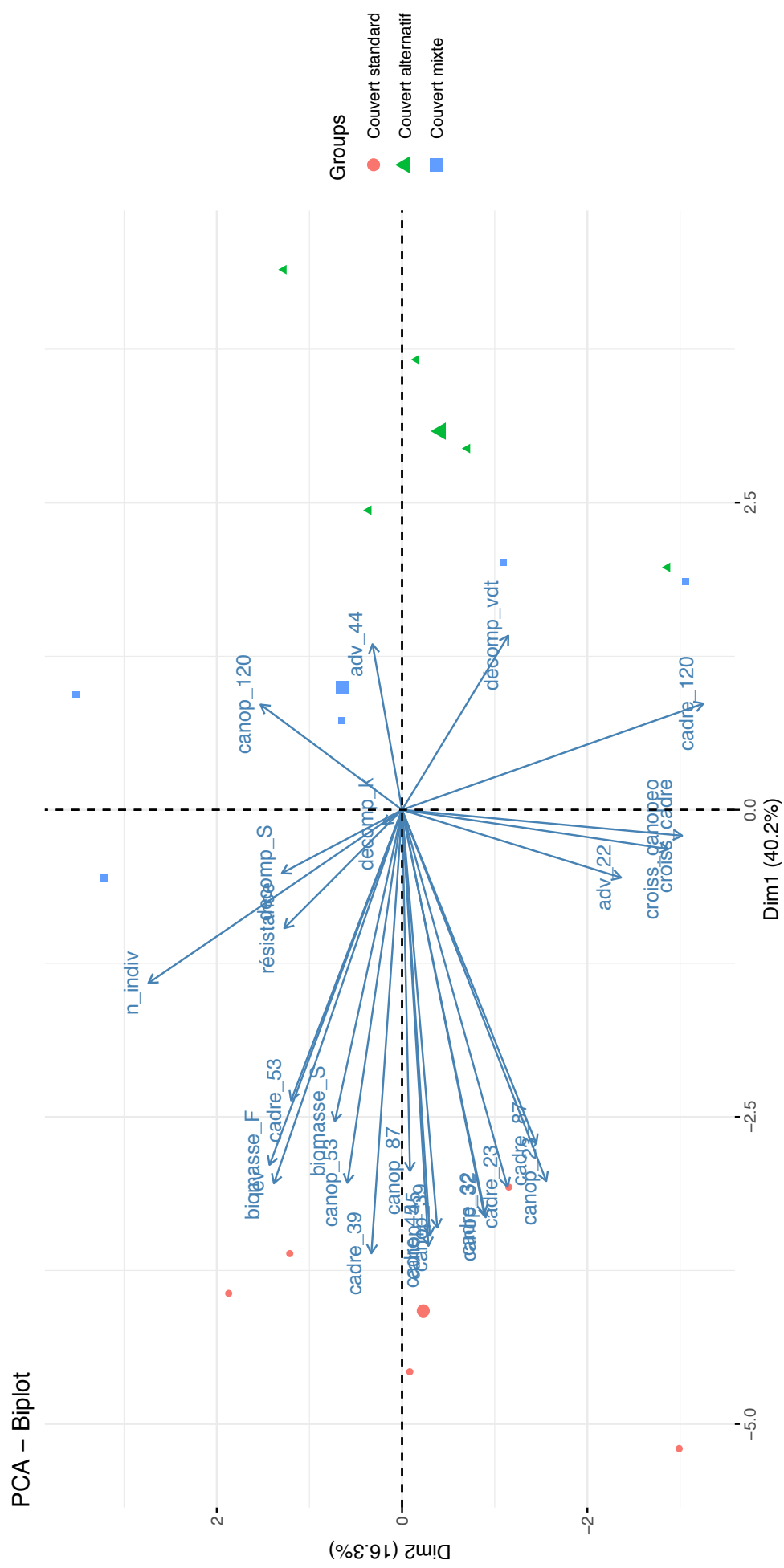


FIGURE 48 – Biplot des deux premières composantes de l'analyse en composantes principales pour l'essai 3.

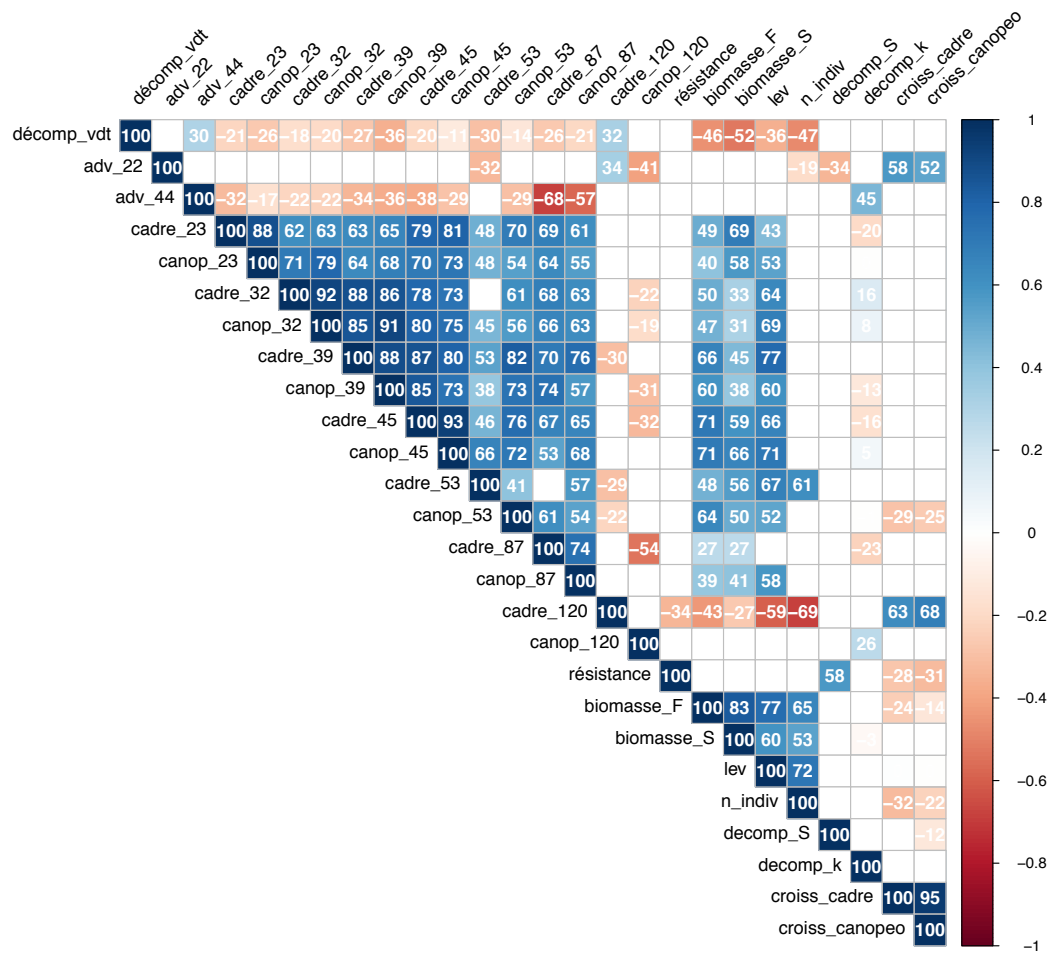


FIGURE 49 – Heatmap des variables de l'analyse multivariée pour l'essai 3.

F Résumé des mesures

TABLE 37 – Résumé de l'ensemble des mesures par essai. A : avoine brésilienne; P : phacélie; R : radis chinois; TA : trèfle d'Alexandrie; SA : sarrasin; SO : sorgho; T : tournesol; TP : trèfle de Perse; NL_15 : non-labour depuis 15 ans; NL_3 : non-labour depuis 3 ans; L : labour

	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Densité d'individus	TA > A > P, R NL_15 > NL_3 Pur > Couvert S	TP > TA > A > ... Pur > Couvert S > Couvert A	TP, TA > A > ... Couvert S > Couvert A, Couvert M
Pourcentage de levée	A > R > TA > P NL_15 > NL_3 Couvert S > Pur	A > R > SO, TA Couvert S > A, P	A > R > ... Couvert S > Couvert A
Densité d'adventices	Couvert S < A, P, R, TA L, NL_3 < NL_15	Couvert S < ... < T	Couvert S, Couvert M < Couvert A
Taux de couverture	Couvert S, TA > A, R, P NL_15 > L > NL_3	TP, TA, Couvert S, A > R, P, SO, T, Couvert A	Couvert S > Couvert A, Couvert M
Taux de croissance	Couvert S, TA > A, R > P NL_15 > L > NL_3	TA, Couvert S > A, TP, R, P, SO, T, Couvert A	Couvert S > Couvert A, Couvert M
Tea bags	Couvert S_2 > Couvert S_1 pour le taux de stabilisation	Couvert S_2 > Couvert S_1 pour le taux de stabilisation et de décomposition	/
Paniers à vers de terre	A > P, R, Couvert S NL_15 > NL_3, L	/	/
Biomasse aérienne	TA, Couvert S > A > P NL_15 > NL_3, L	Couvert S, TP > A, P, R, TA, T, Couvert A, SO, SA Couvert S_1 > Couvert S_2	Couvert S > Couvert A
Biomasse racinaire	H_A > H_D, H_C	/	/
Pénétrométrie	TA > A, P L > NL_15, NL_3	/	/

Évaluation des services écosystémiques rendus par les couverts hivernaux en fonction de leur composition et du travail du sol

Présenté par Nina Avramović et Gregory Meuris

Les effets néfastes des pratiques culturales intensives sur les sols agricoles sont nombreux : dégradation des propriétés physiques et chimiques du sol, perte de matière organique, chute de l'activité biologique, érosion, ruissellement. Les événements climatiques extrêmes causés par le changement climatique (canicules, sécheresses, inondations) renforcent ces effets. En conséquence, certaines cultures originaires de nos régions ne sont plus adaptées pour se développer correctement dans de telles conditions de température et d'humidité et peinent à se développer sur des sols dégradés.

Certaines pratiques agricoles telles que les cultures de couverture et la réduction du travail du sol permettent de minimiser ces impacts via un rôle de protection des sols. Ces pratiques font partie intégrante de l'agriculture de conservation des sols et en constituent les deux premiers principes.

L'objectif de ce mémoire est d'évaluer les performances et caractéristiques des couverts hivernaux en fonction de leur composition et du travail du sol, dans le but d'aider au choix d'un couvert approprié pour l'agriculteur.rice dans le contexte du changement climatique. Le mémoire découle d'une expérience de six mois (automne-hiver 2021) sur une parcelle agricole à Vieux-Sart où les mesures réalisées se concentrent sur les services écosystémiques rendus par les couverts. Nous nous sommes intéressés aux effets du labour (non-labour depuis 15 ans, non-labour depuis 3 ans, labour), du type de couvert semé (couvert tempéré et couvert tropical) et du nombre d'espèces composant le couvert (1, 4 ou 8) sur les services écosystémiques.

Les tendances observées dans les résultats sont en faveur du non-labour depuis 15 ans et en défaveur du non-labour depuis 3 ans. Le labour présente en général des performances intermédiaires. Les services écosystémiques apportés par les couverts végétaux sont donc supérieurs en non-labour ancien. Cependant, les bénéfices liés à la transition d'un sol labouré vers un sol non-labouré sont uniquement observables sur le long terme et la balance des bénéfices est négative lors des premières années de reconversion. Suite à l'été exceptionnellement pluvieux de 2021, les couverts d'interculture ont subi un retard de semis et en ont souffert. Les conditions de température et d'humidité n'ont pas été propices à leur développement optimal. Dans ces conditions, les couverts composés de 4 espèces ont été les plus performants. Parmi les espèces composant le couvert, l'avoine brésilienne, le trèfle d'Alexandrie et le trèfle de Perse ont présenté les meilleures performances. En revanche, le sarrasin, le sorgho et le tournesol n'étaient pas adaptés aux conditions de l'étude.

La discussion met en avant l'importance de la gestion intégrée des cultures de couverture afin de pouvoir profiter des services écosystémiques liés à leur établissement. Le choix et la diversité des espèces composant le couvert, la bonne préparation du lit de semences, la date de semis et la densité de semis sont des éléments à adapter en fonction des conditions du milieu afin de pouvoir tirer le potentiel maximal des cultures de couverture.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN

Faculté des bioingénieurs

Croix du Sud, 2bte L7.05.01, 1348 Louvain-La-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/agro