

Faculté des bioingénieurs

Influence du travail du sol sur la dynamique d'un couvert multi-espèces d'interculture et sur les propriétés chimiques et biologiques du sol en région sablo-limoneuse de Wallonie

Auteur : Chloé Delmon

Promoteur(s) : Pr. Guillaume Lobet (UCL/ELI/ELIA)

Lecteur(s) : Pr. Charles Biolders (UCL/ELI/ELIE)

Hugues Falys

(Responsable opérationnel des fermes universitaires)

Année académique 2024-2025

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

Bioingénieur : Master bioingénieur, science agronomique

Remerciements

Je tiens tout d’abord à exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur, Guillaume Lobet, pour son accompagnement, ses conseils avisés, son écoute et sa patience. Je le remercie sincèrement d’avoir su me guider avec bienveillance malgré mes moments de doute.

Je souhaite également remercier mes lecteurs, Charles Bielders et Hugues Falys, pour avoir accepté d’évaluer mon mémoire et pour l’attention qu’ils y porteront.

Mes remerciements s’adressent aussi à Thomas Dagbert et Pierre Van Thorre pour leur disponibilité, leurs précieux conseils ainsi que pour leur accompagnement sur le terrain.

Je souhaite remercier François Ferrais, qui m’a accueillie au sein du laboratoire de mycologie. Son enseignement et sa disponibilité ont grandement contribué à enrichir mes connaissances sur les champignons mycorhiziens à arbuscules.

J’adresse également toute ma reconnaissance à Xavier Draye pour l’aide précieuse qu’il m’a apportée dans le domaine des statistiques, ainsi que pour sa bienveillance constante.

Enfin, j’exprime ma profonde gratitude à mes amis et à mes proches, qui m’ont soutenue et encouragée tout au long de ce parcours. Je remercie particulièrement ma famille, qui m’a permis d’arriver au terme de ce chemin et qui a toujours su m’épauler même lors des débuts difficiles, ainsi que pour les relectures de dernière minute effectuées par ma sœur et mon père. J’aimerais aussi remercier mon copain, pour m’avoir aidée à y voir plus clair dans des situations compliquées et pour avoir mis la main à la pâte en m’accompagnant sur le terrain.

Une pensée particulière va à Lucie, avec qui j’ai partagé cette année riche en émotions. Je suis reconnaissante d’avoir pu terminer mes études à ses côtés et de clore cette étape importante en partageant avec elle cette belle expérience.

Table des matières

Table des figures	v
Table des tableaux	vii
Liste des acronymes	vii
I. Introduction	1
II. État de l’art	2
1. Fonctionnement général du sol.....	3
1.1. Composition du sol.....	3
1.2. Caractérisation physique du sol.....	3
1.3. Caractérisation chimique du sol	4
1.4. Caractérisation biologique du sol	5
1.5. Le cycle du carbone et de l’azote dans le sol	6
2. Le travail du sol	7
2.1. Définitions	7
2.2. Les modalités de travail du sol	9
2.2.1. Travail du sol conventionnel	9
2.2.2. Techniques culturales simplifiées	9
2.2.3. Travail du sol en conservation.....	10
2.3. Effet des modalités de travail du sol	11
2.3.1. Impacts agronomiques.....	11
2.3.2. Impacts environnementaux.....	14
2.3.3. Performances économiques	14
3. Les couverts végétaux	15
3.1. Définition et objectifs	15
3.2. Les familles et espèces	16
3.2.1. Brassicacées (Crucifères)	16
3.2.2. Graminées (Poacées)	16
3.2.3. Fabacées (Légumineuses).....	17
3.2.4. Hydrophyllacées	17
3.3. Services écosystémiques	18
3.3.1. Amélioration de la qualité des sol	18
3.3.2. Stimulation de la biodiversité fonctionnelle.....	19
3.3.3. Services agronomiques et productifs.....	19
3.4. Effet du travail du sol sur les couverts végétaux	19
4. Les champignons mycorhiziens à arbuscules.....	20
4.1. Générale.....	20
4.2. Impact du travail du sol sur les champignons mycorhiziens à arbuscules	22
5. Objectifs du mémoire	23

III.	Matériel et méthodes	24
1.	Contexte.....	24
1.1.	Localisation	24
1.2.	Caractérisation du dispositif expérimental et du couvert végétale.....	24
1.3.	Historique de la parcelle.....	25
1.4.	Conditions météorologiques.....	27
2.	Méthodes de mesures	29
2.1.	Analyse des caractéristiques du couvert.....	29
2.1.1.	Évaluation de la biomasse aérienne.....	29
2.1.2.	Évaluation de la biomasse racinaire	31
2.2.	Analyse des caractéristiques chimiques du sol.....	32
2.3.	Analyse de la biologie du sol	33
3.	Méthode d'analyses statistiques	37
3.1.	Moyennes, écarts-types et erreur standard	37
3.2.	Analyse en composantes principales	37
3.3.	Analyse de la variance.....	38
3.4.	Régression linéaire simple.....	38
3.5.	Corrélation entre variables	39
4.	Utilisation d'intelligence artificielle.....	39
IV.	Résultats	40
1.	Caractérisation du couvert végétal	40
1.1.	Biomasse aérienne	40
1.1.1.	26 novembre 2024	40
1.1.2.	3 février 2025	43
1.1.3.	Comparaison entre les deux dates	46
1.1.4.	Approche globale	47
1.2.	Indice de surface foliaire	48
1.2.1.	26 novembre 2024	48
1.2.2.	03 février 2025	49
2.	Développement racinaire.....	52
3.	Analyse chimique du sol	55
3.1.	Teneur en carbone organique selon la profondeur	55
3.2.	Évolution du rapport C/N selon la profondeur	56
4.	Activité mycorhizienne	57
V.	Discussion	59
1.	Dynamique du couvert végétal.....	59
1.1.	Implantation du couvert.....	59
1.1.1.	Températures	59
1.1.2.	Précipitations	60
1.1.3.	Rôle des stratégies racinaires et foliaires dans la phase initiale	61

1.2.	Conditions hivernales	62
1.3.	Absence d'effet des modalités de travail du sol	63
2.	Développement racinaire.....	65
2.1.	Date de prélèvement	65
2.2.	Précision méthodologique sur la profondeur d'échantillonnage.....	65
2.3.	Effet du travail du sol sur la distribution de la biomasse racinaire	65
3.	Propriétés chimiques du sol.....	66
3.1.	Teneur en carbone organique	66
3.2.	Rapport C/N	67
4.	Activité mycorhizienne	68
5.	Cohérence des résultats	68
VI.	Conclusion.....	70
VII.	Références bibliographiques	72
VIII.	Annexes	82
1.	Obligations réglementaires relatives aux cultures intermédiaires et à la couverture des sols en Wallonie	82
2.	Carte pédologique de la parcelle expérimentale.....	83
3.	Itinéraire technique complet de la parcelle de 2019 à 2025 selon les différentes modalités de travail du sol.....	84
4.	Contributions des différentes variables aux deux premiers axes de l'analyse en composantes principales des données de biomasse aérienne par espèces au 26 novembre 2024.....	86
5.	Contributions des différentes variables aux deux premiers axes de l'analyse en composantes principales des données de biomasse aérienne par espèces au 03 février 2025 87	
6.	Analyse en composantes principales des données combinées des deux dates, de biomasse aérienne en fonction des modalités de travail du sol.....	88
7.	Analyse en composantes principales des données d'indice de surface foliaire en fonction des modalités de travail du sol à la date du 26 novembre 2025	88
8.	Contributions des variables aux deux premiers axes de l'analyse en composantes principales du LAI au 03 février 2025	89
9.	Températures hivernales 2024.....	90
10.	Synthèse des impacts potentiels des principes de l'agriculture régénérative sur différents objectifs agronomiques et environnementaux.....	91
11.	Valeurs de carbone organique, rapport C/N et MPN selon les modalités de travail du sol	92

Table des figures

Figure 1 : Processus biologiques, chimiques et physiques qui affectent la concentration des éléments nutritifs dans l'eau des pores du sol	4
Figure 2 : Représentation schématique des compartiments et du couplage du carbone et de l'azote au sein de l'écosystème prairial	6
Figure 3 : Schéma des phases extraradicales et intraradicales du développement des CMA, illustrant les principales structures fongiques dans la racine hôte.....	21
Figure 4 : Processus directs et indirects d'interaction entre racines, champignons mycorhiziens à arbuscules et bioagresseurs pour la bioprotection des plantes	21
Figure 5 : Vue aérienne de la parcelle expérimentale à Corroy-le-Grand.....	24
Figure 6 : Représentation du dispositif expérimental réalisée par le Aline Fockede (CRAW, 2024).....	25
Figure 7 : Plan expérimental pour l'évaluation de la biomasse et du LAI selon les modalités de travail du sol du 12 novembre 2024, 26 novembre 2024 et 03 février 2025	29
Figure 8 : Délimitation d'une zone de prélèvement de 0,25 m ² pour l'analyse de la biomasse et du LAI, 26 novembre 2024	30
Figure 9 : Délimitation d'une zone de prélèvement de 0,25 m ² pour l'analyse de la biomasse et du LAI, 03 février 2025	31
Figure 10 : Prélèvement de carottes de sol à l'aide d'une carotteuse GTR-790 inclinée à 30°, 4 mars 2025	31
Figure 11 : Étape d'isolement des racines après le carottage	32
Figure 12 : Constitution d'échantillons composites de sol par tranches de profondeur pour analyse chimique, 04 mars 2025	32
Figure 13 : Dispositif quelques jours après le transfert des maïs germés dans les pots de culture	36
Figure 14 : Distribution du poids sec (g) des différentes espèces végétales selon le traitement, 26 novembre 2024	40
Figure 15 : ACP des données de biomasse aérienne par espèces, selon les modalités de travail du sol, 26 novembre 2024)	42
Figure 16 : Distribution du poids sec (g) des différentes espèces végétales selon le traitement, 3 février 2025	44
Figure 17 : ACP des données de biomasse aérienne par espèces, selon les modalités de travail du sol, 3 février 2025	44
Figure 18 : Distribution du poids sec (g) des différentes espèces végétales aux deux dates d'échantillonnage, 26 novembre 2024 et 3 février 2025	46
Figure 19 : Composition relative en espèces du couvert selon les modalités de travail du sol aux deux dates d'échantillonnage, 26 novembre 2024 et 3 février 2025	47
Figure 20 : Distribution de l'indice de surface foliaire des différentes espèces végétales aux deux dates d'échantillonnage, 26 novembre 2024 et 3 février 2025	48
Figure 21 : Relation entre l'indice de surface foliaire et la biomasse sèche (g) pour les différents traitements, 26 novembre 2024	49
Figure 22 : ACP des données de LAI par espèces, selon les modalités de travail du sol, 03 février 2025	50

Figure 23 : Distribution de l'indice de surface foliaire de l'avoine selon le traitement, 3 février 2025	51
Figure 24 : Distribution des longueur racinaire totale (mm) selon la profondeur et le type de travail du sol.....	52
Figure 25 : Longueur totale des racines en fonction de la profondeur, du traitement et du bloc	53
Figure 26 : Longueur totale des racines de la tranche 20–40 cm selon le traitement	54
Figure 27 : Évolution de la teneur en carbone organique (g/kg) selon la profondeur, pour les trois modalités de travail du sol.....	55
Figure 28 : Évolution du rapport carbone/azote (C/N) selon la profondeur, pour les modalités de travail du sol	56
Figure 29 : Abondance estimée des propagules mycorhiziennes par traitement, exprimée en MPN par gramme de sol, avec intervalles de confiance à 95 %	58
Figure 30 : Températures moyennes journalières à Uccle en août 2024.....	59
Figure 31 : Quantités journalières et cumulées de précipitations à Uccle en août 2024.....	61
Figure 32 : Localisation des types de sols présents sur la parcelle expérimentale	83
Figure 34 : Contributions des variables à l'axe 1 de l'ACP des données de biomasse aérienne, 26 novembre 2024	86
Figure 35 : Contributions des variables à l'axe 2 de l'ACP des données de biomasse aérienne, 26 novembre 2024	86
Figure 36 : Contributions des variables à l'axe 1 de l'ACP des données de biomasse aérienne, 03 février 2025	87
Figure 37 : Contributions des variables à l'axe 2 de l'ACP des données de biomasse aérienne, 03 février 2025	87
Figure 38 : ACP des données de biomasse aérienne par espèces, selon les modalités de travail du sol, données combinées des deux dates.....	88
Figure 39 : ACP des données de LAI par espèces, selon les modalités de travail du sol, 26 novembre 2024.....	88
Figure 40 : Contributions des variables à l'axe 1 de l'ACP des données de LAI, 03 février 2025	89
Figure 41 : Contributions des variables à l'axe 2 de l'ACP des données de LAI, 03 février 2025	89
Figure 33 :Température moyenne journalière à Uccle durant l'hiver 2024	90
Figure 42 : Relation entre carbone organique (g/kg), rapport C/N et abondance de mycorhizes (MPN/g) selon le traitement	92

Table des tableaux

Tableau 1 : Classification des organismes du sol en trois groupes fonctionnels, selon leur type d'activité.....	5
Tableau 2 : Travail du sol profond : types d'opérations, outils et objectifs	8
Tableau 3 : Travail du sol superficiel : types d'opérations, outils et objectifs	8
Tableau 4 : Protocole de dilutions croissantes du sol avec sol stérilisé et substrat	35
Tableau 5 : Présence relative des espèces selon le type de travail du sol, 26 novembre 2024	41
Tableau 6 : Résultats de l'estimation de l'abondance de propagules mycorhiziennes actives par la méthode du MPN pour trois modalités de gestion du sol issus du fichier Excel développé par Jarvis et al., (2010).....	58
Tableau 7 : Températures minimales, maximales, optimales et de base (°C) pour la germination et la croissance de différentes espèces du couvert végétale.....	60
Tableau 8 : Proportion d'échantillons avec LAI d'avoine positif pour chaque traitement, 03 février 2025	64
Tableau 9 : Proportion d'échantillons avec LAI d'avoine positif pour chaque bloc, 03 février 2025	64
Tableau 10 : Opérations culturales réalisées sur la parcelle expérimentale entre 2019 et 2022 selon les modalités de travail du sol. Les différences entre modalités sont signalées par un « X »	84
Tableau 11 : Effets potentiels des principes de l'agriculture régénérative sur différents objectifs agronomiques et environnementaux, selon le rapport de synthèse de la British Ecological Society	91

Liste des acronymes

ACP : Analyse en composantes principales

ACS : Agriculture de conservation des sols

ANOVA : Analyse de la variance

CEC : Capacité d'échange cationique

CIPAN : Cultures intermédiaires pièges à nitrates

CMA : Champignons mycorhiziens à arbuscules

COT : Carbone organique total

CRAW : Centre wallon de recherches agronomiques

IRM : Institut royal météorologique

LAI : Indice de surface foliaire (*Leaf Area Index*)

MPN : Nombre le plus probable (*Most Probable Number*)

TCS : Techniques de culture simplifiées

I. Introduction

La durabilité des systèmes agricoles constitue aujourd'hui un enjeu majeur face à la croissance démographique et à l'augmentation de la consommation alimentaire (Kopittke et al., 2019). La seconde révolution agricole du 20^e siècle, marquée par une intensification du travail du sol, l'usage généralisé de produits phytosanitaires et d'engrais chimiques, a permis d'accroître fortement la production (Henri Regnault et al., 2014). Cette intensification a également eu des conséquences négatives sur l'environnement, avec la contamination des sols et des eaux et une perte de biodiversité au sein des agroécosystèmes (Angon et al., 2023). S'y ajoute une baisse progressive de la fertilité et de la structure des sols, se traduisant notamment par une diminution de la matière organique, une compaction accrue et une vulnérabilité renforcée à l'érosion (Munkholm et al., 2013). Actuellement, l'agriculture entre dans une troisième révolution, portée par les biotechnologies et l'émergence de nouvelles techniques culturales (Henri Regnault et al., 2014). Ces méthodes de gestion des sols permettent de réduire les coûts liés au travail mécanique, tout en préservant leurs fonctions écosystémiques et la productivité des cultures. Parmi ces approches, la réduction ou l'absence de labour, associée à l'implantation de cultures intermédiaires, apparaît comme une voie prometteuse pour améliorer la structure du sol, limiter l'érosion, favoriser la biodiversité et renforcer la résilience des systèmes agricoles (Petermann et al., 2024).

C'est précisément dans ce contexte que s'inscrit ce travail, qui saisit l'opportunité d'étudier, dans une parcelle déjà conduite de manière raisonnée (rotation diversifiée, couverts réguliers, gestion mesurée des intrants), l'effet comparatif du labour, du non-labour récent et du non-labour ancien sur un couvert multi-espèces d'interculture. Ainsi, l'étude se concentre sur l'influence de différentes modalités (labour, non-labour ancien et non-labour récent) sur le développement aérien et racinaire de ce couvert, à travers l'analyse de la biomasse aérienne, de l'indice de surface foliaire au cours du temps et de la distribution verticale des racines du couvert. L'étude s'intéresse également aux conséquences potentielles des modalités de travail du sol sur les éléments nutritifs du sol, par l'évaluation du carbone organique et du rapport carbone/azote. Enfin, l'influence du travail du sol sur la biodiversité est abordée à travers l'étude des champignons mycorhiziens à arbuscules, organismes clés de la fertilité et du fonctionnement biologique des sols.

Ce travail est organisé en quatre grandes parties. L'état de l'art dresse une vision globale des connaissances existantes. Il décrit le fonctionnement physique, chimique et biologique du sol. Expose les différentes modalités et leurs effets sur le sol. Il précise le rôle et les services écosystémiques des couverts végétaux, puis présente les champignons mycorhiziens à arbuscules, leur rôle et leur importance avant d'analyser l'influence du travail du sol sur ces organismes clés de la fertilité. Cette partie permet de définir les bases scientifiques de ce qui fait l'objet de cette étude et précise les objectifs du mémoire. La section matériels et méthodes détaille le dispositif, la localisation et l'historique de la parcelle expérimentale. Elle décrit aussi les conditions météorologiques, les caractéristiques du couvert mais aussi les méthodes de mesure du sol et de la biologie, ainsi que les approches statistiques mobilisées durant l'expérience. Les résultats présentent les observations recueillies, sur l'implantation et le développement du couvert, la biomasse et l'indice de surface foliaire, l'organisation du système racinaire, l'évolution physico-chimique du sol (carbone et rapport C/N) et l'activité mycorhizienne au cours des observations. Enfin, la discussion met ces résultats en raisonnante avec la littérature, afin d'expliquer les dynamiques observées, de préciser les effets du travail du sol et d'identifier les limites méthodologiques ou contextuelles de l'étude, tout en ouvrant des perspectives de recherche.

II. État de l'art

Dans le contexte actuel, marqué par l'intensification agricole des trente dernières années, le labour intensif, l'usage massif de pesticides et le raccourcissement des rotations ont fragilisé les équilibres écologiques. Cela a favorisé l'augmentation des ravageurs et des maladies, soulignant la nécessité de systèmes agricoles plus proches des processus naturels (Fiennes, 2025). Face à ces constats, la recherche de solutions alternatives s'est orientée vers des pratiques visant à reconnecter agriculture et fonctionnement écologique. Cependant, l'évaluation de ces techniques reste parfois complexe, en raison de la diversité des situations dans lesquelles elles sont mises en œuvre. Les pratiques de gestion du sol s'inscrivent dans une grande diversité de contextes, caractérisés par des variations de climat, de types de sols, de rotations culturales, d'objectifs de production, mais aussi par les connaissances, ressources et infrastructures propres à chaque exploitation. Cette diversité rend les effets observés difficiles à généraliser : une technique efficace dans un contexte peut s'avérer neutre, voire contre-productive, ailleurs. Dans ce paysage complexe, certaines pratiques présentent un niveau de preuve élevé et constant. L'élimination du sol nu et le maintien de racines vivantes tout au long de l'année sont fortement associés à l'augmentation de la matière organique, à l'amélioration de la structure du sol, à une meilleure disponibilité en nutriments et à un enrichissement de la biodiversité, avec un degré de certitude élevé. La diversification des systèmes agricoles, par le biais de rotations variées, de cultures associées, de l'intégration de l'élevage et d'une réduction des intrants, présente, avec un degré de certitude moyen, des effets positifs récurrents sur la biodiversité, la résilience et, dans certains cas, les rendements. En revanche, les bénéfices attribués à la réduction de la perturbation mécanique du sol sont plus difficiles à établir de manière concluante et présentent un degré de certitude inférieur à celui d'autres pratiques. Leur expression dépend fortement des conditions locales et de leur combinaison avec d'autres pratiques. Cette variabilité souligne l'importance d'une évaluation contextualisée pour juger de la pertinence et de l'efficacité des choix de gestion du sol (Wade, Ruth et al., 2025).

Une telle analyse nécessite de comprendre au préalable le fonctionnement général du sol, les processus physiques, chimiques et biologiques qui le régissent, ainsi que le rôle des pratiques agricoles, des couverts végétaux et de la biologie du sol, afin d'apprécier pleinement l'impact potentiel des différentes pratiques.

1. Fonctionnement général du sol

1.1. Composition du sol

En pédologie le sol est défini comme la « formation naturelle de surface, meuble, résultant de la transformation, au contact de l'atmosphère, de la roche mère sous-jacente, sous l'influence des processus physiques, chimiques et biologiques » (Larousse, s. d.). Ce dernier se forme à partir de deux composantes principales : l'altération progressive de la roche mère, qui fournit la fraction minérale, et l'accumulation de matière organique provenant des organismes vivants ; plantes, animaux, micro-organismes (Whalen et al., 2021).

La part minérale, majoritaire 90 à 99 % du sol, résulte de la désagrégation des roches sous l'effet du climat ou de leur transport par l'eau et le vent. Elle est composée de particules de tailles variables, allant de l'argile aux cailloux (Pellerin et al., 2020). La matière organique, qui constitue entre 1 et 10 % du sol, regroupe à la fois la biomasse vivante (bactéries, champignons, microfaune) et les matières mortes issues de la décomposition biologique, comprenant les résidus végétaux et animaux, les excréments et les débris en transformation (Pellerin et al., 2020) ainsi que l'humus, forme stable de cette décomposition (Van der Wal & de Boer, 2017). Dans cette fraction organique, environ 95 % correspond à de la matière morte, et seulement 5 % à la biomasse vivante du sol (Pellerin et al., 2020).

Le sol est un milieu complexe et vivant, en constante interaction avec le climat, la végétation, les racines et les organismes qu'il abrite. Il remplit des fonctions physiques, chimiques et biologiques essentielles à la fertilité et à la stabilité des écosystèmes (Schmidt et al., 2011).

1.2. Caractérisation physique du sol

L'importance de la matière organique, notamment de l'humus, réside dans son rôle permettant aux particules minérales de se lier entre elles et de former des agrégats, à l'origine de la structure du sol. Cette dernière est définie par l'agencement de ces agrégats et des espaces vides entraînant ainsi une porosité plus ou moins marquée (Van der Wal & de Boer, 2017). Le sol est ensuite caractérisé par sa texture qui est définie comme l'abondance relative de particules de dimensions variées, regroupées selon trois classes : les argiles, les limons et les sables. La texture va définir la facilité à travailler le sol, mais aussi la quantité d'eau et d'air retenue, ainsi que la vitesse de transport de l'eau (Lemanceau et al., 2006).

1.3. Caractérisation chimique du sol

La capacité du sol à retenir et à échanger des éléments nutritifs repose en grande partie sur la formation de complexe argilo-humique, une association entre les particules minérales fines, notamment les argiles, et l'humus. Ce complexe porte des charges négatives, ce qui lui permet de fixer temporairement des cations comme le calcium, le potassium, le magnésium, l'ammonium ou encore le sodium (Gobat et al., 2010). Ce mécanisme détermine la capacité d'échange cationique du sol (CEC), un indicateur clé de sa fertilité. Plus la CEC est élevée, plus le sol peut stocker de nutriments (Julien et al., 2022).

Cependant une CEC élevée ne garantit pas la disponibilité immédiate des nutriments. En effet, elle dépend fortement des organismes vivants du sol, notamment les micro-organismes mais aussi des racines (Figure 1). Dans la rhizosphère, zone étroitement liée aux racines, les plantes libèrent des exsudats riches en composés carbonés qui stimulent l'activité microbienne. Environ 40 % du carbone photosynthétique est ainsi dirigé vers le sol, alimentant les micro-organismes qui, en retour, jouent un rôle actif dans les processus chimiques en favorisant la minéralisation de la matière organique et en facilitant la libération de nutriments essentiels comme l'azote et le phosphore (Hinsinger, 2010). Ces ions, une fois libérés, transitent par la solution du sol, véritable carrefour d'échange, où ils peuvent être captés temporairement par les microbes eux-mêmes (immobilisation) puis restitués à leur mort (minéralisation), réintégrant ainsi la solution du sol où les racines peuvent les absorber. Cette boucle dynamique régule la libération des éléments retenus par le complexe argilo-humique, rendant la capacité d'échange cationique effective en fonction des conditions biologiques et environnementales, et pouvant ainsi coïncider avec les besoins des plantes (Whalen et al., 2021).

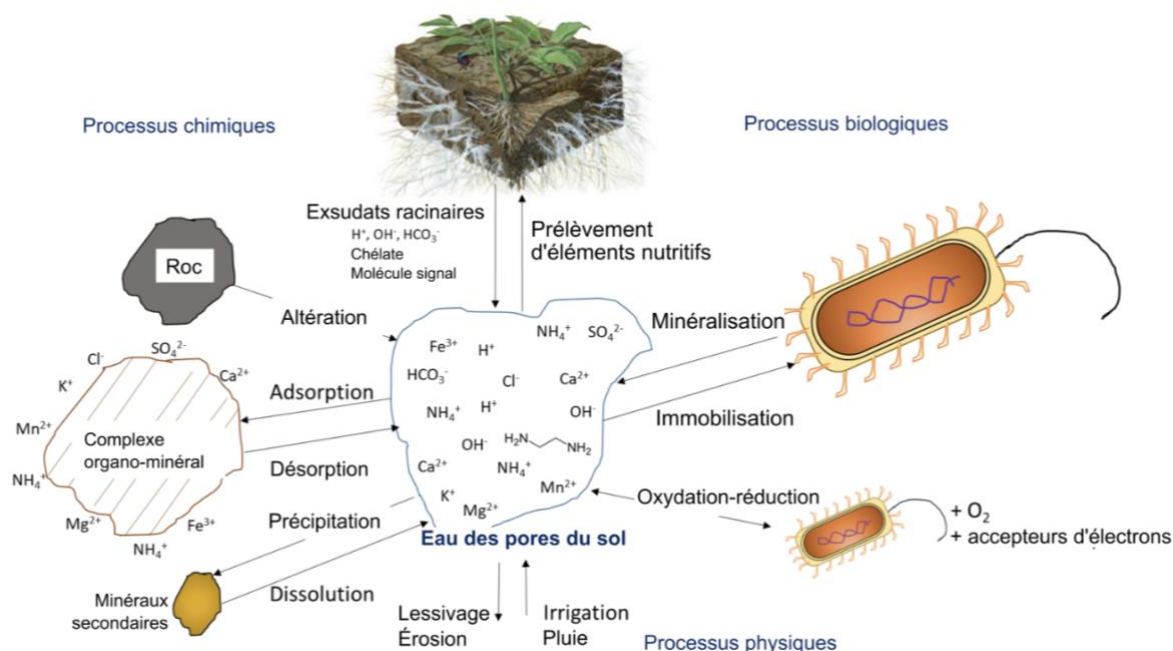


Figure 1: Processus biologiques, chimiques et physiques qui affectent la concentration des éléments nutritifs dans l'eau des pores du sol
(Source : Whalen et al., 2021)

Par ailleurs, l'activité racinaire influence aussi le pH du sol. Les racines fines et leurs poils absorbants prélèvent les nutriments dissous dans la solution du sol par différents mécanismes, notamment le flux de masse avec l'eau, la diffusion selon un gradient de concentration ou encore l'interception directe au

contact des particules du sol. Lors de l'absorption d'un cation tel que le potassium, les racines libèrent un proton afin de maintenir leur équilibre électrique, ce qui entraîne une acidification locale du sol (Whalen et al., 2021). Le pH du sol, qui traduit son niveau d'acidité, joue un rôle essentiel dans la disponibilité des éléments nutritifs. Lorsqu'il devient trop acide ou, à l'inverse, trop basique, certains nutriments peuvent devenir inaccessibles aux plantes, tandis que des éléments indésirables ou toxiques peuvent être libérés. Ainsi l'acidification locale de la rhizosphère contribue à augmenter la solubilité de certains éléments peu mobiles, comme le phosphore, les rendant ainsi plus facilement absorbables. Il convient toutefois de souligner que le pH du sol est influencé par de nombreux facteurs, notamment la composition minérale du sol, les apports organiques, l'activité biologique ainsi que les interventions humaines telles que l'usage d'engrais ou d'amendements (Mariage, 2019).

1.4. Caractérisation biologique du sol

Le sol constitue un véritable réservoir de biodiversité, regroupant une multitude d'organismes vivants qui interagissent pour assurer l'équilibre et le bon fonctionnement de l'écosystème (Tahat et al., 2020). Cette biodiversité souterraine se répartit en plusieurs groupes fonctionnels, classés selon leur taille, de leur nature biologique et de leurs rôles écologiques dans le sol. Le Tableau 1 présente une classification de la biodiversité souterraine, distinguant la microflore, la micro- et la mésofaune, ainsi que la macrofaune, en précisant leurs fonctions respectives dans le sol.

Tableau 1 : Classification des organismes du sol en trois groupes fonctionnels, selon leur type d'activité (Adapté de : Hedde & Zwicke, 2020)

Niveau	Exemples	Rôles	Fonctions	Tailles
Microflore	Bactéries Champignons	Ingénieurs chimiques	Décomposition de la matière organique Minéralisation et libération de nutriments Dégradation des composés toxiques Transformation de la litière et décomposition de la matière organique	0,5 – 5 µm (bactéries) 2 – 10 µm (diamètre des hyphes mycorhiziens)
Microfaune et Mésofaune	Protozoaires Nématodes Acarions Collembolles Carabes	Régulateur biologique	Régulation des communautés microbiennes Régulation de la disponibilité en nutriments	2 – 200 µm (protozoaires) ~ 100 µm (nématodes) 0,5 – 2 mm (acarions) 0,2 – 6 mm (collembolles)
Macrofaune	Fourmis Termites Vers de terre	Ingénieur de l'écosystème	Création et stabilité des habitats dans le sol Modification des propriétés physiques Accumulations de la matière organique Compaction et décompaction du sol Formation des sols	0,1 – 5 cm (fourmis) 0,3 – 7 cm (termites) 0,5 – 20 cm (vers de terre)

1.5. Le cycle du carbone et de l'azote dans le sol

Toutes les interactions biologiques, physiques et chimiques qui s'opèrent dans le sol sont intimement liées aux grands cycles biogéochimiques, en particulier ceux du carbone et de l'azote. Ces cycles régulent la transformation, le stockage et la circulation de ces éléments essentiels entre l'atmosphère, la biomasse végétale, la matière organique et les microorganismes (Zhenggang Du et al., 2018). Le bon fonctionnement du sol repose donc sur cet équilibre dynamique, où la décomposition de la matière organique, l'activité microbienne et les échanges entre les racines et leur environnement permettent de faire circuler et recycler ces nutriments nécessaires à la vie. La Figure 2 illustre de manière schématique les principaux compartiments et flux impliqués dans le couplage entre le cycle du carbone et celui de l'azote au sein d'un écosystème prairial.

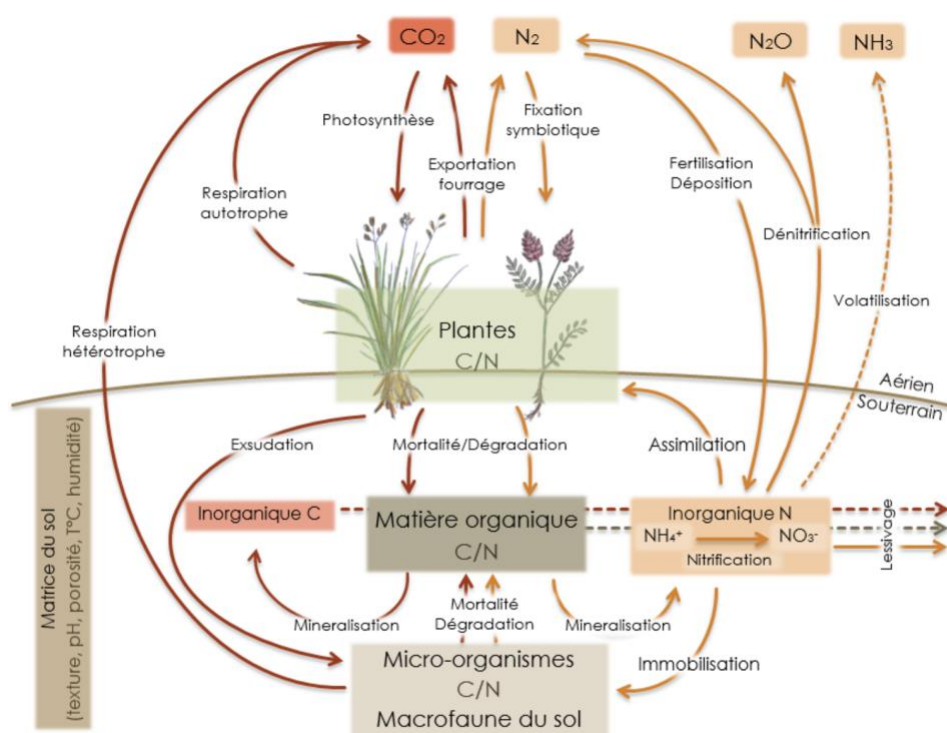


Figure 2 : Représentation schématique des compartiments et du couplage du carbone et de l'azote au sein de l'écosystème prairial
(Source : Whalen et al., 2021)

Les plantes absorbent le dioxyde de carbone (CO_2) de l'atmosphère grâce à la photosynthèse, puis le transforment en glucides utilisés pour leur croissance ou libérés dans le sol sous forme d'exsudats racinaires, qui nourrissent les microorganismes (Schmidt et al., 2011). Ces derniers décomposent la matière organique et participent à la formation de deux formes principales de carbone dans le sol : une matière organique particulaire à cycle rapide et une matière organique plus stable, associée aux minéraux, stockée sur le long terme (Cotrufo & Lavalée, 2020). Le carbone présent dans le sol peut retourner vers l'atmosphère principalement par la respiration des racines et des micro-organismes. D'autres pertes sont également possibles, les exsudats racinaires peuvent libérer du carbone fixé aux complexes minéraux, tandis qu'une partie du carbone organique dissous peut être entraînée vers les milieux aquatiques par lixiviation. Enfin, l'érosion constitue également une voie majeure de perte de carbone (FAO, 2018).

Le taux de carbone organique total (COT), exprimé en g/100 g de sol, est un bon indicateur du statut organique et de la fertilité chimique d'un sol. Son interprétation dépend de la texture, un sol sableux est satisfaisant entre 1,1 et 1,6 un sol limoneux ou argileux entre 1,3 et 2,0. Au-delà de 2,7, le COT est jugé trop élevé, quelle que soit la texture. Un taux trop bas traduit un manque de matière organique, défavorable à la structure et à la vie du sol. Inversement, un excès peut poser problème en favorisant la rétention de contaminants ou les pertes d'azote, surtout en conditions humides ou froides (Mariage, 2019).

L'azote, indispensable à la croissance végétale, provient de la fixation biologique par les bactéries, des résidus organiques et des dépôts atmosphériques. À cela s'ajoute, en contexte agricole, la fertilisation minérale qui constitue une source supplémentaire. Une fois dans le sol, il est transformé par les microorganismes via la minéralisation (en ammonium), puis la nitrification (en nitrate). L'azote peut être assimilé par les plantes ou perdu par dénitrification, lessivage ou volatilisation sous forme d'ammoniac. Ces pertes sont influencées par les conditions du sol, comme l'oxygénation et l'humidité (Yuan, 2022).

La dynamique de ces deux cycles repose sur les échanges constants entre plantes, matière organique et microorganismes (Zhenggang Du et al., 2018). Le rapport carbone/azote (C/N) est un indicateur clé de l'équilibre entre minéralisation rapide et stabilité organique. Un rapport inférieur à 8 indique une dégradation rapide de la matière organique, ce qui libère vite les éléments nutritifs mais limite la formation d'un humus stable, essentiel au stockage du carbone. À l'inverse, un rapport supérieur à 12 traduit une décomposition plus lente, favorable à la stabilisation du carbone mais souvent associée à une faible activité biologique. Un rapport situé entre 8 et 12 est considéré comme optimal : il reflète un bon équilibre entre la minéralisation et la stabilité de la matière organique, tout en soutenant une vie microbienne active (Mariage, 2019).

2. Le travail du sol

2.1. Définitions

Le travail du sol désigne l'ensemble des interventions mécaniques destinées à modifier la structure physique du sol afin de le préparer à accueillir une culture (Roger-Estrade et al., 2014). On distingue généralement le travail primaire, qui comprend les interventions profondes réalisées après la récolte afin de retourner, fragmenter et mélanger le sol avec les résidus végétaux ou les engrais, du travail secondaire, qui se limite à la surface pour affiner le lit de semences ou gérer les adventices (Brian Boyce, 2022). Selon trois critères, la profondeur d'intervention, la présence ou non de retournement et le degré de mélange entre les horizons du sol il est possible de distinguer cinq grandes catégories d'opérations : le labour, le pseudo-labour, le décompactage, le sous-solage et le travail superficiel. On parle de travail très profond lorsqu'il s'effectue sous la couche arable, pouvant aller jusqu'à 60 cm de profondeur, de travail profond lorsqu'il concerne l'ensemble de la couche arable entre 20 et 30 cm, et de travail superficiel lorsqu'il ne dépasse pas les 15 cm (Labreuche et al., 2007). Les Tableaux 2 et 3 présentent de manière synthétique les différents outils mobilisés pour ces opérations, leurs caractéristiques techniques et les effets qu'ils produisent sur la structure et la fertilité du sol.

Tableau 2 : Travail du sol profond : types d'opérations, outils et objectifs
(Adapté de : Labreuche et al., 2007)

Travail	Opération	Profondeur de travail	Retournement	Mélange des horizons	Outils	Objectifs
P r i m a i r e	1. Sous-solage	40 à 80 cm	Non	Non	Sous-soleuse	Fissurer les couches profondes, améliorer la porosité, favoriser l'enracinement et le drainage, détruire les couches imperméables sous la couche arable
	2. Décompactage	15 à 40 cm	Non	Non	Décompacteurs à lames avec socs	Fragmenter les zones compactes de la couche arable, supprimer les tassements, faciliter l'enracinement et l'infiltration de l'eau, préparer le sol sans labour
	3. Labour	15 à 40 cm (souvent 20–30 cm)	Oui	Oui	Charrue à versoirs, charrue à disques, machine à bêcher	Enfouir et mélanger les résidus, fumure et amendements sur la couche arable, détruire les adventices et repousses, ameublir le sol, exposer le sol aux agents climatiques
	4. Pseudo-labour	15 à 40 cm (souvent 20 à 30 cm)	Non	Oui	Charrues à disques, cultivateurs lourds (chisels)	Ameublir la couche arable, mélanger les horizons sans retournement, répartir la matière organique, enfouir partiellement les résidus de culture, substitut possible au labour

Tableau 3 : Travail du sol superficiel : types d'opérations, outils et objectifs
(Adapté de : Labreuche et al., 2007)

Travail	Opération	Profondeur de travail	Retournement	Mélange des horizons	Outils	Objectifs
S e c o n d a i r e	5. Travail superficiel :	0 à 15 cm (souvent 5–8 cm ou 10–15 cm)	Non	Oui	Outils animés ou non, dents, disques, outils combinés avec rouleaux	Mélanger les résidus sans retournement, accélérer leur décomposition, lutter contre adventices/ravageurs, préparer un lit de semences affiné, améliorer l'efficacité du semis, limiter le ruissellement
	5.1 Déchaumage	5 à 15 cm (souvent 8–15 cm)	Non	Oui	Déchaumeurs à disques, chisels, dents (non animés)	Favoriser la décomposition des pailles, déclencher des faux semis, lutter contre les adventices, améliorer l'efficacité du futur labour ou préparer le sol sans labour
	5.2 Reprise de labour	5 à 15 cm	Non	Oui	Cultivateurs lourds/légers, herse rotatives/à dents	Émietter le labour, aérer et ameublir les sols pris en masse, niveler, retravailler en cas d'émiettement insuffisant, préparer le sol avant semis
	5.3 Préparation du lit de semences	0 à 8 cm	Non	Oui	Herse rotatives ou alternatives, cultivateurs rotatifs, outils à dents, combinés au semoir	Émietter les premiers cm pour un bon contact sol-graines, niveler le sol, trier les mottes, enfouir les résidus et engrais, rappuyer le fond du lit pour régulariser le semis, créer un lit favorable à la germination
	5.4 Désherbage mécanique (Binage)	2 à 8 cm	Non	Non	Herse étrille, houe rotative (céréales), bineuse avec dents et socs (cultures sarclées)	Détruire les adventices pendant la culture, contrôler les mauvaises herbes dans l'inter-rang, favoriser l'aération du sol en surface

2.2. Les modalités de travail du sol

2.2.1. Travail du sol conventionnel

Agricultures conventionnelles

L'agriculture conventionnelle désigne le modèle dominant apparu au milieu du 20^e siècle, caractérisé par l'usage intensif d'intrants chimiques, de variétés à haut rendement, et par la mécanisation des exploitations (Bodin, 2023). Son objectif principal est l'augmentation de la productivité pour répondre aux besoins alimentaires croissants. L'utilisation du terme agriculture conventionnelle a été progressivement introduite à partir des années 1970 pour distinguer ce modèle des pratiques émergentes, comme l'agriculture biologique, souvent valorisées comme alternatives plus durables (Sumburg & Giller, 2022). Ce modèle fait l'objet de critiques croissantes en raison de ses impacts environnementaux (pollution, érosion, perte de biodiversité), bien qu'il reste majoritaire dans le monde (Knowler & Bradshaw, 2007).

Le travail du sol en agriculture conventionnelle

Dans un itinéraire conventionnel de préparation du sol, plusieurs opérations se succèdent pour assurer de bonnes conditions d'implantation de la culture. Le processus débute généralement par un labour profond à la charrue, qui retourne la terre, enfouit les résidus, limite les adventices et améliore la structure. Il est suivi d'une reprise avec un déchaumeur, afin de briser les mottes, niveler la surface et favoriser un faux semis. La préparation du lit de semences s'effectue ensuite avec une herse rotative, qui affine le sol, homogénéise les particules et assure un bon contact sol-graine. Cette opération peut être combinée avec le semis à l'aide d'un ensemble herse-semoir, ce qui permet de limiter les passages. Sinon, le semis suit directement pour conserver les conditions optimales. En finition, un rouleau brise-mottes peut être utilisé pour tasser légèrement le sol et améliorer la levée (Labreuche et al., 2007).

Ce qui distingue principalement le travail du sol conventionnel des techniques de réduction ou de non-travail du sol, est le recours au labour. Cette opération, centrale dans les itinéraires classiques, offre plusieurs atouts agronomiques. Elle facilite la préparation d'un lit de semence homogène, favorise l'incorporation des résidus et des amendements, contrôle efficacement les adventices et améliore temporairement la porosité du sol ainsi que l'infiltration de l'eau (Gaborit & Maurincomme, 2023). Toutefois, le labour présente aussi des limites, notamment sur le plan de la durabilité des sols causant une diminution rapide de la matière organique, la perte de la fertilité et une augmentation de la susceptibilité à l'érosion (N'Dayegamiye & Mehuys, 2008).

2.2.2. Techniques culturales simplifiées

C'est dans ce contexte que se sont développées les techniques de culture simplifiées (TCS), visant à réduire fortement le travail du sol. Apparues dès la fin des années 1960, elles ont connu un essor marqué à partir des années 1990, en lien avec l'évolution des politiques agricoles (Labreuche et al., 2007). Les TCS cherchent à limiter les interventions mécaniques tout en maintenant de bonnes performances agricoles.

Parmi les pratiques de TCS, on distingue celles qui travaillent le sol en surface et celles qui interviennent en profondeur, sans pour autant retourner les horizons. Les techniques qui agissent en surface incluent le travail du sol superficiel, qui prépare le lit de semence à faible profondeur (5 à 10 cm), tout en limitant

la perturbation, le déchaumage qui vise à arracher et à enfouir les résidus de culture ou les adventices, ou encore à préparer le lit de semence. Enfin le semis direct, qui n'agit que sur la ligne de semis (Gaborit & Maurincomme, 2023). En ce qui concerne le travail en profondeur, le pseudo-labour permet de fragmenter le sol jusqu'à 20 cm sur toute la surface, sans inversion des couches, contrairement au labour conventionnel. Le décompactage quant à lui, vise à desserrer un sol compacté tout en préservant la stratification naturelle tandis que le sous-solage consiste à fissurer le sol jusqu'à 60 cm de profondeur afin de briser les semelles de labour, améliorer la circulation de l'eau et de l'air, et favoriser un enracinement plus profond, sans perturber les horizons (ARVALIS, 2021).

Les techniques culturales simplifiées ne sont pas un itinéraire en soi mais un ensemble de pratiques très diverses qui vont définir l'ensemble des techniques dont l'intensité est significativement réduite par rapport au système avec labour (Labreuche et al., 2007).

2.2.3. Travail du sol en conservation

Dans une approche plus globale et systémique de la gestion des sols, l'agriculture de conservation s'est progressivement développée. Apparues aux États-Unis dans les années 1950 pour répondre à l'érosion massive causée par les épisodes de dust bowl, tempêtes de poussière catastrophiques survenues dans les années 1930, ces pratiques ont ensuite été adoptées en Europe dans les années 1960 (Cordeau, Stéphane et al., 2021). Elles ont évolué progressivement vers l'agriculture de conservation des sols (ACS), définie comme un mode de production fondé sur l'application simultanée et durable de trois principes :

- la non-perturbation du sol, sauf sur la ligne de semis si nécessaire
- la diversité des cultures dans le temps (rotations) et dans l'espace (cultures associées, plantes compagnes)
- couverture maximale du sol, soit par des résidus de culture, soit par des couverts végétaux, annuels ou permanents

L'ACS est ainsi un concept reposant sur une approche globale (physique, chimique et biologique) du sol, visant sa conservation et son amélioration tout en limitant son altération, notamment en ne reposant plus uniquement sur le travail du sol, mais en mobilisant d'autres leviers comme la couverture permanente et la diversification des cultures (Labreuche et al., 2007).

Les avantages reconnus de l'agriculture de conservation concernent à la fois la fertilité du sol, la biodiversité, la gestion des ressources et l'impact environnemental. Elle améliore la structure du sol en favorisant la formation d'humus et la stabilité des agrégats, qui peut augmenter de 39 % après 20 ans de pratique (Rocco et al., 2024). La couverture permanente du sol et la réduction du travail mécanique stimulent la biodiversité : vers de terre, carabes, araignées et autres organismes qui se développent dans un habitat plus stable et riche (Henneron et al., 2015). En maintenant une présence continue de matière organique et de résidus, elle limite l'érosion, améliore l'infiltration de l'eau et la rétention hydrique (Rust & Williams, 2010). Enfin cette réduction des passages d'engins permet par ailleurs d'économiser du carburant avec une consommation de diesel presque divisée par deux par rapport aux systèmes classiques (Ahmad et al., 2024) mais aussi moins d'usure des machines, une réduction des coûts d'entretien et une plus grande longévité des équipements agricoles (Kriegshauser, 2024).

L'agriculture de conservation joue aussi un rôle sur le plan climatique, en augmentant le stockage du carbone dans le sol, en particulier grâce à l'association de cultures de couverture et de non-labour (Breil et al., 2023). Elle contribue également à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, via une baisse

des apports en engrais minéraux et une moindre utilisation des machines agricoles (Ahmad et al., 2024). Enfin ces pratiques renforcent aussi la résilience face au changement climatique. La couverture végétale crée un micro habitat favorable qui augmente la tolérance des cultures aux épisodes de sécheresse et de fortes pluies tandis que des sols plus vivants se montrent également plus réactifs et autonomes dans leur fonctionnement (Jáuregui et al., 2025).

2.3. Effet des modalités de travail du sol

La comparaison des systèmes de travail du sol repose généralement sur trois catégories : le labour conventionnel, le travail réduit et le non-travail du sol. Outre la profondeur d'intervention mécanique, ces systèmes se distinguent aussi par la gestion des résidus de culture : dans les systèmes sans travail du sol, les résidus sont généralement laissés en surface, dans le travail réduit, ils sont partiellement incorporés, et dans le labour conventionnel, ils sont majoritairement enfouis. Bien que leurs effets agronomiques, environnementaux et économiques soient largement étudiés, les résultats varient fortement selon les contextes pédoclimatiques, les cultures et les pratiques associées. Le travail du sol est donc difficile à évaluer de manière indépendante. D'autres leviers comme la couverture permanente, la diversification des cultures ou la gestion des intrants influencent également la performance globale des systèmes. Une approche systémique est nécessaire pour comprendre les interactions multiples entre pratiques agricoles, sol, climat et durabilité.

Cependant, malgré l'importance de ces facteurs, la section suivante se concentre principalement sur les effets du travail du sol, afin de mettre en évidence les éléments les plus marquants rapportés dans la littérature. L'objectif est de mieux cerner son rôle en tant que facteur principal dans le fonctionnement des agroécosystèmes, à travers ses impacts sur la structure physique du sol, la fertilité chimique, la biodiversité, les effets environnementaux et les performances économiques. Il convient toutefois de rappeler que ces catégories de travail du sol, labour conventionnel, travail réduit et non-travail du sol, représentent des tendances générales, les pratiques observées dans les études ne correspondant pas toujours strictement aux définitions établies.

2.3.1. Impacts agronomiques

Effets sur la structure physique du sol

Le labour peut, dans un premier temps, améliorer la structure du sol en réduisant la compaction superficielle, ce qui se traduit par une porosité accrue et une moindre résistance à la pénétration (Munkholm et al., 2013). Cependant, à plus long terme, le labour conventionnel tend à accentuer la compaction en profondeur, notamment par la formation de semelles de labour, ce qui limite l'enracinement des cultures (Botta et al., 2022). Le non-travail du sol limite les perturbations mécaniques, mais peut favoriser une compaction en surface, réduisant temporairement l'infiltration de l'eau et l'aération. Cette compaction tend toutefois à diminuer avec le temps, sous l'effet de l'accumulation de matière organique (Martínez et al., 2008). Le travail réduit apparaît alors comme un compromis, permettant une amélioration de la structure sans perturber excessivement les horizons profonds (Wu et al., 2025). Cependant, une préparation superficielle seule ne suffit pas toujours à corriger la porosité ou à améliorer durablement l'exploration racinaire, en particulier dans les horizons compacts. Des techniques plus ciblées comme le sous-solage sont parfois nécessaires pour réduire significativement la densité apparente du sol non seulement dans la couche superficielle (0-20 cm), mais aussi en profondeur (20-30 cm), ce qui favorise un enracinement plus profond et plus dense (X. Wang et al., 2015).

Concernant l'évolution de la porosité, des observations sur plusieurs années montrent que, sous travail conventionnel, la porosité initialement accrue après le passage des outils favorise une infiltration rapide. Cependant, cette structure est transitoire, la macroporosité diminue avec le temps et tend à se refermer sous l'effet du tassement, réduisant l'efficacité du système (Strudley et al., 2008). Sous non-travail du sol, l'infiltration est plus lente mais plus régulière. La compaction de surface peut néanmoins entraîner une baisse des volumes de pores drainants rapides, parfois sous les seuils critiques nécessaires à une respiration racinaire suffisante en période de forte humidité (Martínez et al., 2008).

Sur le long terme, les bénéfices structurels du non-labour deviennent plus nets. Sur des sols limoneux, il a été observé que les indices de stabilité des agrégats étaient nettement supérieurs dans les systèmes sans labour, en particulier dans les couches superficielles, avec des valeurs jusqu'à quatre fois plus élevées à 0–10 cm (Sapkota et al., 2012). Des résultats similaires ont été obtenus sous climat pluvial, où le non-labour et le travail réduit ont significativement amélioré l'agrégation des sols à court terme dans les couches superficielles du sol (0-15 cm). Cette amélioration peut être attribuée à la conservation des résidus de culture, riches en carbone labile, qui favorisent l'activité microbienne et la formation d'agrégats (J. Somasundaram et al., 2018).

Effets sur la fertilité chimique du sol

Dans les systèmes labourés, l'intense perturbation du sol stimule fortement la minéralisation de la matière organique, ce qui entraîne une libération rapide des nutriments (Elhaj et al., 2021). Si cette dynamique est favorable à la nutrition immédiate des plantes, elle s'accompagne souvent d'une oxydation accélérée des composés organiques, conduisant à un appauvrissement progressif du stock de carbone du sol. Cette perte de matière organique nuit à la capacité du sol à retenir les éléments minéraux et affecte, à terme, son fonctionnement chimique global et sa fertilité (Wolińska et al., 2015). Cette instabilité peut être observée dans le cas de l'azote, le labour peut entraîner une accumulation d'azote minéral mal valorisée par la culture, augmentant les risques de pertes par volatilisation ou lixiviation. À l'inverse, le non-travail du sol ralentit la minéralisation, favorisant une meilleure conservation de l'humidité et un transfert plus direct vers la plante. Cependant, dans le cas où les résidus du couvert précédent ont été laissés en surface, des pertes superficielles peuvent apparaître en raison d'une augmentation des nitrates liée à la minéralisation accrue de leur matière organique (Uribe et al., 2018). En ce qui concerne le travail réduit, sa perturbation modérée, tend à maintenir un équilibre stable, les plantes absorbent correctement l'azote disponible et les excès d'azote sont limités (Wu et al., 2025). En ce qui concerne les autres nutriments, le non-labour favorise une accumulation en surface des éléments nutritifs comme le phosphore, le potassium et le calcium, concentrés majoritairement dans les 5 premiers centimètres. Cette stratification résulte de l'absence de brassage mécanique et peut améliorer la fertilité de surface, mais limite l'accès aux nutriments en profondeur, notamment en cas de sécheresse (Duiker & Beegle, 2006). À l'inverse, le labour classique homogénéise le profil, assurant une répartition verticale plus régulière, ce qui peut favoriser l'alimentation des racines profondes (Karlen et al., 2013).

Concernant l'acidité du sol, le pH tend à devenir plus acide en surface dans les systèmes sans travail du sol, notamment en raison des apports localisés d'engrais et de l'absence de mélange du sol. À l'inverse, le labour favorise une répartition plus homogène du pH, avec parfois une légère augmentation en profondeur (Duiker & Beegle, 2006).

La question du stockage du carbone mérite cependant d'être nuancée. Si le travail conventionnel du sol a tendance à réduire les stocks de carbone dans l'ensemble des fractions, y compris les formes stables, il apparaît qu'un travail de labour occasionnel du sol, bien maîtrisé, ne compromet pas nécessairement

le stockage du carbone permettant de conserver des niveaux comparables à ceux observés en non-travail du sol (Paye et al., 2024). De plus, les bénéfices du non-labour ne se vérifient pas dans tous les cas. Une étude de longue durée menée à Boigneville n'a montré aucun gain net de carbone organique dans les 0–28 cm du sol après 47 ans de pratiques différenciées. Ce résultat rappelle que le stockage du carbone ne dépend pas uniquement du travail du sol, mais aussi de l'ensemble du système : propriétés du sol (texture, structure, pH, matière organique), présence de couverts végétaux, diversité des cultures, apports organiques et gestion des résidus sont des leviers décisifs pour garantir une fertilité durable (Blaszczyk et al., 2019).

Effets sur la biodiversité du sol

La biomasse microbienne et la respiration du sol sont deux indicateurs clés de l'activité biologique, fortement influencés par le mode de travail du sol. L'adoption du non-labour conduit généralement à une intensification de cette activité microbienne. À court terme, l'absence de perturbation mécanique favorise une hausse rapide de la biomasse totale microbienne (bactéries et champignons confondus), de l'ordre de 20 à 30 %, traduisant une amélioration immédiate de la qualité biologique du sol (Zhang et al., 2014). Sur le long terme, les effets sont encore plus marqués : sur des sols limoneux, le non-labour peut entraîner une augmentation de 70 % de la biomasse microbienne et de 80 % de la respiration du sol par rapport à un système en labour conventionnel, témoignant d'une stimulation durable de l'activité biologique (Sapkota et al., 2012). Cependant, ces effets bénéfiques ne sont pas systématiques : les différences entre systèmes avec et sans labour ne sont pas toujours significatives, notamment lorsque d'autres facteurs, tels que la gestion des résidus ou la saisonnalité, interviennent. Dans certains cas, ces paramètres peuvent exercer une influence plus déterminante sur la biomasse microbienne que le mode de travail du sol lui-même (Spedding et al., 2004).

Le travail du sol, en modifiant certaines caractéristiques physico-chimiques telles que le pH et la proportion de matière organique active, influence la respiration microbienne ainsi que l'activité enzymatique (Cookson et al., 2008). Ces paramètres conditionnent alors la structuration des communautés microbiennes, dont la composition fonctionnelle et taxonomique varie significativement en fonction du mode de gestion du sol (Smith et al., 2016). La répartition verticale de cette biomasse microbienne est également affectée. En surface (0–10 cm), les sols en non-labour présentent généralement des niveaux plus élevés de biomasse bactérienne, tandis qu'en profondeur, celle-ci tend à être plus importante dans les systèmes conventionnels (Cookson et al., 2008). Cette distribution s'explique notamment par une concentration plus marquée de ressources carbonées et azotées dans les couches superficielles des systèmes en non-labour, ressources avec lesquelles la biomasse bactérienne et fongique présente une forte corrélation positive (Villenave et al., 2009).

Les tendances observées pour les communautés microbiennes en réponse au travail du sol se retrouvent également chez le reste de la faune du sol, notamment la microfaune (nématodes, protozoaires), la mésofaune (collemboles, acariens) et la macrofaune (vers de terre, carabes) qui réagissent aux modifications induites par le travail du sol, notamment à travers la redistribution des ressources, la perturbation mécanique de la structure de l'habitat et de modification des propriétés physico-chimiques.

Dans les systèmes sans travail du sol, on observe généralement une diversité fonctionnelle accrue chez les nématodes, avec une part plus importante de prédateurs et d'omnivores, attribuée à un environnement plus stable, plus humide et plus riche en matière organique (Villenave et al., 2009). À l'inverse, le labour tend à simplifier les réseaux trophiques, réduire la densité des groupes sensibles et perturber la régulation biologique des sols (Fujiyama et al., 2001). De la même manière le non-labour favorise une plus grande

richesse spécifique chez les collemboles et acariens, jusqu'à 30 à 40 % de plus selon les indices de biodiversité, en lien avec la présence de résidus végétaux et une meilleure humidité du sol en surface (Sapkota et al., 2012). Chez les carabes, la réduction du travail du sol améliore l'émergence et la survie, tandis que le labour augmente les pertes modulées par les différences de température observées entre les sols labourés et non labourés, par exposition à la prédation ou par enfouissement (Holland & Reynolds, 2003).

Enfin comme pour les micro-organismes, la répartition verticale des organismes plus grands varie selon les systèmes. Par exemple, les vers de terre sont plus actifs en surface sous non-labour (présence de turricules), alors que les collemboles et acariens peuvent être plus abondants en profondeur dans les systèmes labourés, probablement en raison d'une structure du sol plus compacte et d'une moindre porosité en non-labour, limitant l'habitat disponible (Miura et al., 2008).

2.3.2. Impacts environnementaux

Le travail conventionnel du sol, basé sur le labour, tend à exposer les sols à une érosion accrue. Il accentue les risques de ruissellement et de pertes hydriques, en particulier sur des sols sensibles en contribuant à la compaction, notamment par la formation de semelles de labour en profondeur (Elhaj et al., 2021). Le non-travail du sol, de son côté, permet de réduire significativement l'érosion grâce à la présence continue d'une couverture végétale ou résiduelle qui protège la surface du sol (Wu et al., 2025). Cette pratique limite également les pertes en eau par ruissellement. Toutefois, la compaction de surface de laquelle elle peut s'accompagner, surtout à court terme, liée à l'absence de perturbation mécanique, peut ralentir l'infiltration initiale de l'eau, même si celle-ci reste plus stable dans le temps (Wu et al., 2025). Le travail réduit, quant à lui, présente un comportement intermédiaire entre le labour et le non-travail du sol. Il tend à limiter les pertes par érosion par rapport au labour tout en évitant les niveaux élevés de compaction en surface observés sous non-travail. L'infiltration est généralement améliorée par rapport au non-travail du sol, sans atteindre les niveaux parfois observés juste après un labour (Elhaj et al., 2021).

De manière générale, les systèmes avec labour tendent à générer davantage d'émissions de gaz à effet de serre. Cette tendance est notamment marquée lorsque le sol est soumis à des perturbations répétées, qui favorisent la décomposition de la matière organique et l'émission de CO₂. Des suivis sur plusieurs années montrent que le labour conventionnel entraîne une augmentation nette des émissions par rapport aux systèmes sans travail du sol (34,6 %) et au travail simplifié (23,35 %) (Wu et al., 2025).

Le travail du sol intensif est également associé à des excédents azotés plus importants, augmentant les risques de pertes par lixiviation et volatilisation. À l'inverse, le travail réduit permet de limiter fortement ces surplus, en les divisant par deux dans certaines situations, réduisant ainsi l'intensité du risque environnemental (Wu et al., 2025). Le non-travail du sol quant à lui améliore l'efficacité d'utilisation de l'azote mais peut conduire à une volatilisation accrue si les engrais ne sont pas correctement incorporés au sol (Wu et al., 2025).

2.3.3. Performances économiques

De manière générale, le labour conventionnel est souvent associé à des rendements plus élevés que des systèmes de réduction de travail (Villenave et al., 2009) et permet une meilleure résistance aux aléas climatiques par rapport au non-labour (Sapkota et al., 2012). Toutefois, cette performance immédiate masque des coûts indirects importants comme la consommation accrue de carburant, l'usure du matériel,

les pertes d'azote par volatilisation ou lixiviation, ainsi que les émissions de gaz à effet de serre. Ces éléments, bien qu'extérieurs au rendement brut, pèsent lourdement sur les marges et la durabilité à long terme (Wu et al., 2025). En comparaison, le travail réduit du sol apparaît comme un compromis intéressant, permettant d'atteindre des rendements moins importants mais en limitant les charges mécaniques et les impacts environnementaux. Grâce à une perturbation modérée du sol, il permet de mieux valoriser les intrants, notamment l'azote, et d'optimiser le revenu net (Wu et al., 2025). Quant au non-travail du sol, il présente des bénéfices environnementaux indéniables : meilleure conservation des sols, stockage de carbone plus important, réduction de l'usage des intrants. Cependant, sa rentabilité économique peut être plus fluctuante. Des baisses de rendement sont parfois observées, notamment lorsque le système n'est pas complété par des pratiques adaptées telles que la rotation des cultures, la présence de couverts végétaux ou une gestion rigoureuse des adventices (Munkholm et al., 2013). Sur le long terme, des suivis de plus de dix ans montrent que, dans certains cas, les résultats économiques tendent à s'équilibrer, voire à favoriser le non-travail du sol, à mesure que la qualité structurale du sol s'améliore (J. Somasundaram et al., 2018). Ainsi, l'évaluation de la performance économique ne peut se limiter au seul rendement, mais doit prendre en compte l'ensemble des coûts, des externalités et des bénéfices agronomiques, économiques et environnementaux à moyen et long terme.

3. Les couverts végétaux

3.1. Définition et objectifs

Les cultures intermédiaires désignent l'ensemble des cultures implantées entre deux cultures principales (Allam et al., 2023). L'objectif principal de ces couverts est de protéger le sol en évitant de le laisser nu mais aussi en apportant plusieurs services écosystémiques.

Leur désignation varie selon l'objectif principal qui leur est assigné. Le terme le plus générique est celui de « couvert végétal », utilisé notamment lorsque l'objectif principal est la protection du sol contre la battance, le ruissellement ou l'érosion. Ces couverts jouent également un rôle écologique en servant d'habitat à la faune, notamment dans les longues périodes d'interculture. Lorsqu'elles sont implantées dans le but de limiter les pertes d'azote par lessivage, ces cultures prennent le nom de CIPAN (Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrates). On parle d'engrais verts lorsque les cultures intermédiaires sont valorisées pour leur capacité à améliorer la fertilité du sol. Elles permettent notamment de restituer de la matière organique, de recycler des éléments nutritifs profonds et, dans le cas des légumineuses, de fixer l'azote atmosphérique. Elles contribuent également à stimuler l'activité biologique du sol et à améliorer sa structure. Le terme de culture dérobée s'applique quant à lui à une culture intermédiaire qui est récoltée. Il s'agit généralement de cultures de vente à cycle court ou de cultures fourragères. Enfin, certaines confusions peuvent apparaître avec la notion de culture intercalaire, qui peut désigner soit un semis effectué dans l'intervalle temporel entre deux cultures principales, soit un semis effectué dans l'inter-rang d'une culture en place. Dans ce dernier cas, il est plus juste de parler de couvert d'inter-rang, implanté pour protéger le sol durant le cycle d'une culture sarclée. Ce couvert peut, après la récolte de la culture principale, poursuivre sa croissance et devenir une véritable culture intermédiaire (Labreuche et al., 2007). Les aspects réglementaires liés à l'implantation et à la gestion de ces cultures en Wallonie sont détaillés en Annexe 1.

3.2. Les familles et espèces

Dans la pratique, les espèces peuvent être implantées seules ou en mélange, ces mélanges associant souvent plusieurs familles végétales, notamment des graminées, des légumineuses et des brassicacées, et pouvant aussi inclure d'autres familles.

3.2.1. Brassicacées (Crucifères)

Les brassicacées regroupent des plantes comme la moutarde, le radis ou le colza. Elles sont réputées pour leur capacité à produire de la biomasse rapidement grâce à leur développement végétatif important et à structurer le sol avec leur enracinement pivotant. Elles mobilisent efficacement l'azote, le soufre, le phosphore, le potassium et le calcium. On distingue des espèces à cycle court (idéal pour les intercultures estivales) et à cycle long (adaptées aux intercultures d'hiver). Elles sont aussi connues pour leur effet « nettoyeur biologique » grâce à des composés comme les glucosinolates, parfois efficaces contre certains ravageurs, notamment les nématodes. En revanche, elles n'entretiennent pas de symbiose avec les mycorhizes et peuvent provoquer une faim d'azote au printemps. Leur réputation de mauvais précédent pour le maïs est surtout liée à cette concurrence pour l'azote (Thomas & Archambeaud, 2013).

Espèce : Roquette (*Eruca sativa*)

Cette espèce à croissance rapide, rusticité, richesse en protéines, et implantation facile, valorise efficacement les reliquats azotés, restructure le sol grâce à son enracinement profond, et offre une bonne couverture même en conditions climatiques dégradées. Son action biofumigante, son effet anti-nématode et sa bonne valeur fourragère en font un excellent choix en rotation courte ou interculture. En revanche, elle reste peu adaptée aux sols secs, avec une sensibilité marquée à la sécheresse et aux fortes chaleurs (Thomas & Archambeaud, 2013).

3.2.2. Graminées (Poacées)

Les graminées sont de très bons couverts pour structurer la surface du sol et recycler les éléments minéraux. Elles présentent une biomasse dense et un enracinement fasciculé qui améliore l'agrégation du sol. Elles sont particulièrement adaptées aux systèmes d'élevage riches en effluents ou aux cultures maraîchères et horticoles déficitaires en carbone. Leur rapport C/N élevé peut entraîner une faim d'azote s'il n'est pas compensé. En système TCS, une destruction trop tardive peut poser problème à cause de la lente décomposition du matelas racinaire. Par ailleurs, en rotation céréalière, le risque de transmission de maladies, ravageurs ou adventices est plus important (Thomas & Archambeaud, 2013).

Espèce : Avoine rude (*Avena strigosa*)

Cette espèce est rustique, facile à semer et à produire, elle lève bien dans presque toutes les conditions. Elle demande peu d'eau et peu d'éléments minéraux, produit une biomasse abondante grâce à un système racinaire agressif, et concurrence efficacement les adventices. Peu sensible aux maladies, elle présente une bonne qualité fourragère en mélange d'été, et ses pailles riches en carbone protègent longtemps le sol, même après destruction. Cependant, sa forte teneur en carbone ralentit sa dégradation, pouvant entraîner une faim d'azote pour la culture suivante si elle n'est pas associée à des légumineuses ou à une fertilisation adaptée. Elle peut aussi maintenir le sol humide après gel ou roulage, compliquant les reprises ou le réchauffement printanier (Thomas & Archambeaud, 2013).

3.2.3. Fabacées (Légumineuses)

Les légumineuses sont essentielles dans les couverts, elles captent d'abord l'azote minéral, puis développent des symbioses pour fixer l'azote atmosphérique, ce qui leur permet de croître dans des sols pauvres. Elles enrichissent le sol en azote, stimulent l'activité biologique via leurs sucres simples, réduisent la dépendance aux engrais, limitent la faim d'azote et facilitent la décomposition des résidus ligneux. Leur diversité (annuelles, vivaces, grimpantes, dressées) permet une grande souplesse d'intégration dans les rotations. Elles sont aussi une excellente source de fourrage riche en protéines pour les systèmes d'élevage (Thomas & Archambeaud, 2013).

Espèce : Trèfle incarnat (*Trifolium incarnatum*)

Espèce capable de fixer une grande quantité d'azote au printemps, ce qui en fait une excellente plante compagne en mélange fourrager. Il s'adapte aux sols pauvres, acides ou très caillouteux, même en conditions humides et froides, et améliore leur structure et leur fertilité grâce à sa racine pivotante. Résistant aux maladies et nématodes, il démarre vigoureusement au printemps et peut être détruit mécaniquement après floraison. Cependant, son implantation est lente en été et en automne, et il peut concurrencer les cultures de printemps lors de son redémarrage. Il est aussi sensible aux limaces à la levée (Thomas & Archambeaud, 2013).

Espèce : Trèfle d'Alexandrie (*Trifolium alexandrinum*)

Présente une croissance rapide en été et produit une biomasse importante en présence de chaleur et d'eau. Il limite efficacement les adventices, convient bien entre deux céréales ou avant un semis de printemps précoce, et peut être utilisé en fourrage ou en pâture grâce à son absence de météorisation. Non sensible aux maladies, c'est aussi une excellente plante mellifère, très attractive pour les pollinisateurs. En revanche, il est sensible aux excès d'eau comme à la sécheresse, ne pousse pas en dessous de 6 °C et structure peu le sol. Il craint les limaces, demande un semis soigné en sol frais, et sa destruction peut être délicate selon la variété (Thomas & Archambeaud, 2013).

Espèce : Trèfle de Micheli (*Trifolium michelianum*)

Se distingue par une bonne tolérance aux excès d'eau comme à la sécheresse, le rendant plus polyvalent que le trèfle incarnat dans des conditions variables. Non météorisant (c'est-à-dire sans risque de ballonnement pour les ruminants) il peut être intégré en fourrage ou pâture comme les autres trèfles annuels. Cependant, il reste globalement moins performant que le trèfle incarnat, notamment en termes de production ou d'implantation (Thomas & Archambeaud, 2013).

3.2.4. Hydrophyllacées

Espèce : Phacélie (*Phacelia tanacetifolia*)

La phacélie est une plante de la famille des Hydrophyllacées, une famille différente des cultures classiquement utilisées en interculture, ce qui limite les risques sanitaires en rotation. Elle développe un système racinaire superficiel très efficace, utile en sol argileux et en semis direct. Elle mobilise bien l'azote et les minéraux, produit une biomasse importante en cas de semis précoce, et ses résidus favorisent le réchauffement du sol. Plante mellifère, elle attire fortement les pollinisateurs et auxiliaires. En contrepartie, sa semence est coûteuse et exige un semis soigné. Sa floraison indéterminée peut mener

à une montée en graines, et elle peut héberger certains ravageurs comme pucerons, aleurodes ou thrips (Thomas & Archambeaud, 2013).

3.3. Services écosystémiques

Les couverts végétaux contribuent à améliorer la qualité du sol, à favoriser la biodiversité et à soutenir la performance agronomique. Ces effets relèvent de ce que l'on appelle les « services écosystémiques », définis comme « les biens et les services réalisés par la biodiversité, les processus écologiques, les écosystèmes et le support de l'activité humaine pour améliorer le bien-être de l'humanité » (Service public de Wallonie, 2024).

3.3.1. Amélioration de la qualité des sol

Les cultures de couverture sont aujourd'hui reconnues comme un levier majeur pour restaurer et préserver la qualité des sols agricoles. Bien au-delà de leur fonction de protection contre l'érosion, elles jouent un rôle essentiel dans la régénération de la fertilité et l'équilibre écologique des sols. À long terme, elles favorisent le stockage du carbone et de l'azote, éléments clés de la fertilité (García-González, Hontoria, et al., 2018). Cela y compris en profondeur dans la couche 30–60 cm permettant une accumulation de la matière organique en profondeur (Da Costa Soares et al., 2025). Enrichissant le sol en matière organique, elles contribuent également à la restauration des sols dégradés et à la qualité de l'eau, en limitant le lessivage des éléments nutritifs (García-González, Hontoria, et al., 2018).

Lorsqu'elles sont semées en mélanges ou intercalées, elles démultiplient leurs bénéfices : la diversité fonctionnelle des espèces permet une complémentarité des systèmes racinaires et des besoins nutritifs, optimisant ainsi l'usage des ressources du sol (Bedoussac et al., 2015). Par exemple, des plantes aux racines épaisses peuvent pénétrer des sols compactés plus efficacement, contribuant à leur aération et à leur restructuration (Chen & Weil, 2010). Ce type d'agencement biologique accroît également la résilience des cultures face aux aléas climatiques (Merkle et al., 2024).

Même si les mélanges diversifiés peuvent sembler moins performants au départ en raison de la présence d'espèces plus lentes à s'implanter, leur potentiel s'exprime pleinement avec une implantation précoce afin d'assurer une saison de croissance prolongée qui permet à un plus grand nombre d'espèces de développer leur plein potentiel en biomasse et donc d'exercer une pression plus efficace sur les adventices par exemple (Leskovšek et al., 2025).

Sur le plan chimique, les effets sont plus contrastés avec une baisse temporaire du phosphore disponible qui peut survenir due à une absorption accrue par les cultures (Gao et al., 2022) mais à long terme, les couverts améliorent sa disponibilité, notamment dans les sols pauvres ou calcaires, en stimulant l'activité microbienne et enzymatique, en acidifiant localement la rhizosphère et en libérant le P lié aux minéraux ou à la matière organique (Y. Wang et al., 2021). Si la régénération des sols appauvris peut sembler lente, les effets bénéfiques peuvent devenir visibles dès la quatrième année d'implantation des couverts (García-González, Quemada, et al., 2018), signe que la patience et la régularité de la pratique sont essentielles pour des résultats durables. Certaines légumineuses peuvent aussi modifier localement le pH du sol, influençant ainsi la dynamique des nutriments (Gao et al., 2022).

3.3.2. Stimulation de la biodiversité fonctionnelle

Comme pour le travail du sol, l'effet des couverts végétaux s'exerce en grande partie par la modification de paramètres physico-chimiques clés tels que le pH, le potentiel redox et la teneur en carbone organique, qui influencent directement la composition et l'activité des communautés microbiennes du sol (Wolińska et al., 2022). Ainsi les cultures de couverture stimulent la diversité microbienne, en particulier en favorisant des groupes bactériens associés à des fonctions bénéfiques telles que la dégradation de la matière organique et la lutte contre les pathogènes (Gao et al., 2022). Certaines espèces, comme la roquette, favorisent par exemple le développement de bactéries produisant des composés antifongiques, traduisant un potentiel effet de biocontrôle naturel contre les maladies du sol (Gao et al., 2022).

Au-delà de ces effets individuels, c'est la diversité végétale elle-même qui renforce les processus biologiques. Une plus grande diversité d'espèces dans le couvert induit généralement une plus grande diversité microbienne. Cette synergie s'explique par la complémentarité des exsudats racinaires émis par les différentes espèces, mais aussi par leurs effets indirects sur le microclimat du sol (Lange et al., 2014). Chaque espèce végétale émet des composés spécifiques qui nourrissent et structurent des communautés bactériennes particulières, avec des effets différenciés sur les processus biologiques du sol (Gao et al., 2022).

3.3.3. Services agronomiques et productifs

Au-delà de leurs bénéfices pour le sol et la biodiversité microbienne, les cultures de couverture jouent un rôle clé dans la gestion des adventices et des pathogènes. Elles réduisent la pression des mauvaises herbes grâce à des effets allélopathiques via la libération de composés inhibiteurs, et à une forte compétition pour les ressources (Jabran et al., 2015). Certaines espèces, comme l'avoine rude, se montrent particulièrement efficaces même avec une biomasse modeste, en raison de sa croissance rapide et de son fort potentiel allélopathique (Merkle et al., 2024). Il faut noter que une biomasse élevée ne garantit pas toujours une meilleure suppression des adventices. Une explication possible réside dans une différenciation écologique trop importante entre les espèces de couverts et les adventices présentes, limitant leur compétition directe (Leskovšek et al., 2025). Ainsi l'efficacité de cette lutte naturelle dépend de plusieurs facteurs : espèces choisies, méthodes d'implantation, conditions météorologiques et année de culture influencent la densité, la biomasse et la capacité de couverture des couverts (Merkle et al., 2024).

Enfin, les cultures de couverture en mélange contribuent à la régulation des pathogènes grâce à l'effet de dilution, en effet, une diversité végétale accrue diminue la densité des hôtes sensibles, réduisant ainsi la propagation des maladies au sein du système (Keesing et al., 2010). Ce mécanisme confère une protection indirecte mais significative aux cultures principales, en réduisant les risques d'épidémies fongiques ou bactériennes.

3.4. Effet du travail du sol sur les couverts végétaux

La relation entre le travail du sol et les cultures de couverture est souvent envisagée dans une logique de complémentarité, en particulier dans les systèmes à travail réduit. Si les effets bénéfiques des couverts dans ces contextes sont bien documentés, les impacts directs du type de travail du sol sur la réussite des couverts restent encore peu explorés de manière isolée.

Ainsi, en général, on observe que la combinaison d'un travail du sol réduit ou du semis direct avec l'implantation de cultures de couverture permet d'augmenter la biomasse microbienne, d'accélérer la dynamique de la matière organique et de renforcer le stockage du carbone, aussi bien en surface qu'en profondeur (Da Costa Soares et al., 2025). Ces pratiques agissent en synergie, améliorant à la fois les propriétés biologiques et chimiques des sols (Petermann et al., 2024).

Néanmoins, le mode de travail du sol peut influencer la phase d'implantation des couverts dans un but de gestion d'adventices. Un travail plus intensif avant le semis peut améliorer la levée et la croissance des cultures de couverture, mais il favorise également le développement des adventices. À l'inverse, un travail réduit, souvent plus superficiel, peut limiter légèrement la biomasse produite par les couverts comme par les adventices, probablement en raison d'une implantation moins homogène (Leskovšek et al., 2025). C'est comme ça que dans un système sans travail du sol, l'implantation du couvert devient un enjeu critique. Si cette étape échoue, la concurrence avec les adventices devient défavorable, et la couverture du sol est compromise (Leskovšek et al., 2025). Même si les cultures de couverture peuvent, dans certains cas, compenser les effets négatifs de l'absence de travail mécanique en améliorant la structure et la porosité du sol, ces effets dépendent fortement du contexte pédologique et des pratiques antérieures, leur efficacité n'est donc ni systématique ni garantie (Abdollahi & Munkholm, 2014).

4. Les champignons mycorhiziens à arbuscules

4.1. Générale

Les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) appartiennent au phylum des *Glomeromycota*, un groupe fongique ayant coévolué avec les plantes terrestres depuis leur apparition sur les continents il y a plus de 430 millions d'années, durant l'Ordovicien. Cette ancienneté évolutive pourrait expliquer leur présence chez plus de 80 % des plantes cultivées (Stürmer, 2012).

Les CMA forment une symbiose bénéfique et obligatoire avec les racines des plantes, fondée sur un échange réciproque. Le champignon développe dans le sol un vaste réseau de filaments (hyphes) qui explore activement les zones riches en nutriments peu disponibles, tels que l'azote, le phosphore, ou encore divers oligo-éléments comme le fer, le cuivre, le zinc ou le manganèse, améliorant ainsi la nutrition minérale de la plante (Martin & van der Heijden, 2024). En contrepartie, la plante fournit au champignon des composés carbonés issus de la photosynthèse (Chave et al., 2017). Cette relation se manifeste au sein des racines par la formation d'une structure spécialisée appelée arbuscule, qui se développe à l'intérieur des cellules corticales racinaires en un fin réseau ramifié, maximisant la surface d'échange entre les deux partenaires. D'autres structures mycorhiziennes se forment également, comme les hyphes intercellulaires et les vésicules, qui participent au stockage ou à la propagation du champignon (Berruti et al., 2014), (Figure 3). Les hyphes fongiques peuvent également influencer la structure du sol. En effet, les exsudats hyphaux agissent comme des agents liants, enchevêtrant les particules de sol pour former des agrégats plus stables et plus volumineux, contribuant ainsi de manière significative à l'amélioration de la structure du sol (Jastrow et al., 1998).

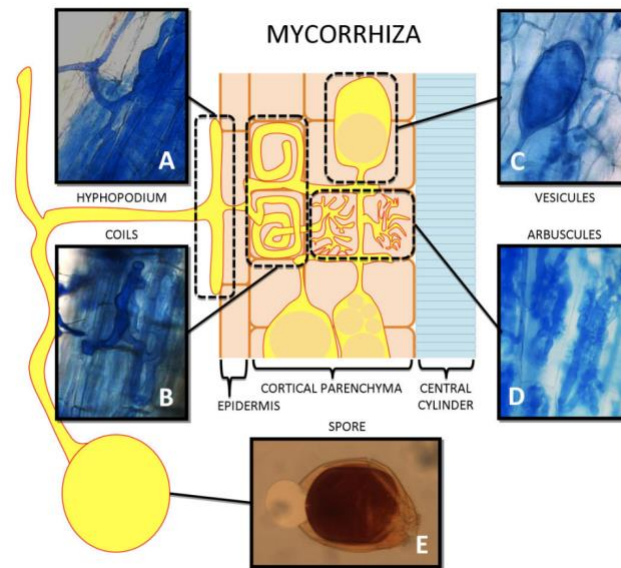


Figure 3 : Schéma des phases extraradicales et intraradicales du développement des CMA, illustrant les principales structures fongiques dans la racine hôte
(Source : Berruti et al., 2014)

La symbiose mycorrhizienne ne se limite pas à améliorer la nutrition des plantes, elle joue également un rôle essentiel dans leur résistance aux stress abiotiques (sécheresse, salinité) et biotiques (pathogènes racinaires et foliaires) (Chave et al., 2017). Les CMA agissent à plusieurs niveaux en stimulant les défenses naturelles des plantes, en occupant les sites d'infection potentiels, et en favorisant le développement d'une microflore antagoniste (Bonfante & Genre, 2010). Ces mécanismes de bioprotection sont illustrés dans la Figure 4.

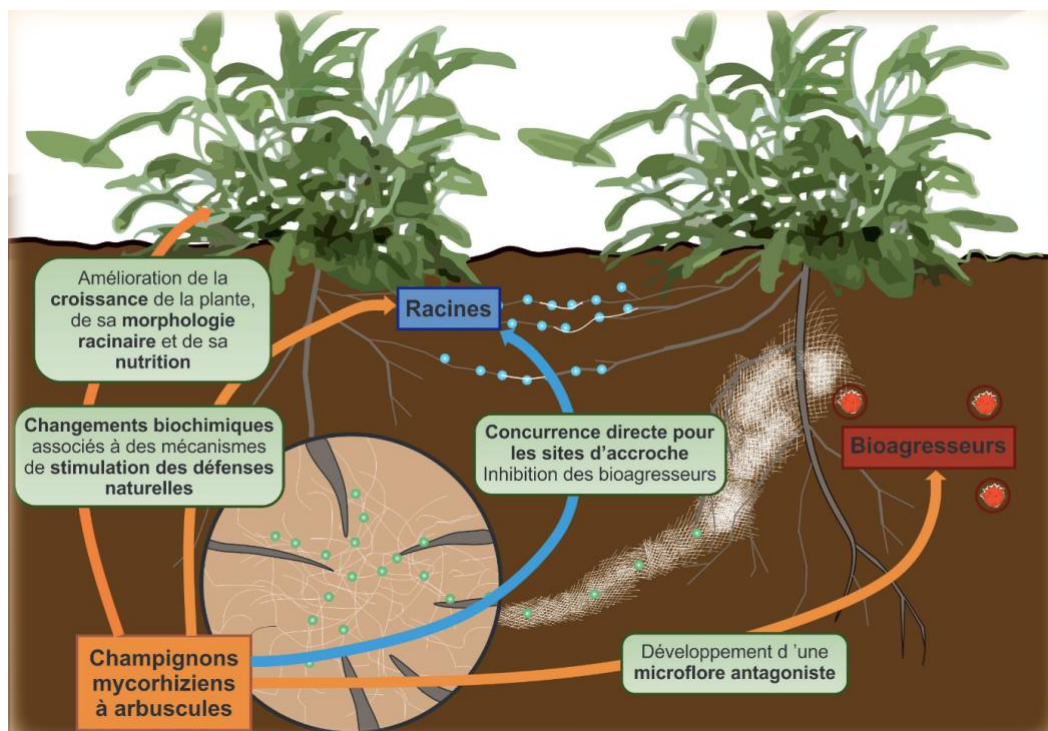


Figure 4 : Processus directs et indirects d'interaction entre racines, champignons mycorhiziens à arbuscules et bioagresseurs pour la bioprotection des plantes
(Source : Chave et al., 2017)

4.2. Impact du travail du sol sur les champignons mycorhiziens à arbuscules

Les CMA jouent un rôle central dans les interactions sol-plante, notamment en facilitant l'absorption des nutriments par les racines et en contribuant à la tolérance au stress. Cependant, leur abondance, leur diversité et leur efficacité sont fortement influencées par les pratiques agricoles, en particulier le travail du sol (Smith et al., 2016).

Le travail du sol, qu'il s'agisse de labour ou de non-labour, modifie profondément la composition et la dynamique des communautés (Alguacil et al., 2008). Le labour à la charrue est particulièrement perturbateur, il entraîne une baisse significative du taux de colonisation racinaire, principalement en raison de la destruction des réseaux d'hyphes fongiques, (Smith et al., 2016). Cette fragmentation du réseau mycélien déstabilise l'habitat fongique et réduit significativement les biomarqueurs associés aux CMA, reflétant leur vulnérabilité au travail du sol (Drijber et al., 2000). Par ailleurs, le labour favorise certaines espèces, notamment celles de la famille des *Glomeraceae*, qui investissent davantage dans la sporulation et la reproduction, au détriment de l'exploration du sol ou du transfert de nutriments à la plante (Verbruggen & Toby Kiers, 2010). Ces espèces, bien qu'efficaces pour recoloniser les sols perturbés, sont souvent moins bénéfiques pour les cultures.

En revanche, les systèmes de non-labour ou de travail réduit sont plus favorables à la mycorhization en permettant une plus grande stabilité du sol et en conservant une part importante des propagules fongiques. Ces systèmes sont également associés à une hausse des teneurs en éléments nutritifs tels que le carbone, l'azote, le soufre et le phosphore, améliorant ainsi les conditions pour une colonisation efficace des racines et une meilleure nutrition des cultures suivantes (Brito et al., 2012). De plus, ces systèmes influencent la structure des communautés fongiques à travers les résidus de culture laissés en surface. Contrairement au labour qui accélère leur décomposition et peut modifier la disponibilité des nutriments, le non-labour maintient une couche de résidus qui agit sur la température et l'humidité du sol, avec des effets indirects mais non négligeables sur la dynamique des communautés CMA (Higo, Masao et al., 2020).

Enfin, les cultures de couverture peuvent jouer un rôle central dans le maintien et la stimulation des CMA. Elles favorisent la formation des réseaux mycorhiziens, même en présence de travail du sol. Montrant que la continuité des associations racinaires est au moins aussi déterminante que la limitation du travail mécanique (Bowles et al., 2017). Cet effet semble particulièrement important dans les systèmes biologiques ou à faibles intrants, où les CMA participent activement à la fourniture de services écosystémiques, comme l'absorption des nutriments, la structuration du sol ou la résistance aux stress. Dans ces contextes, où un certain niveau de travail du sol reste parfois nécessaire pour gérer les adventices ou incorporer la biomasse, l'introduction de cultures de couverture permettrait de maintenir une symbiose mycorhizienne active malgré les perturbations (Bowles et al., 2017).

5. Objectifs du mémoire

La recherche agronomique actuelle vise souvent à évaluer l'impact des différentes modalités de travail du sol et à comparer les techniques simplifiées au labour conventionnel, le plus souvent à travers l'observation d'une culture principale. Cependant, les effets précis de ces pratiques sur l'implantation et le développement d'un couvert multi-espèces d'interculture restent peu documentés, et rares sont les travaux qui analysent conjointement les paramètres physiques, chimiques et biologiques du sol en lien avec cette implantation.

L'objectif général de ce travail est d'évaluer, à l'échelle locale et dans le contexte particulier d'une parcelle conduite de manière raisonnée avec des rotations diversifiées, la présence de couverts réguliers et une gestion mesurée des intrants, l'impact de trois modalités de travail du sol (labour conventionnel, non-labour récent et non-labour ancien) sur le développement d'un couvert multi-espèces, ainsi que sur la composition chimique du sol et l'activité mycorhizienne. L'étude offre une vision globale des effets physiques, chimiques et biologiques de ces pratiques et s'articule autour de plusieurs objectifs spécifiques : évaluer l'effet des modalités de travail du sol sur l'implantation et le développement aérien, au cours du temps, d'un couvert multi-espèces ; analyser les différences de réponse entre les espèces de ce couvert ; évaluer l'effet des modalités de travail du sol sur le développement racinaire du couvert ; analyser la répartition et la dynamique du carbone et de l'azote du sol sous couvert ; et enfin, évaluer l'influence du travail du sol sur l'abondance et l'activité des champignons mycorhiziens à arbuscules.

Ces objectifs peuvent être traduits en cinq questions de recherche :

- Dans un contexte agricole local déjà conduite de manière raisonnée, quels sont les effets du labour conventionnel, d'un non-labour récent et d'un non-labour ancien sur l'implantation et le développement aérien, au cours du temps, d'un couvert multi-espèces ?
- Comment chaque espèce du couvert évolue-t-elle en fonction des modalités de travail du sol, et quelles différences apparaissent entre espèces ?
- Quels sont les effets de ces modalités sur le développement racinaire de ce couvert multi-espèces à différentes profondeurs ?
- De quelle manière ces pratiques influencent-elles la répartition et la dynamique du carbone et de l'azote du sol sous ce couvert ?
- Comment influencent-elles, sur ce même sol, l'abondance et l'activité des champignons mycorhiziens à arbuscules ?

III. Matériel et méthodes

1. Contexte

1.1. Localisation

L'essai système étudié, mené par les Fermes Universitaires de l'UCLouvain et le CRAW (Centre wallon de Recherches agronomiques), se situe sur le plateau de Vieusart, dans le village de Corroy-le-Grand, appartenant à la commune de Chaumont-Gistoux (province du Brabant wallon). Les coordonnées géographiques de la parcelle sont 50.682066 de latitude nord et 4.635382 de longitude est, selon le système de référence WGS84.

Le champ total correspond à deux parcelles agricoles couvrant 6,4 ha (zone rouge), tandis que le plan expérimental occupe une superficie totale de 1,24 ha (zone jaune). La parcelle se répartit sur plusieurs types de sol, allant de limoneux pour la majeure partie à sablo-limoneux pour la partie nord-ouest de la parcelle, ces deux types présentant un drainage naturel favorable. La carte correspondante à la répartition des types de sol est présentée en Annexe 2.



Figure 5 : Vue aérienne de la parcelle expérimentale à Corroy-le-Grand
(Source : WalOnMap, s. d.)

1.2. Caractérisation du dispositif expérimental et du couvert végétal

Le dispositif expérimental (Figure 6) se compose de trois bandes correspondant à trois modalités distinctes de travail du sol. La première, la bande L, correspond à une pratique conventionnelle avec labour annuel, servant de témoin labour et reflétant les méthodes « habituellement » utilisées par les agriculteurs. La bande T représente un système en non-labour récent, mis en place depuis 2018. Elle illustre les techniques culturales simplifiées qui impliquent un travail du sol réduit. Enfin, la bande A se distingue par un non-labour plus ancien, initié dès 2006. Le plan expérimental mis en place par le CRAW et Hugues Falys (responsable opérationnel des fermes universitaires) comprend trois blocs de répétition par modalité, ce qui permet de prendre en compte la variabilité spatiale au sein de la parcelle. Ce dispositif rend possible certaines comparaisons de données avec celles produites par le CRAW.

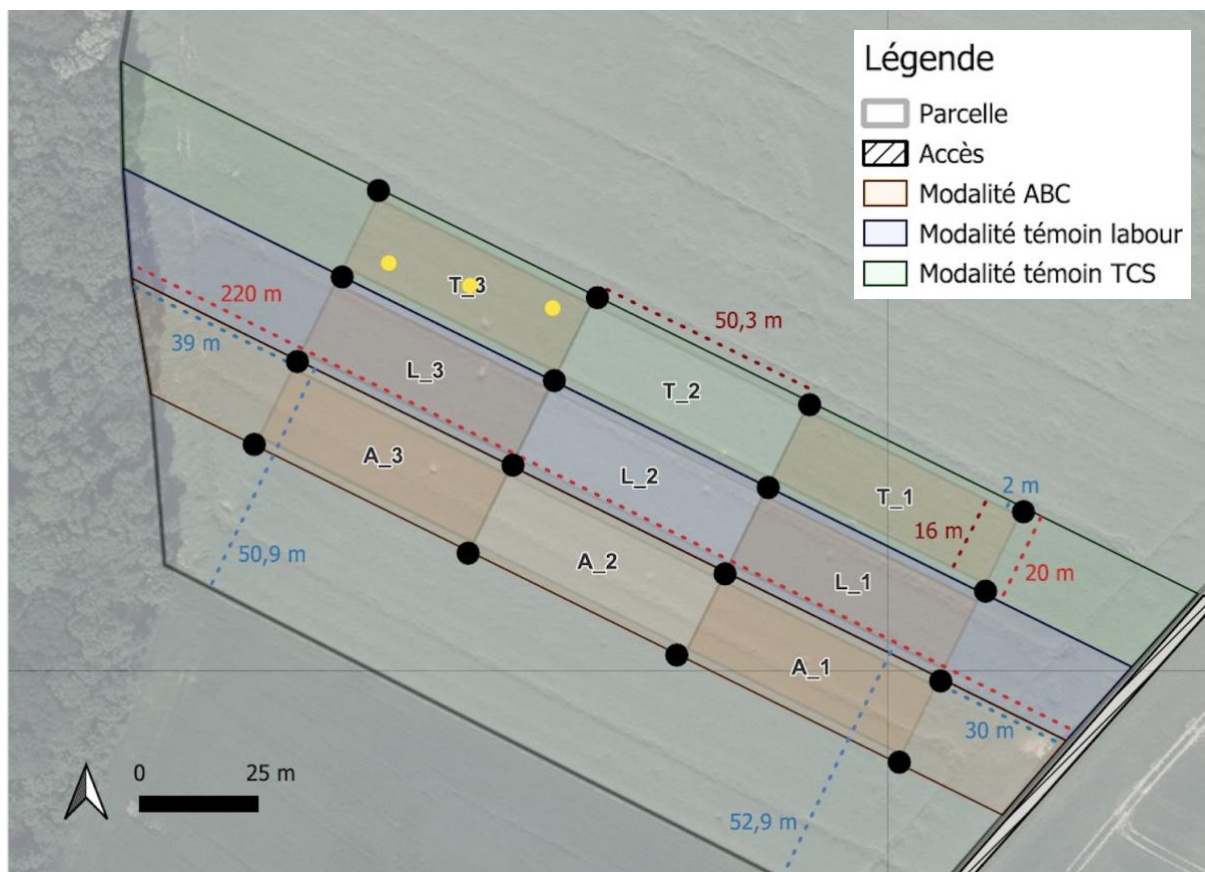


Figure 6 : Représentation du dispositif expérimental réalisée par le Aline Fockedey (CRAW, 2024)

Le couvert multi-espèces étudiant, semé le 6 août 2023, dénommé CIPAM TMF n° 5 A, a été implanté aux doses suivantes : roquette 0,35 kg/ha, phacélie 2,1 kg/ha, trèfle incarnat 2,62 kg/ha, avoine rude 6,65 kg/ha, trèfle d'Alexandrie 4,9 kg/ha et trèfle de micheli 0,88 kg/ha.

1.3. Historique de la parcelle

L'itinéraire de la parcelle avec les cultures et les couverts implantées est disponible depuis 2016 jusqu'en 2019 (Tableau 3). Avant 2020, les parcelles correspondant aux bandes L et T étaient conduites comme une seule et même parcelle, tandis que la parcelle A était déjà conduite en non-labour de manière isolée. La bande labour a été définie en 2020, marquant la séparation avec la bande TCS. À partir de 2019, les trois bandes ont été conduites avec les mêmes espèces de cultures et de couverts, ce qui a permis de distinguer uniquement l'effet des modes de travail du sol. Cette unification des cultures a débuté avec l'implantation d'un couvert multi-espèces en non-labour, réalisée après la culture de froment et d'escourgeon sur la bande déjà conduite en non-labour.

Tableau 3 : Itinéraire cultural de la parcelle expérimentale par bandes de 2016 à 2025

Année	Labour systématique L	Non labour récent T	Non labour ancien A
2016	Froment (Labour)		Betteraves (Non-labour)
2017	Escourgeon (Labour)		Épeautre (Non-labour)
	Couvert : moutarde (Non-labour)		Couvert : féverole (Non-labour)
2018	Pomme de terre (Labour)		Maïs grain (Non-labour)
2019	Froment (Non-labour)		Escourgeon (Non-labour)
	Couvert : multi-espèces (Non-labour)		Idem (Non-labour)
2020	Betteraves (Labour)	Idem (Non-labour)	Idem (Non-labour)
2021	Froment (Labour)	Idem (Non-labour)	Idem (Non-labour)
2022	Pois de conserve (Labour)	Idem (Non-labour)	Idem (Non-labour)
2023	Colza (Labour)	Idem (Non-labour)	Idem (Non-labour)
2024	Froment (Labour)	Idem (Non-labour)	Idem (Non-labour)
2025	Maïs (Labour)	Idem (Non-labour)	Idem (Non-labour)

À partir du 23 août 2019, le détail de chaque intervention a été consigné (Annexe 3). Les principales différences de conduite entre les trois bandes ont été résumées ci-dessous afin d'identifier les facteurs pouvant influencer l'expérimentation.

En 2019, à la suite de la destruction mécanique et chimique du couvert végétal, la préparation du sol avant le semis de betterave a différé selon les bandes expérimentales. Un labour a été réalisé sur la bande L, tandis qu'un déchaumage en deux passages a été réalisé sur la bande T, suivi d'une fertilisation et d'un semis pneumatique identique pour les deux bandes. La bande A, quant à elle, a bénéficié d'une préparation en strip-till et a été semée sans fertilisation. Les interventions suivantes, incluant le désherbage, les traitements phytosanitaires et la récolte, ont été menées de manière identique sur les trois bandes.

En novembre 2020, la préparation du sol pour le semis de froment a de nouveau varié. Un labour a été effectué sur la bande L, tandis que les bandes T et A ont été travaillées à l'aide de deux passages de déchaumeuse. À l'exception d'un décalage de trois semaines dans la date de récolte, la conduite de la culture de froment comprenant fertilisation et traitements phytosanitaires a été homogène sur l'ensemble des bandes jusqu'en août 2021. La conduite du couvert suivant a ensuite été identique pour les trois bandes.

En avril 2022, après la destruction du couvert, un labour a été pratiqué sur la bande L, alors que les bandes T et A ont, une fois encore, été préparées par deux passages de déchaumeuse avant le semis des pois de conserve. La récolte des pois a ensuite été réalisée dans des conditions identiques pour les trois bandes. En juillet 2022, un nouveau couvert a été implanté uniquement sur la bande A avec un déchaumage, avant que l'ensemble de la parcelle ne soit travaillé pour le semis du colza en août, incluant un labour spécifique sur la bande L. Ensuite la culture du colza a été menée dans des conditions similaires sur l'ensemble des modalités jusqu'au 10 août 2023.

Pour le semis du froment en octobre 2023, les pratiques ont de nouveau divergé : un labour a été réalisé sur la bande L, un déchaumage sur la bande T, et un broyage des repousses de colza suivi d'un semis direct sur la bande A. Jusqu'en mars 2024, les apports en engrais et les traitements phytosanitaires ont été similaires entre les bandes. Cependant, à partir d'avril, la bande A a reçu des traitements à base d'huiles essentielles, utilisés en substitution à certains produits phytosanitaires appliqués sur les bandes L et T.

Le couvert interculture étudié a été mis en place le 6 août 2024, semé avec un semoir Claydon dans des conditions identiques sur les trois bandes. Sa destruction mécanique a été réalisée le 10 mars 2025, suivie de modalités de préparation du sol distinctes, labour et hersage sur la bande L, fissuration et déchaumage sur la bande T, et passage au scalpeur seul pour la bande A. Un semis direct du maïs a ensuite été effectué sur la bande A le 23 avril 2025, tandis qu'un semis classique a été réalisé le 30 avril 2025 sur les bandes L et T.

1.4. Conditions météorologiques

Les données climatiques issues de la station d'Uccle (IRM, normales 1991–2020) ont été utilisées afin de caractériser les conditions environnementales ayant influencé le développement des cultures étudiées.

En septembre 2023, la température moyenne a atteint 18,8 °C, établissant un record comme le mois de septembre le plus chaud jamais enregistré, tandis que les précipitations sont restées proches des normales. Le semis du froment a été réalisé en octobre 2023, période qui a marqué le début d'une série inédite de douze mois consécutifs au cours desquels les précipitations ont été supérieures aux valeurs moyennes saisonnières. À la fin novembre, les premiers jours de gel ont été relevés, mais les températures sont globalement restées plus élevées que la normale.

L'hiver 2023-2024 a été caractérisé par des conditions exceptionnellement douces. Le mois de décembre a affiché une température moyenne de 7 °C, contre une normale de 4,3 °C, tandis que février 2024 a atteint 8,3 °C, bien au-dessus de la moyenne habituelle de 4,2 °C. Le printemps a poursuivi cette tendance humide, avec notamment un mois de mai 2024 comptant vingt-trois jours de pluie, en faisant le deuxième mois de mai le plus pluvieux jamais enregistré. La récolte du froment a été effectuée en juillet 2024, dans un contexte toujours marqué par un excès d'humidité. En août 2024, le couvert interculture a été implanté dans des conditions particulièrement humides, avec un cumul mensuel de précipitations de 152,9 mm, contre 86,5 mm en moyenne. Ce mois d'août a toutefois marqué le retour à une insolation légèrement supérieure à la normale, contrastant avec les mois précédents. Ainsi, le froment a évolué dans des conditions peu favorables, tandis que le couvert qui lui a succédé a été implanté dans un contexte très humide. En septembre 2024, la série de douze mois consécutifs à précipitations excédentaires a pris fin. Toutefois, certains mois ont continué à enregistrer des valeurs anormalement élevées, notamment novembre (84,3 mm contre 76,2 mm) et janvier 2025, qui a atteint 153,8 mm contre 75,5 mm en moyenne, devenant ainsi le mois de janvier le plus pluvieux jamais observé. Les premiers jours de gel de la saison ont été enregistrés en novembre 2024 (quatre jours concernés). Le mois de décembre est resté relativement doux, avec une moyenne de 5,3 °C, tandis que janvier 2025 a été légèrement plus froid que la normale (3 °C contre 3,7 °C). L'hiver 2024-2025 a également été marqué par une période neigeuse comptant vingt jours de précipitations neigeuses.

En février 2025, les conditions sont redevenues plus douces et sèches, marquant également un retour à une insolation excédentaire, pour la première fois depuis août 2024. Ce mois a également connu les dernières chutes de neige de la saison. La destruction mécanique du couvert a eu lieu en mars 2025,

dans un contexte exceptionnellement sec et ensoleillé avec seulement 7,8 mm de pluie enregistrés, soit la troisième valeur la plus faible pour un mois de mars. Enfin, le semis du maïs a été réalisé fin mars-début avril 2025, coïncidant avec le jour d'été le plus précoce jamais observé en Belgique. Les températures sont restées bien supérieures aux normales, culminant à 19,3 °C en juin 2025 (contre 16,7 °C habituellement), avec un nombre record de jours de chaleur et une pluviométrie très faible. Cette période s'est ainsi révélée être l'une des plus sèches jamais enregistrées.

2. Méthodes de mesures

2.1. Analyse des caractéristiques du couvert

2.1.1. Évaluation de la biomasse aérienne

But de la mesure

L'objectif de cette mesure a été d'évaluer l'évolution de la biomasse aérienne et de l'indice foliaire (LAI) avant et après l'hiver, en fonction des différentes modalités de travail du sol. L'étude a également visé à identifier d'éventuelles différences de comportement entre les espèces composant le couvert, en cherchant à déterminer si celles-ci, selon les modalités, avaient mieux résisté aux conditions hivernales.

Plan expérimentale

Le plan expérimental (Figure 7) a été établi sur la base de celui développé par Aline Fockedey (CRAW) et Hugues Falys, comprenant trois blocs de répétition par modalité de travail du sol. Deux dates de prélèvement ont été retenues : le 26 novembre 2024 (avant l'hiver), avec des prélèvements réalisés aux quatre coins de chaque bloc de répétition sur une surface de 0,25 m², afin d'être équivalents au prélèvement du CRAW effectué sur une surface de 1 m² et de permettre certaines comparaisons. Le second prélèvement, réalisé le 3 février 2025, a été effectué après des conditions hivernales et a également couvert une surface totale de 1 m², répartie en quatre prélèvements, effectués cette fois-ci aux quatre coins du carré correspondant aux prélèvements du CRAW. Au total, 36 prélèvements, soit 12 par modalité, ont été réalisés pour chacune des deux dates de prélèvements.

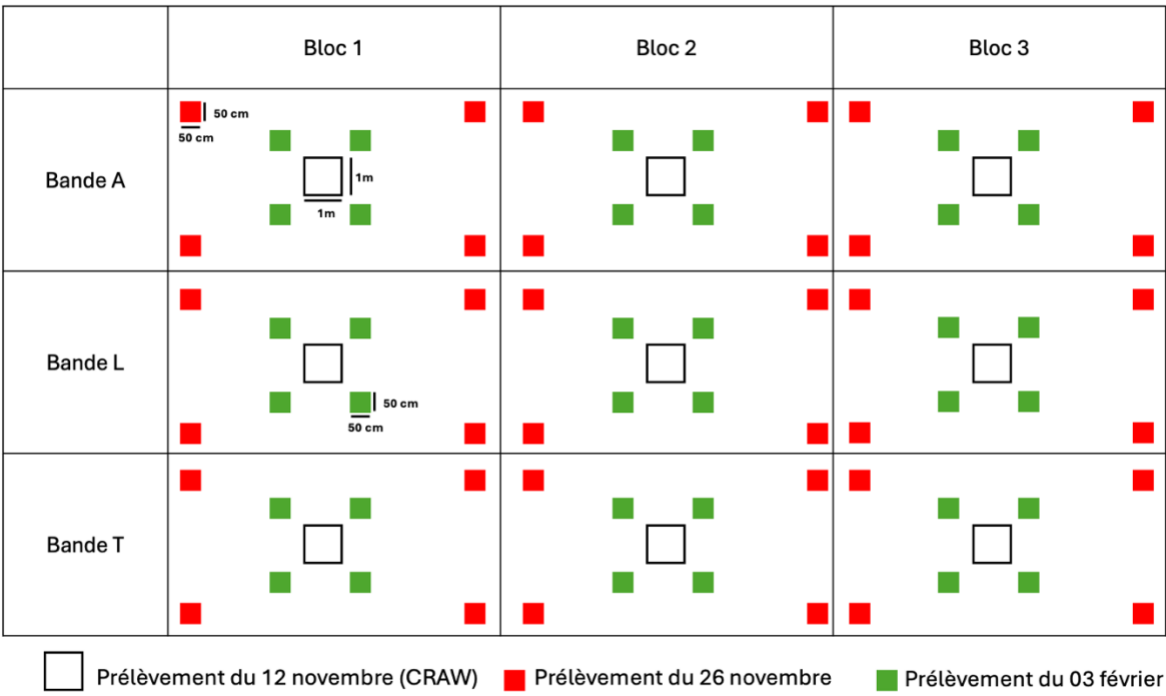


Figure 7 : Plan expérimental pour l'évaluation de la biomasse et du LAI selon les modalités de travail du sol du 12 novembre 2024, 26 novembre 2024 et 03 février 2025

Protocole

Prélèvements du CRAW

Le 12 novembre 2024, un prélèvement a été réalisé sur la base du plan expérimental développé par Aline Fockedey et l'équipe du CRAW. Dans chaque zone, toute la biomasse aérienne a été prélevée à la cisaille sur un quadrat de 1 m², choisi dans une zone représentative, sans accident de culture visible, afin d'éviter les biais liés à une mauvaise levée. Les échantillons ont été mis en sachet, stockés en chambre froide, puis traités le lendemain. Pour chaque prélèvement, le poids frais total de la biomasse a été mesuré. Une séparation des différentes espèces présentes, y compris les adventices, a été effectuée afin d'obtenir le poids frais par espèce. Lorsque la biomasse était trop importante, un sous-échantillon représentatif a été mis à l'étuve pour la détermination du poids sec par espèce.

Prélèvement du 26 novembre

Avec l'aide de Pierre Van Thorre, (accompagnement technique) quatre prélèvements de 50 cm sur 50 cm (soit 0,25 m²) ont été effectués grâce à quatre morceaux de bois (Figure 8) permettant de délimiter la zone, malgré la forte couverture végétale, dans les quatre coins de chacun des blocs de répétition. Chaque prélèvement a été placé dans un sachet numéroté. Les sachets ont ensuite été conservés en chambre froide en attendant leur traitement.

Le traitement des échantillons s'est déroulé entre le 26 et le 30 novembre 2024, afin d'éviter toute dégradation de la biomasse fraîche. Chaque échantillon a été traité selon le protocole suivant :

- Tri des espèces présentes.
- Pesée de la biomasse fraîche par espèce.
- Passage au *leaf scanner* des feuilles uniquement, pour la mesure de la surface foliaire. Seules les feuilles jugées en bon état ont été scannées, selon une échelle d'état préalablement définie.
- Séparation des échantillons par espèce, puis placement dans des enveloppes ou des sacs microperforés numérotés.
- Séchage à l'étuve à 70 °C pendant une durée de un à quatre jours, afin d'assurer un séchage complet.
- Pesée des échantillons secs pour obtenir la masse sèche par espèce.



Figure 8 : Délimitation d'une zone de prélèvement de 0,25 m² pour l'analyse de la biomasse et du LAI, 26 novembre 2024

Prélèvements du 3 février

Le protocole appliqué le 3 février 2025 a été identique à celui du 26 novembre, à la différence que les quatre prélèvements ont été réalisés autour de la zone de 1 m² prélevée par le CRAW.

Malgré le stade avancé de dégradation de certaines espèces comme la phacélie (Figure 8), l'entièreté de la biomasse a quand même été prélevée.

2.1.2. Évaluation de la biomasse racinaire

But de la mesure

L'objectif de cette mesure a été d'évaluer, grâce à des carottes de sol, la répartition des racines en profondeur et de vérifier si la longueur racinaire totale différait selon les modalités de travail du sol.

Protocole

D'après le même plan expérimental que précédemment, trois blocs de répétition ont été prévus par modalité de travail du sol, avec une seule carotte de sol prélevée dans chaque bloc, soit un total de trois carottes par modalité.

Les prélèvements ont été effectués le 4 mars 2025 à l'aide d'une chenille de sondage modèle GTR-790 de chez Geotool, permettant une intervention plus efficace que la méthode manuelle. Cette carotteuse a permis d'extraire des carottes de sol avec un angle d'environ 30° (Figure 10) afin de maximiser la récupération des racines. La carotteuse utilisée était équipée d'une buse de 60 mm de diamètre et de 1 m de longueur. Cet angle d'insertion a permis d'atteindre une profondeur théorique de 86,6 cm. Il faut noter que le tassement provoqué par les vibrations de la machine n'a pas permis de récupérer systématiquement l'intégralité des trente derniers centimètres.

Chaque carotte a ensuite été segmentée en quatre tranches de profondeur grâce à un mètre et à des cuillères pour séparer la terre prélevée par la buse : 0 à 20 cm, 20 à 40 cm, 40 à 60 cm et 60 à 80 cm. Chaque portion de sol a été isolée dans un sac plastique individuel et numéroté.

À la suite de ces prélèvements, les racines ont été lavées au cours des trois semaines suivantes. Le nettoyage a été réalisé à l'aide de tamis très fins et d'un tuyau d'arrosage. Les racines ont ensuite été placées dans un bac à fond blanc pour les repérer et les isoler à l'aide de pinces (Figure 11). Il n'a pas été possible de distinguer les racines par espèce, en raison de leur faible quantité et de l'absence de critères de différenciation nets. Elles ont ensuite été conservées dans des tubes Falcon contenant un mélange de 50 % d'eau et 50 % d'éthanol afin d'assurer leur conservation.



Figure 9 : Délimitation d'une zone de prélèvement de 0,25 m² pour l'analyse de la biomasse et du LAI, 03 février 2025



Figure 10 : Prélèvement de carottes de sol à l'aide d'une carotteuse GTR-790 inclinée à 30°, 4 mars 2025

Les résidus flottants à la surface de l'eau ont également été récupérés dans des tubes Falcon numérotés, afin d'évaluer leur répartition en fonction de la profondeur et des modalités.

Le traitement des racines a ensuite été réalisé durant la semaine du 8 avril 2025 à l'aide d'un scanner Epson (Perfection V850), réglé sur une résolution de 1200 ppp. L'ensemble des racines d'une tranche de profondeur a été réparti dans un bac contenant un fond d'eau, afin d'obtenir une image représentant la totalité des racines, bien séparées les unes des autres, pour la section de sol correspondante. Une image a été produite pour chaque tranche de profondeur de chaque carotte.



Figure 11 : Étape d'isolement des racines après le carottage

Les images obtenues ont été analysées avec le logiciel Fiji (ImageJ 1.54p), à l'aide d'un script en macro.ijm, permettant de traiter chaque image individuellement. Cette analyse a permis de déterminer la longueur totale des racines présentes dans chaque échantillon, en fonction de la profondeur et de la modalité de travail du sol. Les échantillons n'ont pas été pesés, la densité racinaire ayant été jugée trop faible pour fournir des résultats significatifs. Quant aux résidus de culture, ils ont été placés dans des enveloppes et séchés à l'étuve pendant deux jours avant d'être pesés.

2.2. Analyse des caractéristiques chimiques du sol

But de la mesure

L'objectif de cette mesure a été d'analyser la répartition du carbone total et de l'azote total dans le sol, selon les différentes modalités de travail du sol et en fonction de la profondeur.

Protocole

Les prélèvements pour ces analyses ont été effectués le 4 mars 2025, à la même date que ceux réalisés pour les racines, en utilisant la même chenille de sondage GTR-790. La seule différence résidait dans l'utilisation d'une buse plus fine, d'un diamètre de 50 mm, mais de longueur similaire (1 m). Contrairement aux prélèvements racinaires réalisés avec un angle d'insertion, ceux destinés à l'analyse de la composition du sol ont été effectués à la verticale.

Afin de constituer un échantillon composite représentatif, trois prélèvements ont été réalisés par bloc, soit un total de neuf prélèvements par modalité. Le sol extrait par la buse a ensuite été séparé en quatre tranches de profondeur (0 à 20 cm, 20 à 40 cm, 40 à 60 cm et 60 à 80 cm) et placé dans quatre seaux distincts (Figure 12). À la fin des neuf prélèvements pour chaque modalité, les sols de chaque profondeur ont été mélangés, mis en sachets et numérotés.



Figure 12 : Constitution d'échantillons composites de sol par tranches de profondeur pour analyse chimique, 04 mars 2025

Il faut noter qu'en raison de contraintes techniques, les prélèvements initialement prévus pour la bande T n'ont pas pu être réalisés à la carotteuse ce jour-là. Ils ont été effectués le lendemain à l'aide d'une tarière à frapper, équipée d'une gouge de 5 cm de

diamètre, pouvant descendre jusqu'à 1 m. Cette différence de méthode n'a pas eu d'impact significatif sur la qualité des résultats finaux, compte tenu de l'objectif d'obtenir un échantillon composite global.

Enfin, un sous-échantillon de 500 grammes a été prélevé dans chaque échantillon composite et les analyses de sol ont été effectuées par le Centre provincial de l'Agriculture et de la Ruralité (ASBL Brabant Wallon Agro-Qualité), situé à Hulpe. Les analyses réalisées ont permis de déterminer les teneurs en carbone organique, carbone total, carbonate de calcium (CaCO_3) et le rapport C/N.

2.3. Analyse de la biologie du sol

But de la mesure

L'objectif de cette mesure a été d'analyser la biologie du sol au niveau des CMA, en utilisant les trois sols des modalités étudiées.

Principe

La méthode MPN (*Most Probable Number*), ou nombre le plus probable, a pour objectif, grâce à une approche statistique, d'évaluer la densité de micro-organismes présents dans un échantillon sans nécessiter un comptage précis.

Elle consiste à mettre en culture une plante hôte, ici le maïs (*Zea mays*), dans un certain nombre de dilutions successives du milieu à analyser, puis à observer, après plusieurs semaines de culture, la présence ou l'absence de l'organisme cible dans ces cultures. Ensuite, le principe statistique permet d'estimer la concentration initiale de l'organisme dans l'échantillon sur la base de ces résultats de présence/absence. Dans cette analyse, ce sont les CMA qui ont été étudiées. Leur présence ou absence a été déterminée grâce à la détection de structures spécifiques telles que les vésicules, arbuscules ou spores permettant ainsi de déterminer le nombre d'échantillons positifs ou négatifs.

Le calcul du Nombre le Plus Probable repose sur les principes de la théorie des probabilités, selon une loi de Poisson. Ce modèle repose sur deux hypothèses fondamentales :

- (1) Les propagules sont supposées réparties de manière homogène dans le substrat.
- (2) Tout volume contenant au moins une propagule viable entraîne une réponse positive chez la plante piège

Le développement d'un fichier Excel par Jarvis et al, (2010) intégrant un modèle permettant de calculer de manière simple les valeurs du MPN, ainsi que leurs écarts-types et intervalles de confiance. La valeur du MPN constitue une estimation de la densité μ de CMA dans le substrat, exprimée en propagules actives par gramme. La version du programme utilisée pour obtenir ces résultats a été mise à jour en 2018. L'équation à résoudre pour calculer la valeur du MPN est la suivante :

$$\sum_{i=1}^k \left(\frac{x_i d_i w_i}{1 - \exp(-d_i w_i \hat{\mu})} \right) - n_i d_i w_i = 0$$

où :

i = le nombre de dilutions réalisées pour chaque échantillon

x_i = le nombre d'observations positives pour chaque niveau de dilution observé

d_i = le facteur de dilution

w_i = le volume de sol dans lequel chaque plante piège s'est développé

μ = la valeur MPN à estimer

n_i = le nombre de répétitions pour chaque niveau de dilution

Enfin, le modèle intègre aussi un indice de rareté (rarity index), qui permet d'évaluer dans quelle mesure les résultats observés sont inhabituels statistiquement. Cet indice est défini comme le rapport entre la vraisemblance du modèle ajusté et celle d'un modèle alternatif basé sur les données brutes. Il est classé en trois catégories : résultats communs ($0,05 \leq r \leq 1$), peu probables ($0,01 < r < 0,05$) et très rares ($r < 0,01$).

Protocole

Le protocole utilisé a été directement fourni par le laboratoire de mycologie du Professeur Stéphane Declerck.

Prélèvements

La première étape a consisté en un prélèvement de sol sur la parcelle, le 5 mars, avant la destruction du couvert végétal. Dix prélèvements, réalisés à une profondeur de 0 à 20 cm, ont été effectués par modalité à l'aide d'une bêche, puis mélangés afin d'obtenir un échantillon composite dans des seaux. Environ six kilos de sol ont été collectés par bande et ensuite stockés dans des sacs zippés antistatiques, laissés ouverts.

Stérilisation et séchage

Le sol a ensuite été divisé en deux fractions : une partie non stérilisée, simplement mise à sécher à température ambiante dans des bacs peu profonds (maximum 5 cm) pendant une semaine, et une autre partie stérilisée par deux passages à l'autoclave (121 °C pendant 15 minutes), suivis d'un passage en étuve pendant trois jours afin d'assurer un séchage complet. Une fois séchés, les sols ont été tamisés à l'aide d'un tamis de 0,5 cm sous une hotte chimique, afin de limiter la dispersion des poussières. Le sol ainsi préparé a ensuite été conservé dans des bacs en attendant la réalisation des dilutions.

Dilution

La dilution D0 était composée uniquement de sol non stérilisé (trois pots de 100 g chacun). Ensuite, la dilution D1 a été réalisée en mélangeant 300 grammes de sol pur avec 300 grammes de sol stérilisé, afin d'obtenir un facteur de dilution de 1/2. Trois pots de 100 g ont été prélevés dans ce mélange, et les 300 grammes restants ont été de nouveau mélangés avec 300 g de sol stérilisé pour préparer la dilution D2, et ainsi de suite. À chaque étape, une partie du mélange était utilisée pour remplir trois pots, tandis que le reste servait à préparer la dilution suivante. La dernière dilution, nommée « S », ne contenait que du sol stérilisé. Un soin particulier a été apporté à la désinfection du matériel et des surfaces (à l'éthanol) afin d'éviter toute contamination croisée entre les dilutions. Le Tableau 4 présente les différentes dilutions réalisées.

Tableau 4 : Protocole de dilutions croissantes du sol avec sol stérilisé et substrat

Dilution	Facteur de dilution	Quantité de sol pur (g)	Quantité de sol stérilisé (g)	Quantité de substrat ajoutée dans chaque pot (g)	Quantité de substrat pour dilution suivante (g)	Nombre de répliques
D0	1	300	0	100	0	3
D1	1/2	300	300	100	300	3
D2	1/4	0	300	100	300	3
D3	1/8	0	300	100	300	3
D4	1/16	0	300	100	300	3
D5	1/32	0	300	100	300	3
D6	1/64	0	300	100	300	3
D7	1/128	0	300	100	300	3
D8	1/256	0	300	100	300	3
Stérile	/	0	300	100	0	3

Germination des grain de maïs et préparations des pots

Parallèlement aux dilutions, une centaine de graines de maïs non traitées ont été mises à germer sur un gel nutritif pendant trois jours dans l'obscurité, à une température de 20 à 25 °C et 90 pots de 100 g ont été préparés, chacun muni d'un morceau de maille en nylon de 41 microns, afin d'empêcher le contact direct des racines entre les différents pots.

C'est le 25 mars que les graines germées ont été transférées dans les pots à l'aide de pinces, en commençant par le pot contenant la dilution la plus forte jusqu'à celui avec la dilution la plus faible, afin d'éviter toute contamination croisée.

Les plants de maïs ont été cultivés pendant huit semaines dans les serres de l'université, dans des conditions standards. L'humidité a été maintenue tous les 3 à 4 jours avec de l'eau déminéralisée versée dans les bacs contenant tous les pots, sans excès. Une vague de chaleur survenue en fin de culture a affaibli certaines plantes, mais la majorité présentait tout de même un système racinaire bien développé.

Nettoyage des racines et colorations

À la fin des huit semaines de culture soit le 20 mai, les racines ont été nettoyées à l'eau puis placées dans des tubes Falcon contenant un mélange éthanol/eau à 50 % afin de les conserver.

Le lendemain, le protocole de coloration a été appliqué. Il a débuté par un traitement au KOH à 10 % (100 g/L), placé à l'étuve à 70 °C pendant une heure. Les échantillons ont ensuite été brièvement plongés dans une solution d'HCl à 1 % (27 ml d'HCl à 37 % dilués dans 1 L d'eau déminéralisée) afin de neutraliser le KOH. La coloration a été réalisée avec une solution d'encre bleue Parker à 2 % (20 ml dans 1 L de HCl à 1 %), maintenue à 70 °C pendant 30 minutes. Enfin, les racines colorées ont été observées au microscope pendant les trois semaines suivantes afin d'identifier les structures caractéristiques des mycorhizes (hyphes, arbuscules, vésicules).



Figure 13 : Dispositif quelques jours après le transfert des maïs germés dans les pots de culture

3. Méthode d'analyses statistiques

L'ensemble des analyses statistiques des données expérimentales ont été réalisées en s'appuyant sur les méthodes abordées dans les cours « Modélisation et exploration des données multivariées » LBIRA2110 (Draye, Symul, & Rongione, 2025) et « Compléments de biométrie et plans expérimentaux » LBRAI2222 (Draye, Symul, & Biot, 2025). Les traitements statistiques ont été effectués à l'aide des logiciels Excel et RStudio (version 2025.05.1+513).

3.1. Moyennes, écarts-types et erreur standard

Les statistiques descriptives de base, telles que les moyennes, les écarts-types et les erreurs standards, ont été calculées pour résumer les données et évaluer leur dispersion.

Objectifs

- La moyenne fournit une mesure centrale des données.
- L'écart-type décrit la variabilité des valeurs observées.
- L'erreur standard estime la précision de la moyenne.

Méthodologie

Ces indicateurs ont servi à décrire et comparer les distributions de l'ensemble des variables mesurées : biomasse sèche, indice foliaire, longueur racinaire totale, teneur en carbone organique, rapport C/N et abondance de propagules mycorhiziennes, tant dans les représentations graphiques que dans les tableaux descriptifs des résultats.

3.2. Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode statistique multivariée qui transforme un ensemble de variables corrélées en un nombre réduit de nouvelles variables non corrélées, appelées composantes principales. Elle permet de synthétiser l'information en conservant l'essentiel de la variance des données.

Objectifs

- Explorer et visualiser les données dans un espace de dimension réduite.
- Résumer l'information issue de plusieurs variables quantitatives.
- Identifier les relations entre variables et individus.

Méthodologie

Les données sont prétraitées (centrage et standardisation) pour rendre les variables comparables. L'ACP est ensuite réalisée à partir de la matrice de covariance ou de corrélation, permettant d'identifier les axes principaux et de calculer la variance expliquée par chaque composante. Enfin, des représentations graphiques facilitent l'interprétation et le choix du nombre de composantes à retenir.

Dans cette étude, l'ACP a été utilisée pour analyser la structure multivariée des données de biomasse sèche et d'indice foliaire, préalablement transformées par logarithme afin de stabiliser la variance et de réduire l'influence des valeurs extrêmes. Les analyses ont été menées pour chacune des deux dates d'échantillonnage (26 novembre 2024 et 3 février 2025), ainsi que sur les données combinées des deux dates. Elles ont permis de mettre en évidence les associations et contrastes entre espèces et d'évaluer visuellement les différences, ou recouvrements, entre traitements de gestion du sol.

3.3. Analyse de la variance

L'analyse de la variance (ANOVA) est une méthode statistique permettant de tester si les moyennes de plusieurs groupes diffèrent significativement. Elle compare la variabilité entre groupes à celle observée au sein des groupes.

Objectifs

- Évaluer l'effet d'un ou plusieurs facteurs sur une variable quantitative.
- Identifier si des différences observées entre groupes sont statistiquement significatives.

Méthodologie

Les hypothèses d'indépendance des observations, de normalité des résidus et d'homogénéité des variances ont été vérifiées à l'aide d'outils graphiques (QQ-plots, graphiques de résidus). Afin de respecter au mieux ces conditions, l'ensemble des données utilisées pour les analyses de variance a été transformé par logarithme avant l'application des tests.

Des ANOVA à deux facteurs (traitement + bloc, sans interaction) ont été réalisées pour la biomasse sèche, le LAI et la longueur racinaire totale. Lorsque l'ANOVA révélait un effet significatif, un test post-hoc de Tukey était appliqué afin d'identifier précisément les modalités ou blocs présentant des différences statistiquement significatives. Ces analyses ont permis d'évaluer l'influence des modalités de gestion du sol et de la structure en blocs sur les différentes variables mesurées.

3.4. Régression linéaire simple

La régression linéaire simple permet de modéliser la relation entre une variable dépendante Y et une variable indépendante X à l'aide d'une équation de droite. Cette méthode estime l'effet de X sur Y et évalue la force de la relation.

Objectifs

- Quantifier l'effet d'une variable explicative sur une variable réponse.
- Évaluer la qualité de l'ajustement du modèle.

Méthodologie

Les paramètres de la droite de régression sont estimés par la méthode des moindres carrés. La significativité de la pente est testée afin de déterminer si la relation entre X et Y est statistiquement significative. La qualité d'ajustement est mesurée par le coefficient de détermination R^2 qui indique la proportion de la variance de Y expliquée par X.

Dans cette étude, la régression linéaire simple a été utilisée pour analyser la relation entre LAI et la biomasse sèche aux deux dates d'échantillonnage. Cette approche a permis de quantifier la part de variation de la biomasse expliquée par le LAI.

3.5. Corrélation entre variables

La corrélation permet de mesurer la force et la direction de la relation linéaire entre deux variables quantitatives X et Y, à l'aide du coefficient de corrélation de Pearson r .

Objectifs

- Évaluer le degré d'association entre deux variables quantitatives.
- Identifier la direction de la relation (positive ou négative).

Méthodologie

Le coefficient r varie entre -1 (corrélation négative parfaite) et +1 (corrélation positive parfaite), une valeur proche de 0 indiquant l'absence de relation linéaire.

Dans cette étude, la corrélation de Pearson a été utilisée pour analyser la relation entre le LAI et la biomasse sèche, ainsi que pour examiner les corrélations entre les différentes espèces végétales. Cette approche a permis d'évaluer la force et la direction des associations linéaires, et d'identifier les relations positives ou négatives marquées entre variables.

4. Utilisation d'intelligence artificielle

Dans le cadre de la rédaction de ce mémoire, le recours à des outils d'intelligence artificielle générative tels que ChatGPT s'est limité à des opérations de reformulation, d'aide à la résolution de problèmes en langage R et de correction orthographique, dans le but d'améliorer la clarté du texte pour le lecteur. Cette démarche s'inscrit dans le respect des directives émises par le vice-recteur aux affaires étudiantes de l'UCLouvain concernant l'utilisation des IA génératives (Vice-recteur aux affaires étudiantes, 2023).

IV. Résultats

1. Caractérisation du couvert végétal

1.1. Biomasse aérienne

1.1.1. 26 novembre 2024

La première visualisation des données (Figure 14) qui illustre les distributions de biomasse sèche pour chaque espèce selon les modalités de gestion du sol à la date du 26 novembre 2024, ont mis en évidence une forte hétérogénéité entre espèces. La phacélie (*Phacelia Tanacetifolia*) apparaît comme très largement implantée dans l'ensemble des modalités, avec une variabilité de biomasse marquée, observée non seulement entre les traitements mais aussi au sein de chacun d'eux. La roquette (*Eruca sativa*) et l'avoine rude (*Avena strigosa*) sont présentes de manière plus marginale, avec des biomasses globalement plus faibles et une variabilité plus modérée. Les trèfles, quant à eux, présentent des valeurs très faibles, voire nulles, avec une présence limitée pour le trèfle d'Alexandrie (*Trifolium alexandrinum*), tandis que les deux autres espèces ne sont pas détectées, traduisant une absence totale à cette date. À première vue, c'est dans le traitement non-labour ancien que l'on observe les médianes les plus élevées pour les trois espèces les plus représentées, bien que les différences entre traitements restent globalement faibles.

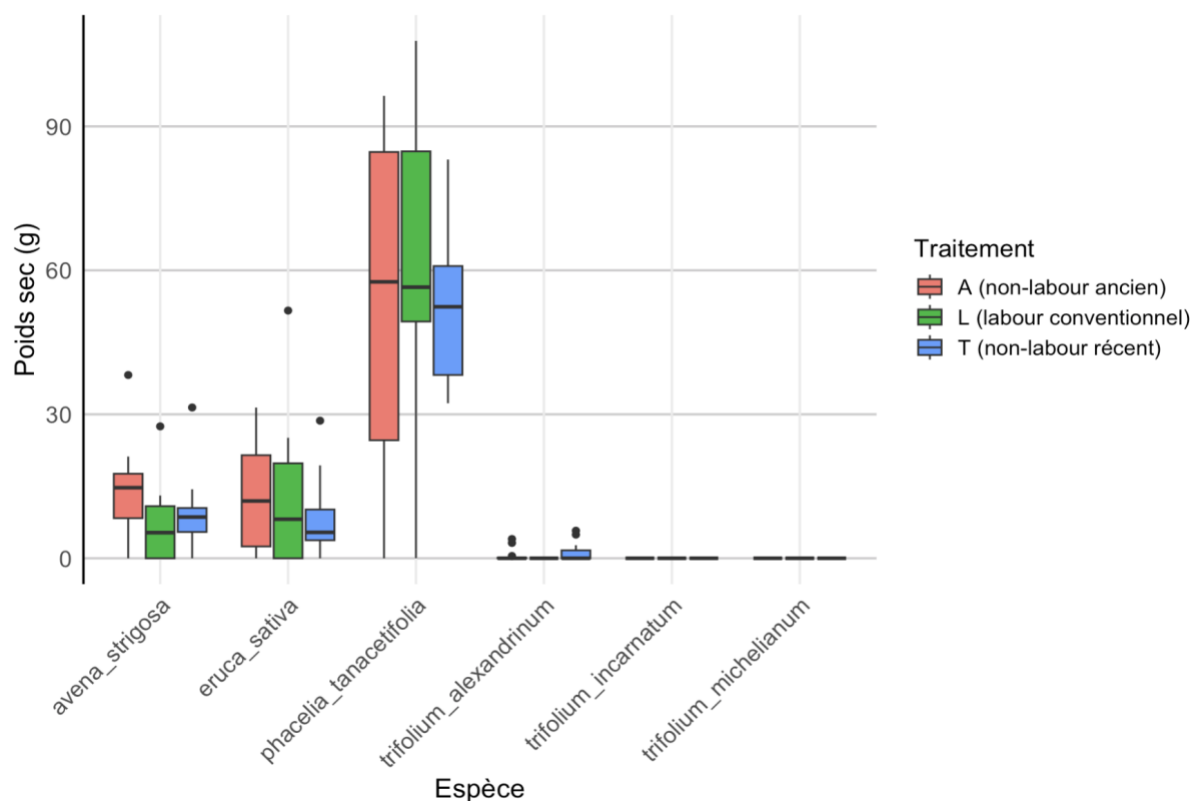


Figure 14 : Distribution du poids sec (g) des différentes espèces végétales selon le traitement, 26 novembre 2024

Ces observations ont motivé la mise en place d'une approche par régression logistique afin de modéliser, pour chaque espèce, la probabilité d'occurrence en fonction du traitement, du bloc et du prélèvement. L'objectif était de déterminer dans quelle mesure la présence ou l'absence d'une espèce pouvait être

expliquée par ces facteurs expérimentaux. Toutefois, cette approche n'a pas fourni de résultats interprétables. Plusieurs limites méthodologiques sont apparues, en particulier un déséquilibre marqué dans la distribution des observations, certaines espèces étaient presque toujours présentes (phacélie) ou, au contraire, absentes (trèfles), ce qui a généré des situations de séparation quasi parfaites. Ce phénomène a conduit à des estimations de coefficients extrêmes ou instables et à des intervalles de confiance très larges, voire non définis, compromettant ainsi l'interprétation des modèles.

Face à ces limites, il a été décidé de ne pas retenir les régressions logistiques pour la suite de l'analyse. À la place, une comparaison directe des pourcentages de présence des espèces dans chaque traitement a été réalisée (Tableau 5). Cette approche descriptive permet de mieux visualiser les différences entre modalités et d'identifier les espèces marginales ou absentes. C'est le cas notamment du trèfle incarnat (*Trifolium incarnatum*) et du trèfle de Micheli (*Trifolium michelianum*), qui ne seront donc pas pris en compte dans les analyses ultérieures en raison de leur absence systématique. Le trèfle d'Alexandrie bien que faiblement présent dans tous les traitements, conserve néanmoins un intérêt potentiel dans le mélange, justifiant une attention particulière lors de l'interprétation des résultats.

Tableau 5 : Présence relative des espèces selon le type de travail du sol, 26 novembre 2024

Espèces	A (non-labour ancien)	L (labour conventionnel)	T (non-labour récent)
avena_strigosa	14.2%	11.9%	14%
eruca_sativa	27.3%	27.3%	24.4%
phacelia_tanacetifolia	57.7%	60.8%	60.5%
trifolium_alexandrinum	0.8%	0.1%	1.2%
trifolium_incarnatum	0%	0%	0%
trifolium_michelianum	0%	0%	0%

C'est dans ce cadre qu'il a été décidé de réaliser des analyses en composantes principales (ACP), afin d'explorer de manière synthétique la structure des données et de compléter les analyses descriptives précédentes. L'ACP du 26 novembre 2024 (Figure 15), dont les deux premiers axes expliquent ensemble 61,9 % de la variance totale (variabilité observée entre les prélèvements), permet tout d'abord d'observer la dispersion des prélèvements individuels sur le plan factoriel. Ces observations mettent en évidence une forte hétérogénéité entre les échantillons. Les individus issus du non-labour ancien (cercles bleus) apparaissent plutôt dispersés dans l'ensemble du plan, ce qui traduit une diversité marquée de composition au sein de cette modalité. À l'inverse, les prélèvements associés au travail du sol conventionnel (triangles jaunes) semblent davantage regroupés dans la moitié gauche du graphique, tandis que ceux du non-labour récent (carrés gris) tendent à se concentrer dans la moitié droite. Cette répartition suggère que les échantillons positionnés d'un même côté du plan factoriel présentent un assemblage d'espèces de couvert plus proche des espèces dont les vecteurs sont orientés vers ce côté, traduisant une potentielle association plus marquée avec ces dernières.

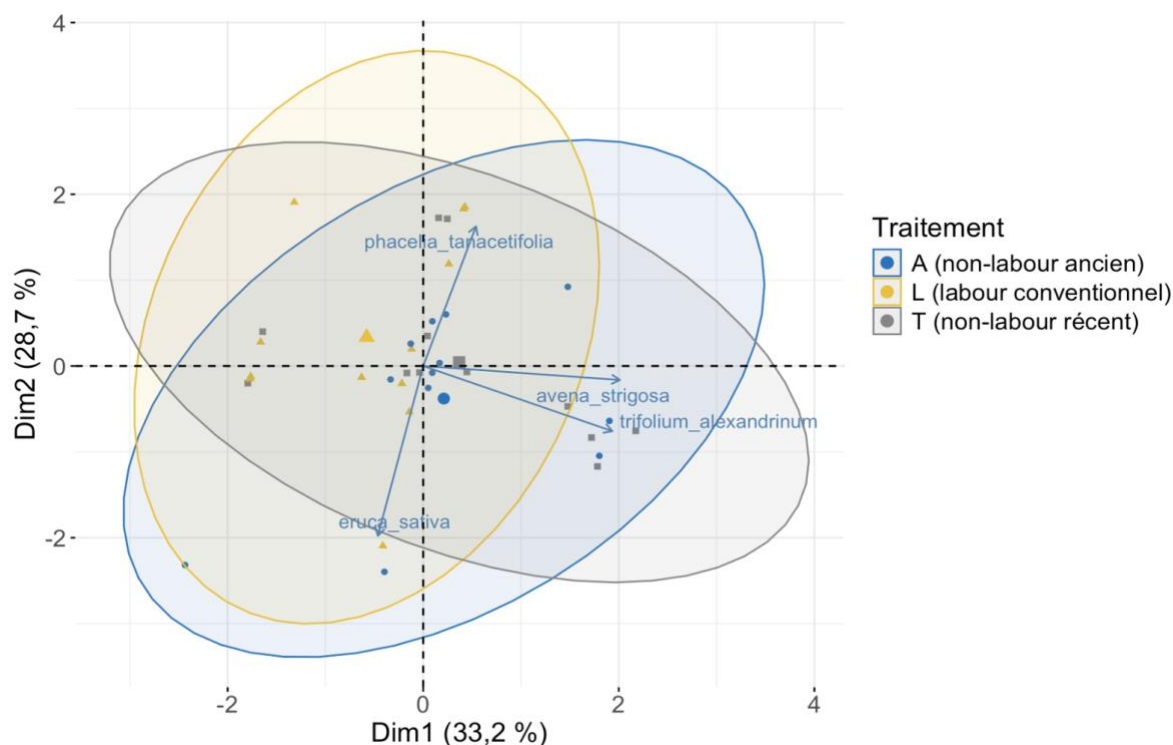


Figure 15 : ACP des données de biomasse aérienne par espèces, selon les modalités de travail du sol, 26 novembre 2024)

Ainsi, dans ce type de graphique, la direction d'un vecteur montre vers quelles observations une espèce est associée, et sa longueur indique l'importance de sa contribution aux axes. Plus la flèche est longue et orientée vers un groupe d'échantillons, plus l'espèce est présente ou abondante dans ces relevés. Ici, la phacélie se distingue par un vecteur orienté vers le haut à droite, signe d'une forte contribution à la première dimension (Dim 1). À l'inverse, la roquette présente un vecteur de taille similaire mais dirigé vers le bas à gauche, indiquant une influence tout aussi marquée mais opposée sur Dim 1, traduisant des dynamiques de présence contrastées entre ces deux espèces. De leur côté, l'avoine rude et le trèfle d'Alexandrie pointent dans une direction proche, vers la droite du graphique, avec une contribution plus forte sur la deuxième dimension (Dim 2). Leur proximité suggère qu'elles répondent de manière similaire aux conditions expérimentales ou qu'elles apparaissent souvent ensemble dans les relevés. Dans l'ensemble, cette projection illustre le rôle différencié des espèces dans la structuration du nuage d'observations.

Les graphiques de contribution des variables aux axes principaux (Annexe 4) confirment cette interprétation. Sur le premier axe, l'avoine (48,8 %) et le trèfle d'Alexandrie (45,1%) sont les espèces qui contribuent le plus. Les différences observées entre prélèvements le long de cet axe sont donc surtout liées à leurs variations de biomasse. Le trèfle, malgré des biomasses globalement modestes, joue un rôle structurant par sa répartition très contrastée entre modalités, ce qui augmente sans doute son poids dans l'ACP. Sur le deuxième axe, la roquette (54,6 %) et la phacélie (36,9 %) dominent les contributions. La séparation des prélèvements selon cette dimension reflète donc principalement les variations de ces deux espèces.

Au final, l'ACP montre que la différenciation entre échantillons à cette date repose surtout sur la répartition contrastée de ces quatre espèces, même si cette hiérarchie doit être interprétée avec prudence compte tenu du faible nombre de variables.

Enfin, l'examen des ellipses de concentration tracées autour de chaque modalité, qui délimitent les zones de dispersion moyenne des prélèvements, montre un important chevauchement entre groupes. Ce recouvrement suggère l'absence de différenciation nette entre traitements à cette date, ce qui indique que les modalités de gestion du sol n'engendrent pas, pour l'instant, de structure de couvert nettement distincte.

Afin de compléter les observations issues de l'ACP, des analyses de variance (ANOVA) ont ainsi été menées sur la biomasse de chaque espèce en fonction du traitement appliqué, en intégrant également l'effet du bloc afin de prendre en compte d'éventuelles variations spatiales liées à la structure expérimentale. Ces analyses ont porté sur les quatre espèces incluses dans l'ACP (avoine, phacélie, trèfle d'Alexandrie et roquette), qui ressortent comme structurant la position des prélèvements sur les deux premières composantes principales.

Les résultats obtenus montrent qu'à la date du 26 novembre, aucun effet significatif des traitements ou des blocs n'a été détecté pour les quatre espèces analysées. Les modèles linéaires testés présentent des coefficients de détermination faibles à modérés, et aucun facteur, qu'il s'agisse du traitement ou du bloc, ne ressort comme statistiquement significatif. L'ajout d'une interaction entre traitement et bloc n'a pas davantage amélioré la qualité des ajustements.

Cette absence d'effet significatif, malgré le rôle structurant de ces espèces mis en évidence par l'ACP, suggère que la variabilité décrite par cette analyse, correspondant aux différences de composition en espèces entre échantillons, provient en grande partie de facteurs non contrôlés dans le dispositif expérimental.

1.1.2. 3 février 2025

À la seconde date (Figure 16), la biomasse présente toujours des différences marquées entre espèces. La roquette et la phacélie affichent désormais les valeurs médianes les plus élevées, toutes modalités confondues, avec une variabilité accrue. Toutefois, la phacélie a nettement perdu la position dominante qu'elle occupait auparavant. L'avoine présente des biomasses plus modestes et moins variables, tandis que le trèfle d'Alexandrie reste très faiblement représenté, avec des valeurs proches de zéro quelle que soit la modalité.

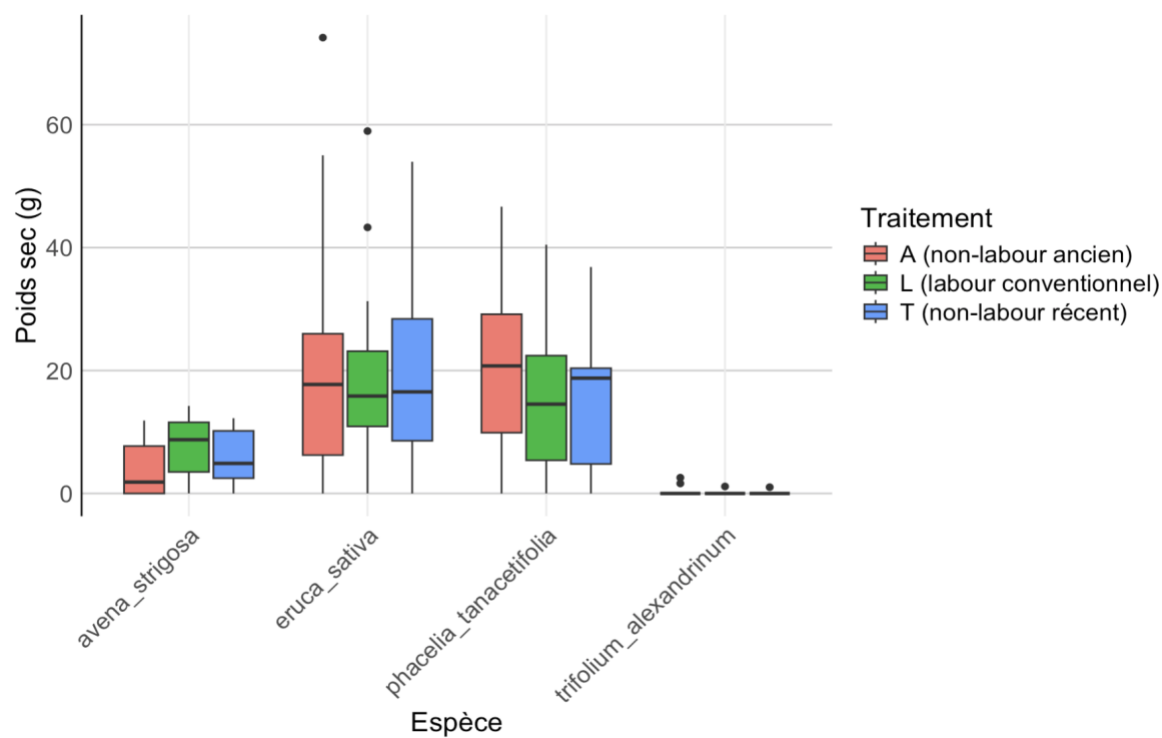


Figure 16 : Distribution du poids sec (g) des différentes espèces végétales selon le traitement, 3 février 2025

Afin d'observer l'évolution dans le temps du comportement des espèces au sein des prélèvements, une seconde ACP a été réalisée pour la date du 3 février 2025 (Figure 17). Les deux premiers axes factoriels expliquent ensemble 58,8 % de la variance totale, offrant une représentation synthétique et pertinente de la structure multivariée des données.

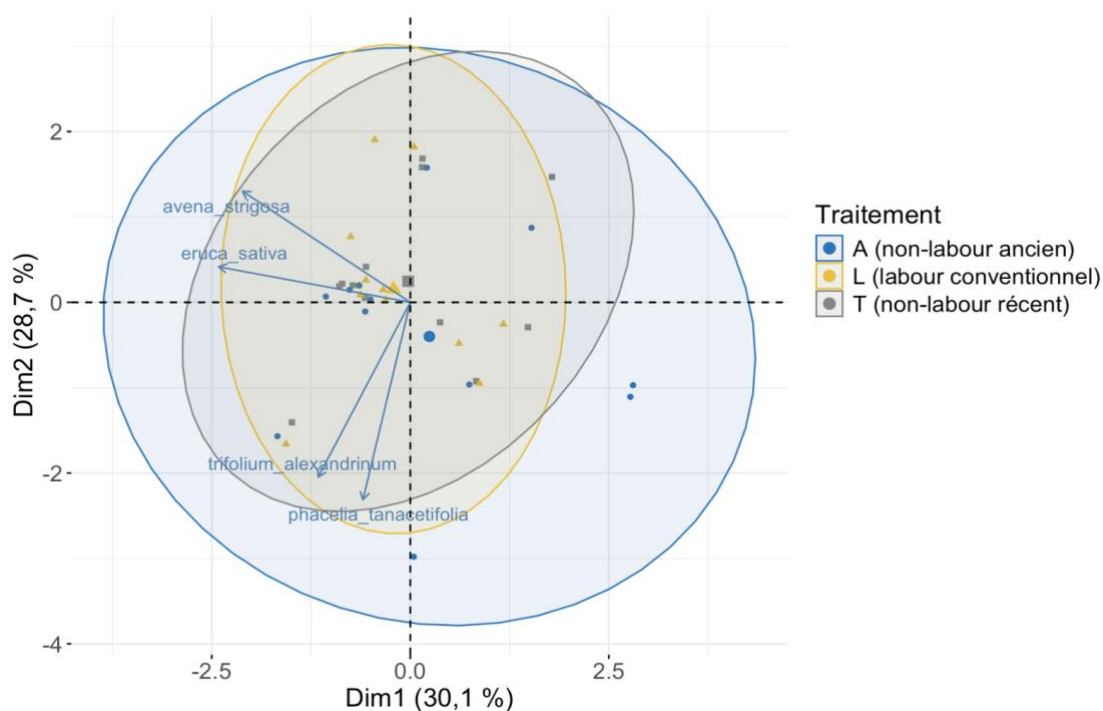


Figure 17 : ACP des données de biomasse aérienne par espèces, selon les modalités de travail du sol, 3 février 2025

La répartition des prélèvements individuels sur le plan factoriel reste caractérisée par une forte hétérogénéité globale, mais certaines tendances spatiales se dégagent. De manière générale, et indépendamment du traitement appliqué, une part importante des prélèvements se regroupe dans le quadrant supérieur gauche du graphique. Cette position suggère une association plus marquée avec la roquette et l'avoine, dont les vecteurs sont orientés vers cette zone. Ce comportement pourrait s'expliquer par la forte diminution de la phacélie, qui s'accompagne d'une augmentation relative de la proportion de roquette et, dans une moindre mesure, d'avoine dans le couvert. Bien que l'avoine, sensible au gel, voit sa biomasse sensiblement réduite, elle reste proportionnellement moins affectée que la phacélie par les conditions hivernales. Ces deux espèces semblent, par conséquent, évoluer de manière concordante dans la structuration du couvert à cette date.

L'analyse des vecteurs montre que si la roquette et l'avoine se projettent tous deux vers le quadrant supérieur gauche à l'inverse, la phacélie se positionne désormais dans le quadrant inférieur droit, indiquant une dynamique opposée. Le trèfle d'Alexandrie, auparavant plus proche de l'avoine, se rapproche maintenant de la phacélie, traduisant un changement d'association entre ces espèces au fil du temps. L'analyse des contributions (Annexe 5) indique que la première dimension est surtout structurée par la roquette (48,6 %) et l'avoine (37,3 %), tandis que la deuxième dimension reflète principalement la variation de la phacélie (46,9 %) et du trèfle d'Alexandrie (36,7 %). Ainsi, la différenciation observée entre échantillons à cette date reste largement portée par ces quatre espèces, bien que cette hiérarchie doive être, à nouveau, interprétée avec prudence compte tenu du faible nombre de variables incluses dans l'ACP.

En ce qui concerne les ellipses de concentration tracées autour de chaque modalité de gestion du sol, elles montrent à nouveau un recouvrement important entre groupes, ce qui suggère l'absence de séparation nette entre traitements.

Un point important à souligner est que l'ACP réalisée sur les données cumulées des deux dates (Annexe 6) montre une structure largement influencée par celle observée en novembre. Les vecteurs des espèces conservent des orientations similaires, avec notamment le retour d'une proximité marquée entre le trèfle et l'avoine, déjà observée à l'automne. Cela suggère que la structuration du couvert s'établit tôt dans le cycle, sous l'influence des différences initiales de biomasse, et tend à se maintenir dans le temps malgré des dynamiques saisonnières secondaires.

Dans la même logique que pour la première date, et dans la continuité des analyses précédentes, des modèles linéaires ont été construits pour chacune des espèces afin d'évaluer l'effet des traitements et des blocs sur leur biomasse au 3 février 2025. Comme précédemment, les modèles incluent les effets fixes du traitement et du bloc, sans interaction entre les deux, cette dernière n'ayant dans aucun cas permis d'améliorer l'explication de la variance. Les résultats confirment l'absence d'effet significatif du traitement ou du bloc sur la biomasse de la roquette, de l'avoine rude, du trèfle d'Alexandrie et de la phacélie à la date du 3 février 2025. Pour chacune de ces espèces, les facteurs testés ne ressortent pas comme significatifs et les coefficients de détermination des modèles demeurent faibles. Ainsi, malgré leur contribution marquée à la structuration multivariée du jeu de données, aucune des espèces principales ne présente de réponse significative aux modalités expérimentales à cette date. Cette absence d'effet mesurable reflète probablement une variabilité résiduelle élevée, liée à des facteurs non contrôlés dans le dispositif expérimental. Elle ne met pas non plus en évidence de différence de comportement hivernale entre modalités de gestion du sol, ceux-ci n'ayant manifestement pas induit de conditions suffisamment contrastées pour influencer la survie ou la persistance des espèces.

1.1.3. Comparaison entre les deux dates

Comme évoqué dans les sections précédentes, certaines tendances saisonnières ont déjà pu être observées à travers les ACP. Toutefois, pour les mettre plus clairement en évidence, cette section s'appuie sur des visuels de comparaison directe entre les deux dates. Elle examine ainsi l'évolution des principales espèces entre novembre 2024 et février 2025, afin de mieux caractériser leurs dynamiques hivernales.

La distribution des poids secs des différentes espèces végétales aux deux dates d'échantillonnage (Figure 18) illustre des trajectoires de croissance différenciées, en cohérence avec les tendances déjà suggérées par l'ACP. La phacélie, très dominante en novembre, voit sa biomasse chuter nettement en février, tandis que la roquette poursuit sa croissance. L'avoine présente une baisse plus modérée, alors que le trèfle d'Alexandrie reste peu développé sur les deux périodes. Ces évolutions traduisent des réponses spécifiques à l'hiver, avec des comportements différenciés selon les espèces.

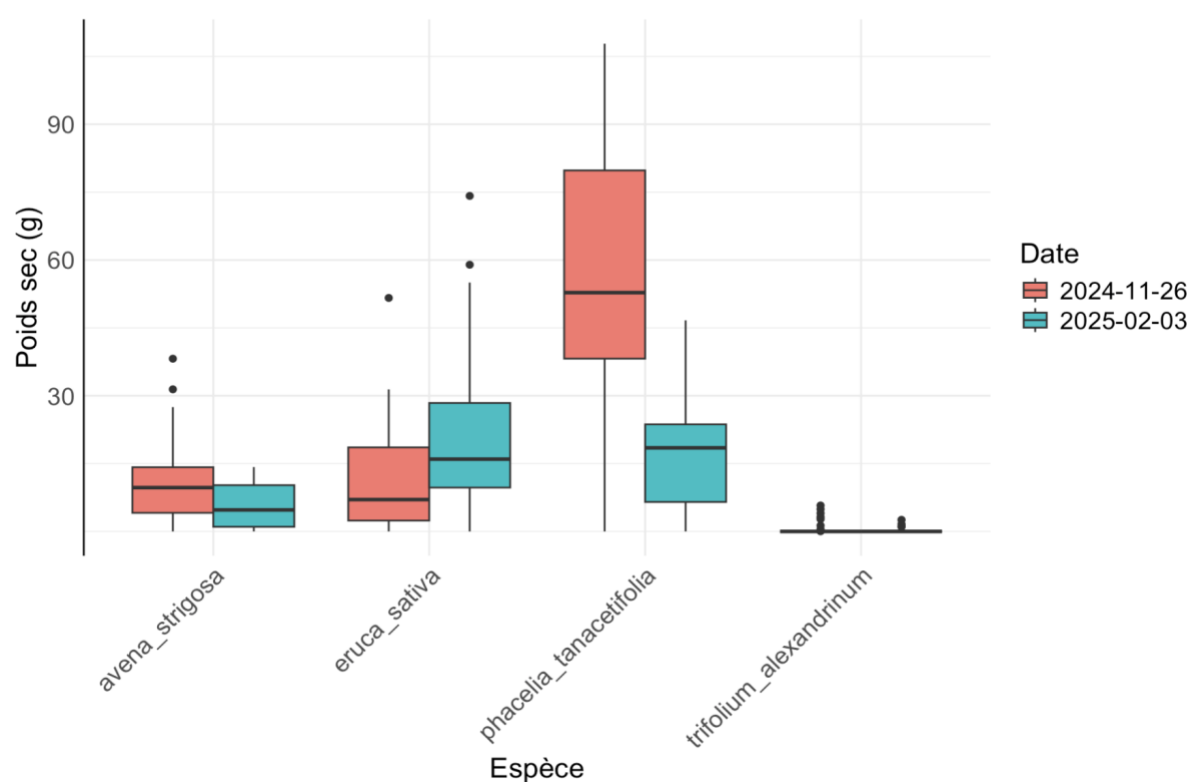


Figure 18 : Distribution du poids sec (g) des différentes espèces végétales aux deux dates d'échantillonnage, 26 novembre 2024 et 3 février 2025

Cette dynamique se retrouve également sur la Figure 19, qui illustre l'évolution de la composition spécifique en biomasse sèche des différentes espèces selon les traitements, entre novembre 2024 et février 2025.

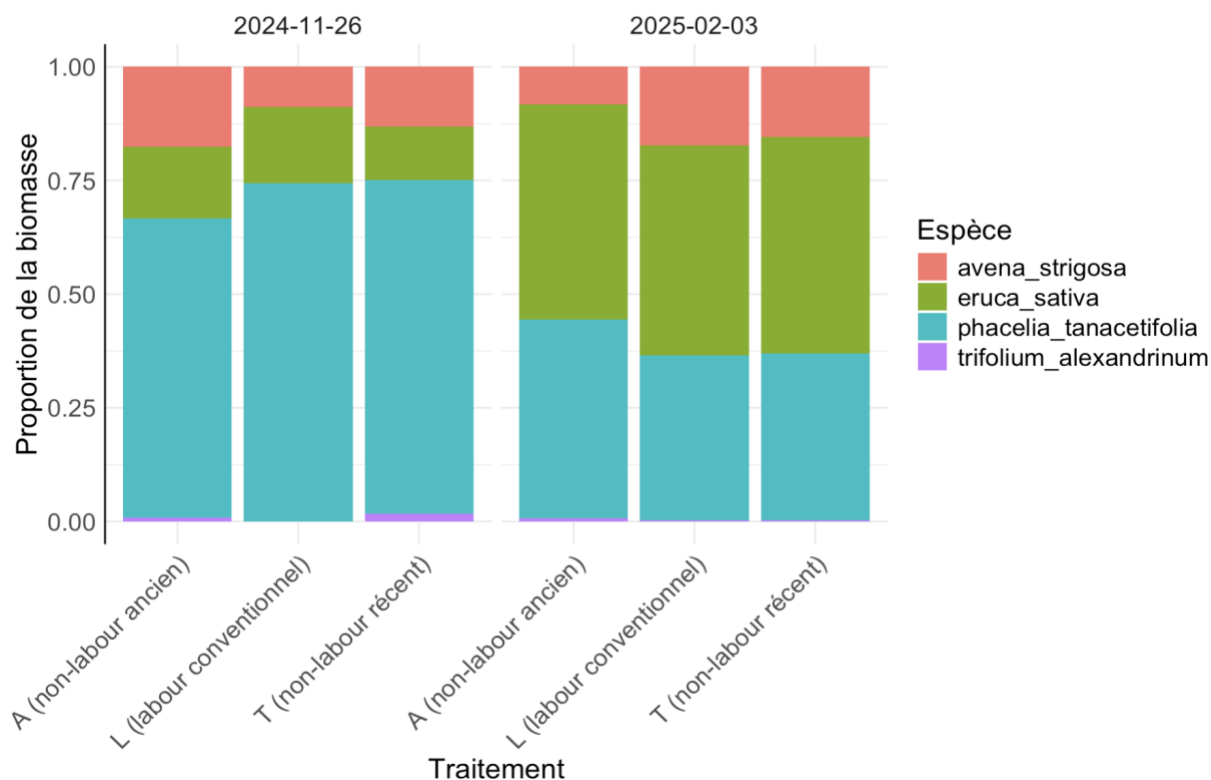


Figure 19 : Composition relative en espèces du couvert selon les modalités de travail du sol aux deux dates d'échantillonnage, 26 novembre 2024 et 3 février 2025

À la première date, la phacélie représente la majeure partie du couvert, toutes modalités confondues. En revanche, sa part relative recule nettement en février, laissant place à une domination progressive de la roquette, dont la contribution devient prédominante.

1.1.4. Approche globale

Étant donné l'absence d'effet des modalités de gestion du sol observée dans les analyses conduites par espèce, une approche plus intégrée a été adoptée afin d'évaluer l'impact potentiel des traitements à une échelle agronomique plus globale. Plutôt que d'étudier séparément les réponses de chaque espèce composant le couvert, l'ensemble des données a été agrégé pour calculer la biomasse sèche totale produite pour chaque combinaison bloc/traitement. Cette méthode permet de considérer la productivité globale du couvert végétal, indépendamment de sa composition spécifique et d'en analyser les variations en fonction des modalités de travail du sol.

Pour chaque date de prélèvement, les biomasses ont été additionnées à l'échelle du bloc pour chaque traitement. Des modèles linéaires ont ensuite été ajustés afin de tester l'effet du traitement sur la biomasse totale, tout en tenant compte de la variabilité liée à la structure en blocs. L'analyse de la variance réalisée pour chacune des deux dates indique qu'aucun des facteurs testés, ni le traitement ni le bloc, ne présente d'effet significatif sur la production de biomasse.

Dans l'ensemble, ces résultats montrent que les modalités de gestion du sol testées n'ont pas généré de différences significatives de productivité en biomasse du couvert. Aucune ne se distingue comme particulièrement avantageuse ou défavorable en termes de biomasse totale produite.

1.2. Indice de surface foliaire

La distribution du LAI des différentes espèces végétales aux deux dates d'échantillonnage (Figure 20) montre une baisse générale entre le 26 novembre 2024 et le 3 février 2025. Cette diminution est particulièrement marquée pour la phacélie, dont le LAI, initialement élevé, chute fortement après l'hiver. L'avoine présente un comportement similaire mais dans une moindre mesure, l'espèce étant déjà moins abondante initialement. Enfin la roquette présente un recul léger bien moins prononcé.

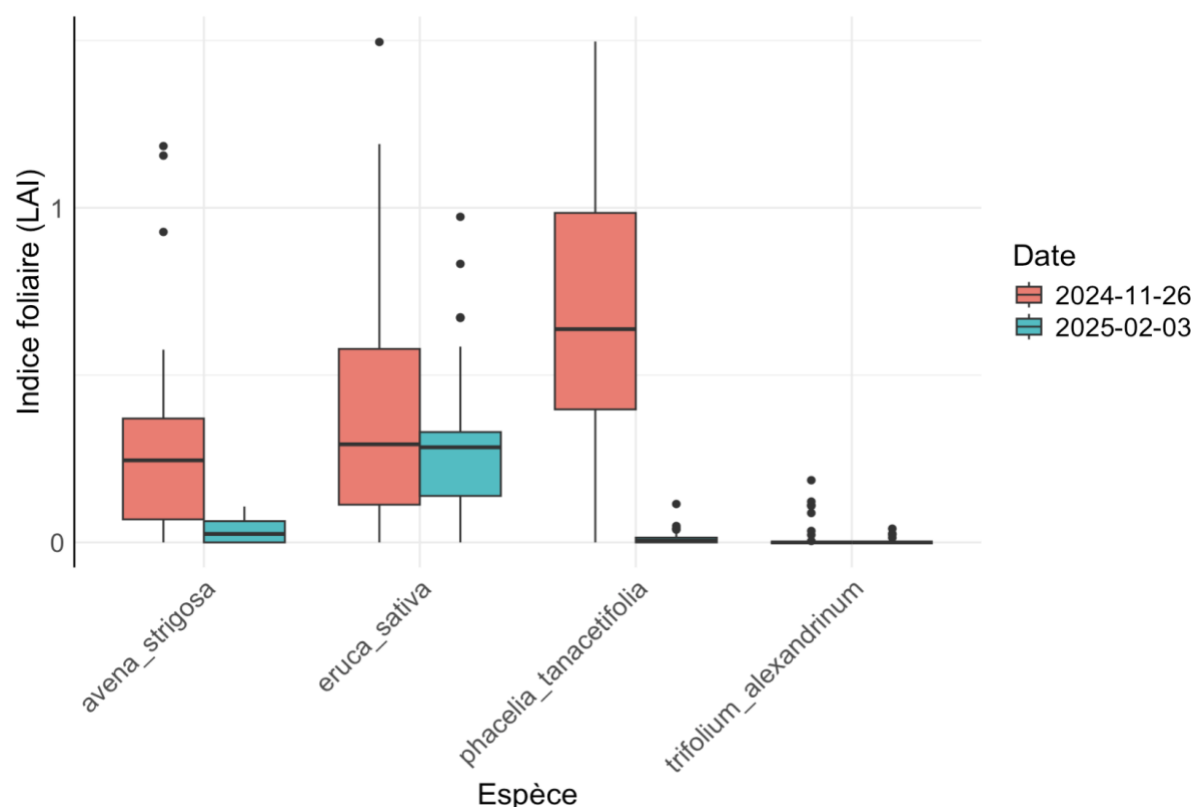


Figure 20 : Distribution de l'indice de surface foliaire des différentes espèces végétales aux deux dates d'échantillonnage, 26 novembre 2024 et 3 février 2025

La forte baisse du LAI chez la phacélie s'explique par son état de dégradation avancé en fin d'hiver, bien qu'elle conserve encore une certaine biomasse, la majorité de ses feuilles étant déjà décomposées ou tombées au sol, elles n'ont donc pas été comptabilisées. Conformément au protocole, seules les surfaces foliaires en bon état et fonctionnelles ont été prises en compte, afin de refléter la capacité réelle d'interception lumineuse à cette date. Une tendance similaire, mais plus modérée, est observée chez l'avoine, dont la sensibilité au gel réduit également la surface foliaire active. Ainsi, le LAI se révèle plus sensible que la biomasse sèche pour détecter les phénomènes de sénescence ou de perte de vigueur. La biomasse inclut les tissus morts ou en décomposition, tandis que le LAI met spécifiquement en évidence la diminution des feuilles encore actives.

1.2.1. 26 novembre 2024

Dans la continuité de l'approche retenue pour la biomasse, l'ACP réalisée à partir des données de LAI au 26 novembre (Annexe 7) révèle des tendances proches de celles obtenues avec la biomasse sèche. Cette concordance s'explique par la forte corrélation entre ces deux variables (Figure 21).

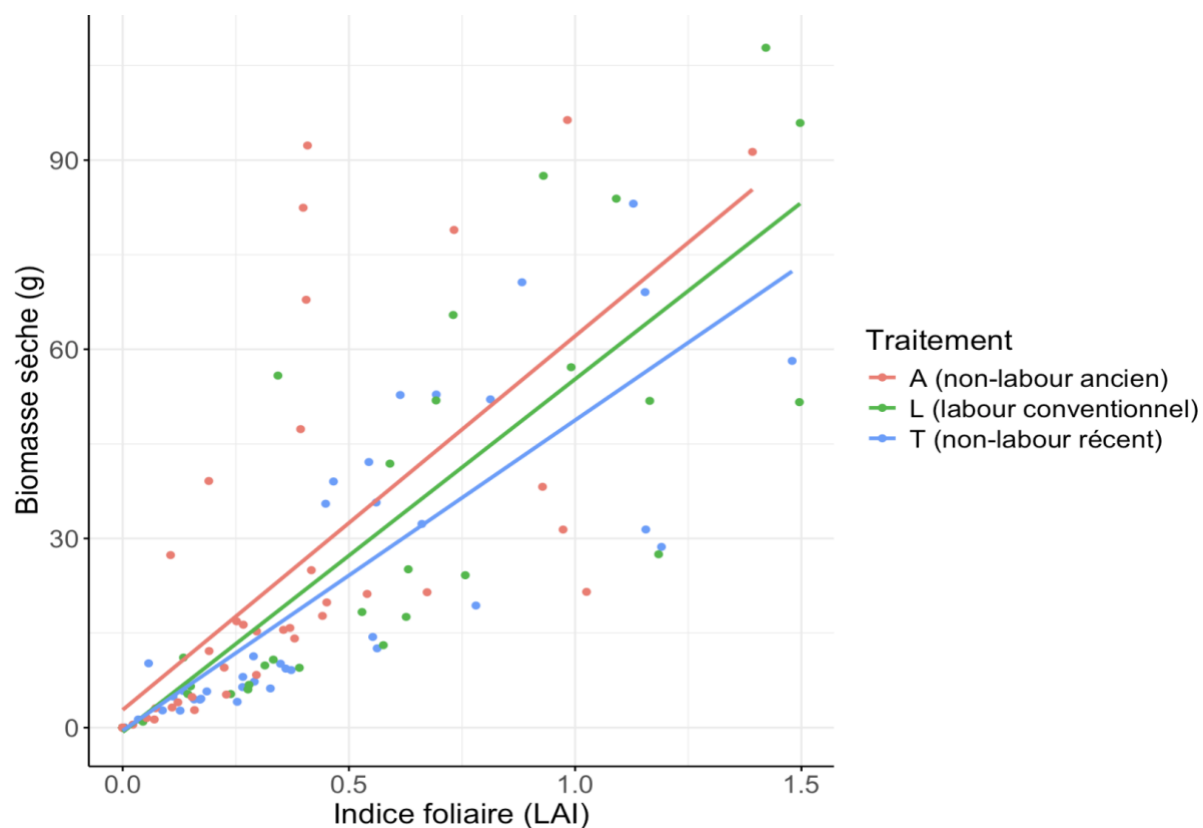


Figure 21 : Relation entre l'indice de surface foliaire et la biomasse sèche (g) pour les différents traitements, 26 novembre 2024

En effet, le modèle linéaire, ajusté sur l'ensemble des données individuelles de LAI et de biomasse sèche, toutes modalités confondues, révèle une relation significative à cette date. Une augmentation du LAI est associée à une hausse marquée de la biomasse sèche, avec un coefficient de régression estimé à 10,86. Le coefficient de détermination indique que 65 % de la variabilité de la biomasse est expliquée par celle du LAI.

Compte tenu de cette forte corrélation entre LAI et biomasse, des résultats similaires étaient attendus lors des tests statistiques. Les mêmes analyses, modèles linéaires et ANOVA, ont donc été appliquées aux données de LAI, espèce par espèce, afin d'évaluer l'effet des traitements de gestion du sol et des blocs expérimentaux. Les résultats ont confirmé cette attente : aucun effet significatif du traitement ou du bloc n'a été détecté pour la phacélie, la roquette, l'avoine ou le trèfle d'Alexandrie. Ces résultats recoupent donc ceux obtenus pour la biomasse à la même date, confortant l'idée que les modalités de gestion du sol testées dans cette expérimentation n'ont pas significativement influencé la structure ou la productivité des couverts végétaux, en termes de LAI, en novembre 2024.

1.2.2. 03 février 2025

Bien qu'une forte corrélation ait été observée entre le LAI et la biomasse sèche en novembre, cette relation s'est atténuée le 3 février, avec un coefficient de détermination qui montre que seulement 25 % de la variabilité de la biomasse est expliquée par celle du LAI à cette date. Cette diminution peut s'expliquer par un décalage méthodologique entre les deux indicateurs. En effet, comme déjà évoqué, la biomasse sèche intègre l'ensemble des tissus aériens, y compris les parties partiellement dégradées, tandis que le LAI ne prend en compte que la surface foliaire verte encore présente au moment de la mesure, ce qui a pu conduire à une surestimation de la biomasse par rapport au LAI et affaiblit mécaniquement leur corrélation. Cette dissociation se reflète également dans l'ACP réalisée à partir des données de LAI au

3 février (Figure 22), qui met en évidence une structuration différente de celle observée dans l'ACP de biomasse à la même date.

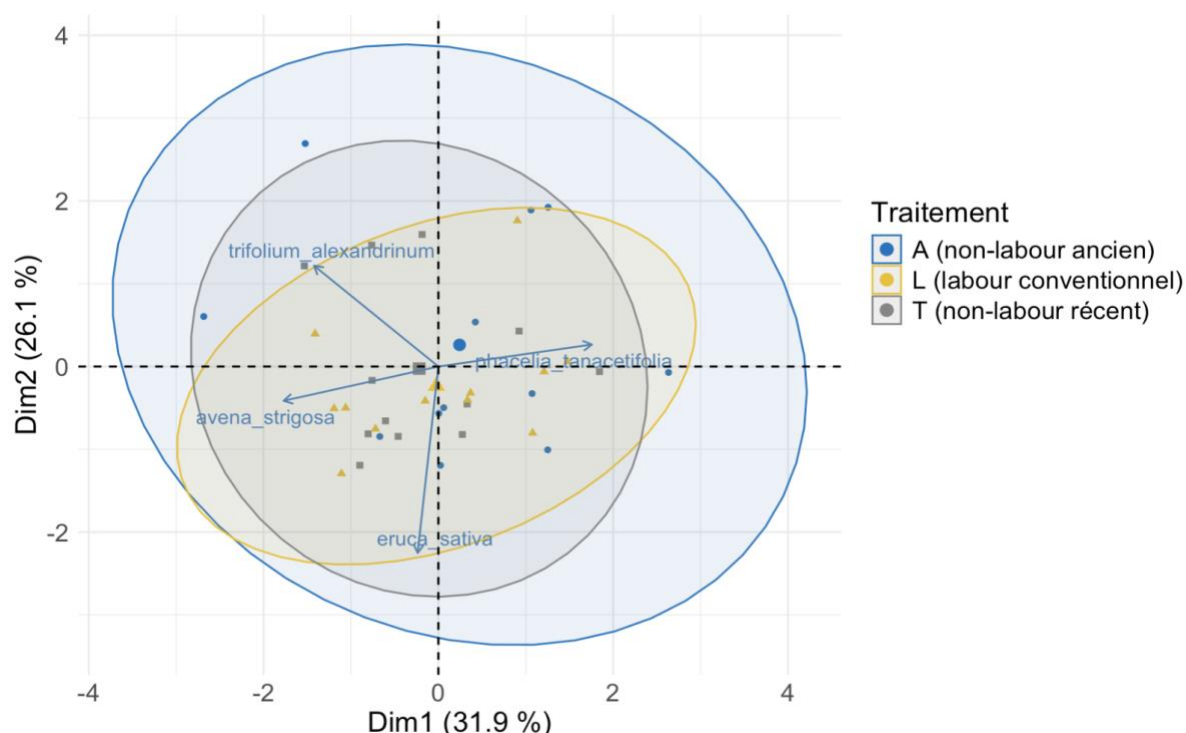


Figure 22 : ACP des données de LAI par espèces, selon les modalités de travail du sol, 03 février 2025

Cette dernière analyse montre un nuage d'échantillons globalement dispersé sur le plan factoriel, avec toutefois une légère concentration dans la partie inférieure, zone vers laquelle se projette la roquette. Contrairement à l'ACP de biomasse de la même date, aucun regroupement marqué d'espèces n'est visible, chacune suit désormais une orientation bien distincte. Cette représentation pourrait refléter plus fidèlement l'état réel du couvert, le LAI captant directement la perte de surface foliaire active du à l'hiver. Dans ce cadre, la distinction entre avoine et roquette devient plus nette, l'avoine, sensible au gel, voit sa surface foliaire se dégrader nettement même si une biomasse résiduelle subsiste, tandis que la roquette conserve une proportion plus importante de feuilles fonctionnelles. De même, la phacélie et le trèfle n'adoptent plus le même comportement, probablement aussi en raison d'un écart plus marqué de LAI. Les deux premiers axes expliquent ensemble 58 % de la variance totale, offrant ainsi une représentation satisfaisante de la structure des données. L'analyse de la contribution des variables (Annexe 8) montre que, si la première dimension reste structurée par les variations conjointes de l'avoine (37,8 %), de la phacélie (37,2 %) et du trèfle d'Alexandrie (24,4 %), la deuxième dimension est désormais quasi exclusivement portée par la roquette (74,6 %). Cette configuration indique que la présence ou l'absence de cette espèce constitue le principal facteur de discrimination entre échantillons, traduisant son rôle dominant dans la composition du couvert à cette date et sa bonne résistance aux conditions hivernales.

Compte tenu de ces comportements différenciés, le recours à une analyse de variance par espèce apparaît, une fois encore, justifié. Dans ce cas précis, l'objectif était également de vérifier que l'absence de différences observée sur la biomasse entre modalités, possiblement surestimée en raison de l'inclusion de tissus dégradés, se retrouve bien avec le LAI, ce dernier étant plus représentatif des effets réels de la dégradation hivernale. Toutefois, la forte superposition des groupes de traitements observée

dans l'ACP suggère que leur effet global demeure limité à cette date. Cette impression est d'ailleurs confirmée par les résultats des ANOVA réalisées sur le LAI au 3 février 2025, avec un comportement commun de réponse selon plusieurs espèces.

Pour la roquette, la phacélie et le trèfle d'Alexandrie, aucun effet significatif du traitement ni du bloc n'a été observé, traduisant une relative stabilité du comportement foliaire quelle que soit la modalité de gestion du sol. En revanche, l'avoine se distingue par des effets significatifs détectés à la fois pour le traitement et pour le bloc avec un modèle expliquant plus de 52 % de la variance totale. Le test post-hoc de Tukey révèle que les modalités labour conventionnel et non-labour récent sont associées à un LAI significativement plus élevé que celui du non-labour ancien. De plus, l'analyse par bloc montre que le bloc 3 présente un LAI significativement plus faible que les blocs 1 et 2. Cette tendance concernant les traitements apparaît clairement sur la Figure 23, qui représente la distribution de l'indice foliaire de l'avoine rude au 3 février 2025 selon les traitements, où le non-labour ancien affiche une médiane proche de zéro, avec deux valeurs extrêmes isolées, ce qui pourrait expliquer en partie la différence statistique observée.

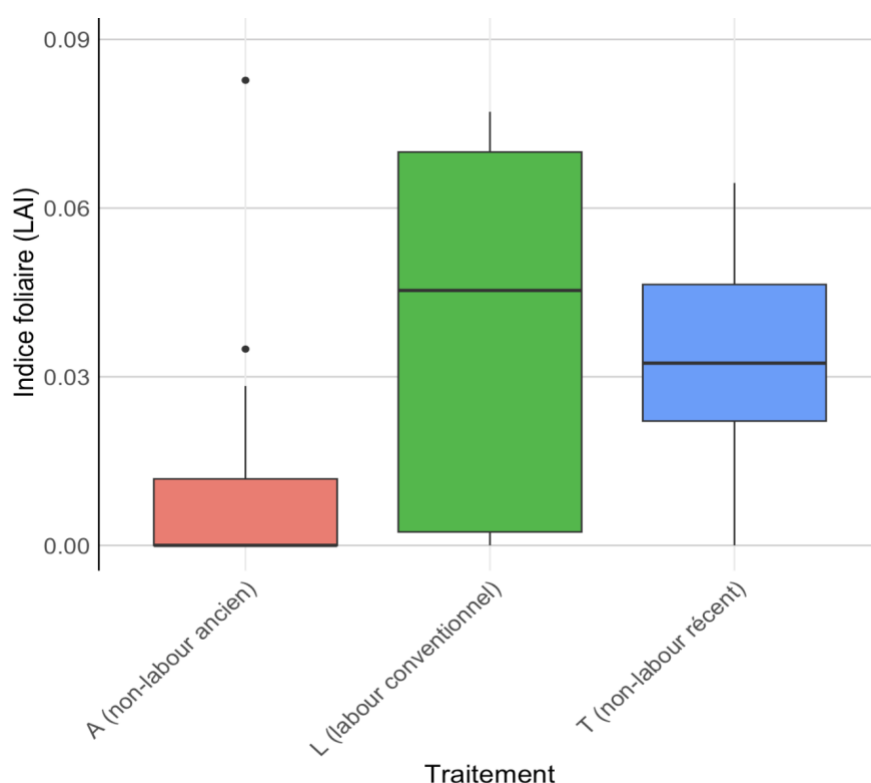


Figure 23 : Distribution de l'indice de surface foliaire de l'avoine selon le traitement, 3 février 2025

Ces résultats suggèrent que l'avoine agit différemment au niveau de son LAI dans les systèmes connaissant une perturbation du sol ou un arrêt du labour plus récent à la date du 03 février 2025.

2. Développement racinaire

En ce qui concerne le développement racinaire, la Figure 24 présente les longueurs de racines selon des tranches de 0–20 mm, 20–40 mm, 40–60 mm et 60–80 mm, correspondant à la segmentation de l'échantillon prélevé à 30° par rapport à la verticale. Ces valeurs ne reflètent donc pas la profondeur réelle dans le sol, mais permettent de comparer la distribution relative des racines le long du profil échantillonné. On observe que la majorité des racines se concentre dans la tranche superficielle (0–20 mm), avec des longueurs particulièrement élevées dans les systèmes en non-labour. La dispersion des valeurs y est nettement plus importante que dans les autres tranches, traduisant une forte hétérogénéité en surface. Dans la tranche 20–40 mm, la tendance s'inverse : le labour conventionnel présente des longueurs racinaires supérieures à celles observées dans les systèmes sans labour, avec une dispersion des valeurs beaucoup plus faible. Dans les tranches plus profondes (40–60 mm et 60–80 mm), les longueurs racinaires diminuent nettement et deviennent plus homogènes entre traitements, comme l'illustre la réduction de la variabilité, à l'exception du non-labour ancien qui conserve des médianes plus faibles et une dispersion plus marquée que les autres modalités.

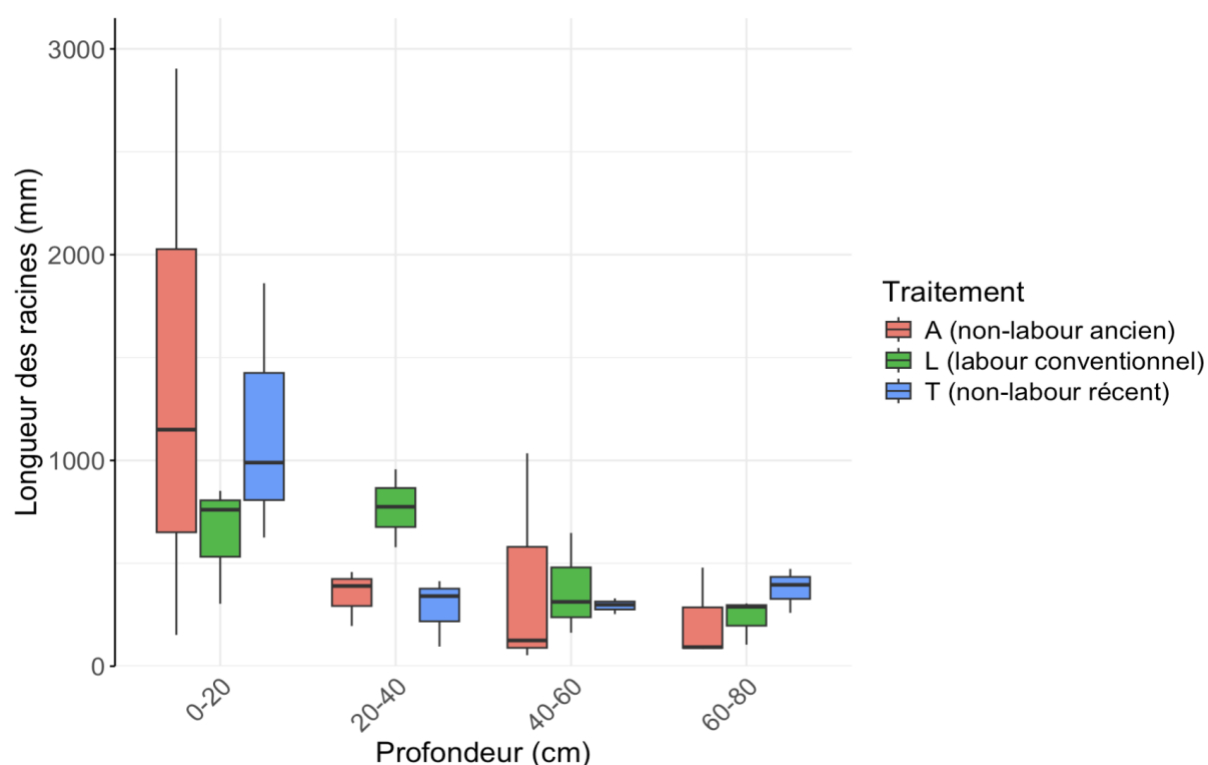


Figure 24 : Distribution des longueurs racinaires totales (mm) selon la profondeur et le type de travail du sol

Afin de mieux cerner l'origine de cette variabilité, les données ont été examinées par bloc expérimental (Figure 25). Cette analyse révèle des contrastes marqués entre blocs, en particulier pour le traitement en non-labour de longue durée, qui présente une forte réponse racinaire dans le bloc 3, notamment dans la tranche 0–20 cm mais une réponse nettement plus faible dans les autres. Un schéma comparable apparaît pour le non-labour récent, avec une longueur racinaire élevée dans le bloc 2, principalement dans la tranche 0–20 cm. Ces résultats suggèrent que l'effet des traitements pourrait être également modulé par des conditions locales propres à chaque bloc.

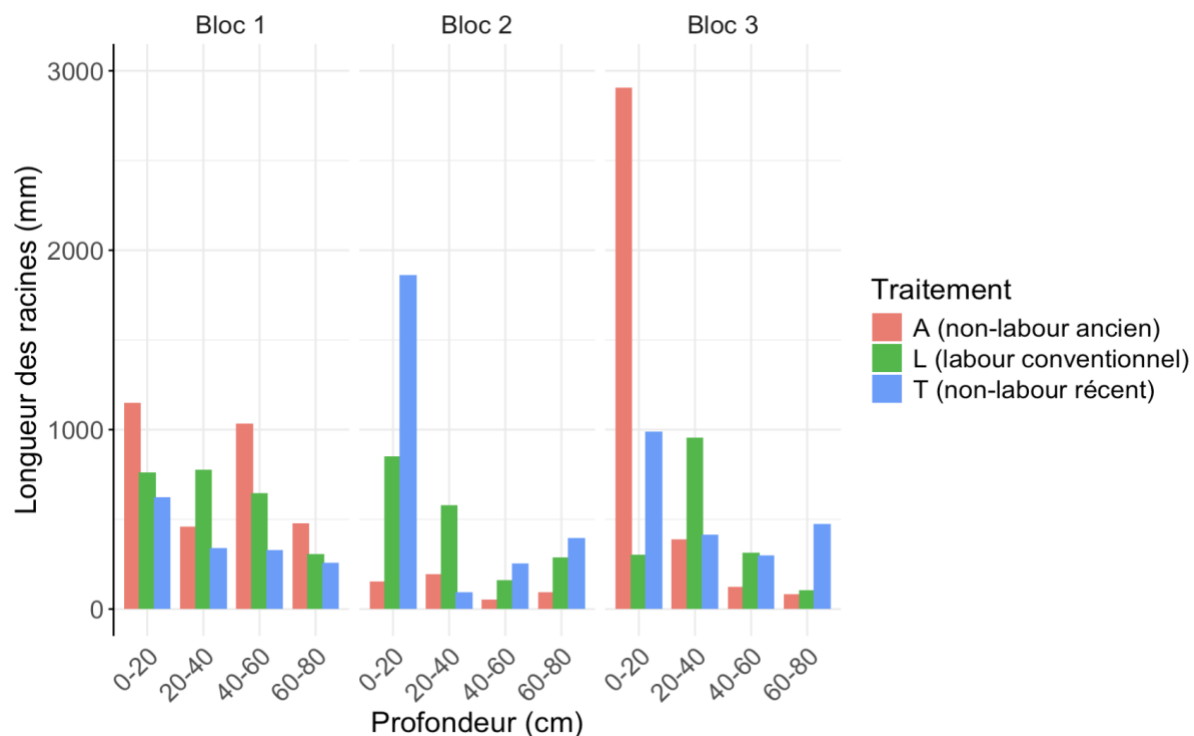


Figure 25 : Longueur totale des racines en fonction de la profondeur, du traitement et du bloc

Pour confirmer ces tendances, des modèles linéaires ont été ajustés séparément pour chaque tranche, afin d'évaluer les effets du traitement et des blocs. Les résultats des ANOVA indiquent que, pour la majorité des couches, aucun effet statistiquement significatif du traitement ou du bloc n'a été mis en évidence. Une exception apparaît toutefois pour la tranche 20–40 cm, où des effets notables ont été détectés à la fois pour le traitement et pour le bloc. Pour préciser ces différences, un test post-hoc de Tukey a été appliqué. Du côté des traitements, il révèle que la longueur racinaire totale dans la tranche 20–40 mm est significativement plus courte en non-labour récent qu'en labour conventionnel. Cette différence est également visible sur la Figure 26, où le traitement en labour conventionnel présente des longueurs racinaires médianes nettement plus élevées que celles observées en non-labour récent ou en non-labour ancien. Concernant les blocs, une différence significative est observée entre le bloc 2 et le bloc 3, ce dernier présentant des longueurs racinaires totales plus élevées. Ces résultats suggèrent que la variabilité spatiale au sein du dispositif expérimental pourrait également influencer la distribution racinaire.

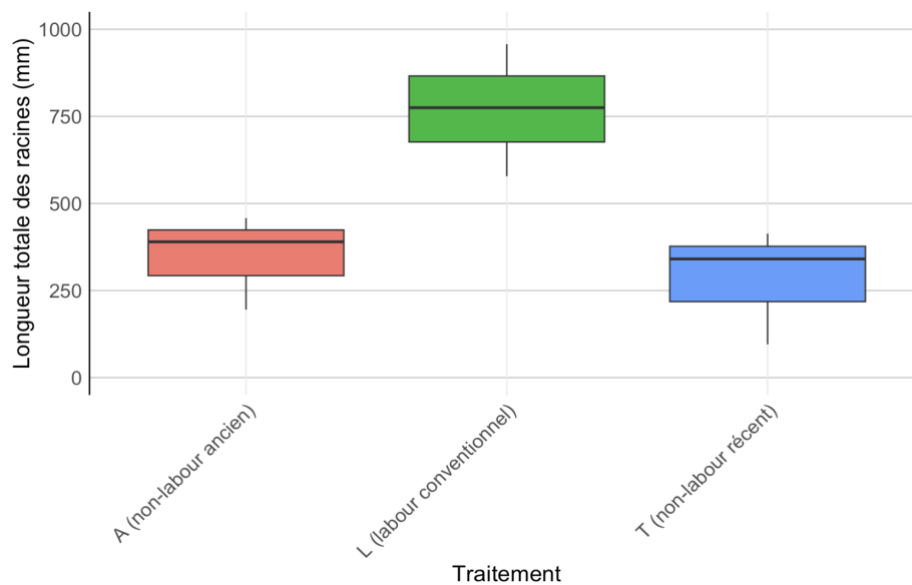


Figure 26 : Longueur totale des racines de la tranche 20–40 cm selon le traitement

Enfin, afin d’adopter une approche plus intégrée, la longueur racinaire totale a été analysée à l’échelle de la carotte entière, indépendamment des tranches de profondeur. Un second modèle linéaire a été ajusté, prenant comme variable dépendante la longueur totale des racines mesurée par carotte et comme variables explicatives le traitement appliqué et le bloc expérimental. Les résultats montrent qu’aucun effet statistiquement significatif du traitement ou du bloc n’a été détecté sur la longueur racinaire totale par carotte.

Par ailleurs, en raison du faible nombre d’observations et du non-respect des hypothèses des modèles linéaires (normalité, homogénéité des variances), les résultats relatifs aux masses de résidus ne sont pas considérés comme interprétables de manière fiable et ne sont donc pas présentés.

3. Analyse chimique du sol

Dans le cadre de cette étude, la teneur en carbone organique du sol (exprimée en g/kg) ainsi que le rapport carbone/azote (C/N) ont été mesurés à différentes profondeurs pour chacun des trois traitements. Étant donné la présence d'une seule valeur par profondeur et par traitement, aucune analyse statistique n'est possible, l'interprétation repose donc uniquement sur une lecture visuelle des profils.

3.1. Teneur en carbone organique selon la profondeur

Le graphique correspondant à la Figure 27 présente l'évolution du carbone organique selon quatre classes de profondeur : 0–20 cm, 20–40 cm, 40–60 cm et 60–80 cm.

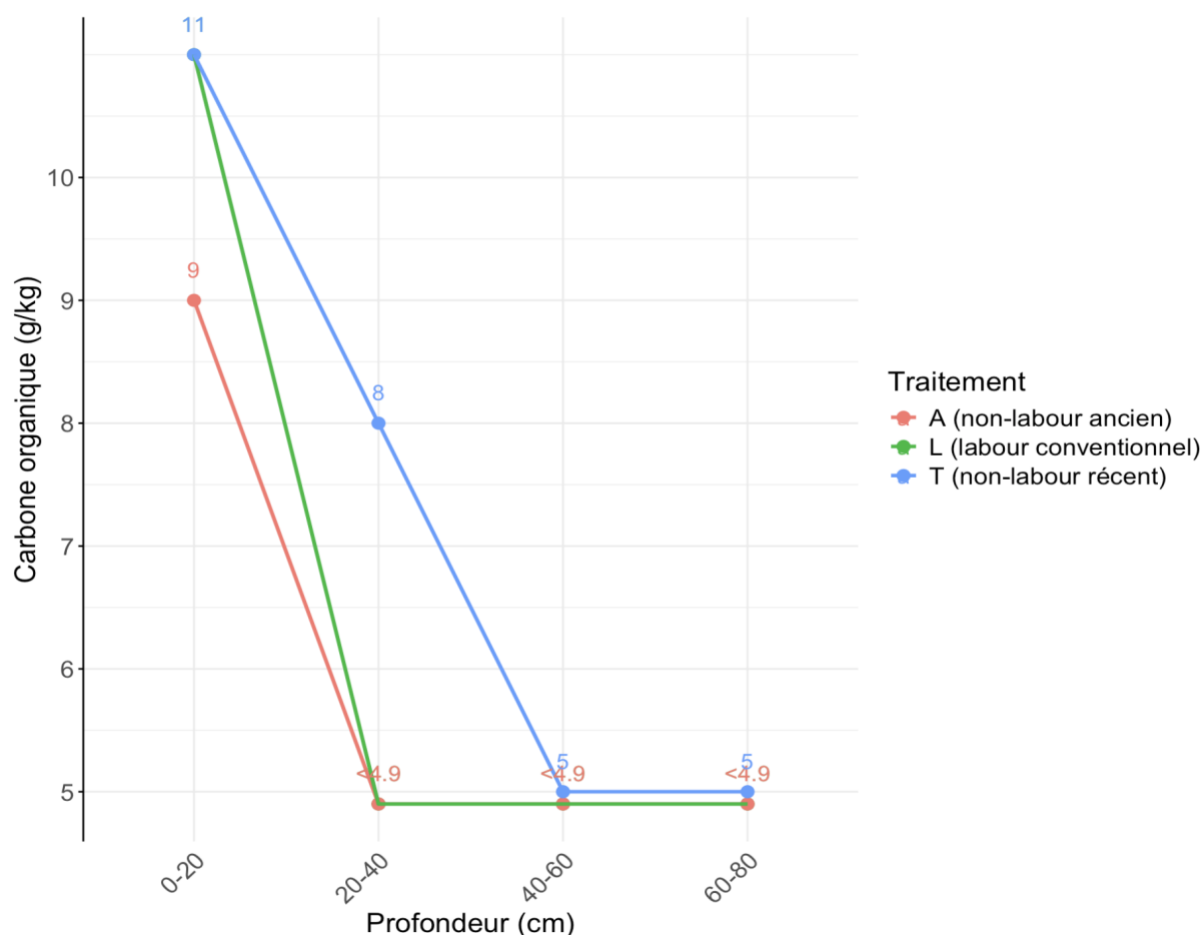


Figure 27 : Évolution de la teneur en carbone organique (g/kg) selon la profondeur, pour les trois modalités de travail du sol

La courbe rouge, correspondant au traitement non-labour ancien, montre une teneur de 9 g/kg dans la couche superficielle (0–20 cm), mais dès la couche suivante (20–40 cm), la concentration chute en dessous du seuil de détection, avec une valeur inférieure à 4,9 g/kg. Cette faible teneur se maintient ensuite dans les deux autres couches (40–60 cm et 60–80 cm), indiquant une accumulation de carbone en surface, typique des systèmes en non-labour prolongé, mais aussi un appauvrissement rapide et marqué en profondeur.

La courbe verte, représentant le traitement avec labour conventionnel, présente une valeur maximale de 11 g/kg en surface. Toutefois, comme dans le cas précédent, la teneur chute en dessous du seuil de détection dès la seconde couche (à partir de 20 cm). Cela suggère que, bien que le labour permette l'accumulation de matière organique en surface, il ne favorise pas une meilleure répartition verticale du carbone dans le profil du sol, contrairement à ce qui pourrait être attendu.

Enfin, la courbe bleue, associée au traitement non-labour récent, affiche également une teneur de 11 g/kg à 0–20 cm, mais contrairement aux autres traitements, elle conserve une valeur intermédiaire de 8 g/kg entre 20–40 cm, avant de retomber à 5 g/kg dans les deux couches plus profondes. Ce profil se distingue par une meilleure conservation du carbone organique dans les 40 premiers centimètres du sol.

Dans l'ensemble, les trois profils montrent une accumulation nette de carbone organique en surface. Toutefois, seul le traitement en non-labour récent présente encore des teneurs notables au-delà de 20 cm. Les deux autres traitements (non-labour ancien et labour) révèlent quant à eux une perte rapide de carbone en profondeur, traduisant une présence principalement superficielle.

3.2. Évolution du rapport C/N selon la profondeur

La Figure 28 illustre la variation du rapport C/N selon les quatre même classes de profondeur : 0–20 cm, 20–40 cm, 40–60 cm et 60–80 cm.

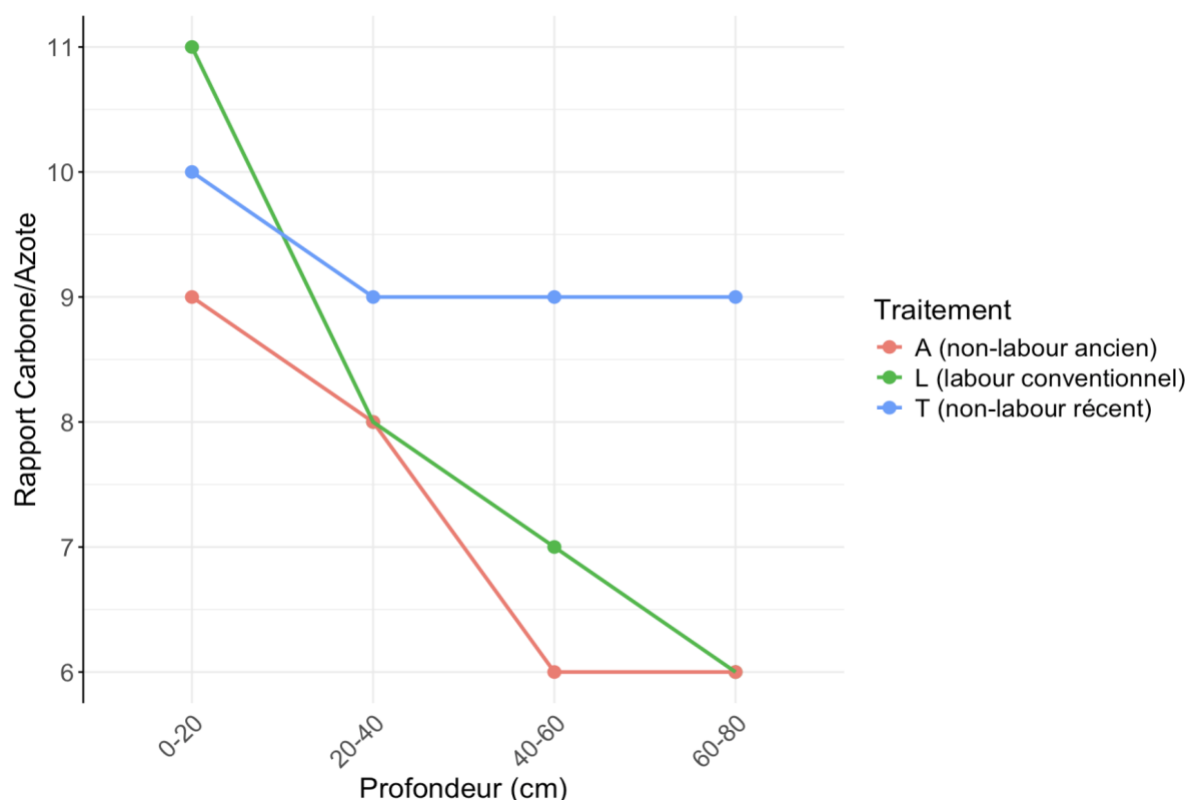


Figure 28 : Évolution du rapport carbone/azote (C/N) selon la profondeur, pour les modalités de travail du sol

La courbe rouge, correspondant au traitement en non-labour ancien, montre une diminution régulière du rapport C/N avec la profondeur. Ce rapport est de 9 dans la couche superficielle (0–20 cm), passe à 8 entre 20–40 cm, puis chute à 6 à partir de 40 cm, valeur qui se maintient jusqu'à 80 cm. Ce profil traduit

une accumulation de matière organique relativement plus riche en carbone en surface, suivie d'un appauvrissement progressif en profondeur.

Le traitement en labour conventionnel, représenté en vert, présente un rapport C/N initialement plus élevé, atteignant 11 dans la couche 0–20 cm, la valeur la plus haute observée parmi les trois traitements. Il diminue ensuite de manière progressive avec la profondeur : 8 à 20–40 cm, 7 à 40–60 cm, puis 6 à 60–80 cm.

Enfin, la courbe bleue, représentant le traitement en non-labour récent, se distingue par une remarquable stabilité du rapport C/N à travers les différentes couches du sol. Le rapport est de 10 en surface, puis reste constant à 9 de 20 à 80 cm de profondeur.

Dans l'ensemble, les trois traitements présentent des dynamiques contrastées. Le labour conventionnel affiche le rapport C/N le plus élevé en surface, suivi d'une décroissance progressive. Le non-labour ancien montre une chute plus rapide et marquée du rapport C/N avec la profondeur. À l'inverse, le non-labour récent se caractérise par une répartition plus uniforme du rapport C/N dans l'ensemble du profil étudié.

4. Activité mycorhizienne

Dans le cadre de cette étude, la biologie du sol a été explorée à travers l'évaluation de l'abondance des propagules mycorhiziennes actives, afin de mieux comprendre l'effet potentiel des pratiques culturales sur l'activité mycorhizienne symbiotique. L'estimation a été réalisée à l'aide de la méthode du Nombre le Plus Probable (MPN), basée sur un test de dilution en série avec une plante piège (maïs), permettant de quantifier la densité de propagules actives par gramme de sol issu des trois modalités de travail du sol.

Le tableau 6 reprend les estimations de densité de propagules mycorhiziennes actives pour les sols correspondant à chaque modalité. Pour chaque modalité, sont indiqués le MPN par g, correspondant à l'estimation du nombre de propagules actives par unité de sol, ainsi que sa transformation logarithmique ($\log_{10}$ MPN). Le tableau précise également l'écart-type associé à cette valeur transformée (SD of $\log_{10}$ MPN), ainsi que les limites inférieure et supérieure de l'intervalle de confiance à 95 %, reflétant l'incertitude associée à l'estimation. L'indice de rareté est également rapporté, indiquant la probabilité statistique d'observer de telles données selon le modèle utilisé, et la catégorie associée selon la classification de Jarvis et al., (2010) permettant d'apprécier la plausibilité statistique des résultats.

Tableau 6 : Résultats de l'estimation de l'abondance de propagules mycorhiziennes actives par la méthode du MPN pour trois modalités de gestion du sol issus du fichier Excel développé par Jarvis et al., (2010)

No.	Désignation	MPN par g	log10 MPN	SD du log10 MPN	IC95 % – borne inférieure	IC95 % – borne supérieure	Indice de rareté	Catégorie
1	Labour	0.73	-0.14	0.19	0.31	1.7	0.307	1
2	Conservation 2018	0.20	-0.70	0.19	0.082	0.49	0.479	1
3	Conservation 2006	0.26	-0.59	0.18	0.11	0.59	0.669	1

L'indice de rareté, calculé pour chaque modèle ajusté, montre des valeurs comprises entre 0,307 et 0,669, ce qui les classe dans la catégorie 1 selon la typologie de Jarvis et al., (2010), c'est-à-dire comme des résultats statistiquement probables.

La représentation graphique des résultats (Figure 29) met en évidence que le traitement en labour conventionnel affiche la valeur la plus élevée, suivi du non-labour ancien, tandis que le non-labour récent présente la plus faible. Toutefois, l'amplitude importante des intervalles de confiance et leur chevauchement marqué entre traitements semble ne pas permettre de conclure à une différence significative entre les modalités, même si l'indice de rareté indique que les résultats sont statistiquement plausibles.

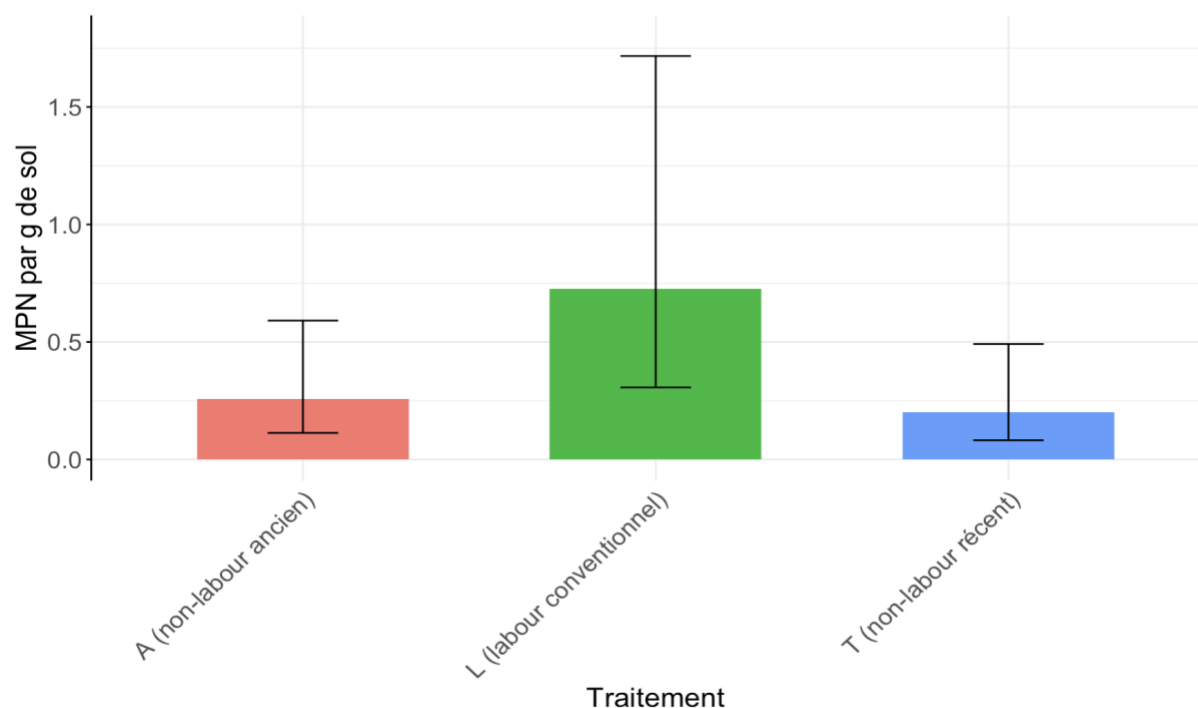


Figure 29 : Abondance estimée des propagules mycorhiziennes par traitement, exprimée en MPN par gramme de sol, avec intervalles de confiance à 95 %

En résumé, bien que les résultats soient considérés comme plausibles selon le modèle, ils ne permettent pas d'identifier un effet statistiquement net de la modalité de travail du sol sur l'abondance des propagules mycorhiziennes dans les conditions de cette expérimentation.

V. Discussion

1. Dynamique du couvert végétal

1.1. Implantation du couvert

1.1.1. Températures

Au mois d'août 2024, lors de l'implantation du couvert effectuée le 6 du mois, la température moyenne a été de 19,8 °C, avec des minima de 11,5 °C et des maxima de 34,0 °C (Figure 31).

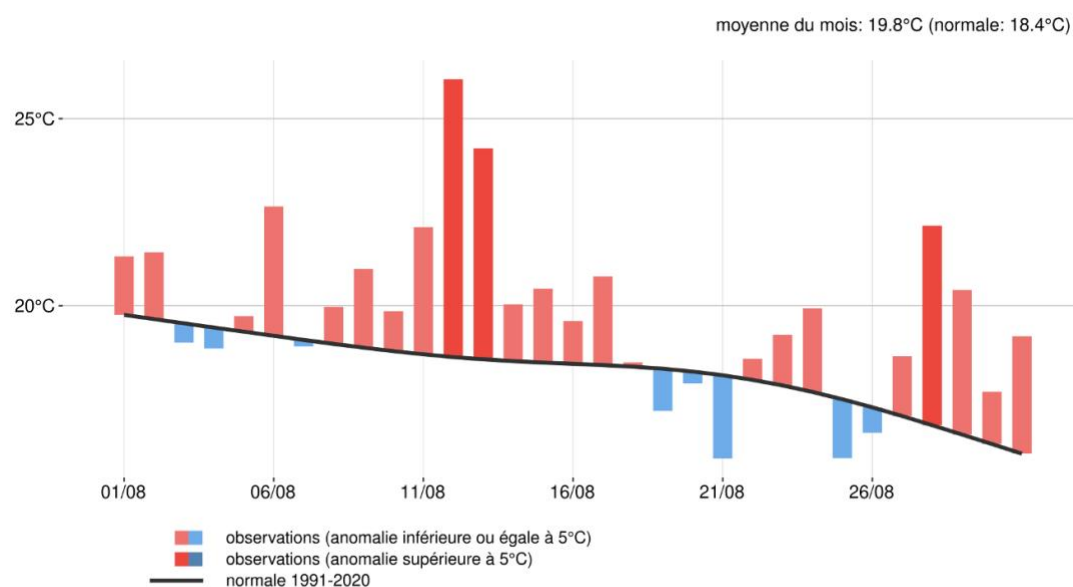


Figure 30 : Températures moyennes journalières à Uccle en août 2024
(Source : IRM - Année, s. d.)

Les températures observées étaient compatibles avec une levée satisfaisante, telles qu'évaluées par une étude expérimentale en conditions contrôlées (Tribouillois et al., 2016). Cette étude, menée sur 36 espèces de couverts issus de six familles botaniques, a déterminé les températures cardinales (T_b , T_{opt} , T_{max} et T_{min}) de germination pour chaque espèce. Les valeurs retenues pour les espèces étudiées du couverts sont reprises dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Températures minimales, maximales, optimales et de base (°C) pour la germination et la croissance de différentes espèces du couvert végétale
(Adpaté de : Tribouillois et al., 2016)

Espèce	Température minimale (°C)	Température maximale (°C)	Température optimale (°C)	Température de base (°C)
Eruca sativa	0.8	36.2	32.5	5.4
Trifolium alexandrinum	1.1	41.6	30.0	6.1
Trifolium incarnatum	1.5	43.4	26.5	6.4
Phacelia tanacetifolia	0.3	27.7	21.3	3.6
Avena strigosa	0.0	35.8	27.8	4.8

Selon cette étude, nos espèces appartiennent au groupe à réponse stable à la température, avec un taux de germination élevé (80 à 100 %) entre 4,5 °C et 35 °C, qui ne baisse nettement qu'à des températures extrêmes proches de 40 à 43 °C, ce qui renforce leur capacité à bien s'implanter dans des conditions climatiques variables.

Les conditions thermiques au moment du semis étaient globalement favorables à la levée et à l'implantation des espèces choisies. La température moyenne journalière au moment du semis, autour de 22 à 23 °C, dépassait largement la température de base de toutes les espèces. Pour la phacélie, dont l'optimum est de 21,3 °C, les conditions étaient presque idéales dès le semis. En revanche, les trèfles (optimum : 26,5 à 30 °C), l'avoine (27,8 °C) et la roquette (32,5 °C) ont connu un contexte plus frais que leur optimum. Entre le 12 et le 13 août, plusieurs journées sensiblement plus chaudes que la normale ont probablement stimulé la croissance du couvert. Ainsi, le mois d'août a offert un contexte thermique généralement propice à l'implantation de toutes les espèces, avec un léger avantage pour la phacélie, particulièrement bien adaptée aux températures observées.

1.1.2. Précipitations

Sur le plan hydrique (Figure 32), les 152,9 mm de pluie tombés en 15 jours, concentrés en plusieurs épisodes intenses, ont probablement maintenu des sols relativement humides, d'autant que les dix mois précédents affichaient déjà des précipitations supérieures à la moyenne. Le semis, réalisé juste après un important épisode pluvieux en début de mois, s'est effectué dans un contexte d'humidité résiduelle élevée. Une courte période plus sèche autour du 8 août a ensuite permis un léger ressuyage en surface, améliorant ou, à défaut, stabilisant l'état hydrique. L'eau nécessaire à la germination était donc présente, dans un contexte globalement humide.

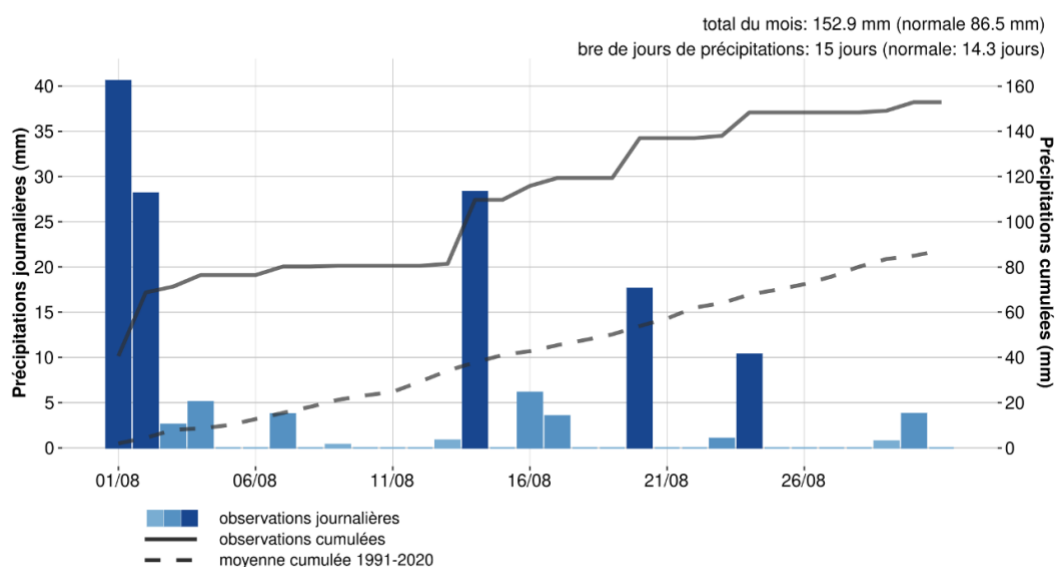


Figure 31 : Quantités journalières et cumulées de précipitations à Uccle en août 2024
(Source : IRM - Année, s. d.)

Si l'on considère que les conditions étaient modérément humides, les réponses à ces conditions peuvent varier selon les espèces. En effet, l'avoine rude, selon une étude qui s'est attachée à évaluer le comportement de différentes variétés face à un épisode de submersion temporaire, présente une tolérance élevée aux sols temporairement saturés grâce à la formation d'aéranchyme et à l'augmentation de la porosité racinaire (Pitann & Mühlhling, 2024). D'autre part, selon la littérature établie en début d'étude, le trèfle Incarnat s'adapte bien aux conditions humides et froides, le trèfle d'Alexandrie est sensible aux excès d'eau, et le trèfle de Micheli présente une bonne tolérance à l'humidité (Thomas & Archambeaud, 2013). Ces éléments ne correspondent toutefois pas aux observations de terrain, où seul le trèfle d'Alexandrie s'est développé. Les conditions humides ont donc pu influencer son développement, mais elles ne peuvent pas expliquer l'absence des deux autres espèces. En ce qui concerne la phacélie, une étude menée en République tchèque sur des semis de printemps, entre plusieurs années, met en évidence une meilleure fermeture de la canopée pour une année plus froide (15°C) et relativement humide plutôt qu'un année sèche, ce qui est en accord avec les observations du bon développement de la phacélie sur la parcelle (Kubíková et al., 2022). Enfin, une étude approfondie qui examine l'influence de différents niveaux d'humidité relative sur la viabilité et la vigueur des graines montre que la roquette se distingue par une faible tolérance aux conditions très humides. En effet, à 75 % d'humidité relative, les graines subissent une perte rapide de viabilité et de vigueur. Cependant, les meilleures performances sont observées à une humidité intermédiaire, ce qui pourrait expliquer son développement plutôt correct dans des conditions modérément humides (Suma et al., 2013).

1.1.3. Rôle des stratégies racinaires et foliaires dans la phase initiale

Le développement très limité des trèfles dans le mélange pourrait néanmoins être attribué à d'autres facteurs comme les stratégies racinaires et foliaires des différentes espèces. En effet ces observations concorde avec une étude ayant analysé les interactions racinaires dans des systèmes associant légumineuses et non-légumineuses. Il a été montré que, chez les trèfles, l'enracinement initial principalement vertical et peu ramifié limite l'exploitation rapide des couches superficielles riches en

ressources. En présence d'espèces à enracinement dense, superficiel et à croissance rapide, comme l'avoine, ce profil constitue un désavantage compétitif dès les premiers stades (Tosti & Thorup-Kristensen, 2010). Ces constats sont également compatibles avec les résultats d'une étude ayant examiné l'influence des traits racinaires et foliaires sur la capacité d'absorption des nutriments chez différentes espèces de couverts, laquelle a mis en évidence que la diversité des architectures racinaires et des stratégies d'acquisition explique en grande partie les différences d'accumulation de biomasse (Wendling et al., 2016). Dans ce dispositif, la compétition a été d'autant plus marquée que la phacélie a rapidement dominé le couvert, occupant une grande partie de l'espace disponible. Une étude ayant examiné la complémentarité entre une céréale, une brassicacée et une légumineuse en culture associée a montré que les espèces à croissance rapide et à fermeture précoce pouvaient réduire la lumière disponible pour les espèces plus lentes, rendant plus difficile le développement des légumineuses et limitant ainsi leur contribution au couvert global (Szumigalski & Van Acker, 2008). Dans ce cas, l'ensemble de ces comportements spécifiques semble avoir favorisé la dominance de la phacélie et conduit à un développement limité des trèfles.

En conclusions dans l'ensemble, toutes les espèces semblent avoir bénéficié de conditions globalement favorables à leur développement, même dans un contexte légèrement humide. Seul les trèfles semblent ne pas s'être développés correctement, probablement en raison d'une compétition avec les autres espèces du couvert. La proximité observée entre le trèfle et l'avoine dans l'ACP sur la biomasse à la première date, pourrait d'ailleurs s'expliquer par cette faible présence du trèfle sur la parcelle. Dans ce contexte, il est possible que le trèfle ait été physiquement ou spatialement associé à l'avoine dans certains traitements, donnant ainsi l'impression qu'ils varient de manière similaire dans les analyses, sans que cela traduise nécessairement une réponse physiologique commune aux conditions du milieu.

1.2. Conditions hivernales

Selon les données relevées à Uccle (Annexe 9), le couvert végétal a connu peu de gelées avant janvier, mais la période du 7 au 20 janvier a engendré un stress marqué. Un minimum absolu de $-6,8\text{ °C}$ a été enregistré autour du 10 janvier, accompagné de plusieurs jours consécutifs sous les normales saisonnières. L'épisode neigeux des 17 au 19 janvier est venu accentuer ces contraintes, provoquant des dégâts notables sur les espèces les plus sensibles. Février, au-dessus des normales, n'a pas généré de nouveau stress thermique (*IRM - Novembre*, s. d.).

C'est dans ce contexte que l'évolution hivernale du couvert végétal a mis en évidence des réponses contrastées selon les espèces. La phacélie, dominante à l'automne grâce à un indice foliaire élevé et une croissance rapide, a vu sa biomasse et son LAI chuter nettement durant l'hiver. Cette diminution s'explique à la fois par sa faible résistance au gel, plante gélive à partir de -4 °C (Minette, 2009) et par une sénescence rapide du feuillage, réduisant ainsi sa contribution au couvert global dès les premières périodes froides. Ce constat rejoint les conclusions d'une étude sur la sélection de couverts d'hiver en fonction de traits ciblés, qui souligne que certains caractères favorisant une croissance rapide peuvent s'accompagner d'une moindre résilience hivernale (Wilke & Snapp, 2008). De la même façon, *Avena strigosa* (avoine de printemps), présente également une sensibilité marquée au froid, elle est gélive dès -3 °C (Minette, 2009) et elle est facilement détruite par le gel. Même si ces espèces ont encore montré une part plus ou moins importante de la biomasse au mois de février, cela s'explique à nouveau par la prise en compte, dans la biomasse sèche, des tissus dégradés, absents du calcul du LAI. Leur comportement hivernal reste donc conforme à ce que leur sensibilité au gel laissait prévoir, avec une diminution générale de leur présence. À l'inverse, la roquette semble présenter une meilleure résistance

au gel jusqu'à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, ce qui pourrait expliquer qu'elle soit la seule à avoir poursuivi sa croissance en biomasse à l'hiver, contrairement aux autres espèces (Minette, 2009).

Cette persistance hivernale a renforcé sa place relative dans le couvert, modifiant ainsi la structuration interspécifique. En effet, les espèces sensibles au gel, comme la phacélie ou l'avoine, ont régressé. À l'inverse, la roquette, espèce résistante, a gagné en dominance relative et se retrouve donc seule, lors de la seconde date d'évaluation de l'ACP du LAI et illustre son importance dans la composition du couvert.

Si le trèfle incarnat est décrit dans la littérature comme relativement résistant à l'hiver par rapport à d'autres trèfles (Brandsæter et al., 2008), son absence, tout comme celle d'autres espèces dans le dispositif, ne permet pas de confirmer cette tendance. Néanmoins, une étude sur l'association de légumineuses gélives avec du colza d'hiver montre que l'intégration de telles espèces peut présenter un intérêt agronomique. Elles assurent à l'automne une bonne couverture du sol, limitent la concurrence des adventices et accumulent de l'azote, restitué à la culture suivante après leur destruction naturelle par le gel. Cela améliore ainsi l'efficacité d'utilisation de l'azote, ce qui met en évidence l'intérêt qu'aurait pu avoir les trèfles dans notre couvert (Cadoux et al., 2015).

1.3. Absence d'effet des modalités de travail du sol

L'essai n'a globalement pas montré de différence significative liée au travail du sol que ce soit sur la biomasse ou sur l'indice foliaire du couvert, ni dans les analyses multivariées ni dans les tests de significativité. Comme évoqué précédemment, cette absence d'effet net pourrait être liée au rôle prépondérant du couvert végétal, qui assure une occupation complète et homogène du sol dans toutes les modalités.

Cette hypothèse trouve un écho dans un rapport de synthèse de la *British Ecological Society* sur l'agriculture régénérative au Royaume-Uni, qui indique que la réduction du travail du sol présente des bénéfices potentiels sur la matière organique, la structure et la biodiversité, mais avec un niveau de certitude faible et des effets souvent modestes. L'amélioration de la structure du sol est mieux documentée, à condition d'éviter la compaction et de favoriser un enracinement diversifié, généralement assuré par l'implantation de cultures intermédiaires. Dans la pratique, ces effets positifs sont donc souvent étroitement liés à la présence de couverts végétaux. Par ailleurs, la minimisation des sols nus et le maintien de racines vivantes toute l'année sont associés à des bénéfices plus nets et mieux établis, notamment sur la structure du sol, la rétention d'eau, la biodiversité et, dans une moindre mesure, la matière organique. Comme le résume le tableau de synthèse proposé par la *British Ecological Society* (Annexe 10), l'intensité et le degré de certitude des impacts varient fortement selon les principes mobilisés, avec des bénéfices plus assurés pour la couverture permanente du sol que pour la seule réduction du travail du sol. Dans le système étudié, toutes les modalités étant sous couvert depuis l'automne, les effets bénéfiques, plus certains, de cette couverture permanente, communs aux trois parcelles, pourraient alors expliquer l'absence de différences observées entre modalités de travail du sol dans les conditions expérimentales (British Ecological Society, 2025).

Des résultats similaires sont rapportés par une revue ayant analysé la littérature scientifique sur l'effet des cultures de couverture dans les systèmes biologiques. Celle-ci souligne que, dans ces conditions, les bénéfices attendus du non-labour deviennent plus difficiles à mettre en évidence, car le couvert végétal joue déjà un rôle central dans la protection et la régénération du sol. L'analyse met également en évidence un manque d'études intégrées évaluant simultanément les effets sur la santé des sols et sur la

compétition végétale, alors que ces effets résultent souvent d'interactions propres au couvert, ce qui pourrait expliquer l'absence de différences significatives entre modalités de travail du sol lorsque celui-ci est présent et bien développé (Osterholz et al., 2021).

Le seul résultat significatif concernait le LAI de l'avoine du 03 février 2015, avec un non-labour de longue durée montrant un LAI supérieur au labour et au non-labour récent, et un bloc 3 inférieur aux blocs 1 et 2. Cela pourrait s'expliquer par la forte proportion d'échantillons à zéro observée en non-labour ancien, 41,7 % de présence contre 75 % en labour et 83,3 % en non-labour récent (Tableau 8). De même, la plus faible valeur du bloc 3 pourrait être liée à sa proportion élevée d'échantillons nuls, seulement 33,3 % de présence, contre 75 % pour le bloc 2 et 91,7 % pour le bloc 1 (Tableau 9).

Tableau 8 : Proportion d'échantillons avec LAI d'avoine positif pour chaque traitement, 03 février 2025

Traitement	Nombre total d'échantillon	Nombre avec présence (LAI>0)	Pourcentage de présence (%)
Non labour ancien	12	5	41,7
Labour conventionnel	12	9	75,0
Non labour récent	12	10	83,3

Tableau 9 : Proportion d'échantillons avec LAI d'avoine positif pour chaque bloc, 03 février 2025

Bloc	Nombre total d'échantillon	Nombre avec présence (LAI>0)	Pourcentage de présence (%)
Bloc 1	12	11	91,7
Bloc 2	12	9	75,0
Bloc 3	12	4	33,3

Par conséquent, le seul résultat significatif observé ne semble pas traduire une réelle différence de LAI, mais plutôt une variation liée à la présence ou à l'absence de l'espèce. Sur la Figure 23, deux des cinq prélèvements présentant un LAI positif affichent des valeurs relativement élevées, proches de celles observées dans les autres traitements. Cela suggère que, lorsque l'espèce est présente, son développement reste comparable entre modalités et que la différence significative provient surtout de sa fréquence de présence.

Dans ce contexte, on peut conclure qu'en général le non-labour ne semble pas constituer un facteur discriminant pour le développement du couvert, dans les conditions de cette étude. En ce qui concerne la production de biomasse et de surface foliaire, l'hypothèse parfois avancée d'un rendement inférieur des cultures en non-labour n'est pas confirmée ici.

2. Développement racinaire

2.1. Date de prélèvement

Les prélèvements racinaires réalisés le 4 mars, après l'hiver, ont révélé une très faible quantité de racines. Cette date d'échantillonnage peut avoir exposé les mesures à plusieurs biais susceptibles de conduire à une sous-estimation de la biomasse et à une modification de la distribution racinaire : mortalité hivernale variable selon les espèces, perte de racines fines due aux cycles gel-dégel, décomposition, ainsi que difficulté à distinguer les racines vivantes des racines mortes. Les profils obtenus début mars ne traduisent donc sans doute pas un potentiel de croissance racinaire maximale.

2.2. Précision méthodologique sur la profondeur d'échantillonnage

À noter que les prélèvements racinaires ont été réalisés avec un angle de 30° par rapport à la verticale. De ce fait, les intervalles de profondeur indiqués (0–20 cm, 20–40 cm, etc.) ne correspondent pas directement aux mêmes tranches verticales dans le sol. Après correction trigonométrique, ces segments représentent approximativement des profondeurs réelles de 0–17 cm, 17–35 cm, 35–52 cm et 52–69 cm. Cette nuance doit être prise en compte dans l'interprétation des résultats, notamment pour la comparaison avec d'autres études exprimant les profondeurs en vertical.

2.3. Effet du travail du sol sur la distribution de la biomasse racinaire

Deux éléments principaux se dégagent des résultats. Premièrement, dans la couche la plus superficielle, les traitements sans labour semblent présenter la plus grande longueur racinaire totale, mais avec une forte variabilité, ce qui limite la clarté de la tendance. Deuxièmement, dans la tranche suivante (20–40 cm mesurés, soit 17–35 cm réels), on observe le comportement inverse, avec une variabilité plus faible, ce qui suggère un effet plus net. Cette interprétation est d'ailleurs confirmée par la différence significative relevée à cette profondeur avec le non-labour récent qui présente une longueur racinaire totale significativement plus faible que le labour conventionnel.

La différence observée pour cette tranche pourrait s'expliquer par le fait que le labour conventionnel, intervenant jusqu'à ces profondeurs, tend à générer une structure plus homogène et mécaniquement moins contraignante, ce qui peut favoriser l'exploration racinaire (Munkholm et al., 2013). Toutefois, il convient de rappeler que le dernier labour dans le traitement conventionnel a été réalisé le 16/10/2023, soit 505 jours avant les mesures, l'effet initial d'ameublissement mécanique a donc probablement été en partie atténué depuis. À l'inverse, le non-labour récent pourrait entraîner une compaction résiduelle ou une porosité réduite dans ces couches, limitant ainsi l'enracinement. L'absence de différence significative pour le non-labour ancien pourrait, quant à elle, s'expliquer par une amélioration progressive de la structure du sol au fil du temps, notamment sous l'effet de l'activité biologique et de l'accumulation de matière organique (Martínez et al., 2008). Ces processus naturels auraient pu rapprocher l'état structural de celui obtenu par le labour, réduisant ainsi les écarts entre traitements. Cependant, il est important de rester prudent quant à l'interprétation de ces effets, d'autant qu'une variabilité notable subsiste dans les données et que le faible nombre de prélèvements (trois par profondeur et par traitement) limite la robustesse statistique des résultats. Dans un tel contexte, la présence d'un échantillon atypique, presque dépourvu de racines ou, au contraire, particulièrement riche en racines pour des raisons indépendantes du traitement, peut influencer sensiblement la moyenne. Ce facteur pourrait également expliquer l'absence de différence significative observée aux profondeurs

supérieures, où la densité racinaire tend de toute façon à diminuer fortement avec l'augmentation de la profondeur.

La forte concentration de racines en surface est cependant cohérente avec les résultats d'une étude ayant quantifié la biomasse racinaire d'une culture de couverture, montrant que, même pour des espèces capables d'explorer jusqu'à 60 cm de profondeur, plus de la moitié de la biomasse racinaire se situe dans les 15 premiers centimètres (Patel et al., 2024). Ainsi, malgré la présence d'espèces à enracinement profond dans le mélange étudié, la majeure partie du système racinaire est demeurée superficielle, ce qui pourrait expliquer la faible longueur racinaire mesurée après l'hiver, probablement en raison d'une dégradation plus importante dans les couches superficielles. Par ailleurs, les espèces à racines plus épaisses et à enracinement profond n'ont pas été intégralement prises en compte par la méthode de carottage, ce qui ne reflète pas pleinement l'exploration racinaire en profondeur et pourrait contribuer à l'absence d'effet significatif aux horizons plus profonds.

Le fait que le bloc 2 présente des longueurs racinaires totales significativement moins importantes que le bloc 3 pourrait être lié aux caractéristiques pédologiques locales (Annexe 3). Le bloc 3 se situe en bordure d'une zone constituée de sols sablo-limoneux, pouvant offrir une meilleure aération et une structure plus propice au développement racinaire. Le bloc 2, quant à lui, est implanté sur des sols limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait, plus susceptibles de retenir l'eau et de présenter des conditions temporaires d'engorgement ou de compaction, pouvant limiter la progression des racines (Lemanceau et al., 2006).

3. Propriétés chimiques du sol

3.1. Teneur en carbone organique

L'analyse du carbone organique sur la parcelle, composée majoritairement de sols limoneux à drainage naturel favorable et, dans sa partie nord-ouest, de sols sablo-limoneux à drainage naturel principalement favorable, met en évidence un déficit marqué. Les seuils considérés comme satisfaisants se situent entre 13 et 20 g/kg pour sols les limoneux et entre 11 et 16 g/kg pour les sols sablo-limoneux (Mariage, 2019). En surface (0–20 cm), les teneurs varient de 9 g/kg pour le non-labour ancien à 11 g/kg pour le labour conventionnel et le non-labour récent. Ces valeurs demeurent insuffisantes pour un sol limoneux et, dans le cas du non-labour ancien, inférieures au seuil minimal pour un sol sablo-limoneux.

En profondeur, la teneur décroît fortement et atteint des valeurs proches de 5 g/kg, parfois même inférieures au seuil de détection, dès 40 cm, sans différence notable entre modalités. Ce profil, caractérisé par un stockage essentiellement superficiel, est cohérent avec la tendance rapportée dans la littérature pour les systèmes sans travail du sol, où l'accumulation de résidus en surface et la stratification verticale limitent l'enrichissement profond (Duiker & Beegle, 2006). Toutefois, contrairement au profil typiquement attendu sous labour, qui présente une proportion plus homogène de carbone dans le profil en raison du brassage mécanique, les valeurs mesurées ne reflètent pas cet effet (Karlen et al., 2013). Le non-labour récent se distingue par des teneurs encore notables jusqu'à 40 cm (8 g/kg entre 20–40 cm), un résultat surprenant au regard des deux autres profils et de la position intermédiaire que l'on pourrait attendre de ce traitement. Une différence aurait pu être envisagée en raison de variations de fertilisation entre modalités. Toutefois, dans le cas présent, la fertilisation a été appliquée de manière identique à l'ensemble des traitements, et le dernier apport d'engrais, réalisé le

26/04/24, remonte à 10 mois avant l'échantillonnage. L'influence directe de cet apport sur les teneurs mesurées est donc probablement limitée.

Il est par ailleurs notable que les teneurs en carbone organique, relativement faibles dans toutes les modalités malgré la présence d'un couvert végétal commun, apparaissent surprenantes au regard des bénéfices généralement attendus de cette pratique. En théorie, les cultures de couverture contribuent à l'enrichissement du sol en matière organique, aussi bien en surface qu'en profondeur, par l'incorporation de résidus, la décomposition racinaire et la rhizodéposition (García-González, Hontoria, et al., 2018).

Plusieurs facteurs pourraient néanmoins avoir limité l'expression de ce potentiel. La qualité et la biomasse du couvert jouent un rôle déterminant, un couvert peu dense, implanté tardivement ou soumis à des conditions climatiques défavorables peut générer des apports de matière organique insuffisants pour induire un enrichissement mesurable (Thorup-Kristensen et al., 2003). Dans ce cas précis, il est possible que les conditions n'aient pas été optimales. Par exemple, l'humidité relativement élevée lors de l'implantation du couvert n'a peut-être pas permis à celui-ci d'exprimer pleinement son potentiel.

3.2. Rapport C/N

Les résultats indiquent que le rapport C/N reste globalement dans la plage optimale de 8–12 en surface, traduisant un bon équilibre entre la minéralisation et la stabilité de la matière organique. En profondeur, en revanche, une dégradation plus rapide de la matière organique est observée. Le non-labour récent se distingue par une stabilité notable en profondeur, probablement liée au maintien régulier de résidus en surface, assurant ainsi un apport continu et homogène. La différence avec le labour conventionnel, qui présente une diminution marquée du rapport C/N en profondeur, peut s'expliquer par l'enfouissement des résidus, modifiant les conditions de décomposition et accélérant la minéralisation (Elhaj et al., 2021). Ce phénomène est cohérent avec les observations d'une étude qui mesure la cinétique de minéralisation du carbone et de l'azote provenant de résidus de cultures intermédiaires et qui montre que l'incorporation des résidus influence directement cette cinétique (Justes et al., 2009). En revanche, au niveau du non-labour ancien un comportement inattendu survient. En effet malgré l'absence de labour, il enregistre la baisse la plus prononcée du rapport C/N en profondeur. Par conséquent, le non-labour ancien présente un comportement inattendu au regard des connaissances actuelles. Après plusieurs années sans perturbation mécanique, on pourrait s'attendre à une amélioration progressive de la structure et à un enrichissement organique plus marqué en surface, ainsi qu'à un maintien relatif de la qualité organique en profondeur. Or, les résultats montrent au contraire des teneurs en carbone organique particulièrement faibles en surface et une diminution prononcée du rapport C/N en profondeur. Cette situation suggère que d'autres facteurs pourraient avoir freiné les effets bénéfiques attendus d'un non-labour de longue durée et rappelle que l'arrêt prolongé du travail du sol ne garantit pas, à lui seul, la préservation de la qualité organique. Par ailleurs, la méthodologie employée présente également certaines limites. En effet, la présence d'une seule valeur par profondeur et par modalité réduit la capacité à détecter des différences réelles et peut masquer une part importante de la variabilité naturelle du sol.

4. Activité mycorhizienne

En ce qui concerne l'activité mycorhizienne, les valeurs du nombre le plus probable montrent le labour conventionnel avec la valeur la plus élevée, suivi du non-labour de longue durée, tandis que le non-labour récent affiche la valeur la plus faible. Les différences observées entre modalités pourraient s'expliquer par une interaction entre la teneur en carbone organique et le rapport C/N du sol (Annexe 11). En effet, à 0–20 cm, le labour conventionnel présente simultanément les valeurs les plus élevées de carbone organique, de rapport C/N et de MPN, tandis que le non-labour récent, avec une teneur en carbone organique comparable mais un C/N légèrement plus faible, affiche un MPN nettement réduit. Le non-labour ancien montre quant à lui les valeurs les plus basses pour l'ensemble des paramètres. Cette tendance suggère qu'une combinaison favorable entre carbone organique et rapport C/N pourrait favoriser une plus grande abondance de propagules mycorhiziennes. Néanmoins, ces résultats doivent être interprétés avec prudence, car ils reposent sur une seule valeur par modalité, ce qui limite la solidité des conclusions. De plus, le chevauchement des intervalles de confiance ne permet pas de conclure à un effet significatif entre les trois traitements. Ce résultat ne correspond pas aux attentes théoriques, selon lesquelles une abondance plus importante serait attendue en non-labour. Ce type de comportement, bien que minoritaire, a été documenté dans la littérature. Par exemple, dans une étude évaluant l'effet du type de travail du sol et de la présence d'un couvert sur la colonisation mycorhizienne et la présence d'un pathogène dans le maïs, il a été montré qu'en présence d'un couvert, aucune différence significative de colonisation par les champignons mycorhiziens à arbuscules n'était observée entre travail réduit et labour conventionnel (Patanita et al., 2020). Ce résultat suggère que le couvert joue un rôle central dans le maintien du réseau mycélien du sol, atténuant ainsi l'impact du type de travail du sol sur la mycorhization initiale.

De même, une étude analysant l'influence des pratiques de travail du sol sur la survie, la diversité et la capacité infectieuse des CMA a montré que la combinaison sol nu et labour constitue l'un des facteurs les plus défavorables, réduisant fortement la densité de propagules et donc le potentiel de colonisation mycorhizienne (Kabir, 2005). Ce constat renforce le rôle du couvert végétal dans la préservation du réseau mycorhizien. Ainsi, dans les conditions du présent essai, où un couvert était implanté sur toutes les parcelles, le labour ne semble pas avoir constitué un facteur discriminant pour la colonisation par les CMA, l'effet du couvert semblant prévaloir sur l'effet du travail du sol. De plus, le dernier labour du traitement conventionnel ayant été réalisé plus d'un an avant l'échantillonnage, son influence directe sur la population mycorhizienne au moment des mesures c'est probablement dissipé.

5. Cohérence des résultats

Notre étude s'inscrit dans un contexte où de bonnes pratiques agronomiques sont mises en œuvre depuis plusieurs années, avec des rotations diversifiées, des couverts réguliers et une gestion raisonnée des intrants. Dans ce contexte, la conduite d'un couvert commun a probablement contribué à homogénéiser l'état physique, chimique et biologique des sols, limitant ainsi les contrastes habituellement observés entre les différentes modalités de travail du sol. Dans toutes les conditions, la couverture végétale permanente a permis une bonne occupation de l'espace, atténuant les différences structurelles que l'on associe généralement au labour ou au non-labour.

Les effets positifs du non-labour, tels qu'une meilleure stabilité de surface ou une stimulation de l'activité biologique, restent souvent discrets et ne se révèlent pleinement qu'à travers des suivis de longue durée. De même, les effets généralement associés au labour, qu'ils soient bénéfiques comme une

meilleure aération du sol, ou au contraire négatifs comme la diminution rapide de la matière organique entraînant une perte de fertilité, n'ont pas été mise en avant dans le cadre de cette étude. Dans ce contexte, le non-labour ne montre pas d'effet discriminant sur la production ni sur l'efficacité du couvert multi-espèces, qui se développe de manière satisfaisante quel que soit le mode de travail du sol. Cela suggère qu'il peut être avantageux, dans des systèmes comparables, de privilégier le non-labour afin de réduire les coûts et de gagner du temps, sans compromettre la qualité du couvert. Toutefois, le labour occasionnel ne s'est pas révélé non plus, incompatible avec la préservation de la vie biologique du sol, les résultats n'indiquent pas d'impact significatif sur l'abondance ou l'activité des champignons mycorhiziens à arbuscules. Ainsi, un passage ponctuel de la charrue ne semble pas compromettre durablement la fertilité biologique des sols.

VI. Conclusion

L'objectif de ce travail était d'évaluer, dans le contexte d'une parcelle conduite depuis plusieurs années de manière raisonnée (rotation diversifiée, couverts réguliers, gestion mesurée des intrants), l'impact de trois modalités de travail du sol, le labour conventionnel, le non-labour récent et le non-labour ancien sur un couvert d'interculture. L'analyse porte sur le développement du couvert au fil du temps, sur son enracinement, ainsi que sur la teneur en carbone organique et le rapport C/N du sol. L'étude porte également sur un aspect biologique spécifique, à savoir l'abondance des champignons mycorhiziens à arbuscules, afin de proposer une vision intégrée des effets physiques, chimiques et biologiques de ces pratiques culturales. Après avoir présenté un état de la littérature consacré aux dynamiques du sol, aux techniques de travail du sol, au rôle des couverts végétaux et aux champignons mycorhiziens à arbuscules, l'étude présente les objectifs poursuivis et la méthodologie expérimentale mise en place afin d'évaluer, dans un contexte local, les effets de ces différentes modalités. Les résultats obtenus ont ensuite permis d'apporter des éléments de réponse aux questions de recherche, et ont fait l'objet d'une discussion visant à les mettre en parallèle avec les données de la littérature scientifique existante.

Dans les conditions de cet essai, les résultats de l'étude n'ont montré aucun effet discriminant des modalités de travail du sol sur la biomasse aérienne ni sur l'indice de surface foliaire. La seule différence significative concerne le LAI de l'avoine après l'hiver, mais celle-ci semble davantage refléter une variation de présence ou d'absence qu'un véritable gain ou une perte de croissance liée au mode de travail du sol. Concernant l'évolution des espèces, toutes ont bénéficié de conditions d'implantation globalement favorables. La phacélie a joué un rôle majeur dans la fermeture rapide de la canopée avant l'hiver, l'avoine et la roquette ont montré un développement plus modeste, tandis que les trèfles se sont plutôt mal implantés, probablement en raison d'une compétition interspécifique importante pour la lumière et l'espace. La période hivernale a confirmé le rôle central de la roquette, espèce non gélive, pour assurer une couverture continue du sol, même si certaines espèces montrent encore une biomasse résiduelle.

Le développement racinaire est resté globalement superficiel, avec une seule différence significative observée entre 17 et 35 cm de profondeur, où le labour présente des longueurs racinaires supérieures au non-labour récent. Cette observation pourrait s'expliquer par une meilleure porosité induite par le labour ou, inversement, une compaction liée au non-labour, mais aucune conclusion définitive ne peut être avancée, d'autant plus que le dernier labour a été réalisé plus d'un an avant l'échantillonnage. Les résultats relatifs à la chimie du sol révèlent une accumulation de carbone organique essentiellement en surface, sans contraste marqué entre traitements, et avec des valeurs globalement faibles pour le type de sol étudié. Le rapport C/N reste correct en surface mais tend à diminuer avec la profondeur. Le non-labour récent présente une stabilité particulière du C/N en profondeur, ce résultat apparaît assez surprenant et difficile à expliquer par rapport aux résultats pour les deux autres modalités. Par ailleurs, il convient de rappeler qu'une certaine limite méthodologique subsiste en raison du faible nombre d'échantillons disponibles. Enfin, l'analyse de l'abondance et de l'activité des champignons mycorhiziens à arbuscules suggère qu'une combinaison favorable entre carbone organique et rapport C/N pourrait favoriser une plus grande abondance de propagules mycorhiziennes. Toutefois, la superposition des intervalles de confiance ne permet pas de mettre en évidence un effet clair des modalités de travail du sol, et ce malgré des résultats statistiquement plausibles.

Dans les conditions expérimentales de cette étude, le mode de travail du sol ne semble pas avoir eu d'impact significatif sur le développement du couvert, les dynamiques observées apparaissent davantage

liées aux caractéristiques propres des espèces et aux conditions hivernales qu'au type de travail du sol. Ces résultats suggèrent que le non-labour, qu'il soit récent ou ancien, ne constitue pas une contrainte majeure pour l'implantation et la croissance d'un couvert multi-espèces, et qu'il peut être considéré comme une alternative viable au labour conventionnel, permettant d'économiser du temps et des ressources sans compromettre l'efficacité du couvert. À l'inverse, un labour annuel ne semble pas influencer de manière importante, sur le long terme, la dynamique des champignons mycorhiziens à arbuscules, véritable levier biologique du sol, et un passage ponctuel de la charrue ne paraît pas incompatible avec le maintien de la dynamique de ces organismes.

Certaines limites méthodologiques peuvent cependant avoir contribué à l'absence d'effet apparent des différentes modalités de travail du sol. En effet, la structure d'échantillonnage est hétérogène selon les variables, la biomasse aérienne et le LAI disposent d'un nombre de répétitions suffisant, mais la biomasse racinaire n'est représentée que par un échantillon par bloc, et les analyses de carbone organique, de rapport C/N et d'activité mycorhizienne reposent sur des échantillons composites, limitant les possibilités de comparaison statistique directe. Le choix d'un prélèvement racinaire réalisé après l'hiver combiné à l'utilisation d'une carotteuse de petit diamètre a probablement conduit à une sous-estimation des racines et des axes pivotants, ainsi qu'à des pertes différentielles liées au gel. Enfin, la précision des mesures de terrain, notamment pour les biomasses et les racines fines, a pu introduire un biais supplémentaire dans les données. L'ensemble de ces facteurs, ajouté à l'effet homogénéisant d'une couverture similaire, a pu masquer des différences réelles entre modalités.

De plus, l'étude s'est intéressée à plusieurs aspects rarement abordés conjointement dans la littérature scientifique, la dynamique aérienne et racinaire du couvert, la chimie du sol et l'activité mycorhizienne. Ce choix, bien qu'il permette une vision intégrée, a limité la profondeur d'analyse de chaque facteur pris isolément. Pour renforcer la robustesse des résultats, il serait pertinent, à l'avenir, de concentrer l'analyse sur un paramètre à la fois, d'augmenter la puissance d'échantillonnage et de répéter les mesures à plusieurs moments clés du cycle du couvert. L'élaboration d'un nouveau plan expérimental en collaboration avec un statisticien permettrait également de garantir la solidité des analyses et d'optimiser l'interprétation des résultats.

Malgré ses limites, cette étude apporte des éléments de compréhension utiles à la réflexion sur l'impact des techniques de travail du sol sur les couverts végétaux. Elle met en évidence l'importance d'intégrer conjointement les dimensions physiques, chimiques et biologiques pour appréhender toute la complexité des dynamiques sol-plante-climat. Ainsi, les résultats renforcent l'idée qu'au-delà du choix d'une technique particulière, c'est la cohérence globale du système de culture, associant gestion raisonnée des intrants, rotations diversifiées, travail du sol et couverts, qui constitue le véritable levier de durabilité des agroécosystèmes.

VII. Références bibliographiques

- Abdollahi, L., & Munkholm, L. J. (2014). Tillage System and Cover Crop Effects on Soil Quality : I. Chemical, Mechanical, and Biological Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 78(1), 262-270. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.07.0301>
- Ahmad, N., Virk, A. L., Nizami, A.-S., Lal, R., Chang, S. X., Hafeez, M. B., Guo, X., Wang, R., Wang, X., Iqbal, H. M. W., Albasher, G., & Li, J. (2024). Carbon trade-off and energy budgeting under conventional and conservation tillage in a rice-wheat double cropping system. *Journal of Environmental Management*, 351, 119888. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119888>
- Alguacil, M. M., Lumini, E., Roldán, A., Salinas-García, J. R., Bonfante, P., & Bianciotto, V. (2008). The Impact of Tillage Practices on Arbuscular Mycorrhizal Fungal Diversity in Subtropical Crops. *Ecological Applications*, 18(2), 527-536. <https://doi.org/10.1890/07-0521.1>
- Allam, M., Radicetti, E., Ben Hassine, M., Jamal, A., Abideen, Z., & Mancinelli, R. (2023). A Meta-Analysis Approach to Estimate the Effect of Cover Crops on the Grain Yield of Succeeding Cereal Crops within European Cropping Systems. *Agriculture*, 13(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091714>
- Angon, P. B., Anjum, N., Akter, Mst. M., Kc, S., Suma, R. P., & Jannat, S. (2023). An Overview of the Impact of Tillage and Cropping Systems on Soil Health in Agricultural Practices. *Advances in Agriculture*, 2023(1), 8861216. <https://doi.org/10.1155/2023/8861216>
- ARVALIS. (2021). *Résidus phytopharmaceutiques - Labour ou TCS : Quel est le mieux pour préserver la qualité de l'eau ?* <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/labour-ou-tcs-quel-est-le-mieux-pour-preserver-la-qualite-de-leau>
- Bedoussac, L., Journet, E.-P., Hauggaard-Nielsen, H., Naudin, C., Corre-Hellou, G., Jensen, E. S., Prieur, L., & Justes, E. (2015). Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(3), 911-935. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0277-7>
- Berruti, A., Borriello, R., Orgiazzi, A., & Barbera Antonio, C. (2014). (PDF) Arbuscular Mycorrhizal Fungi and their Value for Ecosystem Management. In *ResearchGate*. <https://doi.org/10.5772/58231>
- Blaszczyk, N., Labreuche, J., Bouthier, A., Métais, P., Degan, F., Ferchaud, F., & Mary, B. (2019). Le travail du sol n'agit pas ou peu sur le stock global de carbone. *Perspectives Agricoles*, 467, 42-48.
- Bodin, G. (2023). *DÉFINITION : Agriculture conventionnelle*. dahu.bio. <https://www.dahu.bio/base-de-connaissance/agriculture/agriculture-conventionnelle>
- Bonfante, P., & Genre, A. (2010). (PDF) Mechanisms underlying beneficial plant-fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.1038/ncomms1046>
- Botta, G. F., Antille, D. L., Nardon, G. F., Rivero, D., Bienvenido, F., Contessotto, E. E., Ezquerro-Canalejo, A., & Ressia, J. M. (2022). Zero and controlled traffic improved soil physical

- conditions and soybean yield under no-tillage. *Soil and Tillage Research*, 215, 105235. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105235>
- Bowles, T. M., Jackson, L. E., Loehrer, M., & Cavagnaro, T. R. (2017). Ecological intensification and arbuscular mycorrhizas : A meta-analysis of tillage and cover crop effects. *Journal of Applied Ecology*, 54(6), 1785-1793. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12815>
- Brandsæter, L. O., Heggen, H., Riley, H., Stubhaug, E., & Henriksen, T. M. (2008). Winter survival, biomass accumulation and N mineralization of winter annual and biennial legumes sown at various times of year in Northern Temperate Regions. *European Journal of Agronomy*, 28(3), 437-448. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.11.013>
- Breil, N. L., Lamaze, T., Bustillo, V., Marcato-Romain, C.-E., Coudert, B., Queguiner, S., & Jarosz-Pellé, N. (2023). Combined impact of no-tillage and cover crops on soil carbon stocks and fluxes in maize crops. *Soil and Tillage Research*, 233, 105782. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105782>
- Brian Boyce. (2022, juin 22). Defined : The types of tillage in modern agriculture. *AGDAILY*. <https://www.agdaily.com/crops/defined-types-of-tillage-in-modern-agriculture/>
- British Ecological Society. (2025). *Regenerative Agriculture in the UK: An Ecological Perspective*. British Ecological Society. <https://www.britishecologicalsociety.org/our-policy-work/>
- Brito, I., Goss, M. J., de Carvalho, M., Chatagnier, O., & van Tuinen, D. (2012). Impact of tillage system on arbuscular mycorrhiza fungal communities in the soil under Mediterranean conditions. *Soil and Tillage Research*, 121, 63-67. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.01.012>
- Cadoux, S., Sauzet, G., Valantin-Morison, M., Pontet, C., Champolivier, L., Robert, C., Lieven, J., Flénet, F., Mangenot, O., Fauvin, P., & Landé, N. (2015). Intercropping frost-sensitive legume crops with winter oilseed rape reduces weed competition, insect damage, and improves nitrogen use efficiency. *OCL*, 22(3), D302. <https://doi.org/10.1051/ocl/2015014>
- Chave, M., Dufils, A., Perrin, B., Paut, R., & Tchamitchian, M. (2017). *Les mycorhizes : Des réseaux vivants au service des cultures*. INRA Antilles-Guyane.
- Cookson, W. R., Murphy, D. V., & Roper, M. M. (2008). Characterizing the relationships between soil organic matter components and microbial function and composition along a tillage disturbance gradient. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(3), 763-777. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.10.011>
- Cordeau, Stéphane, Maron, Pierre-André, Bertrand, Mathieu, & Omon, Benjamin. (2021). *L'agriculture de conservation des sols* (Éditions France Agricole).
- Cotrufo, F., & Lavalée, J. (2020, février 6). *Soil carbon is a valuable resource, but all soil carbon is not created equal*. The Conversation. <http://theconversation.com/soil-carbon-is-a-valuable-resource-but-all-soil-carbon-is-not-created-equal-129175>
- Da Costa Soares, S., Fernández-Soler, C., Carrillo-López, E., & Martínez-Mena, M. (2025). Soil organic matter fractions in the topsoil and subsoil of woody crop systems : Impact of reduced tillage plus cover crops under rainfed semi-arid Mediterranean conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 393, 109821. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109821>

- Draye, X., Symul, L., & Biot, N. (2025). *Cours : LBRAI2222—Compléments de biométrie et plans expérimentaux* | MoodleUCLouvain. <https://moodle.uclouvain.be/course/view.php?id=4482>
- Draye, X., Symul, L., & Rongione, C. (2025). *Cours : LBIRA2110—Modélisation et exploration des données multivariées* | MoodleUCLouvain. <https://moodle.uclouvain.be/course/view.php?id=950>
- Drijber, R. A., Doran, J. W., Parkhurst, A. M., & Lyon, D. J. (2000). Changes in soil microbial community structure with tillage under long-term wheat-fallow management. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(10), 1419-1430. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00060-2](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00060-2)
- Duiker, S. W., & Beegle, D. B. (2006). Soil fertility distributions in long-term no-till, chisel/disk and moldboard plow/disk systems. *Soil and Tillage Research*, 88(1), 30-41. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.04.004>
- Elhaj, H., Rahman, A., & H Nayel, M. (2021). The Effects of Tillage Systems on Some Soil Physical Properties and Grain Yield of Bread Wheat Under Tropical Conditions. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/352413513_The_Effects_of_Tillage_Systems_on_Some_Soil_Physical_Properties_and_Grain_Yield_of_Bread_Wheat_Under_Tropical_Conditions
- FAO, O. des N. U. pour l'alimentation et. (2018). *Carbone organique du sol : Une richesse invisible*. Food & Agriculture Org.
- Fiennes, J. (2025). Foreword. In *Regenerative agriculture in the UK: An ecological perspective* (British Ecological Society, p. 4).
- Fujiyama, S., Fujita, M., & Shinshu University. (2001). Comparison of soil fauna (oribatids and enchytraeids) between conventional and organic (tillage and no-tillage practices) farming crop fields in Japan. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/282396191_Comparison_of_soil_fauna_oribatids_and_enchytraeids_between_conventional_and_organic_tillage_and_no-tillage_practices_farming_crop_fields_in_Japan
- Gaborit, A., & Maurincomme, J. (2023). *Grandes cultures biologiques : Les clés de la réussite - Chambre d'agriculture France*. <https://chambres-agriculture.fr/sinformer/nos-ressources/toutes-les-publications/publication/grandes-cultures-biologiques-les-cles-de-la-reussite>
- García-González, I., Hontoria, C., Gabriel, J. L., Alonso-Ayuso, M., & Quemada, M. (2018). Cover crops to mitigate soil degradation and enhance soil functionality in irrigated land. *Geoderma*, 322, 81-88. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.024>
- García-González, I., Quemada, M., Gabriel, J. L., Alonso-Ayuso, M., & Hontoria, C. (2018). Legacy of eight-year cover cropping on mycorrhizae, soil, and plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 181(6), 818-826. <https://doi.org/10.1002/jpln.201700591>
- Gobat, J.-M., Aragno, M., & Matthey, W. (2010). *Le sol vivant : Bases de pédologie, biologie des sols* (3e éd. revue et augmentée). Presses polytechniques et universitaires romandes.

- Hedde, M., & Zwicke, M. (2020, janvier 10). *Faune du sol et production végétale* | Planet-Vie. <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/ecologie/production-agricole-agrosystemes/faune-du-sol-et-production-vegetale>
- Henneron, L., Bernard, L., Hedde, M., Pelosi, C., Villenave, C., Chenu, C., Bertrand, M., Girardin, C., & Blanchart, E. (2015). Fourteen years of evidence for positive effects of conservation agriculture and organic farming on soil life. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(1), 169-181. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0215-8>
- Henri Regnaul, Xavier Arnauld de Sartre, & Catherine Regnault-Roger. (2014). *Les révolutions agricoles en perspective* | Réseau wallon PAC. <https://reseauwallonpac.be/fr/ressources/les-revolutions-agricoles-en-perspective>
- Higo, Masao, Tatewaki, Yuya, Iida, Karen, Yokota, Kana, & Isobe, Katsunori. (2020). (PDF) Amplicon sequencing analysis of arbuscular mycorrhizal fungal communities colonizing maize roots in different cover cropping and tillage systems. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58942-3>
- Hinsinger, P. (2010). *Les racines au cœur du fonctionnement de la rhizosphère*.
- Holland, J. M., & Reynolds, C. J. M. (2003). The impact of soil cultivation on arthropod (Coleoptera and Araneae) emergence on arable land. *Pedobiologia*, 47(2), 181-191. <https://doi.org/10.1078/0031-4056-00181>
- IRM - Année. (s. d.). KMI. <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/bilans-climatologiques/2024/annee>
- IRM - Novembre. (s. d.). KMI. <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/bilans-climatologiques/2024/novembre>
- J. Somasundaram, R. S. Chaudhary, D. Awanish Kumar, A. K. Biswas, N. K. Sinha, M. Mohanty, K. M. Hati, P. Jha, M. Sankar, A. K. Patra, R. Dalal, & S. K. Chaudhary. (2018). *Effect of contrasting tillage and cropping systems on soil aggregation, carbon pools and aggregate-associated carbon in rainfed Vertisols*. <https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ejss.12692>
- Jabran, K., Mahajan, G., Sardana, V., & Chauhan, B. S. (2015). Allelopathy for weed control in agricultural systems. *Crop Protection*, 72, 57-65. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.03.004>
- Jarvis, B., Wilrich, C., & Wilrich, P. -T. (2010). Reconsideration of the derivation of Most Probable Numbers, their standard deviations, confidence bounds and rarity values. *Journal of Applied Microbiology*, 109(5), 1660-1667. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2010.04792.x>
- Jastrow, J. D., Miller, R. M., & Lussenhop, J. (1998). Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie1. *Soil Biology and Biochemistry*, 30(7), 905-916. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(97\)00207-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00207-1)

- Jáuregui, I., Ancín, M., García-Mina, J. M., Zamarreño, A. M., Iglesias-Sanchez, A., Florez-Sarasa, I., & Aranjuelo, I. (2025). Permanent crop cover as a strategy for drought-resistant viticulture : Insights on how rhizosphere metagenomics influences leaf-level -omics for an enhanced overall plant response. *Frontiers in Plant Science*, 16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1543171>
- Julien, J.-L., Bourrié, G., Bruand, A., Feller, C., & Tessier, D. (2022). *Capacité d'échange cationique du sol*. https://mots-agronomie.inrae.fr/index.php/Capacit%C3%A9_d%27%C3%A9change_cationique_du_sol
- Justes, E., Mary, B., & Nicolardot, B. (2009). Quantifying and modelling C and N mineralization kinetics of catch crop residues in soil : Parameterization of the residue decomposition module of STICS model for mature and non mature residues. *Plant and Soil*, 325(1), 171-185. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9966-4>
- Kabir, Z. (2005). Tillage or no-tillage : Impact on mycorrhizae. *Canadian Journal of Plant Science*, 85(1), 23-29.
- Karlen, D. L., Kovar, J. L., Cambardella, C. A., & Colvin, T. S. (2013). Thirty-year tillage effects on crop yield and soil fertility indicators. *Soil and Tillage Research*, 130, 24-41. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.02.003>
- Keesing, F., Belden, L. K., Daszak, P., Dobson, A., Harvell, C. D., Holt, R. D., Hudson, P., Jolles, A., Jones, K. E., Mitchell, C. E., Myers, S. S., Bogich, T., & Ostfeld, R. S. (2010). Impacts of biodiversity on the emergence and transmission of infectious diseases. *Nature*, 468(7324), 647-652. <https://doi.org/10.1038/nature09575>
- Knowler, D., & Bradshaw, B. (2007). Farmers' adoption of conservation agriculture : A review and synthesis of recent research. *Food Policy*, 32(1), 25-48. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2006.01.003>
- Kopittke, P. M., Menzies, N. W., Wang, P., McKenna, B. A., & Lombi, E. (2019). Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International*, 132, 105078. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>
- Kriegshauser, C. (2024). *The Economic Case for Minimal Tillage*. Soil and Water Outcomes Fund. <https://theoutcomesfund.com/in-the-news/economics-of-minimal-tillage>
- Kubíková, Z., Smejkalová, H., Hutýrová, H., Kintl, A., & Elbl, J. (2022). Effect of Sowing Date on the Development of Lacy Phacelia (Phacelia Tanacetifolia Benth.). *Plants*, 11(22), 3177. <https://doi.org/10.3390/plants11223177>
- Labreuche, J., C. Le Souder, P. Castillon, J.-F. Ouvry, J.-C. Germon, & Stéphane de Tourdonnet. (2007). *Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturelles Sans Labour (TCSL) en France*. A2C le site de l'agriculture de conservation. <https://agriculture-de-conservation.com/Evaluation-des-impacts.html>
- Lange, M., Habekost, M., Eisenhauer, N., Roscher, C., Bessler, H., Engels, C., Oelmann, Y., Scheu, S., Wilcke, W., Schulze, E.-D., & Gleixner, G. (2014). Biotic and Abiotic Properties Mediating Plant Diversity Effects on Soil Microbial Communities in an Experimental Grassland. *PLOS ONE*, 9(5), e96182. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0096182>

- Larousse, É. (s. d.). *Définitions : Sol - Dictionnaire de français Larousse*. Consulté 26 juillet 2025, à l'adresse <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/sol/73257>
- Lemanceau, P., Philippot, L., & Boiffin, A. (2006). *Guidelines for soil description* (4th ed). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Leskovšek, R., Eler, K., & Zamljen, S. A. (2025). Weed suppression and maize yield influenced by cover crop mixture diversity and tillage. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 383, 109530. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109530>
- Mariage, C. (2019). *La fertilité chimique des sols*. REQUASUD, Gembloux Agro-Bio Tech
- Martin, F. M., & van der Heijden, M. G. A. (2024). The mycorrhizal symbiosis : Research frontiers in genomics, ecology, and agricultural application. *New Phytologist*, 242(4), 1486-1506. <https://doi.org/10.1111/nph.19541>
- Martínez, E., Fuentes, J.-P., Silva, P., Valle, S., & Acevedo, E. (2008). Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile. *Soil and Tillage Research*, 99(2), 232-244. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.02.001>
- Merkle, M., Schumacher, M., & Gerhards, R. (2024). Impact of different establishment methods for summer-sown cover crops in Southwestern Germany on their weed suppression properties. *European Journal of Agronomy*, 152, 127031. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127031>
- Minette, S. (2009). *Caractéristiques des principales cultures intermédiaires*. Chambre d'Agriculture Poitou-Charentes.
- Miura, F., Nakamoto, T., Kaneda, S., Okano, S., Nakajima, M., & Murakami, T. (2008). Dynamics of soil biota at different depths under two contrasting tillage practices. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(2), 406-414. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.09.004>
- Munkholm, L. J., Heck, R. J., & Deen, B. (2013). Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. *Soil and Tillage Research*, 127, 85-91. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.02.007>
- N'Dayegamiye, A., & Mehuys, G. (2008). *Évaluation des effets à long terme du semis direct et du labour sur les propriétés du sol et les rendements des cultures*.
- Osterholz, W. R., Culman, S. W., Herms, C., Joaquim De Oliveira, F., Robinson, A., & Doohan, D. (2021). Knowledge gaps in organic research : Understanding interactions of cover crops and tillage for weed control and soil health. *Organic Agriculture*, 11(1), 13-25. <https://doi.org/10.1007/s13165-020-00313-3>
- Patanita, M., Campos, M. D., Félix, M. do R., Carvalho, M., & Brito, I. (2020). Effect of Tillage System and Cover Crop on Maize Mycorrhization and Presence of Magnaporthe oryzae. *Biology*, 9(3), 46. <https://doi.org/10.3390/biology9030046>

- Patel, S., Singh, A., Sawyer, J. E., & Lundvall, J. P. (2024). Root and shoot biomass and nutrient composition of winter rye cover crop following corn and soybean. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 7(4), e70017. <https://doi.org/10.1002/agg2.70017>
- Paye, W. S., Thapa, V. R., & Ghimire, R. (2024). Limited impacts of occasional tillage on dry aggregate size distribution and soil carbon and nitrogen fractions in semi-arid drylands. *International Soil and Water Conservation Research*, 12(1), 96-106. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.04.005>
- Pellerin, S., Bamière, L., & Launay, C. (2020). *Stocker du carbone dans les sols français : Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? – Synthèse du rapport d'étude* (p. 114). INRAE (France).
- Petermann, B. J., Acosta-Martinez, V., Laza, H. E., Lewis, K., Steffan, J., & Slaughter, L. C. (2024). Soil bacterial and fungal microbiomes under cotton production are more sensitive to tillage and cover crops than irrigation level in a semi-arid sandy soil. *Applied Soil Ecology*, 204, 105711. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105711>
- Pitann, B., & Mühlhling, K. H. (2024). Oat—An alternative crop under waterlogging stress? *Frontiers in Plant Science*, 15, 1386039. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1386039>
- PROTECT'eau - Dimitri Wou. (2025). *Implantation et destruction : Mes obligations* | PROTECT'eau. <https://www.protecteau.be/fr/implantation-et-destruction-mes-obligations>
- Rocco, S., Munkholm, L. J., & Jensen, J. L. (2024). Long-term soil quality and C stock effects of tillage and cover cropping in a conservation agriculture system. *Soil and Tillage Research*, 241, 106129. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106129>
- Roger-Estrade, J. J., Labreuche, J., & Boizard, H. H. (2014). *Importance du travail du sol : Typologie des modes de mise en œuvre et effet sur le rendement des cultures*.
- Rust, B., & Williams, J. D. (2010). *How Tillage Affects Soil Erosion and Runoff*.
- Sapkota, T. B., Mazzoncini, M., Bàrberi, P., Antichi, D., & Silvestri, N. (2012). Fifteen years of no till increase soil organic matter, microbial biomass and arthropod diversity in cover crop-based arable cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(4), 853-863. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0079-0>
- Schmidt, M. W. I., Torn, M. S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D. A. C., Nannipieri, P., Rasse, D. P., Weiner, S., & Trumbore, S. E. (2011a). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478(7367), 49-56. <https://doi.org/10.1038/nature10386>
- Schmidt, M. W. I., Torn, M. S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D. A. C., Nannipieri, P., Rasse, D. P., Weiner, S., & Trumbore, S. E. (2011b). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478(7367), 49-56. <https://doi.org/10.1038/nature10386>
- Service public de Wallonie. (2024). *Services écosystémiques (SES)—Série* | Géoportail de la Wallonie. <https://geoportail.wallonie.be/catalogue/a86c95ae-44e7-4e8e-b998-cac59d8171fd.html>

- Smith, C. R., Blair, P. L., Boyd, C., Cody, B., Hazel, A., Hedrick, A., Kathuria, H., Khurana, P., Kramer, B., Muterspaw, K., Peck, C., Sells, E., Skinner, J., Tegeler, C., & Wolfe, Z. (2016). Microbial community responses to soil tillage and crop rotation in a corn/soybean agroecosystem. *Ecology and Evolution*, 6(22), 8075-8084. <https://doi.org/10.1002/ece3.2553>
- Spedding, T. A., Mehuys, G. R., Hamel, C., & Madramootoo, C. A. (2004). *Soil microbial dynamics in maize-growing soil under different tillage and residue management systems—ScienceDirect*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071703003560>
- SPW. (s. d.). *Pac 2023-2027—Description des interventions—Portail de l'agriculture wallonne*. Agriculture en Wallonie. Consulté 7 juillet 2025, à l'adresse <https://agriculture.wallonie.be/home/aides/pac-2023-2027-description-des-interventions.html>
- Strudley, M. W., Green, T. R., & Ascough, J. C. (2008). Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time : State of the science. *Soil and Tillage Research*, 99(1), 4-48. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.01.007>
- Stürmer, S. L. (2012). A history of the taxonomy and systematics of arbuscular mycorrhizal fungi belonging to the phylum Glomeromycota. *Mycorrhiza*, 22(4), 247-258. <https://doi.org/10.1007/s00572-012-0432-4>
- Suma, A., Sreenivasan, K., Singh, A. K., & Radhamani, J. (2013). Role of Relative Humidity in Processing and Storage of Seeds and Assessment of Variability in Storage Behaviour in Brassica spp. And Eruca sativa. *The Scientific World Journal*, 2013, 504141. <https://doi.org/10.1155/2013/504141>
- Sumberg, J., & Giller, K. E. (2022). What is 'conventional' agriculture? *Global Food Security*, 32, 100617. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2022.100617>
- Szumigalski, A. R., & Van Acker, R. C. (2008). Land Equivalent Ratios, Light Interception, and Water Use in Annual Intercrops in the Presence or Absence of In-Crop Herbicides. *Agronomy Journal*, 100(4), 1145-1154. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0343>
- Tahat, M., Alananbeh, K., Othman, Y., & Leskovar, D. (2020). Soil Health and Sustainable Agriculture. *Sustainability*, 12(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/su12124859>
- Thomas, F., & Archambeaud, M. (2013). *Les couverts végétaux* (Éditions France Agricole).
- Thorup-Kristensen, K., Magid, J., & Jensen Lars, S. (2003). Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones | Request PDF. *ResearchGate*. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(02\)79005-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)79005-6)
- Tosti, G., & Thorup-Kristensen, K. (2010). Using coloured roots to study root interaction and competition in intercropped legumes and non-legumes. *Journal of Plant Ecology*, 3(3), 191-199. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtq014>
- Tribouillois, H., Dürr, C., Demilly, D., & Wagner, M.-H. (2016). *Determination of Germination Response to Temperature and Water Potential for a Wide Range of Cover Crop Species and Related Functional Groups*. https://www.researchgate.net/publication/306263849_Determination_of_Germination_Respon

se_to_Temperature_and_Water_Potential_for_a_Wide_Range_of_Cover_Crop_Species_and_Related_Functional_Groups

- Uribe, N., Corzo, G., Quintero, M., van Griensven, A., & Solomatine, D. (2018). Impact of conservation tillage on nitrogen and phosphorus runoff losses in a potato crop system in Fuquene watershed, Colombia. *Agricultural Water Management*, 209, 62-72. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.006>
- Van der Wal, A., & de Boer, W. (2017). Dinner in the dark : Illuminating drivers of soil organic matter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 105, 45-48. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.11.006>
- Verbruggen, E., & Toby Kiers, E. (2010). Evolutionary ecology of mycorrhizal functional diversity in agricultural systems. *Evolutionary Applications*, 3(5-6), 547-560. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2010.00145.x>
- Vice-recteur aux affaires étudiantes. (2023). *Utilisation des intelligences artificielles génératives : Note à l'attention des étudiantes et étudiants de l'UCLouvain*. Université catholique de Louvain. <https://uclouvain.be/fr/etudier/reglement-general-des-etudes-et-des-examens.html>
- Villenave, C., Oumar, A., & Rabary, B. (2009). Analyse du fonctionnement biologique du sol par l'étude de la nématofaune : Semis direct versus labour sur les hautes terres près d'Antsirabé (Madagascar). *Etude et Gestion des Sols*.
- Vukicevich, E., Lowery, T., Bowen, P., Úrbez-Torres, J. R., & Hart, M. (2016). Cover crops to increase soil microbial diversity and mitigate decline in perennial agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(3), 48. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0385-7>
- Wade, Ruth, N., Amoo, A., Cooper, H., Magkourilou, E., Neal, A., Wright, H., Norton, L., Dodsworth, J., & Neilson, R. (2025). Chapter 3 : Ecological evidence : Assessing benefits and indicators. In *Regenerative agriculture in the UK: An ecological perspective* (British Ecological Society, p. 45-72). <https://www.britishecologicalsociety.org/our-policy-work/>
- WalOnMap. (s. d.). *Accueil | Géoportail de la Wallonie*. <https://geoportail.wallonie.be/home.html>
- Wang, X., Zhou, B., Sun, X., Yue, Y., Ma, W., & Zhao, M. (2015). Soil Tillage Management Affects Maize Grain Yield by Regulating Spatial Distribution Coordination of Roots, Soil Moisture and Nitrogen Status. *PLOS ONE*, 10(6), e0129231. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129231>
- Wang, Y., Huang, Q., Gao, H., Zhang, R., Yang, L., Guo, Y., Li, H., Awasthi, M. K., & Li, G. (2021). Long-term cover crops improved soil phosphorus availability in a rain-fed apple orchard. *Chemosphere*, 275, 130093. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130093>
- Wendling, M., Büchi, L., Amossé, C., Sinaj, S., Walter, A., & Charles, R. (2016). Influence of root and leaf traits on the uptake of nutrients in cover crops. *Plant and Soil*, 409(1), 419-434. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2974-2>

- Whalen, J., Ziadi, N., Schoenau, J., Paré, M. C., Burton, D., & Bruulsema, T. (2021). *Cycles des éléments nutritifs du sol*. <https://www.saskoer.ca/soilsciencefrench/chapter/soil-nutrient-cycling/>
- Wilke, B. J., & Snapp, S. S. (2008). Winter cover crops for local ecosystems : Linking plant traits and ecosystem function. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(4), 551-557. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3149>
- Wolińska, A., Kruczyńska, A., Podlewski, J., Słomczewski, A., Grządziel, J., Gałązka, A., & Kuźniar, A. (2022). Does the Use of an Intercropping Mixture Really Improve the Biology of Monocultural Soils?—A Search for Bacterial Indicators of Sensitivity and Resistance to Long-Term Maize Monoculture. *Agronomy*, 12(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030613>
- Wolińska, A., Rekosz-Burlaga, H., Goryluk-Salmonowicz, A., Błaszczuk, M. K., & Stępniewska, Z. (2015). Bacterial Abundance and Dehydrogenase Activity in Selected Agricultural Soils from Lublin Region. *Polish Journal of Environmental Studies*, 24(6), 2677-2682. <https://doi.org/10.15244/pjoes/59323>
- Wu, H., Ran, L., Wang, J., Yan, S., Xue, Y., Xia, F., Shi, H., Wei, W., Zhang, Y., & Zheng, S. (2025). Tillage effects on maize yield, N use efficiency and GHG emissions under parallel N application in Northwest China. *Field Crops Research*, 322, 109735. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109735>
- Yuan, L. (2022). *New dynamic vegetation model constructed for soil mineralized nitrogen prediction*. <https://phys.org/news/2022-04-dynamic-vegetation-soil-mineralized-nitrogen.html>
- Zhang, B., Li, Y., Ren, T., Tian, Z., Wang, G., He, X., & Tian, C. (2014). Short-term effect of tillage and crop rotation on microbial community structure and enzyme activities of a clay loam soil. *Biology and Fertility of Soils*, 50(7), 1077-1085. <https://doi.org/10.1007/s00374-014-0929-4>
- Zhenggang Du, Ensheng Weng, Lifeng Jiang, Yiqi Luo, Jianyang Xia, & Xuhui Zhou. (2018). *Carbon–nitrogen coupling under three schemes of model representation : A traceability analysis*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-illustrating-the-major-carbon-C-and-nitrogen-N-flows-and-stores-in_fig2_328701264

VIII. Annexes

1. Obligations réglementaires relatives aux cultures intermédiaires et à la couverture des sols en Wallonie

Programme de Gestion durable de l'azote en agriculture, qui vise à réduire la pollution des eaux souterraines et de surface par les nitrates d'origine agricole, les cultures intermédiaires après récolte constituent une mesure efficace et sont soumises à différentes réglementations (PROTECT'eau, 2025).

- Pour l'ensemble du territoire wallon, lorsqu'un épandage de matière organique a lieu entre le 1er juillet et le 15 septembre sur terre arable, une Culture Intermédiaire Piège à Nitrates (CIPAN) doit être implantée au plus tard le 15 septembre et maintenue jusqu'au 15 novembre inclus de manière à couvrir 75% du sol de la parcelle. Cette obligation ne s'applique pas lorsque la culture suivante est une culture d'hiver ou si l'épandage est limité à 80 kg d'azote/ha sur pailles enfouies.
- Plus spécifiquement dans les zones vulnérables, une CIPAN doit être implantée avant le 15 septembre sur 40 % des surfaces récoltées avant le 1er septembre et qui seront suivies d'une culture implantée après le 1er janvier. Ce couvert doit être maintenu jusqu'au 15 novembre inclus et couvrir au moins 75 % de la parcelle dès le 1er novembre.
- Pour le cas particulier des légumineuses récoltées avant le 15 août et suivies d'une culture de froment, un couvert doit être présent au plus tard le 1er septembre et maintenu jusqu'au 1er octobre. Cette obligation ne s'applique pas si une autre culture est mise en place avant l'implantation du froment.
- La composition des CIPAN doit également respecter les critères suivants : la somme des rapports entre la densité de semis de chaque légumineuse et sa densité en culture pure ne peut pas dépasser 0,5, et la somme des rapports entre la densité de semis de chaque espèce non-légumineuse et sa densité en culture pure doit être supérieure à 0,5.

Zones vulnérables : Une zone vulnérable est un territoire où les eaux dépassent ou risquent de dépasser 50 mg/l de nitrates, ou sont menacées d'eutrophisation. En Wallonie, elle couvre plus de 70 % de la surface agricole utile, notamment le nord du sillon Sambre-et-Meuse, le nord de Liège, le sud namurois et le Condroz. Elle inclut tous les captages dépassant la norme et la majorité de ceux entre 25 et 50 mg/l.

De plus pour répondre aux obligation de la conditionnalité des aides de la politique agricole commune (PAC 2023 -2027), les agriculteurs doivent respecter plusieurs obligations liées à la protection des sols, à la rotation des cultures et au maintien de zones non productives pour pouvoir bénéficier des aides (SPW, s. d.).

- Concernant la protection des sols pendant les périodes sensibles (BCAE 6), il est exigé d'assurer une couverture d'au moins 80 % des terres arables entre le 15 septembre et le 15 novembre lorsque ces parcelles sont destinées à un semis à partir du 1er janvier de l'année suivante. Cette couverture peut être constituée de résidus de culture sur au moins 75 % de la parcelle, de repousses de céréales ou d'oléagineux couvrant 75 % de la surface, ou d'une interculture ou culture secondaire implantée avant le 1er novembre. Sur les terres arables présentant un risque érosif, c'est-à-dire celles avec une pente supérieure ou égale à 10 %, une couverture totale est obligatoire entre le 15 septembre et le 31 décembre. Celle-ci peut consister en des résidus de

culture, des repousses de céréales ou d'oléagineux, ou une culture dérobée ou fixatrice d'azote implantée au plus tard le 15 septembre.

- Pour la préservation du potentiel des sols (BCAE 7), si aucun changement de culture n'est réalisé sur au moins 35 % de la surface des terres arables, une interculture doit être implantée entre deux cultures identiques sur ces surfaces et maintenue pendant au moins trois mois. Dans le cas de la monoculture de maïs pratiquée plus de trois ans sur la même parcelle, il est également obligatoire d'implanter chaque année une interculture, également maintenue pendant trois mois minimum.
- Concernant le maintien des zones et des éléments non productifs (BCAE 8), l'agriculteur doit soit consacrer 4 % de ses terres arables à des zones et éléments non productifs, soit 3 % à ces zones et 4 % à des cultures dérobées et/ou légumineuses. Dans ce dernier cas, la surface des cultures dérobées est pondérée par un coefficient de 0,3, nécessitant donc environ 13,34 % de cultures dérobées pour atteindre l'objectif.
- Enfin, en complément de ces obligations, les agriculteurs peuvent volontairement prolonger la présence de leurs intercultures au-delà du 31 décembre grâce à l'éco-régime « couverture longue du sol ». Dans ce cadre, ils doivent maintenir le couvert développé entre le 1er janvier et le 15 février, limiter l'activité agricole à un éventuel pâturage sans destruction mécanique ou chimique du couvert, et ne pas utiliser de produits phytosanitaires pour détruire le couvert avant le 16 février (destruction chimique interdite à partir de 2025). Entre le 1er janvier et le 15 février, l'utilisation du couvert comme fourrage n'est possible que par pâturage, indépendamment du type de bétail. La fauche est autorisée à partir du 15 janvier, à condition de ne pas détruire le couvert ni sa couverture intégrale.

2. Carte pédologique de la parcelle expérimentale

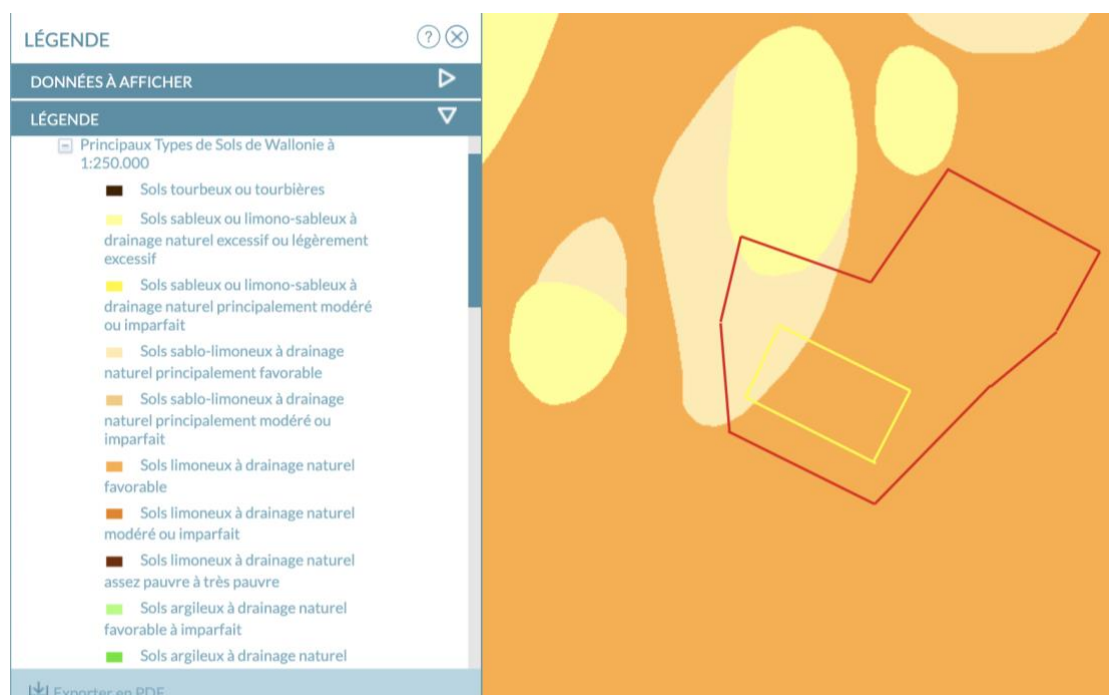


Figure 32 : Localisation des types de sols présents sur la parcelle expérimentale
(Source : WalOnMap, s. d.)

3. Itinéraire technique complet de la parcelle de 2019 à 2025 selon les différentes modalités de travail du sol

Tableau 10 : Opérations culturales réalisées sur la parcelle expérimentale entre 2019 et 2022 selon les modalités de travail du sol. Les différences entre modalités sont signalées par un « X »

Année	Culture	Opération	Différences	Date	Pratiques habituelles de l'agriculteur (témoin labour) (= Labour systématique - labours fréquents jusque 2018) L	Pratiques habituelles de l'agriculteur (témoin TCS) (= Non labour récent - dernier labour : 2018) T	Co-construction (ABC) (= Non labour ancien) A
2019	Interculture	Fertilisation		23/08/19	Engrais minéral	Idem	Idem
				25/08/19	Engrais organique	Idem	Idem
		Préparation semis		28/08/19	Déchaumage	Idem	Idem
		Semis couvert		29/08/19	Semis au combiné rotative-semoir	Idem	Idem
2020	Interculture	Destruction mécanique du couvert		22/01/20	Gyrobroyage	Idem	Idem
		Destruction chimique du couvert		15/03/20	Herbicides	Idem	Idem
		Préparation semis	X	30/03/20	Labour	Déchaumage (2 passages)	/
		Fertilisation	X	30/03/20	Engrais minéral	Idem	/
	Bettravage sucrières	Préparation semis (A)	X	31/03/20	/	/	StripTill
		Semis bettrave	X	1/04/20	/	/	Semis au Knenerland
			X	2/04/20	Semis au pneumatique	Idem	/
		Désherbage mécanique		1/06/20	Binage	Idem	Idem
		Traitements phyto		25/04/20 au 07/09/20	10 traitements (herbicides, insecticides, fongicide, autre)	Idem	Idem
		Fertilisation		29/05/20	Engrais minéral	Idem	Idem
		Récolte bettraves		13/11/20	Arrachage bettrave	Idem	Idem
		Préparation semis	X	13/11/20	Labour	Déchaumage (2 passages)	Idem que T
	Froment	Semis froment		13/11/20	Semis au Horsch Pronto	Semis au Horsch Pronto	Semis au Horsch Pronto
		Fertilisation		3/03/21	Engrais minéral	Idem	Idem
				8/03/21	Engrais minéral	Idem	Idem
		Traitements phyto		31/03/21	Herbicide	Idem	Idem
		Fertilisation		31/03/21	Engrais minéral	Idem	Idem
				9/04/21	Engrais minéral	Idem	Idem
		Traitements phyto		10/05/21	Fongicide	Idem	Idem
				10/05/21	Raccourcisseur	Idem	Idem
				10/05/21	Engrais minéral	Idem	Idem
		Fertilisation		20/05/21	Engrais minéral	Idem	Idem
				29/05/21	Engrais minéral	Idem	Idem
		Traitements phyto		29/05/21	Herbicides + fongicide	Idem	Idem
		Récolte froment	X	13/08/21	/	/	Moisson froment + récolte paille
			X	21/08/21	Moisson froment + récolte pailles	/	/
			X	25/08/21	/	Moisson froment + récolte paille	/
2021	Froment	Préparation semis		9/09/21	Déchaumage	Idem	Idem
		Semis couvert		9/09/21	Semis au Horsch Pronto	Idem	Idem
	Interculture	Destruction chimique du couvert		10/03/22	Herbicide	Idem	Idem
		Destruction mécanique du couvert		15/03/22	Gyrobroyage	Idem	Idem
			X	12/04/22	/	Déchaumage (premier passage)	Idem que T

2 0 2 2	Pois de conserverie	Préparation semis	X	13/04/22	Labour	Déchaumage (second passage)	Idem que T
			X	14/04/22	Préparation lit de semence (2 passages)	Idem	Idem
		Semis pois de conserverie		14/04/22	Semis au semoir de précision	Idem	Idem
		Traitements phyto		17/04/22	Herbicide	Idem	Idem
				20/05/22	Herbicides	Idem	Idem
				28/05/22	Fongicide + insecticide	Idem	Idem
	Récolte pois conserverie		28/06/22	Récolte par entrepreneur	Idem	Idem	
	Interculture	Préparation semis	X	1/07/22	/	/	Déchaumage
		Semis couvert	X	4/07/22	/	/	Semis au Horsch Pronto
		Déchaumage	X	22/08/22	Déchaumage	Idem	/
			X	22/08/22	Prépéartion lit de semence	Idem	/
		Préparation semis	X	12/09/22	Labour	/	Déchaumage
2 0 2 3	Colza	Semis colza		12/09/22	Semis au Horsch Pronto	Idem	Idem
		Traitements phyto		22/09/22	Herbicide	Idem	Idem
		Fertilisation		17/02/23	Engrais minéral	Idem	Idem
				24/02/23	Engrais minéral	Idem	Idem
		Traitements phyto		2/05/23	Fongicide	Idem	Idem
		Récolte colza		10/08/23	Moisson par entrepreneur	Idem	Idem
		Préparation semis		10/10/23	/	/	Broyage repousses de colza
				16/10/23	Labour	Déchaumage	/
2 0 2 4	Froment	Semis froment		16/10/23	Semis au Horsch Pronto	Idem que L	Semis direct au Horsch Pronto
		Traitements phyto		15/11/23	Anti-limaces	Idem	Idem
				30/11/23	Anti-limaces	Idem	Idem
		Fertilisation		6/03/24	Engrais minéral	Idem	Idem
		Traitements phyto		20/03/24	Herbicide	Idem	Idem
		Fertilisation		22/03/24	Engrais minéral	Idem	Idem
		Traitements phyto	X	6/04/24	Herbicides + régulateur	Idem que L	Huiles essentiels (protection fongique), 1e passage
		Fertilisation		11/04/24	Engrais minéral	Idem	Idem
		Traitements phyto	X	26/04/24	Fongicide + régulateur	Idem que L	Huiles essentiels (protection fongique), 2e passage
		Fertilisation		26/04/24	Engrais minéral	Idem	Idem
		Récolte froment		30/07/24	Moisson par moissonneuse batteuse expérimentale	Idem	Idem
		2 0 2 5	Interculture	Semis couvert		6/08/24	Semis au Claydon
Destruction mécanique du				10/03/25	Passage rouleau FACA frontal +	Idem	Idem
Préparation semis	X			17-avr	labour à 25 cm suivi de 2x herse rotative à 15 cm	/	Scalpeur 5 cm
	X			18/04/25	/	Fissurateur à 20 cm + disques déchaumeurs à 10 cm	/
	X		29/04/25	/	Vibroculteur (2 passage)	/	
Maïs	Semis maïs		X	23/04/25	/	/	Semis direct maïs avec fissuration du sol sur la ligne de semis à 10 cm de profondeur.
				30/04/25	Semis maïs	Semis maïs	/
				17/05/25	/	/	Resemé à cause d'un orage

4. Contributions des différentes variables aux deux premiers axes de l'analyse en composantes principales des données de biomasse aérienne par espèces au 26 novembre 2024

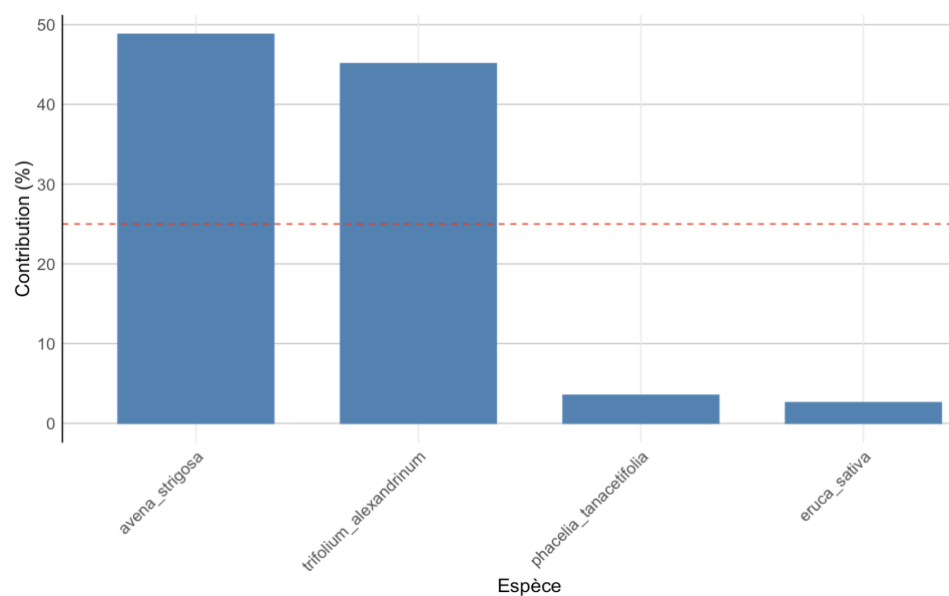


Figure 33 : Contributions des variables à l'axe 1 de l'ACP des données de biomasse aérienne, 26 novembre 2024

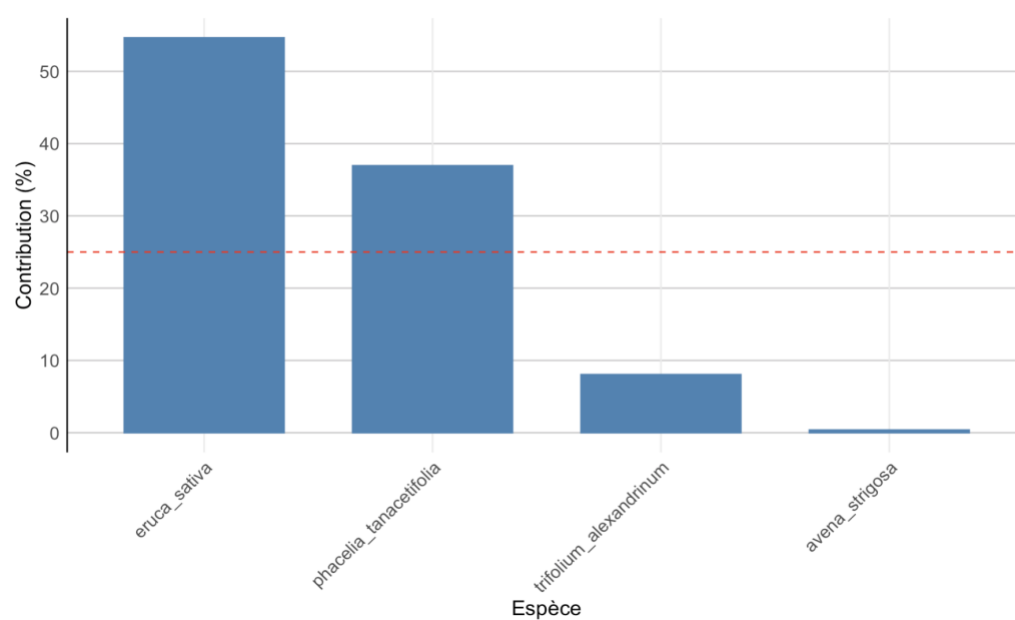


Figure 34 : Contributions des variables à l'axe 2 de l'ACP des données de biomasse aérienne, 26 novembre 2024

5. Contributions des différentes variables aux deux premiers axes de l'analyse en composantes principales des données de biomasse aérienne par espèces au 03 février 2025

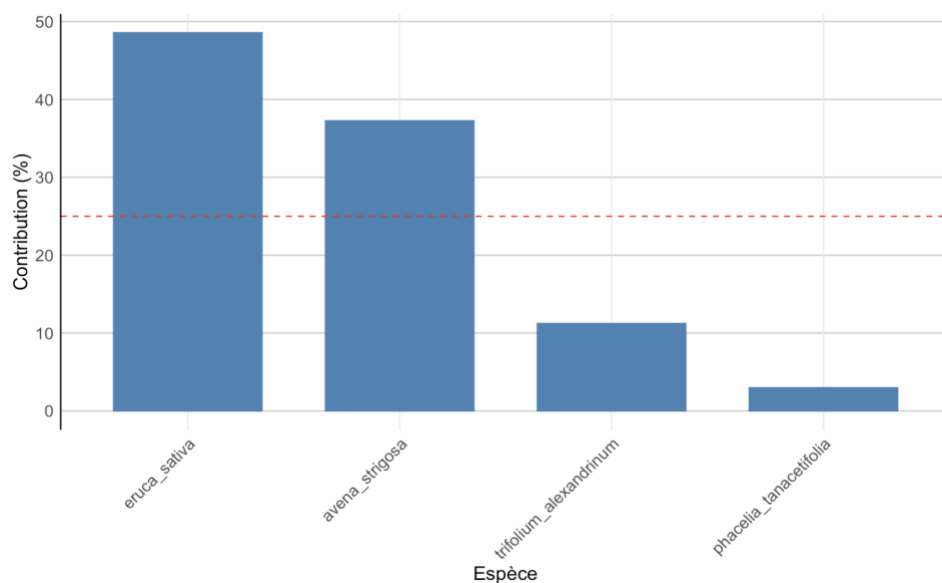


Figure 35 : Contributions des variables à l'axe 1 de l'ACP des données de biomasse aérienne, 03 février 2025

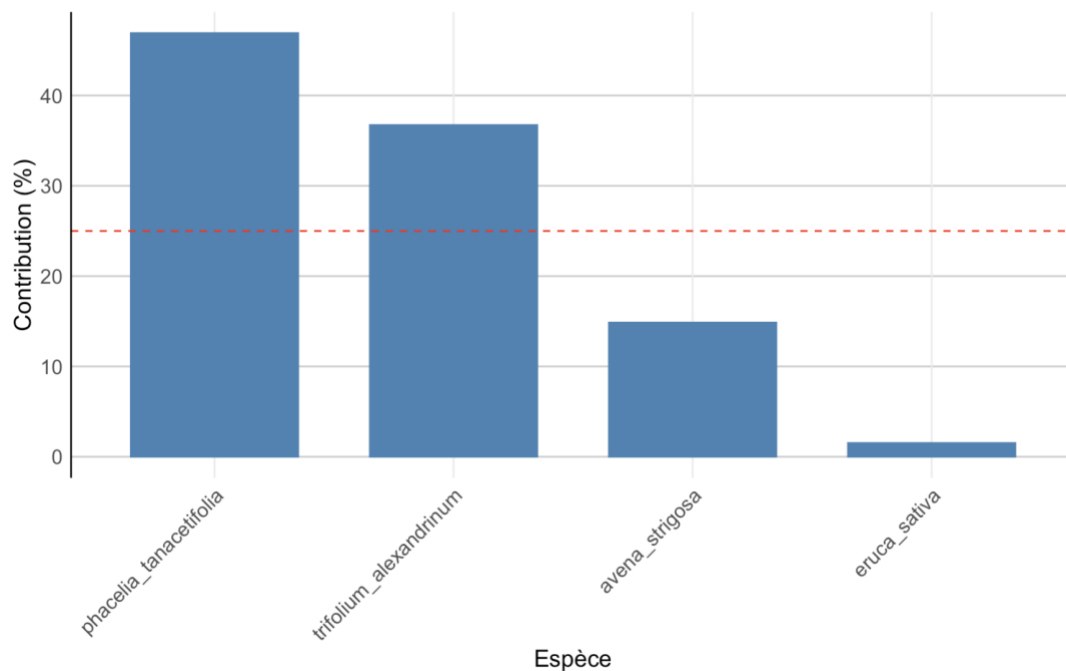


Figure 36 : Contributions des variables à l'axe 2 de l'ACP des données de biomasse aérienne, 03 février 2025

6. Analyse en composantes principales des données combinées des deux dates, de biomasse aérienne en fonction des modalités de travail du sol

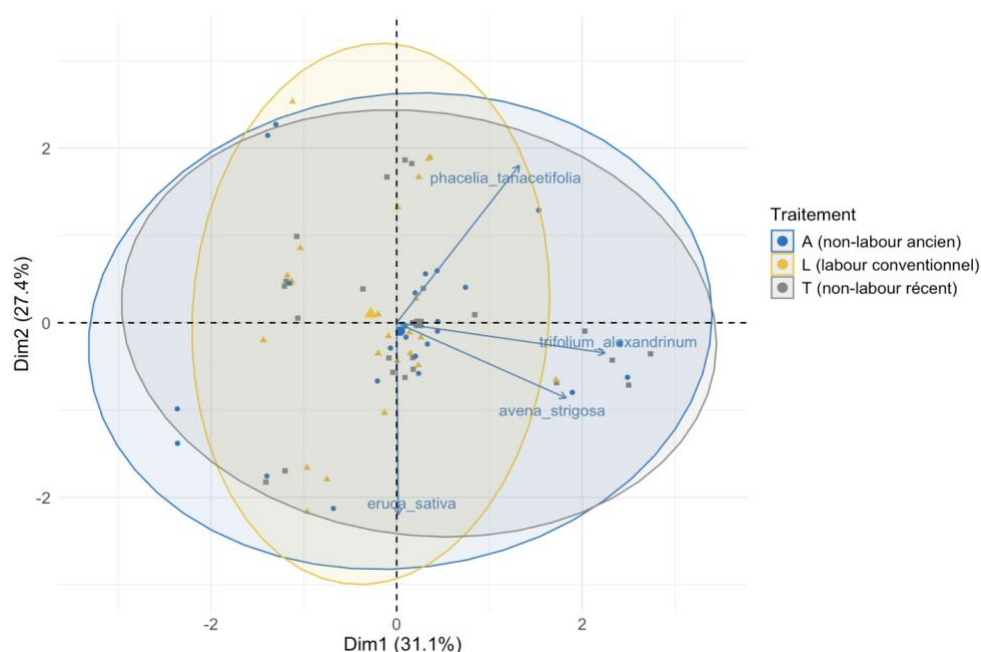


Figure 37 : ACP des données de biomasse aérienne par espèces, selon les modalités de travail du sol, données combinées des deux dates

7. Analyse en composantes principales des données d'indice de surface foliaire en fonction des modalités de travail du sol à la date du 26 novembre 2025

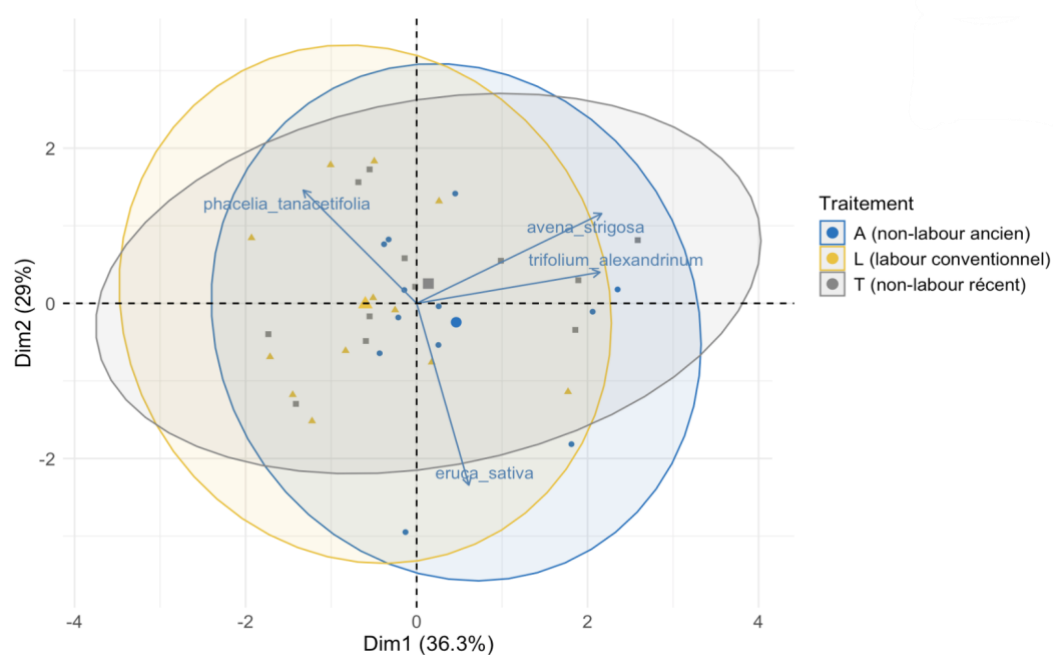


Figure 38 : ACP des données de LAI par espèces, selon les modalités de travail du sol, 26 novembre 2024

8. Contributions des variables aux deux premiers axes de l'analyse en composantes principales du LAI au 03 février 2025

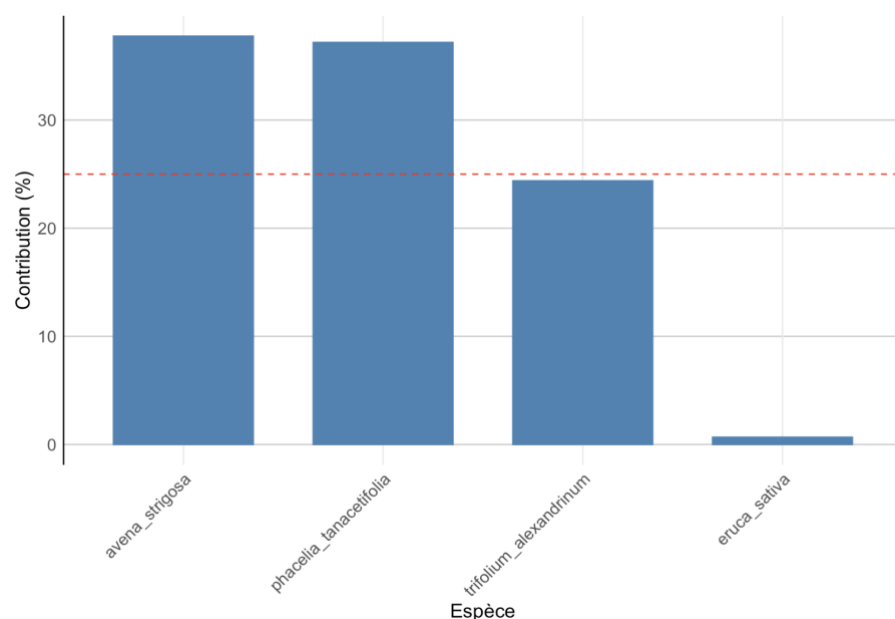


Figure 39 : Contributions des variables à l'axe 1 de l'ACP des données de LAI, 03 février 2025

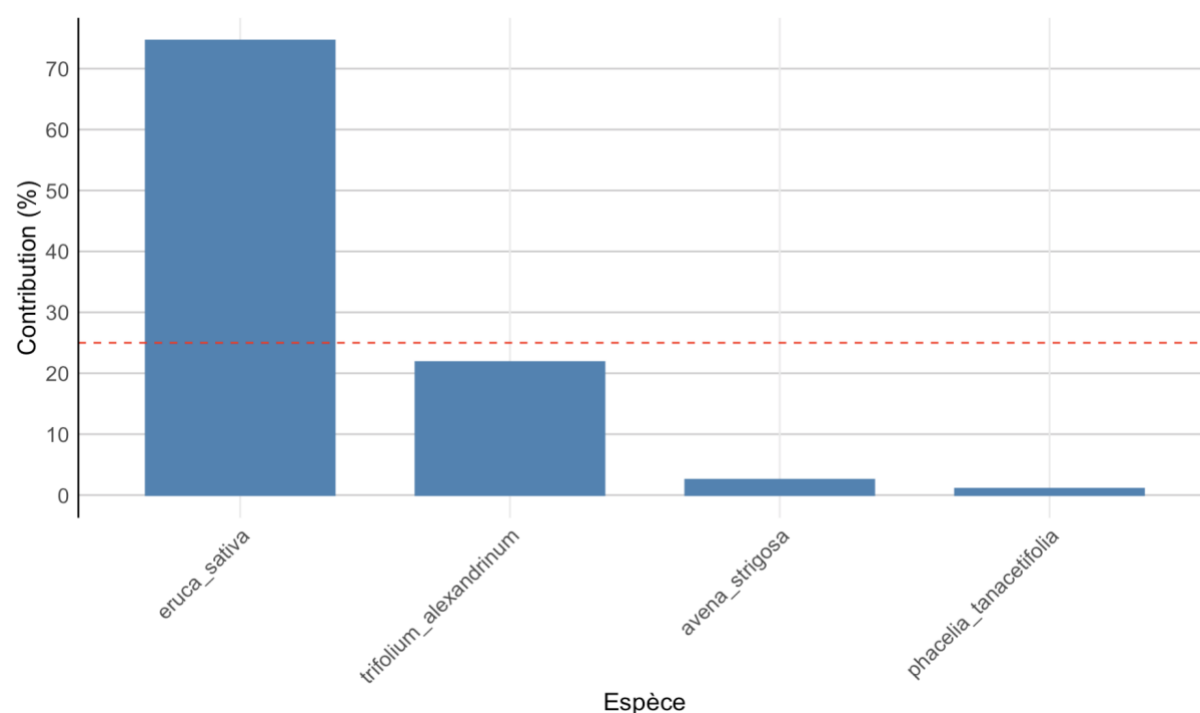


Figure 40 : Contributions des variables à l'axe 2 de l'ACP des données de LAI, 03 février 2025

9. Températures hivernales 2024

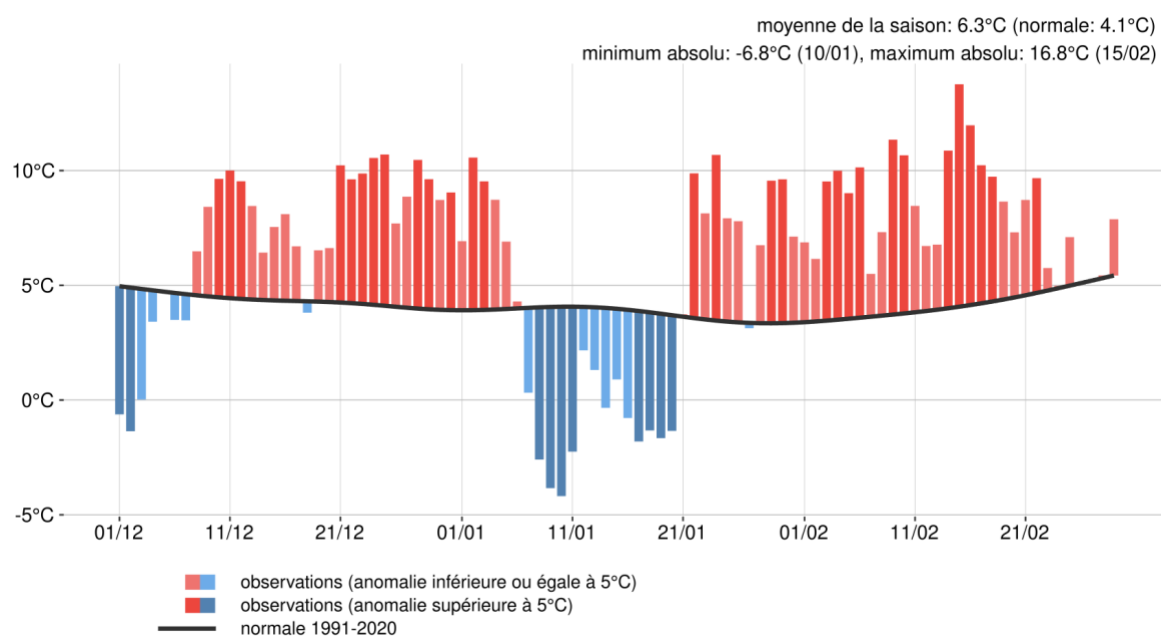


Figure 41 : Température moyenne journalière à Uccle durant l'hiver 2024
(Source : IRM - Année, s. d.)

10. Synthèse des impacts potentiels des principes de l'agriculture régénérative sur différents objectifs agronomiques et environnementaux

Tableau 11 : Effets potentiels des principes de l'agriculture régénérative sur différents objectifs agronomiques et environnementaux, selon le rapport de synthèse de la British Ecological Society
(Source : British Ecological Society, 2025)

	Principles				
	Minimise soil disturbance	Minimise bare soil and keep living roots year round	Increase on-farm diversity	Integrate livestock or approaches that deliver the same functions	Favour nature-based methods over synthetic inputs
Objectives	Increase in soil organic matter	*	***	***	***
	Improved soil structure	***	***	—	?
	Improved nutrient availability	*	***	*	—
	Increased biodiversity	*	***	*	***
	Weeds, disease and pest suppression	?	*	***	*
	Reduced environmental externalities	*	*	—	***
	Commercial yields (including business resilience)	?	*	***	?

— Negative impact * Small impact ** Medium impact *** Large impact

? Uncertain Low certainty Medium certainty High certainty

11. Valeurs de carbone organique, rapport C/N et MPN selon les modalités de travail du sol

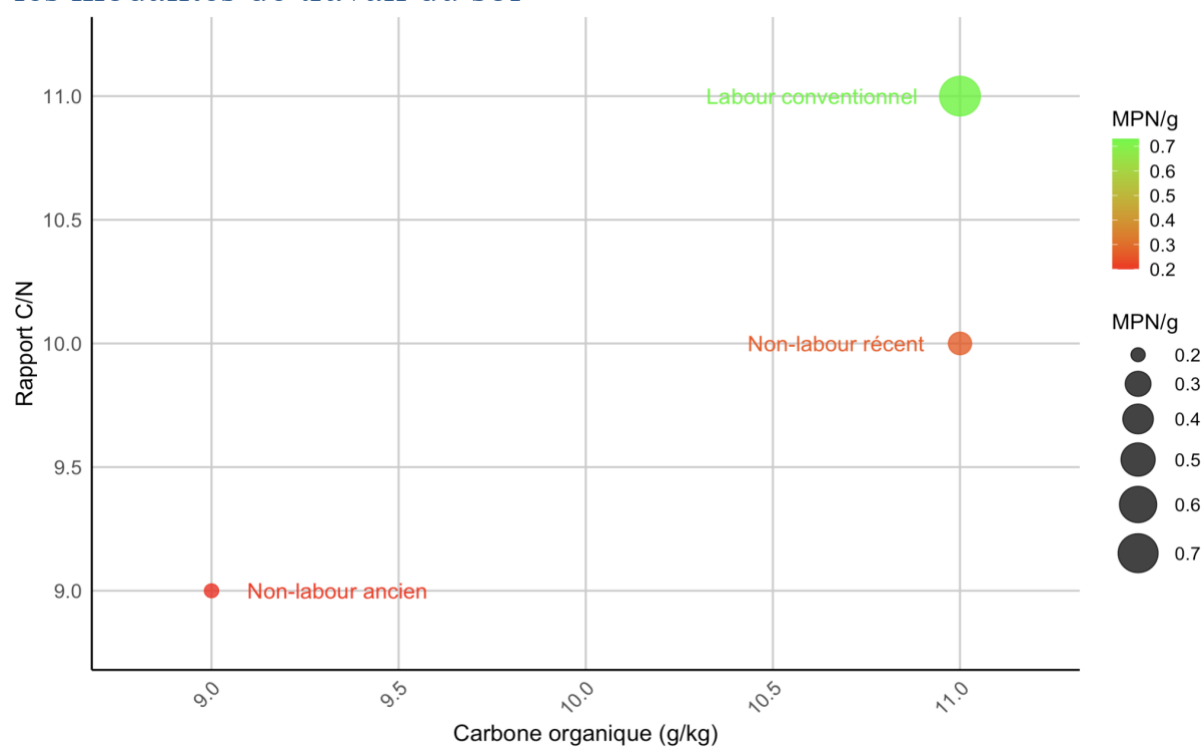


Figure 42 : Relation entre carbone organique (g/kg), rapport C/N et abondance de mycorhizes (MPN/g) selon le traitement

Influence du travail du sol sur la dynamique d'un couvert multi-espèces d'interculture et sur les propriétés chimique et biologique du sol associé en région sablo-limoneuse de Wallonie

Résumé :

Ce travail évalue l'effet de trois modalités de travail du sol, labour conventionnel, non-labour récent (depuis 2018) et non-labour ancien (depuis 2006), sur le développement d'un couvert multi-espèces d'interculture, en considérant à la fois les aspects physiques (biomasse aérienne, indice de surface foliaire, enracinement), chimiques (carbone organique, rapport C/N) et biologiques (abondance des champignons mycorhiziens à arbuscules). Dans un contexte d'agriculture durable et de réduction de la perturbation mécanique, l'étude cherche à déterminer si ces pratiques influencent significativement la croissance du couvert et son environnement.

Les résultats ne mettent pas en évidence d'effet net significatif du type de travail du sol sur la biomasse aérienne, l'indice de surface foliaire, la biomasse racinaire ou l'activité mycorhizienne. Les différences observées restent ponctuelles et limitées, notamment pour une seule espèce (*Avena strigosa*) après l'hiver au niveau de l'indice foliaire, ainsi que pour la longueur racinaire à une profondeur comprise entre 17 et 35 cm. Le carbone organique s'accumule principalement en surface, en faible quantité, et le rapport C/N montre un bon équilibre en surface mais une baisse en profondeur. Le non-labour récent se distingue toutefois par un maintien plus marqué de ce rapport.

L'absence de différences nettes semble surtout liée à la couverture végétale similaire entre les trois modalités, dans un contexte de gestion agronomique homogène appliquée depuis plusieurs années. En d'autres termes, le non-labour ne s'est pas révélé être un facteur statistiquement discriminant du développement du couvert dans les conditions expérimentales étudiées. Par ailleurs, certaines limites méthodologiques (faible nombre de répétitions, précision des prélèvements, outils de mesures) ont pu restreindre la détection de différences réelles. Ces résultats suggèrent que, dans un système où la seule différence entre modalités concerne le travail du sol et où un couvert commun est implanté, l'impact du travail du sol sur les paramètres apparaît réduit. Des suivis sur plusieurs campagnes, avec un protocole renforcé et un échantillonnage élargi, apparaissent nécessaires pour confirmer ou infirmer ces tendances.