

Faculté des bioingénieurs

**Étude de l'impact du paillage
(« mulch ») sur la santé des sols, le
développement des légumes et la
gestion des adventices dans un
contexte de maraîchage biologique
sur petite surface en Belgique.**

Auteur : Eliot Vas

Promoteur : Pr. Guillaume Lobet (SST/ELI/ELIA)

Lecteurs : Pr. Charles Bielders (SST/ELI/ELIA)

Mr. Simon Vanderveken (SST/AGRO)

Année académique 2024 – 2025

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

Remerciements

Ce mémoire est le fruit d'une collaboration multidisciplinaire ayant nécessité l'aide de nombreux contributeurs. J'aimerais exprimer ici toute ma gratitude à celles et ceux qui, de près ou de loin, ont rendu ce travail possible.

Je remercie tout d'abord mon promoteur, le Professeur Guillaume Lobet, pour son encadrement, ses conseils avisés tout au long de la réalisation et de la rédaction de ce mémoire. Sa rigueur scientifique et sa confiance ont été des repères constants.

Je tiens également à remercier Simon Vanderveken pour son accompagnement et son soutien sur le terrain, tant lors de la mise en place de l'expérimentation que lors de la plantation des légumes.

Ma reconnaissance va aussi à Thomas Dagbert, qui m'a soutenu pour les prises de mesures, toujours avec une énergie et un aplomb qui lui sont propres. Son aide sur le terrain a été précieuse.

J'ai eu la chance, durant ce travail, de pouvoir collaborer avec de nombreux laboratoires et membres du personnel de l'UCLouvain, qui m'ont éclairé à de multiples reprises sur des aspects à la fois théoriques et techniques. Je souhaite tout particulièrement remercier Lola Levaux pour son aide sur les méthodes de caractérisation de la biologie des sols, ainsi que pour sa bienveillance et sa disponibilité.

Je remercie également le Professeur Stéphane Declerck d'avoir pris de son temps pour répondre à mes questions concernant les méthodes de mesure de la mycorhization et pour m'avoir grand ouvert les portes de son laboratoire. Dans le prolongement de ces échanges, François Ferrais m'a énormément aidé, toujours avec patience, pour l'encadrement et la mise en œuvre de la méthode MPN.

Mes remerciements vont en outre à Brice de Saint-Aubert, du laboratoire MOCA, qui m'a accompagné dans la réalisation des mesures de carbone microbien, avec une joie de vivre communicative et un enthousiasme qui ont rendu ce travail encore plus stimulant.

Je n'oublie pas mes collègues de classe, mes camarades et amis pour leurs encouragements et leur soutien, mais surtout pour avoir fait en sorte que ces années d'université restent des années à tout jamais gravées en moi. Merci pour les échanges, les idées, les rires et les précieux moments de partage.

Enfin, je souhaite remercier chaleureusement mes parents, pour leur soutien indéfectible tout au long de mon parcours universitaire. Leur confiance, leur patience et leur amour ont été mon moteur dans les moments de doute et de difficultés.

Encore une fois, à toutes et à tous, merci.

Table des matières

1. Introduction	9
2. Etat de l'art	10
2.1. Les défis de l'agriculture dans un contexte mondial en mutation.....	10
2.1.1. La mise en contexte du maraîchage en Belgique et Wallonie.	10
2.1.2. Le maraîchage : Une approche diversifiée pour des systèmes alimentaires résilients	11
2.1.3. La santé des sols : fondements et enjeux pour le maraîchage bio	12
2.1.4. La gestion des adventices : fondements et enjeux pour le maraîchage biologique	13
2.1.5. Le rendement : fondements et enjeux pour le maraîchage bio	14
2.2. La pratique du paillage ou « mulching ».....	14
2.2.1. Les paillages inorganiques.	14
2.3. Les paillages organiques	15
2.3.1. Le paillage organique « mort »	15
2.3.2. La paille	17
2.3.3. Les résidus de bois	17
2.3.4. Les matières d'origine animale et autres.....	17
2.3.5. Les paillages vivants ou « living mulch »	18
2.3.6. Les paillages « mixte » ou « mixed mulching »	19
2.4. Les expérimentations agronomiques à long terme	19
3. Objectifs du mémoire	21
4. Matériel et méthodes	22
4.1. L'usage d'outils d'intelligence artificielle générative.	22
4.2. Le contexte géographique et pédoclimatique de l'expérimentation	22
4.2.1. La localisation	22
4.2.2. La pédologie, la géologie et l'hydrographie	23
4.3. La nature des mulch utilisés.....	24
4.3.1. La bâche en plastique noire.....	24
4.3.2. La paille de miscanthus	24
4.3.3. Le Bois Raméal Fragmenté (BRF).....	25
4.3.4. Les paillages vivants : un mixte de mélilot et de moha	25

4.4.	Le design expérimental mis en oeuvre.....	26
4.4.1.	L'épinard « Butterflay »	28
4.4.2.	L'oignon jaune « Sturon ».....	28
4.5.	L'itinéraire phytotechnique.....	29
4.5.1.	Les antécédents culturels et phytotechniques.....	29
4.5.2.	La mise en place des modalités de mulch	30
4.5.3.	La préparation du sol et le désherbage	32
4.5.4.	La plantation et la récolte.....	32
4.5.5.	Les perspectives phytotechniques pour la suite de l'expérimentation....	33
4.5.6.	La synthèse chronologique des opérations culturales et phytotechniques réalisées pour l'année 2024-2025.....	34
4.6.	La description des méthodes d'analyse testées	35
4.6.1.	Les méthodes de mesure de santé du sol	35
4.6.2.	Les méthodes de mesure de la population et la diversité en adventices des parcelles	42
4.6.3.	La méthode de mesure de croissance des légumes d'intérêt	43
4.7.	La synthèse des méthodes de mesure utilisées dans le cadre de l'expérimentation	45
4.7.1.	Les méthodes d'analyse statistique	46
5.	Interprétation des résultats.....	48
5.1.	Les résultats des méthodes évaluant la santé du sol.....	48
5.1.1.	Les résultats des mesures de fertilité chimique	48
5.1.2.	Les résultats de l'état de structure des agrégats.....	49
5.1.3.	Les résultats de la méthode VESS	50
5.1.4.	Les résultats de la méthode « test bêche »	51
5.1.5.	Les résultats des mesures de vitesse d'infiltration.....	53
5.1.6.	Les résultats du rapport en matière sèche, du carbone microbien et de la méthode MPN	54
5.2.	Les résultats de la méthode de quantification et d'identification des adventices	56
5.2.1.	La surface occupée par les adventices (carrés de 25 cm ²)	56
5.2.2.	La richesse des espèces d'adventices identifiées.....	57
5.3.	Les résultats du pourcentage de recouvrement de la surface foliaire pour chaque légume.	59
5.3.1.	La surface foliaire du légume 1 à la date du 29 avril 2025	59

5.3.2.	La surface foliaire du légume 2 à la date du 29 avril 2025	60
5.3.3.	La surface foliaire du légume 2 à la date du 26 mai 2025.....	61
5.4.	Les résultats de la biomasse mesurée.....	62
5.5.	La corrélation entre les mesures de fertilité, de biomasse et de surface foliaire.	63
6.	Discussion des résultats	65
6.1.	Les résultats comparés à la littérature	65
6.1.1.	Les effets sur la fertilité chimique	65
6.1.2.	Le score USDA.....	66
6.1.3.	Le score VESS	66
6.1.4.	La vitesse d’Infiltration	66
6.1.5.	Le test bêche.....	66
6.1.6.	Le carbone microbien par fumigation et la méthode MPN	67
6.1.7.	Le suivi d’adventices et de surface foliaire des légumes par Wilmus	67
6.1.8.	La biomasse des épinards « Butterflay »	68
6.2.	Discussion des résultats Les résultats des méthodes de caractérisation de la santé du sol	68
6.2.1.	La fertilité chimique	68
6.2.2.	La structure physique	68
6.2.3.	La vie biologique.....	69
6.3.	La discussion des résultats des méthodes de mesure de la population et la diversité en adventices.	70
6.4.	La discussion des résultats des méthodes de caractérisation de développement des légumes	70
6.5.	L’impact global des paillages (mulch) sur les indicateurs mesurés	71
7.	Bilan et perspectives des méthodes mobilisées	72
7.1.	Les limites et les pistes d’amélioration	72
7.2.	La pertinence des méthodes testées	73
7.2.1.	Les analyses de fertilité.....	73
7.2.2.	La structure du sol et lombrics (VESS, USDA, test bêche)	73
7.2.3.	L’nfiltration de l’eau (méthode « Ariane Chabert »)	73
7.2.4.	Les indicateurs biologiques (MPN, carbone microbien)	74
7.2.5.	Les adventices et le recouvrement foliaire (méthode inspirée de Wilmus, application Canopeo).....	75
7.2.6.	La biomasse récoltée.....	75

7.2.7. La biodiversité macroscopique : méthodes complémentaires	76
7.3. La synthèse des avantages et inconvénients des méthodes mobilisées.....	77
8. Conclusions générales	78
9. Annexes	89
10. Bibliographie	80

Liste des figures

Figure 1 Évolution des superficies légumières en région wallonne entre 1980 et 2020 Source: (Stabel,2021)	11
Figure 2,Schéma de la faim d'azote, Source : Agricarbone	16
Figure 3 Carte indiquant le positionnement de terrain d'expérimentation (A) par rapport à la Belgique, (B) à la ferme universitaire de Lauzelle, et (C) distribution des parcelles sur le terrain d'essai	23
Figure 4 : Carte Numérique des Sols de Wallonie indiquant la situation du terrain d'essai en rouge Source SPW 2023	24
Figure 5 : Disposition des paillages et des parcelles, avec leur numérotation, et mise en évidence des blocs du design expérimental.	27
Figure 6 : Disposition des paillages selon l'ancien design expérimental (2024)	31
Figure 7 : Photographie illustrant la colonisation d'adventices sur les parcelles non couvertes	32
Figure 8 : Illustrations du plan de cinq rangs utilisés pour planter les épinards	33
Figure 9 : Immersion des tubes PVC dans l'eau déminéralisé avec 3 échantillons testés pour maximiser la rapidité de la méthode USDA	36
Figure 10 : Dimensions du tube PVC utilisé pour la méthode USDA (Prosensols, 2023)	36
Figure 11 : Mise en œuvre de la méthode VESS, prélèvement des blocs de sol	37
Figure 12 : Mise en œuvre du test bêche : identification de la structure de l'échantillon et dégradation des mottes pour prélever les lombrics	37
Figure 13 : Collage du file nylon sur les pots pour la mise en œuvre de la méthode du Most Probable Number (MPN)	39
Figure 14 Développement des plants de maïs dans leurs pots individuels au bout de deux semaines, lors de la mise en œuvre de la méthode MPN.	39
Figure 15 prélèvement des racines de maïs après 8 semaines (méthode MPN)	39
Figure 16 Colorisation des racine grâce à une solution d'encre INK 2% (méthode MPN)	39
Figure 17 Observation des racines par microscope pour vérifier s'il y à colonisation des CAM (méthode MPN)	39
Figure 18 : Prise de mesure durant la mise en œuvre de la méthode dite « Ariane Chabert » sur paillage BRF	41
Figure 19 : Fumigation des échantillons durant la mise en œuvre de la méthode de dosage du carbone microbien par fumigation au CHCl_3	42
Figure 20 Cadre en bois de 0.5m^2 grillagé utilisé durant la méthode de suivi des adventices (couverture foliaire)	43
Figure 21 Interphase utilisateur de l'application Canopeo (App Store)	44
Figure 22 Matrice de Corrélation des variables de fertilité mesurées	49
Figure 23 Moyennes ajustées par traitement du score de la méthode USDA. Les traitements partageant une même lettre ne sont pas significativement différents à un seuil de 5% pour un même paramètre.	50

Figure 24 Moyenne ajustée par traitement du score de la méthode VESS. Les traitements partageant une même lettre ne sont pas significativement différents à un seuil de 5% pour un même paramètre.	51
Figure 25 Moyenne ajustée par traitement du nombre de lombrics observés. Les traitements partageant une même lettre ne sont pas significativement différents à un seuil de 5% pour un même paramètre.....	52
Figure 26 Moyenne ajustée par traitement de la richesse en groupement fonctionnel. Les traitements partageant une même lettre ne sont pas significativement différents à un seuil de 5% pour un même paramètre.....	53
Figure 27 Moyenne ajustée par traitement de la vitesse d'infiltration exprimée en mm/h suite à une conversion des unités initiales exprimées en cm/ 5min (méthode « Ariane .Chabret »). Les traitements partageant une même lettre ne sont pas significativement différents à un seuil de 5% pour un même paramètre.....	54
Figure 28 Heat maps de (A) le rapport en matière sèche, (B) la concentration en spore, (C) la concentration en carbone microbien.....	56
Figure 29 Moyenne ajustée par traitement de la surface occupée par des adventices. Les traitements partageant une même lettre ne sont pas significativement différents à un seuil de 5% pour un même paramètre.....	57
Figure 30 Moyenne ajusté par traitement de richesse en espèces d'adventices. Les traitements partageant une même lettre ne sont pas significativement différents à un seuil de 5% pour un même paramètre.....	58
Figure 31 Moyenne ajustée par traitement et par bloc légume de la richesse en espèces d'adventices. Les traitements partageant une même lettre ne sont pas significativement différents à un seuil de 5% pour un même paramètre.....	59
Figure 32 Moyenne ajustée par traitement de la surface foliaire du légume 1 (épinard) à la date du 29 avril 2025. Les traitements partageant une même lettre ne sont pas significativement différents à un seuil de 5% pour un même paramètre.....	60
Figure 33 Moyenne ajustée par traitement de la surface foliaire du légume 2 (oignon) à la date du 29 avril 2025. Les traitements partageant une même lettre ne sont pas significativement différents à un seuil de 5% pour un même paramètre.....	60
Figure 34 Moyenne ajustée par traitement de la surface foliaire du légume 2 (oignon) à la date du 26 mai 2025. Les traitements partageant une même lettre ne sont pas significativement différents à un seuil de 5% pour un même paramètre.....	61
Figure 35 : Graphique de l'évolution de la surface foliaire par traitement pour le légume 2 (oignon aux dates du 29 avril et 26 mai 2025)	62
Figure 36 Moyenne ajustée par traitement de la biomasse du légume 2 (épinard). Les traitements partageant une même lettre ne sont pas significativement différents à un seuil de 5% pour un même paramètre.....	63
Figure 37 Corrélation des mesures de fertilité (Ferti_), de la biomasse (bio_mean) et de la surface foliaire (leaf_area) pour le légume 1 (épinard), les croix indiquent que le test de corrélation n'a pas atteint le niveau de significativité requise ($p > 0.05$)	64

Liste des tableaux

Tableau 1 : Rotation triennale prévue dans l'expérimentation à long terme.	27
Tableau 2 Antécédents cultureux et d'amendements pour l'année 2023 par colonne (planches)	30
Tableau 3 : Synthèse chronologique des opérations culturelles et phytotechniques (2024-2025).....	34
Tableau 4 : Echelle d'évaluation de la stabilité des sols (0 à 6) (Prosensol, 2023)	36
Tableau 5: Synthèse des méthodes de mesure mobilisées dans le cadre de l'expérimentation	45
Tableau 6 : Moyenne des résultats obtenus pour le carbone microbien, le rapport en matière sèche et la méthode MPN	55
Tableau 7 : Comparaison des données observées sur le terrain avec celles de Resquasud (2013-2023)	65
Tableau 8 : Synthèse des méthodes testées durant ce travail ou d'intérêt pour le futur avec leurs avantages et inconvénients.....	77

1.Introduction

L'agriculture mondiale a traversé une phase de bouleversements majeurs au cours du dernier siècle. La mécanisation a remplacé la main-d'œuvre humaine et animale, alors que les intrants de synthèse ont supplanté la fertilisation traditionnelle organique. Des systèmes agraires initialement diversifiés et à échelle humaine ont évolué vers des monocultures de grande ampleur. Cette transformation a certes permis des gains de productivité et une baisse des prix, mais elle a aussi généré des pressions environnementales, économiques et sociales sans précédent (Bertin, 2023; FAO, 2024; Hazell & Wood, 2007). Les crises récentes ont, en outre, mis en lumière la vulnérabilité des chaînes d'approvisionnement mondialisées et ont remis au premier plan les enjeux de souveraineté et d'autosuffisance alimentaire.

Dans ce contexte, le maraîchage, en particulier sur petites et moyennes surfaces en agriculture biologique, apparaît comme une voie crédible pour concilier production, résilience et respect des ressources (Milford & Reed, 2024). Cette orientation n'est toutefois pas exempte de contraintes. Le métier de maraîcher reste exigeant, avec un travail manuel très physique, de nombreuses heures de travail et une performance économique faible (Biot et al., 2024).

Alléger cette charge suppose d'identifier des pratiques culturelles simples, efficaces et adaptées aux réalités du terrain. Il faut donc multiplier les essais comparatifs, conduits en conditions réelles, afin de faire émerger des recommandations sur base de résultats empiriques solides. Il convient aussi de tenir compte du fait que de nombreuses pratiques agroécologiques mobilisent des processus biologiques lents, dont les effets se manifestent surtout à moyen et long terme.

C'est dans cette perspective, et à la suite d'une demande émanant d'un collectif de praticiens « *les maraîchers diversifiés bio sur petite surface* » que s'inscrit ce travail de fin d'étude. Il vise à initier une expérimentation au long cours consacrée aux méthodes de paillage, ou « mulch ». Le paillage est une pratique courante en maraîchage. Plusieurs travaux récents ont mis en évidence que le paillage contribue à la gestion des adventices, à la protection du sol, à l'augmentation du rendement et, dans certains cas, à l'apport de matière organique (Kader et al., 2017; Sallets & Wiaux, 2020).

Dans ce travail, nous évaluons l'effet de différents paillages sur un ensemble d'indicateurs couvrant la santé du sol, le développement des cultures et la pression des adventices en maraîchage biologique sur petite surface. Nous sélectionnons et validons aussi des méthodes de mesure et des indicateurs opérationnels en vue d'un suivi pluriannuel et des contraintes propres à ce type de culture. Cette première année constitue la première année d'un programme prévu sur dix ans. Elle fixe le cadre méthodologique, dresse un premier état des lieux et met en évidence les ajustements à apporter pour la suite de l'expérimentation.

2. État de l'art

2.1. Les défis de l'agriculture dans un contexte mondial en mutation

L'agriculture mondiale traverse une période de bouleversements majeurs, confrontée à des défis environnementaux, économiques et sociaux sans précédent. La pression exercée sur les ressources naturelles, notamment les sols, l'eau et la biodiversité, met en péril la durabilité des systèmes agricoles actuels (Bertin, 2023; FAO, 2024; Hazell & Wood, 2007). Depuis le 20^e siècle, les progrès en matière de motorisation, d'irrigation, de fertilisation et d'utilisation de pesticides ont permis d'augmenter considérablement les rendements agricoles (Bertin, 2023; Hazell & Wood, 2007). Toutefois, ces innovations se sont accompagnées de conséquences environnementales lourdes : déforestation, perte de biodiversité, épuisement des ressources en eau, dégradation des sols et changement du climat (Brett et al., 2001; Hazell & Wood, 2007). En Europe, les sols subissent de multiples menaces, notamment l'érosion, la compaction, la pollution par les pesticides et les métaux lourds, ainsi qu'une diminution inquiétante de leur matière organique (European Commission, s. d.).

Ces préoccupations ont été exacerbées par des crises récentes comme la pandémie de Covid-19 ou plus récemment, la guerre en Ukraine qui a provoqué une flambée des coûts de l'énergie et par le fait même des intrants agricoles, tout en perturbant les flux de céréales en Europe (Isabelle, 2022; Zerah, 2022).

Dans ce contexte, le maraîchage émerge comme une solution pertinente et stratégique (Milford & Reed, 2024). En mobilisant des surfaces agricoles souvent de petite taille et en s'appuyant sur des pratiques agroécologiques,¹ il pourrait offrir une alternative durable pour renforcer l'autosuffisance alimentaire et préserver les ressources naturelles (Arulingam et al., 2022; Biot et al., 2024; Dumont, 2017).

2.1.1. La mise en contexte du maraîchage en Belgique et Wallonie.

La Belgique se positionne comme le 7^e producteur européen de légumes frais, avec une production annuelle estimée à 1,7 million de tonnes en 2022 (Eurosta, 2023; SYTRA & Wagralim, 2023).

Le secteur maraîcher belge est fortement mondialisé, ce qui entraîne une grande dépendance aux importations de légumes. Ainsi, seulement 17 % des légumes consommés sont produits localement, tandis que la majorité des légumes cultivés en Belgique sont destinés à l'exportation (Apar-W, 2022; Riera et al., 2020).

La Wallonie, représente 34 % des surfaces légumières nationales. En 2020, comme illustrée dans la figure 1, les surfaces légumières en plein air de Wallonie couvraient

¹ Selon (Gliessman, 2018), l'agroécologie est « l'intégration de la recherche, de l'éducation, de l'action et du changement qui apporte la durabilité à toutes les parties du système alimentaire : écologique, économique et sociale »

environ 17 314 hectares, soit environ 2 % de la surface agricole utile (SAU) de la région. Ces cultures sont majoritairement destinées à la filière de transformation industrielle. Les petits pois occupent 53 % de ces surfaces (9 258 hectares), suivis des haricots verts (2 693 hectares, soit 16 %), des oignons (1 299 hectares, soit 8 %), et des carottes (940 hectares, soit 5 %) (*Filière wallonne des légumes*, 2021; *Filière wallonne des légumes*, 2021; Riera et al., 2020).

En 2021, la production totale de légumes en Wallonie était estimée à 325 000 tonnes, dont 175 000 tonnes étaient destinées à la transformation et 149 000 tonnes au marché du frais. On dénombre environ 2 000 producteurs pour la transformation, contre moins de 500 producteurs pour le marché du frais (Riera et al., 2020; StatBel, 2024). Environ 335 maraîchers produisent des légumes frais sur de petites surfaces, avec une grande diversité de cultures (Apaq-W, 2022). Une majorité d'entre eux respectent les principes de l'agriculture biologique, et la plupart sont certifiés (*Dumont, 2017*).

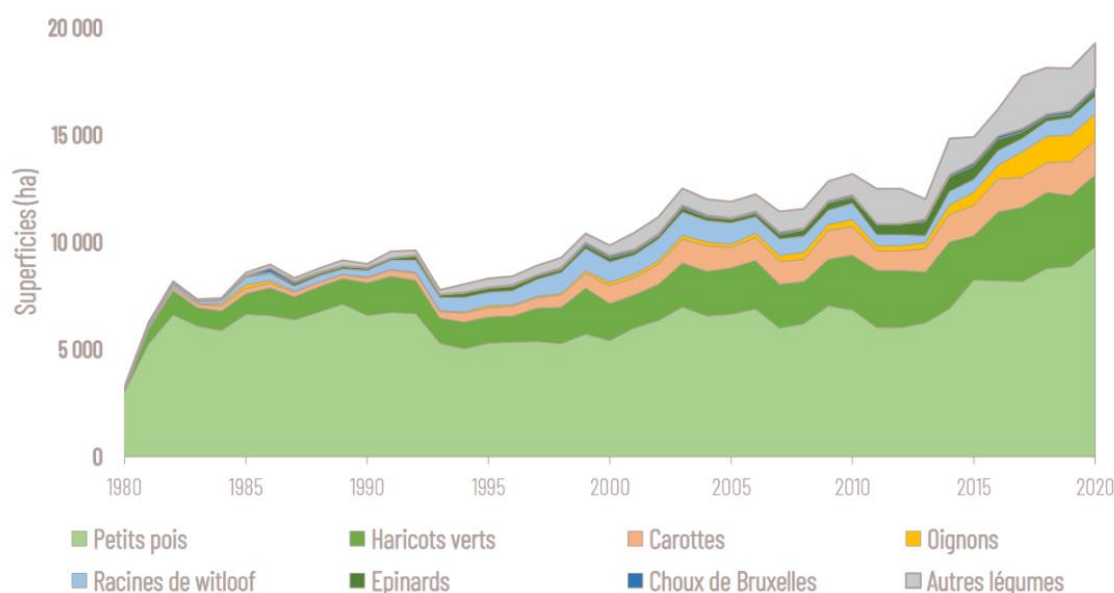


Figure 1 Évolution des superficies légumières en région wallonne entre 1980 et 2020 Source: (Stabel, 2021)

2.1.2. Le maraîchage : Une approche diversifiée pour des systèmes alimentaires résilients

Le terme « *maraîchage* » désigne la culture de végétaux à usage alimentaire à des fins professionnelles (Grand Dictionnaire Terminologique, 1992; « Maraîchage », 2024). En français, ce terme n'établit pas de distinction précise quant à la taille des exploitations. En revanche, le concept anglo-saxon de *Market Gardening* se concentre sur des exploitations de petite échelle, souvent caractérisées par une diversité culturelle élevée et un ancrage dans les circuits courts (Biot et al., 2024, 2024; Cambridge University, 2025; « Market Garden », 2024)

Dans le cadre de ce mémoire, l'expérimentation sera réalisée dans des conditions proches du maraîchage de petite et moyenne surface, en agriculture biologique. Pour préciser ce qu'on entend par "maraîchage de petite surface", nous adoptons la classification proposée par Dumont (Dumont, 2017). Selon cette classification, le maraîchage de petite surface concerne les exploitations de moins de 2,5 hectares, la moyenne surface correspond à des parcelles de 2 à 10 hectares, et au-delà de 12 hectares, on parle de maraîchage en grandes cultures.

1.1.1.1 Les spécificités du maraîchage intensif de moyenne surface à grandes cultures

Les cultures légumières intensives nécessitent des quantités importantes de fertilisants, d'irrigation et de travail du sol (Willekens et al., 2014). Ces pratiques permettent d'accroître les rendements, la qualité du légume et par conséquent, les profits. Cependant, elles présentent des impacts environnementaux préoccupants. Une utilisation excessive de fertilisants et le labour fréquent favorisent la perte d'azote inorganique, entraînant notamment une contamination des eaux par la lixiviation des nitrates (Withers et al., 2014).

1.1.1.2 Un modèle alternatif : le maraîchage biologique de petite surface

Le maraîchage biologique de petite surface, proche du concept de *Market Gardening*, cherche à réduire ces impacts négatifs en combinant des méthodes traditionnelles et des techniques modernes (Grand Garten, 2023). Ce modèle privilégie des pratiques agroécologiques, améliorent les performances environnementales, augmentent la biodiversité, et génèrent une plus grande valeur ajoutée pour les agriculteurs (Arulingam et al., 2022; Biot et al., 2020, 2024; Dumont, 2017).

En renonçant aux machines lourdes, il diminue le compactage des sols et réduit le risque d'érosion (Willekens et al., 2014). L'amélioration délibérée de la fertilité et de la santé des sols via des amendements organiques et des couverts végétaux (*mulch*) garantit une productivité élevée (Betancur et al., 2023; Youssef et al., 2021). Ces pratiques permettent également de piéger le carbone et de renforcer la biodiversité tout en diminuant les besoins en intrants (El-Beltagi et al., 2022).

Par ailleurs, la diversité culturelle favorise l'intégration dans les marchés locaux et la diversification des revenus. (Arulingam et al., 2022; Biot et al., 2024; Grand Garten, 2023) génère des rendements de qualité supérieure tout en créant des écosystèmes stables dotés d'une résilience remarquable (Canali et al., 2016; Youssef et al., 2021).

Ces éléments font du Market Gardening une stratégie clé pour répondre aux besoins alimentaires locaux tout en minimisant l'empreinte écologique, contribuant ainsi à la transition vers des systèmes alimentaires durables (Grand Garten, 2023).

2.1.3. La santé des sols : fondements et enjeux pour le maraîchage bio

Ce mémoire s'appuie essentiellement sur des indicateurs de santé des sols pour évaluer les effets des *mulch* en maraîchage bio. Il est donc nécessaire de définir correctement ce

que l'on entend par santé du sol et quels sont les indicateurs pertinents pour caractériser celle-ci.

La santé des sols se définit comme :

« La santé des sols correspond à la capacité du sol à fonctionner sur le long terme comme un système vivant, i.e., capable d'assurer une productivité de biomasse végétale compatible avec le maintien à long terme des fonctionnalités écologiques de l'écosystème naturel ou cultivé, de même que les processus » (Sarhou, 2016).

Ce concept, marque une évolution majeure du concept de qualité du sol des années 1990. Il dépasse la vision réductrice du sol comme simple support physique pour les cultures, en intégrant sa dimension écologique et biologique. Cette approche est devenue indispensable face à la dégradation accélérée des sols agricoles, identifiée comme un frein critique à la durabilité des systèmes agroalimentaires (Doran & Parkin, 1994; European Commission, s. d.; Larkin, 2015).

Une clarification s'impose entre santé et qualité des sols. Si la qualité évalue l'aptitude d'un sol à un usage spécifique (ex. productivité agricole), la santé englobe des multiples fonctions : cycle des nutriments, régulation de l'eau, habitat biologique, et préservation de la biodiversité. Elle insiste sur le sol comme un système intégré, dynamique et vivant (Doran & Parkin, 1994; Kibblewhite et al., 2008).

L'évaluation de ces attributs repose sur des indicateurs multidimensionnels. À l'image d'un bilan médical, la santé des sols nécessite des mesures physiques (texture, stabilité des agrégats, etc), chimiques (pH, carbone organique, N P K disponible, ...) et biologiques (biomasse microbienne, activité enzymatique, ...)(Kibblewhite et al., 2008; Larkin, 2015). Par ailleurs, des indicateurs émergents, tels que la structure et l'activité des communautés microbiennes ou l'abondance de vers de terre, gagnent en pertinence pour refléter la dynamique biologique (El-Beltagi et al., 2022; Larkin, 2015; Wezel et al., 2014).

2.1.4. La gestion des adventices : fondements et enjeux pour le maraîchage biologique

Le nombre d'heures et la charge de travail sont des enjeux importants pour la durabilité des systèmes maraîchers. Les producteurs doivent composer avec une charge de travail élevée et peu rémunérée. Cela constitue un obstacle à la viabilité financière et à la durabilité sociale (Biot et al., 2024; Dumont, 2017; Heine et al., 2025). Il apparaît que le temps de travail assigné à la gestion des adventices est important. La gestion des adventices est très dépendante des méthodes utilisées (chimiques, physiques ou culturales). En ce qui concerne les maraîchages biologiques, les méthodes de gestion des adventices sont encore plus réduites. Les pratiques de contrôle des adventices sont principalement le désherbage mécanique, manuel ou outillé et le paillage. C'est une tâche laborieuse et fréquente qui demande beaucoup de temps et d'effort. C'est donc un aspect critique pour eux (Dupré et al., 2017).

2.1.5. Le rendement : fondements et enjeux pour le maraîchage bio

Dans les systèmes maraîchers de petite surface, la viabilité passe entre autre par une rentabilité économique (Biot et al., 2024). Ceci passe par une production suffisante et constante, une diversité de légume cultivées et une qualité commerciale élevée, notamment lorsqu'on vend en circuits courts où l'aspect, la fraîcheur conditionnent le prix. (Heine et al., 2025, 2025; Loodts, 2020)

Dans ce contexte, documenter l'effet de pratique agricole maraîcher sur le rendement est pleinement pertinent.

2.2. La pratique du paillage ou « mulching »

La technique du paillage, aussi appelée paillis ou mulch, consiste à recouvrir le sol d'une couche de végétaux morts ou d'autres matériaux apportés pour améliorer ses propriétés, limiter l'évaporation et l'érosion ou encore lutter contre les mauvaises herbes (Le Guen, s. d.). Ces couvertures peuvent se distinguer en 2 grandes catégories, les couvertures organiques ou « végétales » et inorganique ou « non-végétale ».

Le paillage améliore la production végétale en stimulant la croissance des plantes tout en réduisant les besoins en eau. Cette technique limite également l'érosion des sols et aide à maintenir une température optimale pour le développement des cultures. (El-Beltagi et al., 2022). Les mulch, qu'ils soient organiques ou inorganiques, contribuent significativement à améliorer la capacité du sol à retenir l'eau et à contrôler les mauvaises herbes, tout en augmentant la fertilité grâce à l'apport de matière organique. (El-Beltagi et al., 2022; Kader et al., 2017).

2.2.1. Les paillages inorganiques.

Les bâches en plastique sont le meilleur exemple de paillage inorganique utilisé en agriculture. Aujourd'hui, elles sont utilisées partout dans le monde dans différents types d'agricultures en raison des nombreux avantages qu'elles offrent notamment l'amélioration des conditions de croissance des cultures (Kader et al., 2017).

Ces bâches présentent plusieurs bénéfices, tels que la régulation de la température du sol, la conservation de l'humidité, ainsi qu'une réduction de la consommation d'eau, d'herbicides et d'engrais (Kader et al., 2017; Zumstein et al., 2018). De nombreuses études ont démontré qu'à court terme, elles augmentent significativement la croissance, le rendement et la qualité des cultures. Elles permettent également de réduire efficacement les coûts liés à la gestion des adventices (Chauhan et al., 2024; Maida et al., 2019). De manière générale, les mulchs inorganiques augmentent la température et l'humidité du sol, l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE), la biomasse et les rendements des cultures (Dai et al., 2024).

Cependant, malgré leurs nombreux avantages, les bâches plastiques posent des problèmes environnementaux non négligeables. Elles peuvent être composées de différent type de polymères, tels que le chlorure de polyvinyle (PVC), le polyéthylène

haute densité (HDPE) ou le polyéthylène basse densité (LDPE). Ce dernier étant majoritairement utilisé par les agricultrices et agriculteurs (El-Beltagi et al., 2022). Ces matériaux, qui ne sont pas biodégradables, entraînent, à long terme, une accumulation de plastique dans les sols. Cette accumulation a des impacts écologiques et économiques négatifs, notamment une diminution de la qualité et de la productivité des sols sur le long terme (Hegan et al., 2015; Qi et al., 2020; Zumstein et al., 2018)

Aussi, une augmentation trop élevée de la température au niveau des racines à un stade avancé de développement du végétal peut mener à la sénescence des racines et des feuilles. Elle favorise également la détérioration du carbone organique dans le sol. en augmentant l'activité microbienne et donc la décomposition.(Yin et al., 2016).Ces modifications importantes des propriétés du sol pourraient également perturber l'écosystème du sol notamment les nématodes ou la présence de vers de terre. (Kader et al., 2017)

En réponse à ces défis, des alternatives biodégradables ont été développées. Des plastiques biodégradables promettent de réduire les débris plastiques ainsi que l'accumulation de macro et microplastiques dans les sols. Cependant, leurs effets réels sur le sol et la plante restent encore peu étudiés (Qi et al., 2020) et certaines recherches expriment des réserves quant à leur réelle efficacité (Qi et al., 2018).De plus, leur coût plus élevé par rapport aux bâches plastiques traditionnelles limite leur adoption, en particulier parmi les petits producteurs (El-Beltagi et al., 2022).

Sur le plan économique, les bâches plastiques apportent des bénéfices immédiats grâce à l'augmentation des rendements et à une meilleure gestion des ressources. Toutefois, leur coût d'achat et d'entretien peut freiner leur utilisation, notamment chez les petits exploitants (Yin et al., 2016).

Il est à noter que des matériaux tels que le sable, le gravier et le béton sont également considérés comme des couvertures inorganiques, bien qu'ils soient rarement utilisés en raison de leur coût élevé, de leur apport inexistant en nutriments et leur fiable impacte sur la productivité (Kader et al., 2017).

2.3. Les paillages organiques

Les paillages organiques sont composés de matières d'origine animale ou végétale issues de co-produits agricoles tels que la paille, le fumier ou les copeaux de bois (Kader et al., 2017). Ils peuvent être classés en deux catégories principales : les paillages organiques « morts », souvent appelés mulchs organiques ou couverts organiques, et les paillages organiques « vivants », également connus sous les termes de « living mulch ».

2.3.1. Le paillage organique « mort »

Les paillages organiques « mort » ont de multiples avantages comme la diminution du lessivage des nitrates, l'amélioration de la structure physique du sol, le soutien de l'activité biologique, l'équilibre du cycle de l'azote, l'apport de matière organique au sol, la régulation de la température, la rétention en eau et la réduction de l'érosion (Bajgai et al., 2014; Chen et al., 2007; El-Beltagi et al., 2022; Kader et al., 2017). Ils contribuent

également à une diminution des intrants liés à la fertilisation et à la gestion des adventices (Grassbaugh et al., 2004).

Le paillage organique mort favorise le développement de nombreux micro-organismes du sol, tels que les algues, les mousses, les champignons, les bactéries, ainsi que d'autres organismes comme les vers de terre (Kader et al., 2017 ; Ortiz-Ceballos & Fragoso, 2004). En modifiant l'humidité et la température du sol, il crée un environnement favorable à leur activité. Ces conditions améliorent la décomposition de la matière organique par les microbes, ce qui renforce la fertilité du sol, tout en stimulant la croissance et le rendement des cultures. (Kader et al., 2017). Un des grands inconvénients des paillage organiques « mort » est qu'ils peuvent conduire à un rapport entre azote et carbone trop élevé. Ceci conduit à un phénomène appelé : « faim d'azote » (figure.2) .La faim d'azote se manifeste par un affaiblissement des plantes, un retard de croissance et/ou une décoloration des feuilles (Mazollier & Védie, 2008).

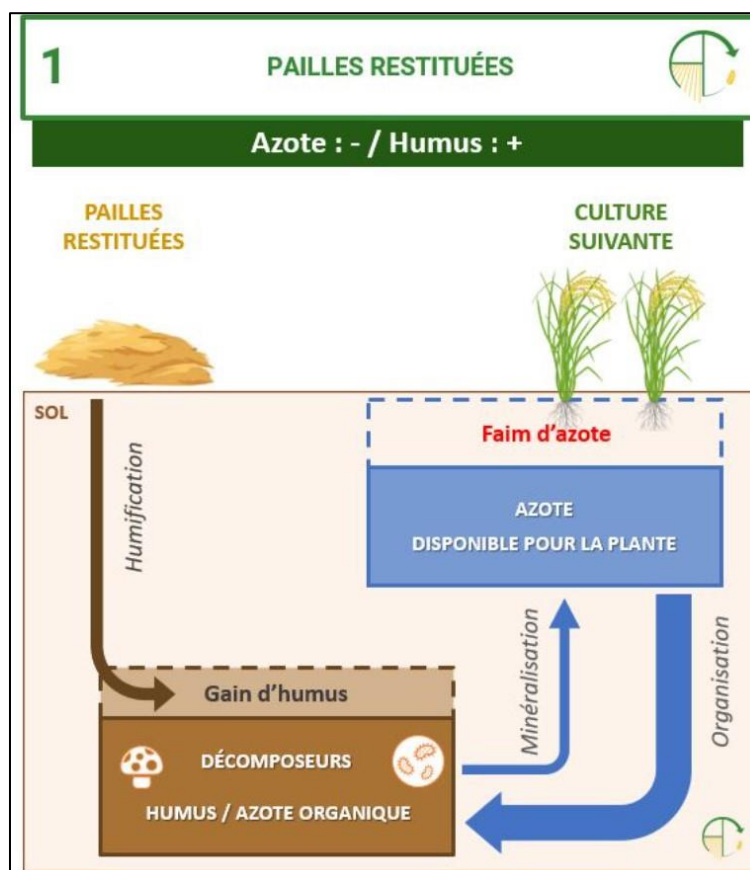


Figure 2, Schéma de la faim d'azote, Source : Agricarbone

La faim d'azote est causée par une concurrence entre les microorganismes du sol et les plantes pour l'azote inorganique. Si le rapport C/N est trop élevé ceci va stimuler de manière trop importante des microorganismes qui vont utiliser l'azote minéral utile pour la plante plus vite qu'ils ne vont en produire comme illustré en figure 2. Il est important de souligner que cet azote n'est que temporairement indisponible pour les plantes. Une fois que le ratio C/N s'équilibre grâce au rejet de CO₂ par les microorganismes, une grande

partie de ceux-ci meurent et libèrent l'azote qu'ils ont absorbé. La durée de cette immobilisation de l'azote dépend de plusieurs facteurs tels que le type de paillis apporté, la profondeur d'enfouissement, le climat, etc. (Triple Performance, s. d.-a)

2.3.2. La paille

La paille est l'un des matériaux les plus couramment utilisés comme couvert organique en raison de sa disponibilité après récolte et de sa facilité d'utilisation. Des études ont montré qu'elle améliore la structure du sol, réduit le lessivage, stabilise la température et l'humidité, améliore la rétention en eau et joue un rôle positif dans la fertilité des sols et le développement des cultures d'intérêts (El-Beltagi et al., 2022; Goodman, 2020; Kader et al., 2017). Cependant, son principal inconvénient, outre le risque de faim d'azote, est qu'elle doit être remplacée chaque année en raison de sa décomposition. De plus, elle peut contenir des graines susceptibles de germer et d'affecter la disponibilité en azote (El-Beltagi et al., 2022; Goodman, 2020). La paille intégrée au sol se décompose lentement, mais elle peut également favoriser le développement de maladies. (Goodman, 2020).

2.3.3. Les résidus de bois

Les résidus de bois, comme les copeaux, présentent également un potentiel intéressant en tant que paillage, bien que leur ratio carbone/azote (C/N) varie en fonction de l'espèce d'arbre et puisse poser problème si celui-ci est trop élevé (Bantle et al., 2014). Le paillage avec de l'écorce est efficace pour retenir l'humidité sur une période prolongée. De plus, utiliser des débris ligneux produits localement comme paillis a été décrit comme un outil abordable avec peu d'intrants externes pour restaurer les terres endommagées (Chalker-Scott, 2007). Les fragments d'écorces sont considérés par certains comme des acidifiants du sol qui ne serait donc pas adapté à la culture sur sol à PH faible. Cependant, il ne semble pas avoir de consensus scientifique claire sur son effet acidifiant en condition réelle. Même si les matériaux ligneux ont effectivement un effet acidifiant lorsqu'ils sont utilisés comme partie d'un substrat de rempotage en pépinière. Aussi, bien que les paillis fabriqués à partir de bois malades puissent contenir des populations vivantes de pathogènes, peu d'exemples de transmission de maladie existent dans la littérature. (Chalker-Scott, 2007)

2.3.4. Les matières d'origine animale et autres

Les excréments animaux et le compost sont d'autres options courantes de couverture organique morte, bien qu'ils nécessitent une application raisonnée pour éviter les brûlures sur les plantes (causées par la libération d'ammoniac), la prolifération d'adventices ou encore la pollution des eaux par lixiviation ((El-Beltagi et al., 2022; Kader et al., 2017; Withers et al., 2014). Le risque de faim d'azote est aussi élevé selon la teneur en carbone du paillis (Mazollier & Védie, 2008).

D'autres matériaux peuvent être utilisés comme couverts organiques. Les résidus de papier ou de papier journal, par exemple, sont une option économique pour contrôler les adventices (Haapala et al., 2014).

2.3.5. Les paillages vivants ou « living mulch »

Les paillages végétaux vivants ou « living mulch » (LM) peuvent être composés de nombreuses espèces différentes. On retient néanmoins trois grandes catégories : les légumineuses dicotylédones, les non-légumineuses dicotylédones et les herbes monocotylédones. Aussi, les paillages végétaux vivants peuvent être utilisés dans des méthodes d'agriculture différenciée. Ils peuvent être utilisés durant une interculture puis être incorporés dans le sol après l'hiver ou peut être laissés sur le sol pour accueillir le lit de semence (Wezel et al., 2014)

Le couvert végétal vivant ne se limite pas à la gestion des adventices et à la régulation de l'humidité et de la température du sol. Il favorise également des interactions rhizosphériques bénéfiques, telles que l'optimisation de l'absorption des nutriments via une augmentation de la colonisation par les champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA). Ces avantages restent cependant variables selon les cultivars utilisés. Par exemple, dans une étude sur l'artichaut biologique (Trinchera et al., 2017), le couvert végétal vivant n'a pas réduit les rendements par rapport au témoin sans couvert végétal vivant (LM). Il a induit des changements structuraux dans les racines, notamment une prolifération des poils absorbants, ce qui a optimisé l'absorption des nutriments et favorisé la colonisation rhizosphérique par les hyphes.

Cependant, la mise en œuvre des paillages vivants présente certaines contraintes, telles que des difficultés pour un contrôle des adventices efficaces, une difficulté accrue pour la gestion et l'implantation du «living mulch», et une potentielle réduction des rendements due à la compétition entre les cultures de rente et les cultures de couverture (Canali et al., 2017; Wezel et al., 2014).

Ces limitations, principalement étudiées dans les systèmes arables, sont encore plus problématiques dans les systèmes de cultures maraîchères biologiques en raison de la faible compétitivité des légumes vis-à-vis des autres plantes et de leurs besoins nutritifs élevés. En outre, une réduction même légère de la qualité des produits peut avoir un impact significatif sur leur valeur marchande et donc pénaliser fortement le maraîcher (Canali et al., 2017).

Il est donc essentiel que les services écosystémiques apportés par le paillage vivant puissent contrebalancer de potentielles pertes dans la quantité ou la qualité de la culture d'intérêt. Des techniques de cultures spécifiques comme le semi-tardif du couvert par rapport à la culture d'intérêt semble être efficace pour diminuer la compétition avec la culture principale et pour avoir une meilleure gestion des adventices (Canali et al., 2017; Ciaccia et al., 2017). En général, l'efficacité des stratégies de «living mulch» dépend de nombreux facteurs, tels que le type de «living mulch», le cultivar de légume, les conditions climatiques, les sols et la durée de la saison de croissance (Montemurro et al., 2017)

En outre, l'introduction de légumineuses en tant que « living mulch » a montré qu'elle pouvait réduire les besoins en engrais grâce à une fertilisation locale et adaptée. Cependant, semer un couvert de légumineuse en même temps que la culture d'intérêt

semble avoir des effets limiter sur la concentration d'azote dans le sol et des effets négatifs, due à la compétition, sur l'absorption de l'azote pour la culture principale. Il semblerait qu'il soit donc préférable de réaliser un semis précoce ou tardif pour éviter toute compétition des ressources. (Canali et al., 2016; Xie et al., 2017)

Concernant la biodiversité, l'utilisation de paillage vivant a révélé des effets positifs sur la faune du sol et les interactions arthropodes/plantes. Par exemple, dans des systèmes maraîchers européens, les paillages vivants ont amélioré la biodiversité des coléoptères carabes, tout en maintenant une activité élevée des espèces bénéfiques et en réduisant la densité des ravageurs, tels que les pucerons et les chenilles. En Italie, le taux de parasitisme des larves par des insectes bénéfiques a atteint 88 % dans les parcelles avec « living mulch », contre 63 % dans les parcelles sans « living mulch » (Depalo et al., 2017) Ces observations semblent indiquer que les « living mulch » favorisent les services écosystémiques tout en ayant peu ou pas d'effets négatifs sur les ravageurs aériens.

Enfin, les paillages vivants peuvent contribuer à réduire les pertes de nitrates dans le sol, Mais ceci dépend du type de couvert semé et de la date du semis et du contexte pédoclimatique (Xie et al., 2017).

2.3.6. Les paillages « mixte » ou « mixed mulching »

Il existe aussi des pratiques agricoles qui combinent des matériaux organiques et inorganiques pour offrir une gestion optimale du sol et des cultures dans divers climats et conditions culturelles. Ces systèmes de paillage visent à combiner les avantages des mulch inorganiques (augmentation de la température, diminution de l'évaporation, augmentation de la productivité, avec les avantages des mulch organiques (amélioration la fertilité et de la structure du sol, ...). (Kader et al., 2017)

Une application innovante de ces much mixtes est le système de « double mulching », qui associe une bâche plastique et un paillis de paille dans un contexte de culture intercalaire intensifiée. Ce système a montré des bénéfices significatifs sur la conservation de l'humidité du sol, augmentant celle-ci pendant la co-croissance du blé-maïs comparé à une pratique conventionnelle. Par ailleurs, l'évapotranspiration totale des deux cultures a diminué et la température du sol a été modifiée de manière favorable, permettant une croissance collaborative des deux cultures durant leur période de co-croissance (Yin et al., 2016).

2.4. Les expérimentations agronomiques à long terme

Une expérimentation à long terme se définit comme une manipulation planifiée ou active d'un système sur une période prolongée dans le but de tester une hypothèse (Knapp et al., 2012). Cette approche permet d'étudier les impacts cumulatifs des pratiques agricoles sur le temps long. La durée nécessaire pour qu'une expérimentation soit qualifiée de "long terme" varie selon le phénomène étudié et les références dans la littérature. Elle est généralement fixée à 15-20 ans, ce qui correspond au temps requis pour dépasser la phase d'initialisation et observer des tendances stables (Berti et al.,

2016). Cependant, des expériences dépassant six ans sont souvent déjà considérées comme "long terme" (Knapp et al., 2012).

Les expérimentations à long terme présentent de nombreux avantages. Elles permettent d'identifier des tendances dans les systèmes agricoles en comparant des pratiques ou des traitements sur une période prolongée. Cela est crucial pour développer et valider des modèles capables de représenter des phénomènes de longue durée, comme les effets des rotations culturales ou des pratiques agroécologiques sur la santé des sols. En outre, ces expérimentations favorisent la collecte et l'archivage d'échantillons qui peuvent être réanalysés à l'avenir grâce à des technologies et des méthodes analytiques plus modernes. Ces archives ouvrent ainsi la porte à des études imprévues lors de la conception initiale des expérimentations (Berti et al., 2016).

Cependant, ces expérimentations présentent également des défis importants.

L'un des principaux obstacles réside dans le compromis entre le nombre de traitements possibles et la taille des parcelles expérimentales. En effet, un nombre suffisant de traitements et de réplifications est essentiel pour garantir la pertinence de l'expérience sur le long terme et assurer la validité statistique des résultats (Berti et al., 2016; Dagnelie, 2012; Payne, 2015). En considérant cela, les grandes parcelles produisent des résultats plus proches des conditions réelles des champs et réduisent les effets de bordure, mais elles limitent le nombre de traitements pouvant être testés. À l'inverse, les petites parcelles permettent d'évaluer un plus grand nombre de traitements, mais elles sont plus sensibles à l'hétérogénéité des sols et aux interférences entre parcelles voisines (Berti et al., 2016; Dagnelie, 2012).

Un autre défi majeur concerne l'évolution des méthodes analytiques et des technologies au fil du temps. Les progrès dans les techniques agricoles et de mesure peuvent rendre difficile la comparaison des données collectées à différentes périodes. L'archivage des échantillons est une solution potentielle mais il implique des coûts élevés, des infrastructures adéquates et une organisation rigoureuse. Par ailleurs, l'urbanisation autour des sites expérimentaux peut modifier les microclimats locaux, compliquant ainsi la distinction entre les effets des changements climatiques globaux et les influences locales (Berti et al., 2016).

Malgré ces limites, les expérimentations à long terme demeurent essentielles pour l'étude des phénomènes complexes. Elles permettent de comprendre comment les pratiques agricoles influencent les dynamiques écologiques, la fertilité des sols et la biodiversité sur plusieurs décennies (Berti et al., 2016).

Pour que ces expérimentations soient menées à bien, elles doivent être conçues avec soin. Les hypothèses doivent être clairement définies, et la planification expérimentale doit être précise. Les méthodes de mesure et les protocoles doivent être correctement standardisés afin de garantir leur reproductibilité dans le temps. Enfin, les données collectées doivent être rigoureusement triées et stockées pour qu'elles soient facilement accessibles et analysables (Berti et al., 2016; Payne, 2015).

3. Objectifs du mémoire

Ce mémoire tente de mieux comprendre les effets à court terme (au cours d'une culture de légume) de différents types de paillage sur la santé du sol, le développement de la culture et la gestion des adventices en maraîchage biologique sur petite surface. De plus, ce mémoire contribue à sélectionner et valider des méthodes de mesure pertinentes et robustes dans une perspective de suivi pluriannuel.

Ce travail constitue une première étape dans la construction d'un dispositif expérimental prévu sur dix années. Il propose un cadre méthodologique robuste, une revue de la littérature ainsi que plusieurs premières expérimentations. Il identifie également des pistes d'amélioration pour assurer la pérennité du dispositif expérimental dans les années à venir.

Ce mémoire s'inscrit également dans une perspective à plus long terme (10 années) d'expérimentation portant sur les effets des pratiques de paillage en système de maraîchage biologique sur petite surface. À terme, grâce aux données empiriques collectées en conditions réelles, des recommandations pourront être proposées aux maraîchers pour les orienter vers des pratiques plus durables, plus fonctionnelles, plus efficaces et adaptées à leur pratique agricole spécifique (petite surface biologique).

4. Matériel et méthodes

4.1. L'usage d'outils d'intelligence artificielle générative.

Dans le cadre de la rédaction de ce mémoire, le recours à des outils d'intelligence artificielle générative tels que ChatGPT ou DeepSeek s'est strictement 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).

4.2. Le contexte géographique et pédoclimatique de l'expérimentation

4.2.1. La localisation

La parcelle utilisée pour cette étude est située à la Ferme Universitaire de UCLouvain à Lauzelle, en périphérie d'Ottignies-Louvain-la-Neuve, dans la province du Brabant wallon en Belgique, comme illustré par la figure 3. Cette ferme, gérée par l'UCLouvain et soutenue par le fonds Baillet Latour, dispose de trois hectares dédiés à l'expérimentation scientifique en maraîchage biologique, sur de petites à moyennes surfaces (UCLouvain, s. d.).

La figure 3 (B) présente en détails le terrain concerné par l'expérience, d'une superficie d'environ 360 m². La figure 3 (C) montre également la subdivision en parcelles d'expérimentation. Chaque parcelle étant identifiée par un système de codage combinant une lettre (de A à B) pour les lignes et un chiffre (de 1 à 10) pour les colonnes. Cette numérotation facilitera la localisation et le suivi des données tout au long du mémoire.

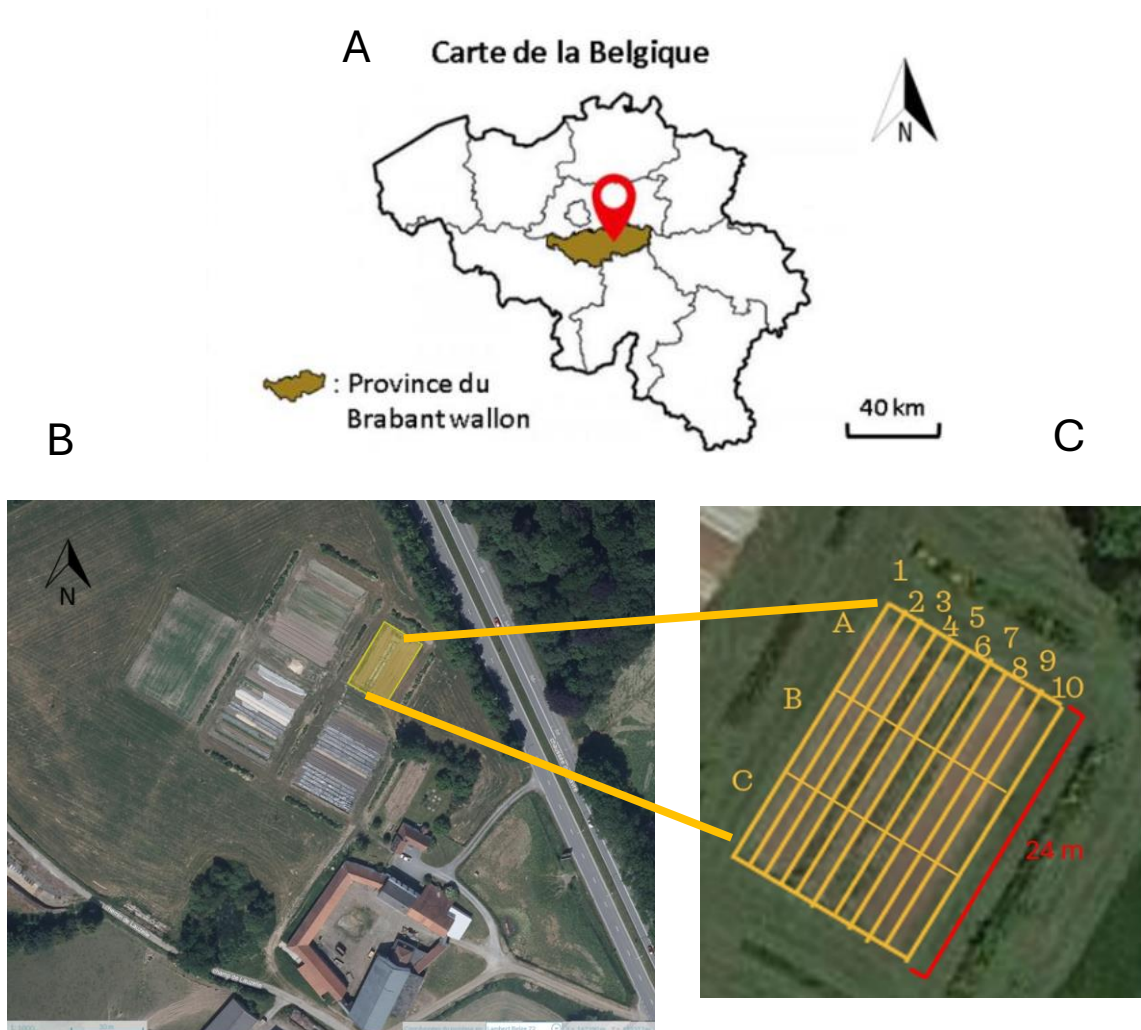


Figure 3 Carte indiquant le positionnement de terrain d'expérimentation (A) par rapport à la Belgique, (B) à la ferme universitaire de Lauzelle, et (C) distribution des parcelles sur le terrain d'essai

4.2.2. La pédologie, la géologie et l'hydrographie

Selon la Carte Numérique des Sols de Wallonie disponible sur le portail WalOnMap (SPW, 2015), la zone d'étude se trouve sur un sol sablo-limoneux, dont le drainage naturel est principalement modéré à imparfait comme illustré en figure 4.

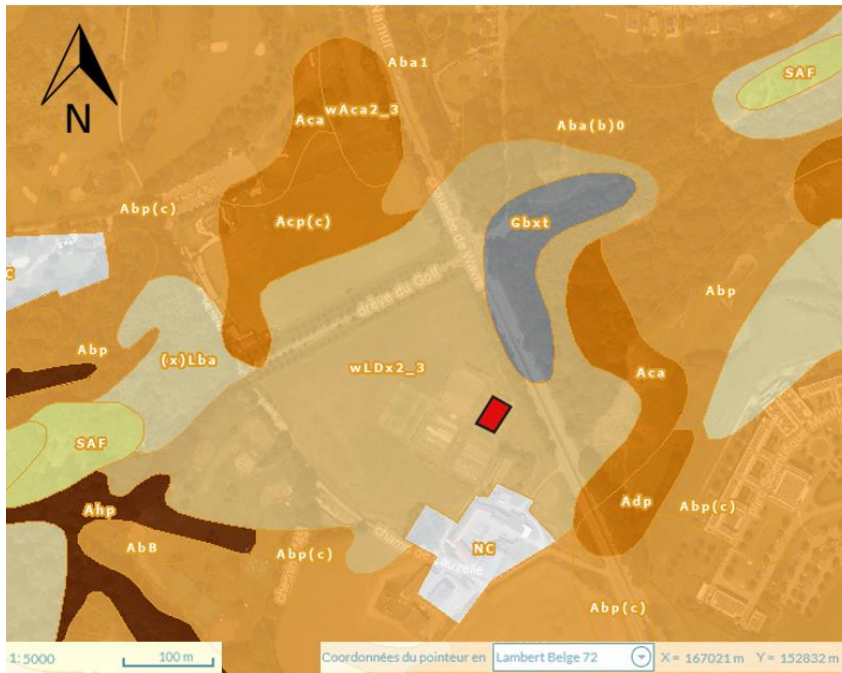


Figure 4 : Carte Numérique des Sols de Wallonie indiquant la situation du terrain d'essai en rouge Source SPW 2023

4.3. La nature des mulch utilisés

Nous avons choisi de sélectionner 5 types de paillage différents pour leurs propriétés spécifiques au regard de la littérature. Nous proposons de les présenter dans les sections suivantes.

4.3.1. La bâche en plastique noire

Nous avons considéré que le paillage inorganique qu'est la bâche en plastique noire serait le mulch témoin tout long de l'expérimentation. Comme déjà mentionné (section 2.2.1), la bâche en plastique est l'une des couverture de sol les plus utilisés à travers le monde (Kader et al., 2017). Bien qu'elle n'améliore pas directement la fertilité du sol, contrairement aux mulch organiques, elle joue un rôle important pour le développement des légumes et la gestion des adventices (Dai et al., 2024; Maida et al., 2019). Son caractère inerte en fait un témoin idéal pour comparer les autres modalités de mulch. Les bâches utilisées dans l'expérimentation proviennent du fournisseur SANACE en rouleau de toiles hors sol 100gr/m², au dimension 2.07mx100m.

4.3.2. La paille de miscanthus

L'un des mulch organique sélectionné pour cette expérimentation est la « paille de miscanthus ». La paille de façon générale est régulièrement utilisée en agriculture, car c'est un matériau facile d'accès provenant généralement de coproduits agricoles (Chen et al., 2007; Goodman, 2020). Ses effets positifs sur la santé du sol, le rendement des légumes et la gestion des adventices sont bien documentés dans la littérature (section 1.4.2.2).

Le miscanthus a été préféré à d'autres types de paille plus courants comme la paille de blé ou de maïs, car il était facilement disponible dans les environs de la Ferme Universitaire de Lauzelle à Louvain-la-Neuve. Ce choix permet de reproduire le comportement réel d'un maraîcher de petite surface se fournissant en matériaux localement accessibles.

4.3.3. Le Bois Raméal Fragmenté (BRF)

Le deuxième paillage organique testé est du bois raméal fragmenté (BRF). Le BRF est un mulch composé de rameaux de bois fraîchement broyés, issus directement du bois de Lauzelle adjacent à l'essai d'expérimentation. Ce type de mulch est également utilisé en maraîchage, avec des avantages sur l'enrichissement de la fertilité du sol en matière (section 1.4.2.3).

4.3.4. Les paillages vivants : un mixte de mélilot et de moha

Aux vues de la littérature, il est apparu pertinent de tester des paillages de sol vivants aussi appelé « living mulch ». Les paillages de sol vivants peuvent en effet être considérés comme un type de mulch, bien qu'ils soient moins fréquemment utilisés en raison des difficultés d'implantation et d'entretien (Depalo et al., 2017; Wezel et al., 2014). La première modalité retenue est un mixte peu commun entre une légumineuse (le mélilot jaune) et une graminée (le moha).

Ce mélange inédit a été proposé pour la première fois dans un travail antérieur à ce mémoire (Georges et al., 2023). C'est la plus expérimentale de nos modalités. Elle vise à tester une alternative innovante aux associations végétales plus conventionnelles. Nous présentons ci-dessous les caractéristiques de ces végétaux composants notre paillage mixte.

4.3.4.1. Le mélilot

Le mélilot est une légumineuse appartenant à la famille des fabacées. Cette plante a été couramment utilisée comme fourrage ou engrais vert et possède également des propriétés médicinales intéressantes. Parmi les différentes espèces de mélilot, deux se sont révélées pertinentes pour l'expérimentation : le mélilot blanc (*Melilotus albus*) et le mélilot jaune (*Melilotus officinalis*). Ces deux espèces sont connues pour leur capacité à fixer l'azote atmosphérique et à améliorer la structure du sol (Agryco, s. d.). Sur le plan des besoins nutritionnels et culturels, ces deux espèces présentent des caractéristiques similaires. Notre choix s'est porté sur le mélilot jaune car il est plus couramment commercialisé que son homologue blanc et donc plus facilement accessible pour les agriculteurs. Par ailleurs, le mélilot jaune présente une taille plus modérée (atteignant environ 100 cm) comparativement au mélilot blanc qui peut atteindre jusqu'à 150 cm, ce qui aurait pu être trop élevé pour être associé au moha dans le cadre de ce mélange expérimental.

L'utilisation du mélilot comme paillage végétal présente plusieurs avantages. En premier lieu, lors du dessèchement, la plante dégage une odeur vanillée qui attire de nombreux insectes pollinisateurs. Cette plante mellifère possède en outre un système racinaire

profond, favorisant la mobilisation des nutriments en profondeur ainsi qu'une résistance accrue à la sécheresse et au gel (jusqu'à -15 °C). Elle contribue également à limiter l'enherbement des cultures et à améliorer les apports en azote dans le système cultivé (Agryco, s. d.).

4.3.4.2. *Le moha*

Le moha, plus précisément *Setaria italica subsp moharia*, est une plante appartenant à la famille des graminées. Elle est souvent utilisée comme culture fourragère, mais également comme couvert végétal. Son emploi en tant que paillage vivant présente plusieurs avantages. Tout d'abord, cette plante se révèle très sensible au froid et au gel, ce qui facilite sa destruction en fin de cycle cultural. Ensuite, elle supporte bien les conditions sèches grâce à un système racinaire fasciculé particulièrement efficace.

Cependant, le moha présente également certains inconvénients. Sa culture a tendance à attirer les pucerons, bien qu'elle suscite un faible appétit chez les limaces. Il est donc recommandé de privilégier des variétés tardives afin d'éviter les problèmes liés à la germination précoce (Arvalis, s. d.-b; Triple Performance, s. d.-b).

4.3.4.3. *Le trèfle blanc*

Pour tester une autre composition de couverture vivante, nous avons opté pour le trèfle blanc (*Trifolium repens*), c'est une légumineuse pérenne de la famille des fabacées. Il est couramment utilisé en agriculture belge et française. Il est apprécié pour sa capacité à fixer l'azote atmosphérique, réduisant ainsi les besoins en fertilisation azotée (AgroLeague, s. d.)

Cette espèce présente un port rampant et une hauteur modérée, variant généralement entre 5 et 30 cm selon les variétés. Cette caractéristique facilite la gestion de son développement à long terme, en limitant la concurrence avec les cultures principales.

De plus, le trèfle blanc est reconnu pour sa rusticité et sa capacité à s'adapter à divers types de sols, bien qu'il préfère les sols bien pourvus en potasse et non excessivement acides. Son système racinaire dense, sa capacité à produire de nombreux stolon et son système racinaire peu profond lui permet de concurrencer efficacement les adventices.

Cependant, Il est sensible à la sécheresse et est compétitif pour l'eau, de plus, Il résiste également au piétinement, au rouleau ou au broyeur ce qui peut être un problème pour sa régulation. (AgroLeague, s. d.)

4.4. Le design expérimental mis en œuvre

Tout d'abord, le terrain a été divisé en 10 planches, chacune d'entre elles a été subdivisée en 3 parcelles. Au total nous avons donc 30 parcelles d'environ 12m². Le plan expérimental, illustré à la figure 5, est structuré en deux blocs principaux nommés *Légume 1* et *Légume 2*. Chaque bloc principal est subdivisé en trois sous-blocs aux lignes A, B et C. À l'intérieur de chaque sous-bloc (*Légume x Ligne*), les cinq modalités de paillage ont été réparties de manière aléatoire afin de limiter les biais expérimentaux.

Chaque bloc de légume est dédié à une culture différente, ce qui permet de tester l'effet des mulch sur deux espèces légumières simultanément, tout en minimisant les effets de bord liés aux différentes modalités de paillage.

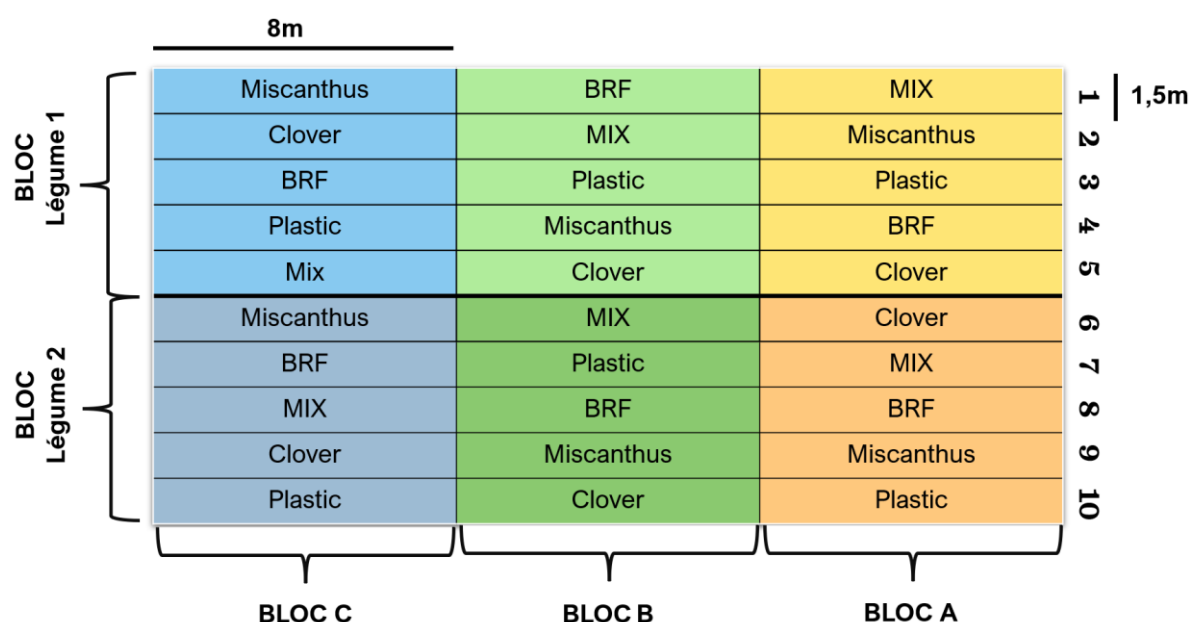


Figure 5 : Disposition des paillages et des parcelles, avec leur numérotation, et mise en évidence des blocs du design expérimental.

L'ensemble de ce dispositif expérimental s'inscrit dans un système de rotation culturale sur trois ans, présenté en tableau 1. Dans le cadre de ce mémoire, le bloc *Légume 1* est en année B du cycle de rotation, tandis que le bloc *Légume 2* est en année A. En 2026, *Légume 1* passera à l'année C et *Légume 2* à l'année B, et ainsi de suite.

Durant l'année de réalisation de ce mémoire (2024-2025), il y avait des épinards cultivés dans le bloc légume 1 et des oignons dans le bloc légume 2.

Tableau 1 : Rotation triennale prévue dans l'expérimentation à long terme.

Année	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juine	Juil	Août	sept	octo	nov	dec
A				Oignon				Fenouil				
B				Épinard			Courge					
C				Salade			Chou					

Ce système de rotation à trois ans, combiné à la culture simultanée de deux légumes vise plusieurs objectifs. D'une part, cultiver deux espèces différentes sur la même parcelle

permet de limiter le risque que des aléas climatiques ou des pressions phytosanitaires (maladies, ravageurs, etc.) compromettent la totalité de l'essai. En diversifiant les cultures, on diminue la probabilité qu'un facteur externe affecte toutes les modalités de manière homogène.

D'autre part, la mise en place d'une rotation culturale permet de reproduire des conditions réalistes en maraîchage sur petite surface. En effet, les maraîchers de ce type privilégient généralement des systèmes diversifiés et planifiés autour de rotations réfléchies. La rotation permet également de limiter l'effet spécifique qu'un légume pourrait avoir sur les résultats des mesures. Comme ce mémoire se concentre sur les effets des différents mulch sur plusieurs indicateurs, il est pertinent de minimiser l'influence propre à chaque culture. Ainsi, à plus long terme, ce dispositif permettra d'analyser les interactions écologiques liées aux pratiques de paillage dans des conditions proches de celles rencontrées sur le terrain.

Le choix des légumes intégrés dans le dispositif expérimental comme mentionné dans le tableau 1 mérite également d'être précisé. En effet, les légumes sélectionnés ne correspondent pas nécessairement aux légumes les plus couramment cultivés en Belgique (les petits pois, les haricots verts, les oignons et les carottes). Ce choix s'explique par le contexte spécifique du maraîchage de petite et moyenne surface, dans lequel les systèmes de culture sont généralement beaucoup plus diversifiés. Nous avons donc souhaité refléter cette diversité dans la construction de notre rotation culturale.

Par ailleurs, des contraintes temporelles liées à la réalisation du mémoire ont également influencé l'agencement du plan de rotation. Il était impératif de pouvoir suivre au moins une culture complète au cours de la période d'étude. Ainsi, les espèces retenues ont été choisies en tenant compte de leur cycle cultural et de leur compatibilité avec le calendrier expérimental.

4.4.1. L'épinard « Butterflay »

Durant l'année 2025, la variété d'épinard « Butterflay » (*Spinacia oleracea*) a été retenue. Elle se caractérise par une croissance rapide et une montaison tardive, ce qui la rend cultivable toute l'année selon les fenêtres de semis. La culture s'exprime au mieux dans un sol meuble, frais et riche en matière organique, avec une résistance au froid comprise entre moins cinq et moins dix degrés Celsius et des besoins en eau modérés.

Deux périodes de conduite sont privilégiées. Un premier semis s'étale de mars à la mi-avril pour une récolte de fin avril à la mi-juin. Un second semis se place en août et septembre avec une récolte d'octobre à la mi-décembre (Semailles, s. d.-b). Les jeunes plants utilisés ont été achetés chez L'archenterre à Wavre, une ferme de maraîchage biologique qui fournit des plants de légumes bio (L'archenterre, s. d.).

4.4.2. L'oignon jaune « Sturon »

Durant cette même année, la variété d'oignon jaune « Sturon » (*Allium cepa* L.) a été retenue. Elle produit des bulbes ronds à épiderme jaune qui deviennent très volumineux à maturité. Sa culture est réputée facile et s'adapte à une large gamme de sols pourvu

qu'il soit frais et bien drainé avec un pH neutre. L'espèce exige une exposition en plein soleil et présente une bonne tolérance à la sécheresse ainsi qu'une résistance au froid jusqu'à moins dix degrés Celsius.

Le semis s'effectue habituellement de mi-février à mi-avril et la récolte intervient de mi-juillet à fin septembre. Dans ces conditions, le rendement attendu se situe entre vingt et quarante kilogrammes pour dix mètres carrés (La Boîte à Graines, s. d.; Semailles, s. d.-a). Les jeunes plants ont aussi été fournis par L'archenterre à Wavre(L'archenterre, s. d.).

4.5. L'itinéraire phytotechnique

Cette section décrit l'ensemble des opérations culturales et phytotechniques réalisées avant et pendant l'expérimentation, ainsi que les recommandations pour les saisons à venir.

Elle couvre d'abord l'historique des parcelles, puis détaille la mise en place des modalités de mulch, la préparation du sol, le semis et la plantation, le désherbage et la récolte, pour enfin proposer un itinéraire technique futur visant à optimiser la gestion des couverts et des paillages.

4.5.1. Les antécédents cultureux et phytotechniques

Avant le lancement effectif et définitif de l'expérimentation en début 2025, les parcelles expérimentales avaient déjà été mises en culture au cours des années précédentes. En 2023, les parcelles étaient divisées en 10 planches de culture alignées sur les colonnes du futur plan expérimental. Chacune de ces planches présentait un historique cultural distinct (voir tableau 2).

Concernant la fertilisation, début du printemps, 40T /ha de fumier a été épandu partout. Ensuite, les deux planches avec carotte (4 et 5) ont reçu entre 5 et 10 cm de compost au moment du semis. Parallèlement, les planches 6-7-8-9 ont reçu 3-5 cm de copeaux de bois début 2023.

Début 2024, il n'y a pas eu de culture spécifique sur les planches, la terre est restée nue et n'a pas été travaillée, jusqu'en septembre 2024. C'est à cette date que les premières modalités de mulch (bâche plastique, miscanthus et BRF) ont été installées, marquant le début de l'expérimentation proprement dite.

Tableau 2 Antécédents culturels et d'amendements pour l'année 2023 par colonne (planches)

Col.	Janv.	Févr.	Mars.	Avr.	Mai	Juin	Juli.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1				Fenouil Solaris	Fenouil Solaris	Fenouil Solaris	Fenouil Solaris					
2					Céleris-branché	Fenouil Solaris	Fenouil Solaris					
3				Persil plat et frisé	Persil plat et frisé	Persil plat et frisé	Persil plat et frisé	Persil plat et frisé	Persil plat et frisé	Persil plat et frisé	Persil plat et frisé	Persil plat et frisé
4						Carotte orange et de couleur	Carotte orange et de couleur	Carotte orange et de couleur	Carotte orange et de couleur	Carotte orange et de couleur	Carotte orange et de couleur	Carotte orange et de couleur
5						Carotte orange et de couleur	Carotte orange et de couleur	Carotte orange et de couleur	Carotte orange et de couleur	Carotte orange et de couleur	Carotte orange et de couleur	Carotte orange et de couleur
6	◆			Fèves des marais	Fèves des marais	Fèves des marais	Fèves des marais	Fèves des marais	Fèves des marais	Fèves des marais	Fèves des marais	Fèves des marais
7	◆			Fèves des marais	Fèves des marais	Fèves des marais	Fèves des marais	Fèves des marais	Fèves des marais	Fèves des marais	Fèves des marais	Fèves des marais
8	◆			Fèves des marais	Fèves des marais	Fèves des marais	Fèves des marais	Fèves des marais	Fèves des marais	Fèves des marais	Fèves des marais	Fèves des marais
9					Céleris rave Monarch	Céleris rave Monarch	Céleris rave Monarch	Céleris rave Monarch	Céleris rave Monarch	Céleris rave Monarch	Céleris rave Monarch	Céleris rave Monarch
10					Panais Turga	Panais Turga	Panais Turga	Panais Turga	Panais Turga	Panais Turga	Panais Turga	Panais Turga

Légende, Fertilisation:

▲ : 5/10 cm de composte

◆ : 3/5cm de copeaux de bois

■ : 40T /ha de fumier

4.5.2. La mise en place des modalités de mulch

4.5.2.1. La mise en place de la bâche en plastique, du miscanthus et du BRF

En septembre 2024, les paillages « bâche plastique », « miscanthus » et « BRF » ont été positionnés selon un ancien schéma expérimental initial (figure 6°). Cet ancien design a été revu pour minimiser les effets de bords et les effets spatiaux de ligne en janvier 2025. Les modalités indiquées en « gras et souligné » dans la figure 6 correspondent aux modalités qui ont été modifiées le 26 février 2025.

Le bâche plastique et le miscanthus ont été mis en place dès septembre 2024. Néanmoins, à la suite de la reconfiguration du design expérimental, la mise en place définitive a été actée le 26 février 2025.

Ce paillage a été mis en place en septembre 2024 lors de la première version du dispositif expérimental. Il se composait alors de feuilles mortes provenant de la ville de Louvain-la-Neuve. Cette solution temporaire avait été retenue dans l'optique de privilégier un approvisionnement local en paillage, tout en attendant de trouver un fournisseur de BRF dans la région. Ce paillage de feuilles a finalement été remplacé par du BRF le 1^{er} avril 2025.

8m				
Bloc Légume 1	Miscanthus	BRF	Miscanthus	1
	Plastic	Mix	Miscanthus	2
	BRF	Mix	Plastic	3
	BRF	Clover	BRF	4
	Mix	Clover	Mix	5
Bloc Légume 2	Clover	Mix	Clover	6
	Clover	Miscanthus	Plastic	7
	Plastic	BRF	BRF	8
	Mix	Miscanthus	Miscanthus	9
	Plastic	Mix	Plastic	10
				1,5m

Figure 6 : Disposition des paillages selon l'ancien design expérimental (2024)

4.5.2.2. La mise en place des paillages vivants

Les paillages vivants (mélange moha/mélilot et trèfles) ont été semés à la volée sur le bloc légume 1 (épinards) le 29 avril 2025. Pour le bloc légume 2 (oignons), aucun paillage vivant n'a été implanté durant la période d'expérimentation. Cette décision découle du risque élevé de concurrence qu'aurait entraîné un paillage semé juste avant ou pendant la plantation des légumes. Afin de garantir le suivi complet d'une culture dans le cadre de ce mémoire, la plantation des légumes a été réalisée début avril 2025. Les épinards, dont la croissance est rapide, ont pu recevoir un paillage quelques semaines après plantation, tandis que les oignons, à développement plus lent, auraient mal supporté un semis à cette même date.

En pratique, cela implique que les modalités « Mix » et « Clover » ont fonctionné comme des témoins « sol nu » au moment des relevés de mesure en raison de l'absence de couverture végétale effective.

Le paillage mixte testé dans cette étude est inédit. Il n'existe pas de recommandations précises concernant les proportions ou la densité de semis pour cette association spécifique. Le moha est généralement combiné avec d'autres légumineuses comme le trèfle d'Alexandrie ou le pois fourrager (Arvalis, s. d.-a, s. d.-b).

En nous basant sur des mélanges déjà répertoriés, nous avons retenu un rapport d'environ 2 pour 3, soit 10 kg/ha de mélilot pour 15 kg/ha de moha. À l'échelle de nos parcelles, cela correspond à 72 g de mélilot jaune et 108 g de moha pour le Bloc légume 1. Toutefois, en raison du semis tardif, nous avons doublé les doses initialement prévues pour maximiser les chances d'implantation du paillage. Ainsi, nous avons semé 140 g de mélilot jaune et 216 g de moha.

Pour le trèfle, le processus reste sensiblement le même. La recommandation en semis pure est de 3kg/ha (*Le Trèfle Blanc, Couvert Permanent Bon Marché Fixateur d'azote*,

s. d.). Cela représente 21,6g pour le bloc légume 1 que nous avons doublé pour les raisons énoncées précédemment.

4.5.3. La préparation du sol et le désherbage

Après la révision du design expérimental effectuée fin février 2025, il a été nécessaire de préparer les parcelles pour limiter la pression des adventices et assurer une implantation homogène des légumes. En effet, les parcelles non couvertes étaient fortement colonisées par des adventices comme illustré en figure 7. Le 27 mars 2025, un labour superficiel (10–15 cm de profondeur) a donc été réalisé sur toutes les modalités, à l'exception des modalités « miscanthus », car le paillage y était déjà bien implanté et qu'il était difficile de le retirer.



Figure 7 : Photographie illustrant la colonisation d'adventices sur les parcelles non couvertes

En dehors de ce désherbage et du labour mécanisé, l'entretien des parcelles a été assuré manuellement à l'aide d'une rasette. Lors de la plantation des épinards et des oignons, effectuée en avril 2025, un désherbage manuel a été réalisé afin de limiter la concurrence des adventices avec les jeunes plants.

Un second désherbage manuel a été effectué le 28 avril 2025 sur le bloc légume 1, juste avant la mise en place des paillages vivants de type mixte (moha/mélilot) et trèfle. De manière similaire, les parcelles destinées à la culture des oignons ont fait l'objet d'un désherbage manuel le 29 avril 2025.

4.5.4. La plantation et la récolte

Pour assurer une levée rapide et homogène, la décision a été prise de travailler avec de jeunes plants achetés chez L'archeterre à Wavre. Le légume 1 (épinard) a été planté le 8 avril 2025, selon un plan de cinq rangs par parcelle, avec un espacement de 15 cm entre chaque plant, soit un total de 3.150 plants. Les oignons, quant à eux, ont été semés le 15 avril 2025, en respectant une disposition comparable (figure 8)

La récolte des épinards a eu lieu le 16 mai 2025, après un peu plus d'un mois de croissance active.



Figure 8 : Illustrations du plan de cinq rangs utilisés pour planter les épinards

4.5.5. Les perspectives phytotechniques pour la suite de l'expérimentation

Afin d'assurer une robustesse dans le plan d'expérimentation à long terme, nous suggérons plusieurs recommandations en termes de modalités de paillage et d'itinéraire phytotechnique.

En ce qui concerne notre paillage témoin (la bâche en plastique noire), il convient de planter les cultures à travers la bâche, d'appliquer la fertilisation au printemps et de laisser la bâche en place toute l'année afin de réduire la concurrence des adventices.

En ce qui concerne les paillages organiques à savoir le miscanthus et le BRF, il convient de planter les cultures à travers ces paillis et réalimenter régulièrement le stock avant l'hiver pour maintenir une épaisseur constante.

Finalement, pour ce qui est des paillages vivants, un semis à la volée en début de saison permet d'établir un tapis végétal, suivi d'une tonte avant la plantation des cultures. Les légumes doivent être plantés à travers le paillis et un fraissage doit être réalisé si une culture d'épinard est prévue par la suite.

4.5.6. La synthèse chronologique des opérations culturales et phytotechniques réalisées pour l'année 2024-2025

Tableau 3 : Synthèse chronologique des opérations culturales et phytotechniques (2024-2025)

Date	Opération	Nom / Type d'intervention	Résumé
2023 (début)	Amendement compost	Fertilisation planches 4 et 5	Apport compost 5–10 cm pour culture de carottes
2023 (début)	Paillage copeaux de bois	Fertilisation planches 6 à 9	Apport copeaux bois 3–5 cm
Sept. 2024	Mise en place bâche plastique	Paillage inorganique	Installation initiale bâche plastique
Sept. 2024	Mise en place BRF (feuilles mortes)	Paillage organique temporaire	Installation feuilles mortes LLN en attente du BRF
Sept. 2024	Mise en place miscanthus	Paillage organique	Installation initiale miscanthus
Janv. 2025	Révision du design expérimental	Réorganisation des parcelles	Réduction effets de bord et subdivision blocs légumes
26 fév. 2025	Pose définitive bâche plastique	Paillage inorganique	Installation finale après réorganisation
27 mars 2025	Labour superficiel (10–15 cm)	Préparation du sol / désherbage	Travail du sol sauf parcelles en miscanthus
1 ^{er} avril 2025	Remplacement feuilles mortes par BRF	Paillage organique	Installation définitive du BRF
8 avril 2025	Plantation épinards	Légume 1	5 rangs par parcelle, espacement régulier
15 avril 2025	Plantation oignons	Légume 2	5 rangs par parcelle, espacement régulier
28 avril 2025	Désherbage manuel bloc légume 1	Entretien	Nettoyage avant semis des couverts vivants
29 avril 2025	Désherbage manuel bloc légume 2	Entretien	Nettoyage pré-culture oignons
29 avril 2025	Semis moha/mélilot bloc légume 1	Couvert vivant mixte	Semis tardif, doses doublées
2023 (début)	Amendement compost	Fertilisation planches 4 et 5	Apport compost 5–10 cm pour culture de carottes
2023 (début)	Paillage copeaux de bois	Fertilisation planches 6 à 9	Apport copeaux bois 3–5 cm

4.6. La description des méthodes d'analyse testées

Notre revue de littérature a montré qu'il existe de nombreux moyens et types de mesure permettant d'évaluer la santé du sol, le bon développement de la plante et la gestion des adventices.

Dans le cadre de ce mémoire, en vue de lancer correctement l'expérimentation dans une perspective de long terme, un travail de recherche a été mené afin de sélectionner les protocoles de mesure et les indicateurs les plus adaptés à ce contexte spécifique. En effet, le nombre élevé de parcelles à étudier, ainsi que leur promiscuité et leur taille, ont dû être pris en compte dans l'élaboration de protocoles à la fois fiables, pertinents et facilement reproductibles.

4.6.1. Les méthodes de mesure de santé du sol

4.6.1.1. *La méthode d'analyse de la fertilité du sol*

Pour mesurer la fertilité chimique du sol, plusieurs indicateurs de base ont été utilisés, tels que les concentrations en phosphore, potassium, magnésium et calcium (exprimées en mg/100 g de terre sèche). Le pH KCl 1N a également été mesuré, ainsi que le carbone organique, le carbone total (exprimé en g/Kg), le pourcentage d'humus et le pourcentage d'azote.

Ces analyses ont été réalisées par le laboratoire de La Hulpe du Centre Provincial de l'Agriculture et de la Ruralité (CPAR). Différentes méthodes de mesure ont été utilisées dans ce laboratoire. Étant donné que ces analyses ont été sous-traitées, les différentes méthodes employées par le laboratoire ne seront pas détaillées dans ce mémoire. Toutefois, à titre illustratif, un bulletin d'analyse chimique du sol est disponible en annexe1. Il décrit l'ensemble des méthodes mobilisées par le laboratoire externe.

En revanche, nous proposons de décrire la méthode de prélèvement des échantillons afin d'assurer sa reproductibilité.

Pour chacune des 30 parcelles, 15 prélèvements de sol ont été réalisés en zigzag à l'aide d'une fine tarière gouge. Les 15 prélèvements ont ensuite été homogénéisés dans un récipient pour former un même échantillon. Ce processus a été répété pour les 30 parcelles. Les 30 échantillons de 500 g chacun ont été envoyés au laboratoire du CPAR pour réaliser les analyses. Les relevés ont été réalisés le 14 novembre 2024 et les résultats des analyses ont été reçus le 13 février 2025.

4.6.1.2. *Les méthodes de mesure de la structure du sol et de la stabilité des agrégats du sol*

4.6.1.2.1. *La méthode USDA*

La méthode USDA, décrite dans le projet ProSensols (Prosensols, 2023), permet de mesurer la stabilité des agrégats dans les couches superficielles du sol en observant leur vitesse de désagrégation dans l'eau.

Concrètement, les agrégats du sol sont immergés dans de l'eau déminéralisée à l'aide d'un fin tube PVC bouché par un filtre pendant cinq minutes (figures 9 et 10).



Figure 9 : Immersion des tubes PVC dans l'eau déminéralisée avec 3 échantillons testés pour maximiser la rapidité de la méthode USDA

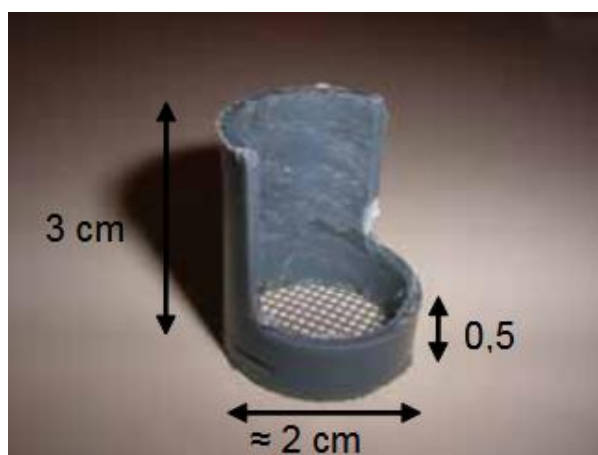


Figure 10 : Dimensions du tube PVC utilisé pour la méthode USDA (Prosensols, 2023)

Un score est attribué selon la proportion et la vitesse de dégradation de l'échantillon. Si moins de 50 % de l'échantillon s'est désagrégé après cinq minutes, une étape supplémentaire est réalisée. L'échantillon est alors plongé cinq fois de suite dans l'eau (immersion dynamique) avant d'être noté. Le score obtenu varie de 0 à 6, où 0 correspond à un sol très instable et 6 à un sol très stable. Les critères précis d'attribution du score sont disponibles dans le tableau 4.

Tableau 4 : Echelle d'évaluation de la stabilité des sols (0 à 6) (Prosensol, 2023)

Classes	Critères
0	Sol trop instable pour récolter un agrégat (tout le sol passe à travers le filtre)
1	50% de l'échantillon est dissous en 5 secondes lors de l'immersion dans l'eau.
2	50% de l'échantillon est dissous entre 5 à 30 secondes après immersion.
3	50% de l'échantillon est dissous entre 30 sec et 5 min après immersion ou Il reste moins de 10 % de l'agrégat de départ après 5 cycles d'immersion.
4	Il reste entre 10 et 25 % de l'agrégat de départ après 5 cycles d'immersion.
5	Il reste entre 25 et 75 % de l'agrégat de départ après 5 cycles d'immersion.
6	Il reste entre 75 et 100 % de l'agrégat de départ après 5 cycles d'immersion.

Avant de prélever les agrégats, les couches superficielles de paillis ont été retirées afin d'accéder à la première couche de sol et donc de permettre un prélèvement correct des agrégats. Une spécificité de notre protocole tient au nombre réduit d'agrégats testés. Seulement trois par parcelle, contre neuf recommandés dans la méthode initiale (Prosensols, 2023). Ce choix a été motivé par la faible surface des parcelles, ce qui

suppose une hétérogénéité intra-parcellaire limitée, ainsi qu'un souci d'efficacité et de gestion du temps au vue du nombre de parcelles à tester. Ce prélèvement a été réalisé le 28 mai 2025.

4.6.1.2.2. La méthode Visual Evaluation of Soil Structure (VESS)

La méthode Visual Evaluation of Soil Structure (VESS) permet une estimation visuelle de la structure globale d'un sol et la taille et l'apparence des agrégats (Ball et al., 2007).



Figure 11 : Mise en œuvre de la méthode VESS, prélèvement des blocs de sol



Figure 12 : Mise en œuvre du test bêche : identification de la structure de l'échantillon et dégradation des mottes pour prélever les lombrics

Concrètement, elle consiste à prélever, à l'aide d'une bêche, un bloc de terre de 20 x 20 x 25 cm. Ensuite, le bloc est manuellement cassé afin d'observer les limites naturelles des agrégats. Il faut ensuite observer la structure de l'échantillon et examiner les différentes couches de celui-ci comme illustré en figure 11 et figure 12.

Selon plusieurs critères visuels, telle que la taille des agrégats ou la porosité, un score de qualité globale est attribué à chaque couche visible de l'échantillon, allant de « friable » à « très compact », comme décrit dans la grille de cotation disponible en annexe 2. Pour déterminer un score global pour le bloc, on additionne les scores de chaque couche après les avoir pondérés par leur épaisseur, puis on divise le total obtenu par l'épaisseur totale du bloc.

Un score de 1 indique un sol bien structuré et peu susceptible à la compaction, tandis qu'un score de 5 fait référence à un sol très compact.

Concernant l'échantillonnage, deux blocs de terre ont été prélevés par parcelle, en évitant autant que possible les bords. Il n'était pas pertinent de réaliser les six prélèvements initialement recommandés par le protocole, compte tenu de la petite taille des parcelles.

Lors de ces prélèvements, nous avons utilisé l'application VESS disponible sur téléphone version 1.1.0 (App Store, 2025a) pour nous aider à attribuer un score aux différentes

couches du sol et pour stocker les photos ainsi que les données directement sur le terrain.

Le protocole VESS a été combiné au protocole « test bêche » visant à estimer la population de vers de terre dans le sol. La manière dont cette combinaison a été mise en œuvre est décrite dans la section suivante. Les mesures de la méthode VESS ont été réalisées le 26 et 27 mars 2025.

4.6.1.3. Les méthodes de mesure de la population en lombric du sol et de la richesse en groupe fonctionnel

Pour réaliser une estimation de la population de vers de terre dans notre sol, nous nous sommes largement basés sur le protocole décrit dans « *le Guide méthodique du test bêche : Structure et Action des vers de terre* » (Agro transfert, 2023). Cependant, ce protocole a été adapté pour répondre aux contraintes et aux objectifs spécifiques de ce travail. Il a notamment été couplé avec la méthode VESS.

Concrètement, le bloc de sol prélevé avec la méthode VESS est posé sur un bac en plastique noir, comme illustré dans la figure 13. Une fois le test VESS réalisé, de petites mottes sont cassées et transférées dans un autre bac afin d'y rechercher les vers de terre. Une fois les vers de terre collectés et comptabilisés, ils sont rassemblés, puis identifiés selon leur groupement fonctionnel à l'aide de la clé d'identification fournie sur le site de l'Observatoire Participatif des Vers de Terre (OPVT), disponible en annexe 3. Cette identification nous permis de déterminer la richesse en groupement fonctionnel pour chaque parcelle. Tout comme la méthode VESS, le test bêche a été réalisé le 26 et 27 mars 2025.

4.6.1.4. Les méthodes de mesure la concentration en spore de champignon mycorhizien arbusculaire (CAM) du sol

Pour estimer le potentiel d'inoculum mycorhizien dans les sols la méthode MPN à été mobilisée. Celle-ci a été fournie par le pôle de microbiologie appliquée de l'UCLouvain (ELI-m) et est disponible en annexe 4.

Concrètement, il faut prélever 5 kg de terre entre 0 et 20 cm de profondeur. Celle-ci est ensuite séchée, tamisée, puis une partie est stérilisée. Des petits pots de jardinage carré de 7cm de côté sont utilisés sur lesquels un tissu de nylon a été préalablement fixé à la base (figure 13). Ceci est fait pour que, lors de l'arrosage, les pots ne puissent pas contaminer leurs voisins.



Figure 13 : Collage du file nylon sur les pots pour la mise en œuvre de la méthode du Most Probable Number (MPN)



Figure 14 Développement des plants de maïs dans leurs pots individuels au bout de deux semaines, lors de la mise en œuvre de la méthode MPN.

Ensuite, la terre stérilisée est diluée à de la terre non stérilisée selon différentes dilutions, chaque fois par un facteur 2. Une graine de maïs, préalablement germée, est ensuite plantée dans chaque pot. Celle-ci sert de plante piège, comme illustré en figure 14.



Figure 15 prélèvement des racines de maïs après 8 semaines (méthode MPN)



Figure 16 Colorisation des racine grâce à une solution d'encre INK 2% (méthode MPN)

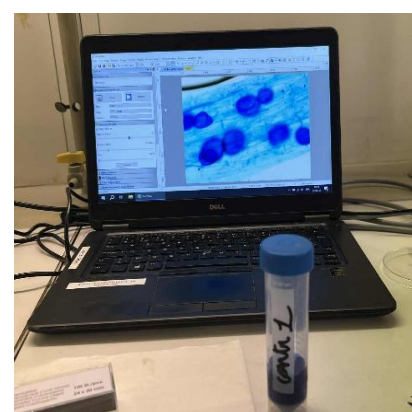


Figure 17 Observation des racines par microscope pour vérifier s'il y a colonisation des CAM (méthode MPN)

Au bout de 6 à 8 semaines, les racines de maïs sont traitées et récoltés notamment avec du colorant INK 2%. Les racines traitées sont ensuite observées au microscope pour y déceler la présence ou non de CAM. On observe jusqu'à quelle dilution les racines colonisées par les champignons arbusculaires mycorhiziens (CAM) restent visibles. En fonction de la dernière dilution colonisée, on peut déterminer, à l'aide d'un coefficient, la concentration initiale en spores dans le sol [MPN/g(sol)] [propagules infectifs / g de sol sec]. Ces grandes étapes sont illustrées sur la figure 15, figure 16 et figure 17.

Cette méthode est relativement longue à mettre en oeuvre et à finaliser. C'est pourquoi il n'était pas souhaitable de réaliser ce test sur les 30 échantillons. Cinq parcelles, correspondant chacune à une modalité différente de paillage, ont été sélectionnées. Il s'agit des parcelles 1, 2, 3, 4 et 5 de la ligne B.

Ces parcelles ont été choisies sur la base des résultats des tests de fertilité réalisés plus tôt durant l'expérimentation. En effet, nous avons cherché à sélectionner des parcelles qui présentaient une variabilité initiale minimale avant la mise en place des mulch, afin de limiter les biais. Ces cinq parcelles seront systématiquement utilisées pour réaliser les mesures de mycorhization tout au long de l'expérimentation à long terme.

La mise en œuvre de cette méthode a débuté le 21 mars 2025 et s'est achevée le 24 juin 2025.

4.6.1.5. Les méthodes de mesure évaluant la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol

Nous avons utilisé la méthode dite « Ariane Chabert », désignée ainsi dans le mémoire de Nicolas Biot, car elle est décrite dans la thèse de cette dernière (Biot et al., 2020; Chabert & Sarthou, 2017).

L'expérience consiste à enfoncer un tube en PVC de 12 cm de diamètre à une profondeur de 5 cm dans le sol (figure 18). Ce tube est ensuite rempli avec 1,25 litres d'eau pour saturer le sol et ainsi standardiser les mesures. Si l'intégralité des 1,25 litres d'eau est complètement absorbée en moins de 15 minutes, l'opération est répétée et mesure directement l'infiltration. Pour mesurer cette infiltration, après avoir versé une seconde fois les 1,25 litres d'eau, la hauteur d'eau dans le tube est mesurée au temps zéro et cinq minutes plus tard à l'aide d'un mètre. Si les 1,25 litres initiaux ne sont pas absorbés après les 15 premières minutes, on mesure l'infiltration directement en mesurant la différence de hauteur à la 15^{ème} et 20^{ème} minutes.

Cette méthode a été choisie car elle est plus simple et rapide que d'autres protocoles scientifiquement plus reconnus (exemple : la méthode à double anneau). Elle a permis de tester toutes les parcelles. Cependant, elle reste moins précise que d'autres méthodes de mesure et est plus sensible à l'humidité déjà présente dans le sol (Biot, 2020). Les mesures de vitesse d'infiltration ont eu lieu le 26 juin 2025.



Figure 18 : Prise de mesure durant la mise en œuvre de la méthode dite « Ariane Chabert » sur paillage BRF

4.6.1.6. Les méthodes de mesure de la population microbienne présente dans le sol et du pourcentage en matière sèche du sol

La dernière mesure effectuée pour caractériser l'état de santé du sol vise à quantifier la population microbienne présente dans celui-ci. Pour ce faire, nous avons utilisé la méthode de dosage du carbone microbien par fumigation au chloroforme. Le protocole détaillé a été fourni par la plateforme MOCA (Mineral and Organic Chemical Analysis) de L'UCLouvain (MOCA, 2024).

Le principe consiste à fumiger l'échantillon de terre avec du chloroforme afin de faire éclater les cellules microbiennes (figure 19). Le carbone contenu dans ces cellules est ainsi libéré et peut être extrait. Le carbone microbien, qui représente la composante vivante de la matière organique à l'exclusion des macro-organismes et des racines (bactéries, champignons, protozoaires, algues, etc.), est calculé à partir de la différence entre le carbone organique mesuré après et avant fumigation.



Figure 19 : Fumigation des échantillons durant la mise en œuvre de la méthode de dosage du carbone microbien par fumigation au CHCl_3

La concentration de carbone dans les extraits est mesurée à l'aide de l'analyseur « Total Organic Carbon » (TOC). Le carbone libéré est converti en carbone microbien (Cmic) en divisant par un facteur de conversion de 0,45 (MOCA, 2024). Il est à noter que la mise en œuvre de ce protocole nécessite la mesure du rapport en matière sèche des échantillons. Bien que cette mesure ne constitue pas un objectif initial, elle présente un intérêt particulier à analyser. En effet, comme le souligne la littérature, les paillages peuvent avoir un effet notable sur le maintien de l'humidité du sol, notamment en réduisant l'évaporation de l'eau. La méthode de prélèvement n'étant pas précisée dans le protocole de base, nous avons choisi d'appliquer la même procédure que celle utilisée pour l'échantillonnage des mesures de fertilité, telle que décrite précédemment dans ce travail. Cette méthode a débuté le 18 juin 2025 et a été finalisée le 25 juin 2025.

4.6.2. Les méthodes de mesure de la population et la diversité en adventices des parcelles

La gestion des adventices est une préoccupation majeure pour les maraîchers, et plus particulièrement pour ceux travaillant en agriculture biologique. En effet, le désherbage représente une part importante de leur charge de travail (Dupré et al., 2017). Il était donc primordial d'inclure cette dimension parmi les indicateurs à mesurer.

Pour ce faire, nous avons suivi la même méthode exposée dans le mémoire de Wilmus (Wilmus, 2021). Dans ce travail, le suivi des adventices repose sur l'évaluation de leur couverture foliaire. L'objectif de cette analyse est de réaliser un relevé des adventices en effectuant un inventaire et un comptage des différentes espèces présentes.

Concrètement, nous utilisons un cadre en bois de 71 centimètres de côté, divisé en 196 cases de 5 centimètres sur 5 centimètres (figure 20). Cet outil couvre donc une surface

totale de 0,5 m². Le cadre est systématiquement placé au centre de chaque unité expérimentale. Ensuite, nous comptons le nombre de cases dont au moins 50 % de la surface est recouverte par une adventice. Une case recouverte à moitié ou plus est notée « 1 », tandis qu'une case recouverte à moins de 50 % est notée « 0 ». Un pourcentage de cases recouvertes à au moins 50 % de végétation a ainsi pu être calculé.

Toutes les espèces présentes dans cette surface ont été identifiées et comptabilisées dans un premier temps au moyen des applications PlantNet ou encore PictureThis (App Store) et dans un deuxième temps grâce à Monsieur Pierre Van Thorren travaillant à l'UCLouvain et qualifié dans l'identification d'adventices. Cette méthode a été mise en œuvre le 26 mai 2025.



Figure 20 Cadre en bois de 0.5m² grillagé utilisé durant la méthode de suivi des adventices (couverture foliaire)

4.6.3. La méthode de mesure de croissance des légumes d'intérêt

4.6.3.1. Méthode de suivi du développement foliaire des légumes d'intérêt.

Pour le suivi du recouvrement foliaire des légumes, nous avons utilisé l'application mobile Canopeo (App Store & Oklahoma State University, 2025). Cette application permet d'analyser une photo en comptant les pixels verts, et fournit ainsi un pourcentage de recouvrement foliaire (figure 21). Les photos ont été prises au centre de chaque parcelle, à hauteur d'épaule, soit environ 1,40 mètre.



Figure 21 Interphase utilisateur de l'application Canopeo (App Store)

Cette mesure permet de quantifier le recouvrement foliaire total, incluant potentiellement les adventices. Toutefois, compte tenu de la date des désherbages effectués à proximité des prises de mesures, la surface occupée par les adventices reste faible. La tendance générale de l'évolution du recouvrement foliaire est donc largement expliquée par les cultures légumières d'intérêt.

Cette mesure a été réalisée le 29 avril 2025 pour les deux blocs légume et le 26 mai seulement pour le bloc légume 2 (oignon) car les épinards avaient déjà été récoltés.

4.6.3.2. Méthodes de mesure de la biomasse produite.

Comme déjà mentionné, la culture maraîchère sur petites surfaces est très tributaire de la quantité et de la qualité des légumes produits, car elle doit être la plus rentable possible pour les exploitants ((Loodts, 2020). Il était donc indispensable d'ajouter un indicateur de rendement en biomasse fraîche pour compléter les mesures effectuées.

Pour les épinards, nous avons prélevé trois échantillons chacun constitué de neuf plants par parcelle. Chaque groupe de neuf plants étaient regroupé en zone répartie de façon aléatoire sur la parcelle pour être le plus représentatif de l'ensemble de la parcelle. Chaque échantillon a été pesé sur place afin de déterminer la masse fraîche des légumes. Cette opération a été répétée pour chaque parcelle étudiée.

Nous avons choisi d'utiliser uniquement le rendement en biomasse foliaire fraîche, car pour les épinards en particulier, c'est ce critère qui revêt le plus d'importance pour les maraîchers.

Au total, environ 20,5 kg d'échantillons ont été prélevés à la date du 16 mai 2025.

4.7. La synthèse des méthodes de mesure utilisées dans le cadre de l'expérimentation

Tableau 5 : Synthèse des méthodes de mesure mobilisées dans le cadre de l'expérimentation

Axe de mesure	Date	Nom de la méthode	Mesure	Méthode d'échantillonnage
Santé du sol	14/11/2024 (prélèvements) – 13/02/2025 (résultats)	Analyse de fertilité chimique (Laboratoire CPAR)	pH KCl, C organique et total, % humus, % azote, P, K, Mg, Ca	15 prélèvements en zigzag/tarière gouge par parcelle, homogénéisés en 1 échantillon (500 g)
Santé du sol	28/05/2025	Méthode USDA, stabilité des agrégats	Stabilité structurale des agrégats dans l'eau (score 0–6)	3 agrégats prélevés sous le paillage par parcelle
Santé du sol	26–27/03/2025	Méthode VESS (Visual Evaluation of Soil Structure)	Structure visuelle du sol, taille/porosité des agrégats (score 1–5)	2 blocs 20×20×30 cm prélevés à la bêche par parcelle, hors bordures
Santé du sol	26–27/03/2025	Test bêche (adapté OPVT)	Densité et identification fonctionnelle des vers de terre	Même bloc que VESS, motte cassée et tri manuel des lombrics
Santé du sol	21/03/2025 – 24/06/2025	Méthode MPN, mycorhization	Concentration en spores de champignons mycorhiziens arbusculaires (spores/g sol)	5 kg de sol prélevés à la bêche (0–20 cm) par parcelle sélectionnée
Santé du sol	26/06/2025	Méthode « Ariane Chabert », infiltration de l'eau	Vitesse d'infiltration de l'eau (cm/min)	Tube PVC 12 cm enfoncé sur 5 cm, mesure sur place
Santé du sol	18–25/06/2025	Dosage du carbone microbien par fumigation (Cmic)	Carbone microbien (mg C/g sol) et matière sèche	Même protocole que fertilité (15 prélèvements en zigzag par parcelle)
Adventices	26/05/2025	Relevé adventices, méthode Wilmus (quadrillage 71 cm, 196 cases)	% surface recouverte par adventices, inventaire et diversité spécifique	Quadrillage centré dans la parcelle, identification des espèces dans chaque case
Croissance des cultures	29/04/2025 (2 blocs) et 26/05/2025 (bloc 2)	Suivi du recouvrement foliaire, application Canopeo	% recouvrement foliaire total (pixels verts)	Photo verticale au centre de chaque parcelle (~1,40 m de hauteur)
Croissance des cultures	16/05/2025	Biomasse foliaire fraîche (épinards)	Rendement en masse fraîche par parcelle	3 échantillons de 9 plants représentatifs par parcelle, pesés sur place

4.7.1. Les méthodes d'analyse statistique

Dans le prolongement des méthodes de mesure décrites ci-dessus, cette section précise les approches statistiques retenues pour analyser les données collectées. L'ensemble des analyses et des graphiques a été réalisé avec le logiciel R (version 2024.04.1) et Microsoft Excel, au moyen de scripts personnalisés développés spécifiquement pour ce mémoire, disponible via le lien Google drive disponible en annexe 9. Pour réaliser les codes, différents packages que cela ont été utilisés pour manipuler, préparer, visualiser et traiter statistiquement les données (readxl, dplyr, tydr, rlang, tidyverse, string, ggplot2, scales, lme4, lmerTest, emmeans, multcompView, car, agricolae, performance, corplot).

4.7.1.1. Les facteurs et modèles étudiés

Pour rappel, le dispositif expérimental repose sur un plan en lignes et en colonnes structuré en quatre facteurs :

- Traitement (Trait), est un facteur fixe à 5 niveaux (les 5 paillages),
- Bloc Légume (*Bloc_Lég*), est un facteur fixe à deux niveaux (« Épinards » et « Oignons »),
- Ligne (*Row*), est un facteur aléatoire à trois niveaux (les trois lignes A, B et C),
- Colonne (*Col*), est un facteur aléatoire à dix niveaux (les dix colonnes).

Les facteurs « ligne » et « colonne » sont traités en tant qu'effets aléatoires, car ils constituent des sources de nuisance (gradient de sol, précédents culturels) dont on cherche à neutraliser l'impact, sans pour autant les étudier directement. Cette approche garantit également une meilleure généralisation des résultats au-delà de la configuration spécifique de nos planches maraîchères.

Le bloc Légume est un facteur fixe imbriqué avec les colonnes, on a 5 colonnes par bloc, mais on traite toutes les colonnes comme un facteur aléatoire croisé avec Row. Grâce à ce plan en croisillons imbriqué, on contrôle la variabilité spatiale entre le bloc légume, les lignes et les colonnes, tout en estimant l'effet des traitements.

Ce design implique toutefois plusieurs contraintes analytiques. En effet, l'absence de tous les traitements dans chaque colonne empêche de tester proprement un effet « Traitement » par colonne sans créer des comparaisons déséquilibrées (degrés de liberté faibles voire nuls). D'autre part, puisque certains traitements sont absents de certaines colonnes, les effets « Colonne » et « Colonne × Traitement » deviennent confondus. Il est alors impossible d'attribuer une différence observée à la colonne, au traitement ou à leur interaction (phénomène de confusion/aliasing).

4.7.1.2. La vérification des hypothèses ANOVA et l'utilisation du test de Tukey

Lors de la réalisation d'une ANOVA, trois hypothèses doivent être vérifiées : l'indépendance des observations, la normalité des résidus et l'homogénéité des variances expérimentales / homoscedasticité. L'indépendance est assurée par le design et le bon contrôle des conditions expérimentales. La normalité, a systématiquement été

prouvé via le test de Shapiro–Wilk et visualisée par Q–Q plot. Alors que l’homoscédasticité a été systématiquement démontré via le test de Levene.

Ce n’est qu’une fois ces hypothèses vérifiées que des tests Anova à un, deux ou trois facteurs ont été utilisés. Le seuil de significativité est fixé à 5 % ($p < 0,05$).

Lorsque l’ANOVA mettait en évidence un effet significatif, des comparaisons multiples ont été réalisées au moyen du test de Tukey HSD afin d’identifier précisément les niveaux du facteur qui diffèrent significativement entre eux.

4.7.1.3. Alternatives non-paramétriques à l’ANOVA et au test de Tukey. Les alternatives non-paramétriques à l’ANOVA et au test de Tukey.

Si une ou plusieurs hypothèses de l’ANOVA n’était pas respectées et qu’aucune transformation ne permettait de les satisfaire, des méthodes non paramétriques ont été employées. Dans le cas de ce travail, les méthodes de Kruskal-Wallis et des comparaisons par paire de Wilcoxon ont été utilisées, puisqu’elles sont les équivalents non-paramétriques de l’ANOVA I et du test de Tukey.

4.7.1.4. Le modèle mixte (LMM) et la méthode LRT

Lorsque l’analyse intègre des facteurs aléatoires (ici *Col* et *Row*) en plus des facteurs fixes (*Trait*, *Bloc_Leg*), le modèle statistique approprié est un modèle linéaire mixte (Linear Mixed-Effects Model, LMM). Les facteurs « ligne » et « colonne » sont traités en tant qu’effets aléatoires, car ils constituent des sources de nuisance (gradient de sol, précédents culturels) dont on cherche à neutraliser l’impact, sans pour autant les étudier directement. Cette approche garantit également une meilleure généralisation des résultats au-delà de la configuration spécifique de nos planches maraîchères.

Pour obtenir la plus grande précision, nous avons élaboré plusieurs modèles que nous avons comparés selon la méthode des modèles emboîtés. Cette approche consiste à retirer successivement chaque composante aléatoire puis à confronter par un test de rapport de vraisemblance LRT le modèle restreint au modèle complet. Les résultats ont permis de désigner le modèle le plus performant dont l’analyse a ensuite guidé les conclusions de notre étude.

4.7.1.5. Les matrices de corrélation et le coefficient de Pearson

Au cours de ce travail, Des matrices de corrélation ont été établies ponctuellement pour explorer des relations jugées pertinentes entre variables. Le coefficient de Pearson mesure l’intensité et le sens (positif ou négatif) de la relation linéaire entre deux variables quantitatives.

4.7.1.6. Les indicateurs de comparaison des facteurs fixe et aléatoire

Dans les modèles mixtes, le R^2 marginal quantifie la variance expliquée par les seuls effets fixes, tandis que R^2 conditionnel reflète la variance expliquée par l’ensemble du modèle, effets fixes et aléatoires compris. Ces deux R^2 ne s’additionnent pas mais se compare pour la même variable-réponse. Ces indicateurs décrivent l’ampleur des effets plutôt que leur existence statistique et complètent les valeurs de p .

5. Interprétation des résultats

Dans cette section consacrée aux résultats, nous présenterons une description globale des observations obtenues à partir des différentes méthodes et indicateurs utilisés via les tests statistiques présentés précédemment.

Il est à noter que, pour des raisons de cohérence avec les figures et les tableaux, certaines formulations seront reprises telles quelles dans le texte. Par exemple nous utiliserons régulièrement les abréviations « Col » pour désigner le facteur « Colonne », « Row » pour le facteur « Ligne », « Bloc_Leg » pour le facteur « Bloc Légume » et « Trait » pour le facteur « Traitement ».

Pour approfondir l'analyse des données, des tableaux résumant des facteurs significatifs ainsi que d'autres analyses complémentaires sont disponibles de l'annexe 5 à l'annexe 8.

5.1. Les résultats des méthodes évaluant la santé du sol

5.1.1. Les résultats des mesures de fertilité chimique

Pour rappel, comme stipulé dans la partie *Matériel et méthodes*, ces tests de fertilité ont été réalisés avant la mise en place définitive du plan expérimental, de sorte qu'il était peu probable de détecter un effet des mulch à ce stade. L'objectif était de vérifier si les parcelles présentaient déjà une hétérogénéité liée aux cultures précédentes et d'estimer dans quelle mesure cette variabilité initiale pourrait influencer les mesures réalisées ultérieurement.

Chaque variable de fertilité a fait l'objet d'une analyse univariée pour chacun des facteurs d'intérêts (Col, Row, Bloc Légume). Au préalable les hypothèses ANOVA ont été vérifiées et les tests paramétrique ou non paramétrique ont été réalisés.

Comme attendu les paillages (n'étant pas encore appliqués) n'ont pas eu d'effets significatifs sur la fertilité chimique.

En revanche, plusieurs effets spatiaux ont été détectés. Le facteur *Bloc Légume* n'a eu un effet notable que sur le rapport carbone/azote ($p = 0,0437^*$), une valeur très proche du seuil de significativité et à interpréter avec prudence. Le facteur colonne n'apparaît significatif que pour le pH ($p = 0.001386^{**}$) et pour le rapport C/N ($p = 0.04743^*$). En revanche, le facteur ligne se révèle régulièrement significatif pour plusieurs mesures de fertilité : carbone organique, calcium, humus, potassium, magnésium, phosphore et pH.

Concernant les comparaisons par paires, la colonne 4 a des valeurs significativement plus élevées que la 1 ($p = 0,0399^*$). Pour le carbone et l'humus, les lignes A et C affichent respectivement les valeurs les plus faibles et les plus élevées, tandis que la ligne B occupe une position intermédiaire.

Ces résultats suggère l'existence d'un gradient spatial qu'il conviendra de surveiller afin de ne pas le confondre avec un effet des traitements.

Une matrice de corrélation entre les mesures de fertilité (figure 22) a été réalisée. Elle révèle une très forte redondance entre les indicateurs de fertilité organique (carbone total, humus, rapport C/N et azote total), suggérant qu'ils mesurent une même dimension sous-jacente de la « qualité organique du sol ». Le potassium est modérément associé à ce bloc, tandis que le pH constitue une composante distincte.

Matrice de Corrélation des variables de fertilité mesurées

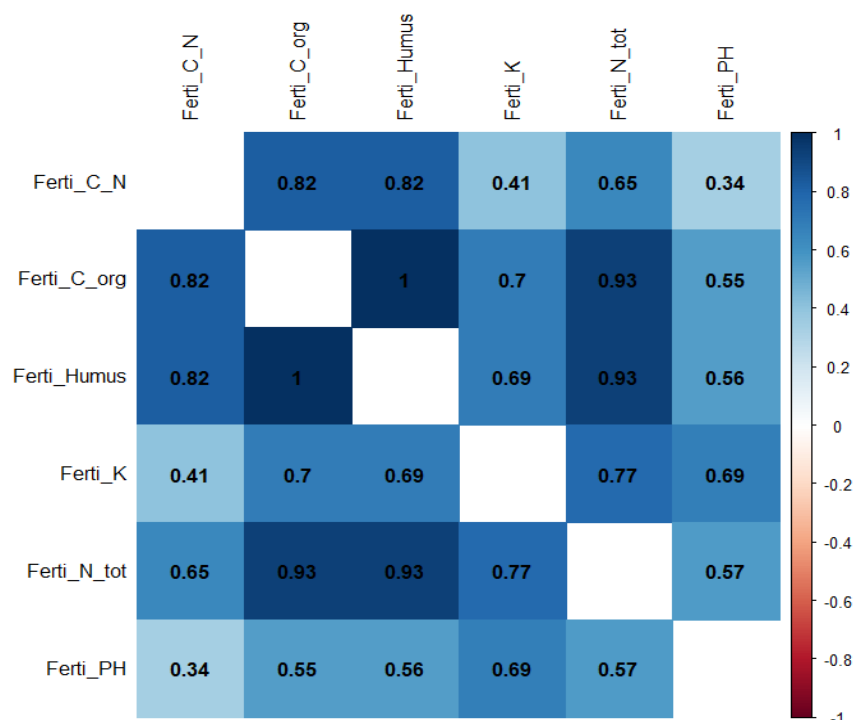


Figure 22 Matrice de Corrélation des variables de fertilité mesurées

5.1.2. Les résultats de l'état de structure des agrégats

Pour les données USDA, nous avons ajusté un modèle mixte intégrant les traitements et les blocs légumes comme effets fixes, et la colonne comme effet aléatoire. Le facteur ligne (Row) n'a pas été conservé à l'issue d'un test de rapport de vraisemblance (LRT).

Les hypothèses de l'ANOVA ont été vérifiées et respectées. Le modèle présente un R^2 marginal (effets fixes) de 0,232 et un R^2 conditionnel (effets fixes plus aléatoires) de 0,447. Autrement dit, 44,7 % de la variance est expliquée par ce modèle, tandis qu'un peu plus de la moitié reste non expliquée. Ce modèle a servi à produire le graphique des moyennes ajustées (figure 23). Aucun traitement significativement différent pour les valeurs USDA est observées. Les moyennes ajustées restent globalement proches les unes des autres (score de 5,458 à 5,620).

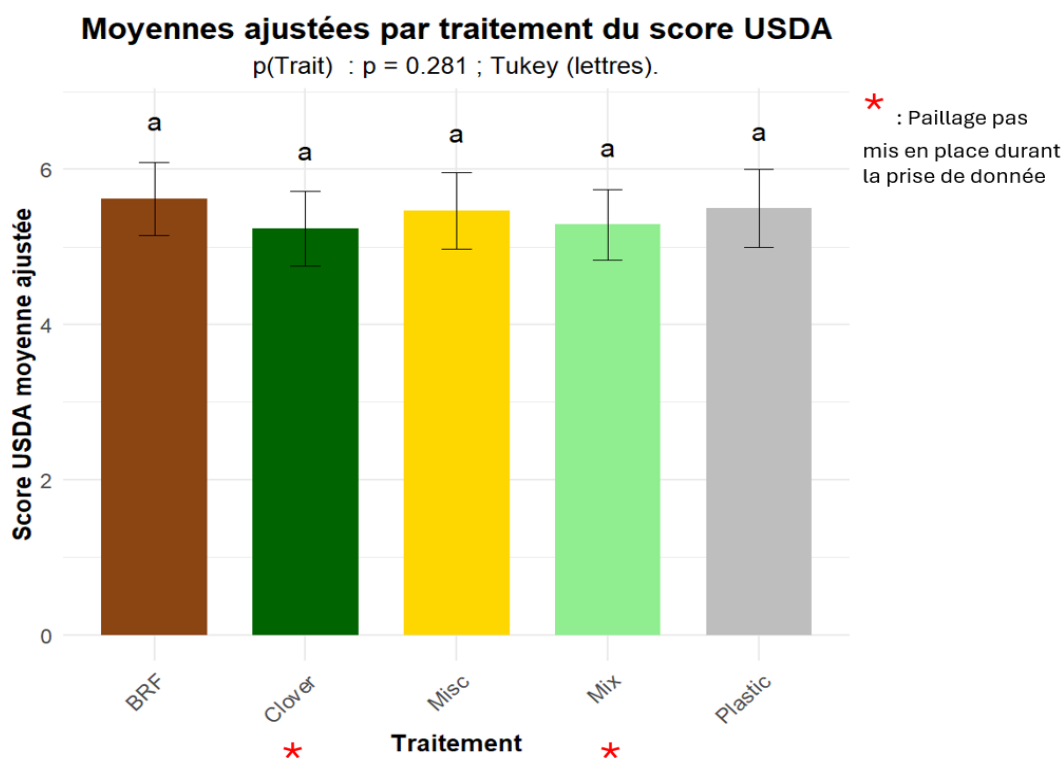


Figure 23 Moyennes ajustées par traitement du score de la méthode USDA. Les traitements partageant une même lettre ne sont pas significativement différents à un seuil de 5% pour un même paramètre.

Cependant, le modèle met également en évidence une interaction significative entre les traitements et les blocs légumes ($p = 0,004811^{**}$), indiquant que l'effet des traitements varie selon le bloc légume. Autrement dit, certains traitements se comportent différemment d'un bloc à l'autre, sans qu'il existe pour autant un effet uniforme du traitement ou du bloc sur l'ensemble des données. Cependant, les comparaisons par paires révèlent une seule différence entre le paillage *Clover* du bloc légume 1 et le paillage *Mix* du bloc légume 2 ($p = 0,0169^{*}$).

Une analyse unifactorielle a été réalisée pour évaluer les effets colonne et ligne sur les valeurs USDA. La colonne présente un effet global significatif selon le test de Kruskal-Wallis, mais les comparaisons par paires ne révèlent aucune différence significative entre niveaux. Bien que des tests complémentaires puissent être utiles pour confirmer l'absence d'effets robustes liés à la colonne ou la rangée, ces résultats suggèrent que l'influence de ces facteurs reste limitée.

5.1.3. Les résultats de la méthode VESS

Pour l'analyse des données VESS, un modèle mixte sans interaction a été ajusté, avec les traitements comme facteur fixe et les lignes et colonnes comme facteurs aléatoires.

Il respecte les hypothèses de type ANOVA. Le R^2 marginal est de 0,194 et le R^2 conditionnel de 0,65.

Les résultats du modèle avec moyennes ajustées sont présentés en figure 24 et indique que l'effet des paillages ne sont pas significatif ($p = 0,2341$), ce qui est cohérent car les paillages n'étaient pas tous installés au moment de la prise de mesure. Tout comme pour les résultats USDA, les moyennes ajustées restent très proches les unes des autres (de 1,53 à 1,967).

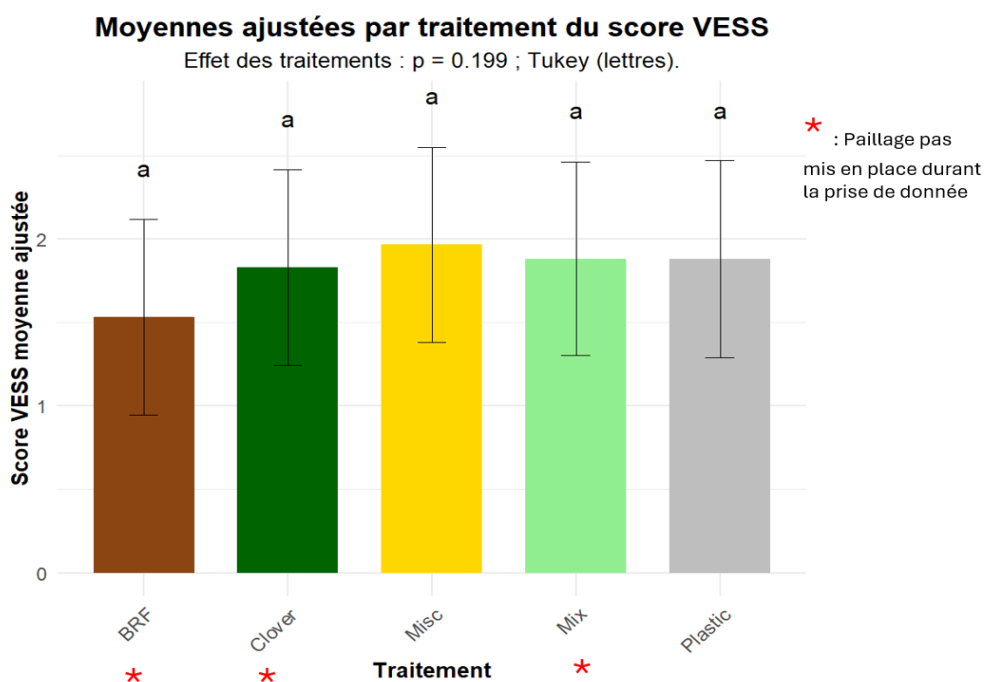


Figure 24 Moyenne ajustée par traitement du score de la méthode VESS. Les traitements partageant une même lettre ne sont pas significativement différents à un seuil de 5% pour un même paramètre.

Une analyse de type ANOVA I a été conduite pour caractériser l'influence de l'hétérogénéité du sol. Il apparaît que les lignes (Row) ont un effet très marqué sur les résultats ($p = 3,73 \cdot 10^{-5***}$).

Le test de Tukey met en évidence que la ligne C présente des moyennes significativement plus élevées comparé aux lignes A et B ($p = 0,00088 ***$, $p = 0,0000647 ***$). Les blocs légumes présentent un effet tendanciel, sans signification statistique forte ($p = 0,127$).

5.1.4. Les résultats de la méthode « test bêche »

Pour cette partie, plusieurs indicateurs ont été utilisés. Le nombre d'individu lombricien ainsi que de la richesse en groupements fonctionnels a été mesuré pour chaque parcelle. La richesse en groupements fonctionnels correspond simplement au nombre de groupes fonctionnels lombricien identifiés dans un échantillon

5.1.4.1. La population en lombrics

Concernant la population en lombrics, aucun modèle mixte, malgré les transformations réalisées, n'a respecté les hypothèses de l'ANOVA. Après comparaison et transformation (mise en racine carrée des valeurs), un modèle additif intégrant les facteurs traitement et bloc légume a été retenu.

Le R^2 du modèle additif est de 0,153 et demeure donc peu explicatif de la variance observée. Les résultats indiquent que le paillage n'est pas significatif ($p = 0,18$), tandis que le bloc légume l'est ($p = 0,04591^*$). Le bloc légume 1 présente une moyenne significativement plus élevée que le bloc 2 (3,87 contre 2,71 individus) malgré que la parcelle 10B.a eu des résultats mesurés beaucoup plus élevé que la moyenne global (15.5 contre 3.246 individus en moyenne).

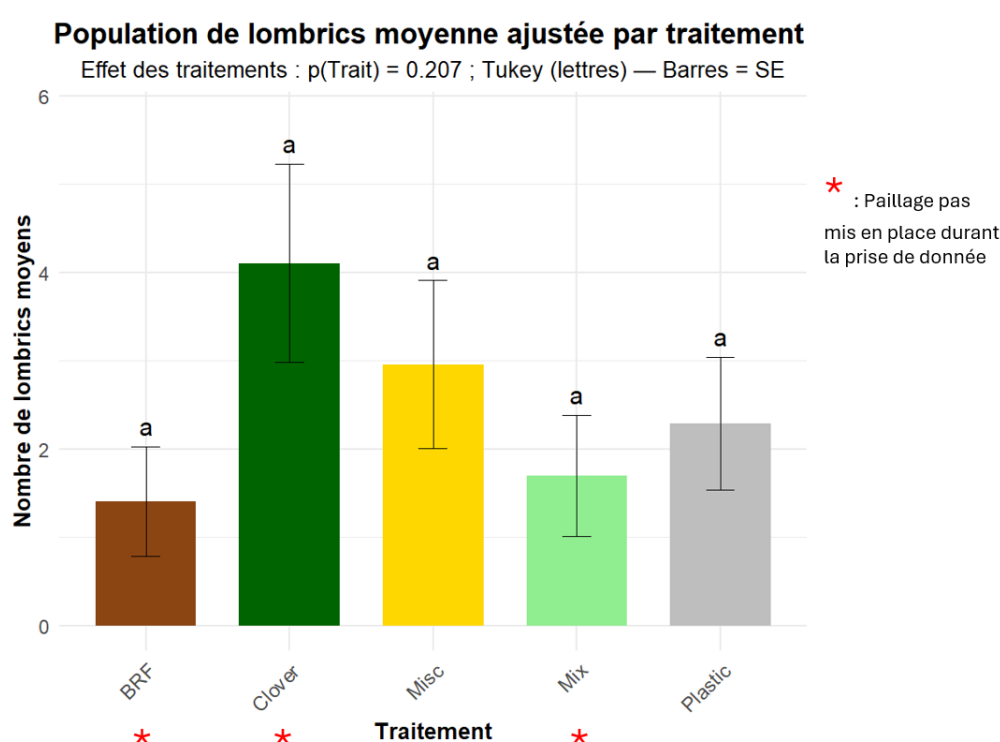


Figure 25 Moyenne ajustée par traitement du nombre de lombrics observés. Les traitements partageant une même lettre ne sont pas significativement différents à un seuil de 5% pour un même paramètre

La figure 25, réalisée à partir du modèle additif retenu, illustre bien la relation non-significativité des traitements.

L'analyse ANOVA I de *Row* et *Col*, décèle un effet significatif des colonnes ($p = 0,0363^*$) sur les résultats. Toutefois, aucune paire de colonnes ne s'est distinguée significativement après les comparaisons par paires.

5.1.4.2. La richesse en groupements fonctionnels

L'analyse du modèle mixte montre que les traitements n'ont pas d'effets significatifs sur la richesse en groupements fonctionnels ($p = 0,590$) et n'explique qu'environ 4,5 % de la variance observée (R^2 marginal = 0,0448). En revanche, l'effet aléatoire *Colonne* capture

une part notable de la variance (R^2 conditionnel = 0,241), ce qui suggère une hétérogénéité spatiale liée à la position en colonne. La figure 26 illustre une nouvelle fois la tendance générale des moyennes ajustées tout en confirmant qu'aucune différence observée n'est statistiquement significative.

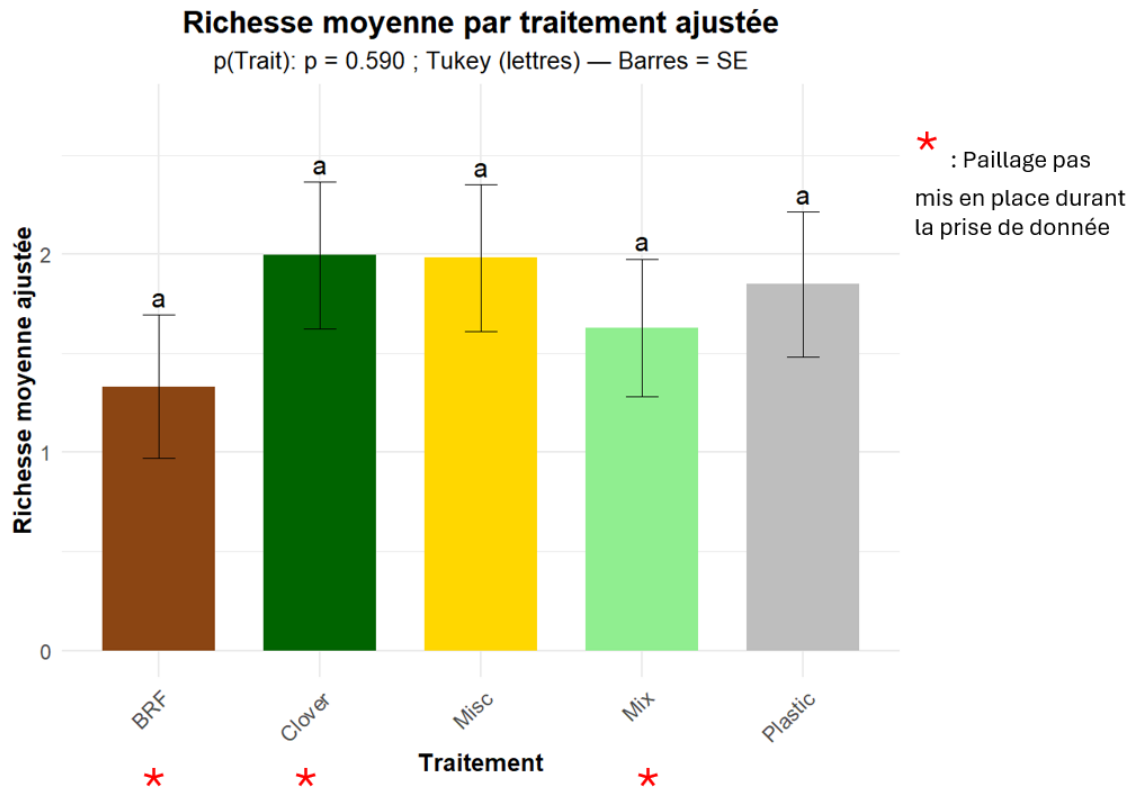


Figure 26 Moyenne ajustée par traitement de la richesse en groupement fonctionnel. Les traitements partageant une même lettre ne sont pas significativement différents à un seuil de 5% pour un même paramètre

Une analyse uni factoriel ANOVA I a également été réalisé pour estimer l'effet de la position sur les résultats. L'effet de la colonne influence significativement la richesse ($p = 0,0169^*$).

La comparaison par paire montre que la colonne 5 a une richesse significativement inférieure à la colonne 2 ($p=0.01298^*$).

5.1.5. Les résultats des mesures de vitesse d'infiltration

Le modèle mixte retenu, inclus *Trait* comme facteur fixe et *Col* comme facteur aléatoire, il offre le meilleur compromis entre complexité et qualité d'ajustement.

Le facteur *Trait* explique une part substantielle de la variance (R^2 marginal = 0,478) et à un effet significatif ($p = 0,001531^{**}$). L'ajout de l'effet aléatoire *Colonne* permet de capturer une variabilité résiduelle (R^2 conditionnel = 0,594), indiquant une structure spatiale faible mais non négligeable. Les comparaisons par paires mettent en évidence des différences significatives entre certains traitements (notamment *Misc* vs *Mix*, *Misc* vs *Plastic* et *Clover* vs *Misc*), confirmant une hiérarchie où *Misc* obtient de moins bons

résultats en matière d'infiltration comme illustré sur la figure 27. Pour une plus grande clareté et pour comparer plus facilement avec les données de la littérature , les unités initiales (cm/5minutes) ont été converties en unités plus standards pour mesurer l'infiltration (mm/h).

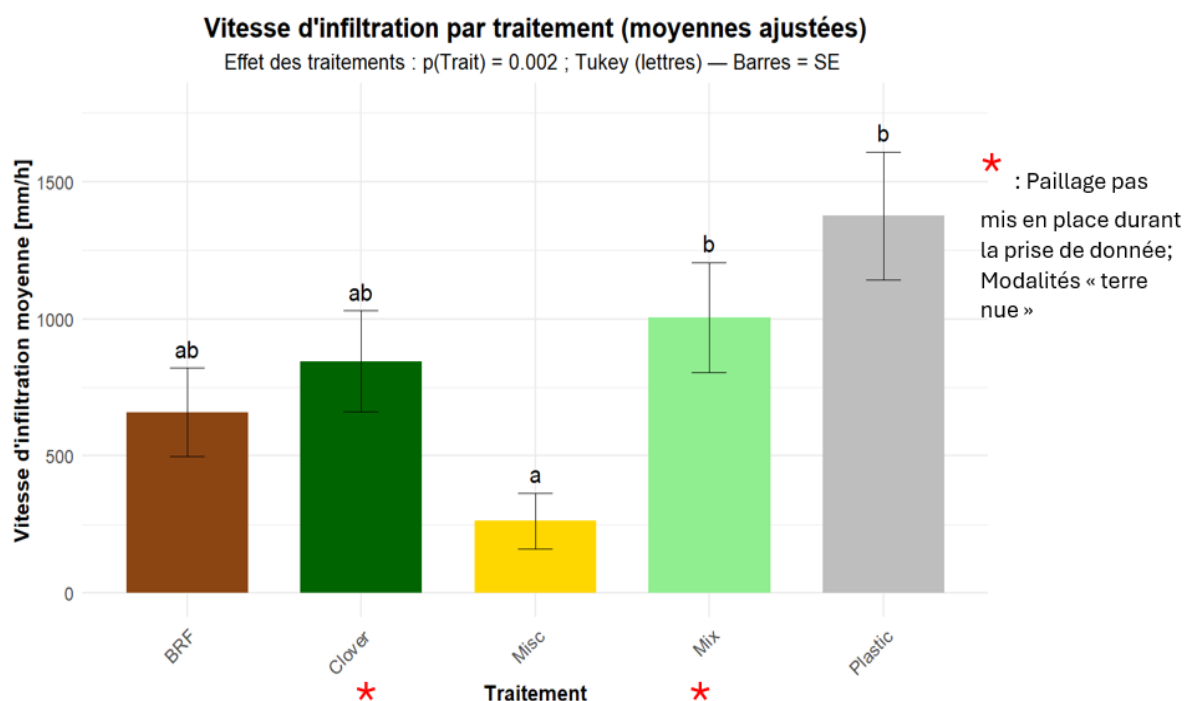


Figure 27 Moyenne ajustée par traitement de la vitesse d'infiltration exprimée en mm/h suite à une conversion des unités initiales exprimées en cm/ 5min (méthode «Ariane .Chabret»). Les traitements partageant une même lettre ne sont pas significativement différents à un seuil de 5% pour un même paramètre

L'analyse univariée indique qu'aucune variation significative de l'infiltration n'est attribuable à la position en ligne ou en colonne, ni au bloc légume.

5.1.6. Les résultats du rapport en matière sèche, du carbone microbien et de la méthode MPN

Les trois indicateurs mesurés, à savoir le carbone microbien, le rapport en matière sèche et le MPN, ont été regroupés dans une même analyse en raison de la similarité de leurs traitements statistiques. Comme il n'y avait pas de réplicats indépendants par traitement, il n'a pas été possible de réaliser d'analyses statistiques inférentielles de type ANOVA ou de tests non paramétriques.

L'interprétation repose donc sur une approche descriptive, appuyée par des représentations graphiques comme les cartes thermiques et par l'examen des corrélations entre variables. On remarque toutefois, dans le tableau 6, que la méthode MPN présente des écarts types ainsi que des intervalles de confiance supérieurs et inférieurs. Cela s'explique par le fait que cette méthode utilise plusieurs réplicats d'un même échantillon pour estimer la valeur finale.

Pour le carbone microbien (tableau 6), les valeurs moyennes diffèrent de manière notable entre traitements. La modalité *BRF* enregistre la teneur en carbone la plus élevée (0,693 gCmic/g(sol)). Les traitements *Misc*, *Plastic* et *Mix* présentent des niveaux intermédiaires relativement similaires, tandis que le trèfle (*Clover*) affiche la valeur la plus faible (0,450 MPN/g(sol)). Cette distribution laisse entrevoir un effet potentiellement bénéfique du BRF sur la population microbienne du sol.

Tableau 6: Moyenne des résultats obtenus pour le carbone microbien, le rapport en matière sèche et la méthode MPN

Variable	Trait	Mean
C_micro	BRF	0.693
C_micro	Clover	0.450
C_micro	Misc	0.566
C_micro	Mix	0.547
C_micro	Plastic	0.550
MS	BRF	0.769
MS	Clover	0.827
MS	Misc	0.763
MS	Mix	0.843
MS	Plastic	0.811
MPN	BRF	0.041
MPN	Clover	NA

Concernant la matière sèche, les rapports g sol sec / g sol humide sont globalement homogènes entre modalités. Les traitements miscanthus et BRF sont très proches, tandis que Clover, Mix et Plastic présentent les résultats les plus élevés. Cela ne permet pas de mettre en évidence des tendances claires entre traitements à ce stade de l'expérimentation.

Pour la variable MPN, les différences de valeur exprimées en MPN /g(sol) sont plus marquées. Le *BRF* et *Misc* présentent les valeurs les plus élevées, suivies de la bâche en plastique. Le traitement *Mix* est le seul à enregistrer une valeur nulle. La donnée pour *Clover* est manquante (NA) en raison d'un échec d'analyse en laboratoire. Des réplicats ont été perdus lors de la phase de développement des maïs ce qui réduit la confiance dans les résultats. Il faut donc interpréter ceux-ci avec précautions.

L'analyse spatiale par les *heat maps* (figure 28) révèle un gradient potentiel de concentration pour le carbone microbien (A), allant du bord vers le centre de l'essai. Pour le reste, aucune tendance n'est visible.

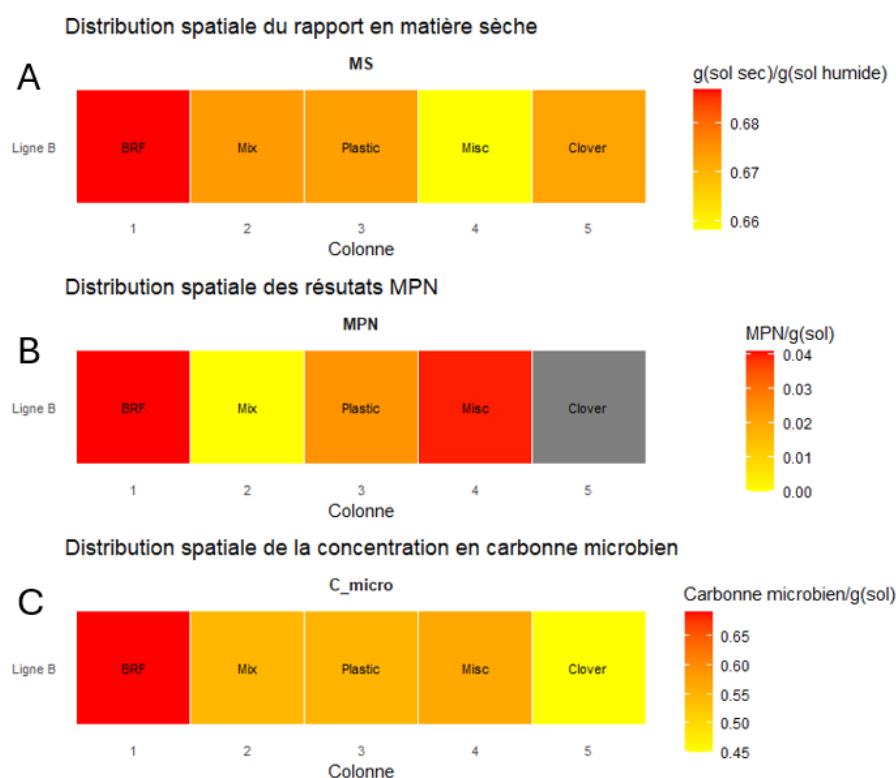


Figure 28 Heat maps de (A) le rapport en matière sèche, (B) la concentration en spore, (C) la concentration en carbone microbien

L'analyse de la corrélation met en évidence une relation quasi parfaite (~ 1) entre la teneur en carbone microbien du sol et la concentration mesurée par la méthode MPN. Ce résultat est cohérent, puisque le carbone microbien reflète directement la quantité de micro-organismes présents dans le sol, incluant les champignons mycorhiziens à arbuscules évalués par la méthode MPN.

5.2. Les résultats de la méthode de quantification et d'identification des adventices

Tout comme pour la méthode de « test bêche », deux indicateurs ont été retenus : d'une part, la surface totale couverte par les adventices, et d'autre part, la richesse en adventices. Cette dernière correspond au nombre d'espèces identifiées dans l'échantillon.

5.2.1. La surface occupée par les adventices (carrés de 25 cm²)

Le modèle retenu est un modèle avec interaction entre le traitement et le bloc légumes ($R^2 = 0,4778$). Les composantes aléatoires sont statistiquement faibles. Une transformation logarithmique a été appliquée afin de satisfaire les hypothèses de l'ANOVA. L'effet principal du traitement est tendanciel ($p = 0,091$), tandis que celui du bloc légume n'est pas significatif ($p = 0,693$). La figure 29 des moyennes ajustées sur

l'échelle d'origine, reflète les tendances. En moyenne, *BRF*, *Misc* et *Plastic* affichent des valeurs plus faibles que les modalités assimilées à « terre nue » (*Mix* et *Clover*.)

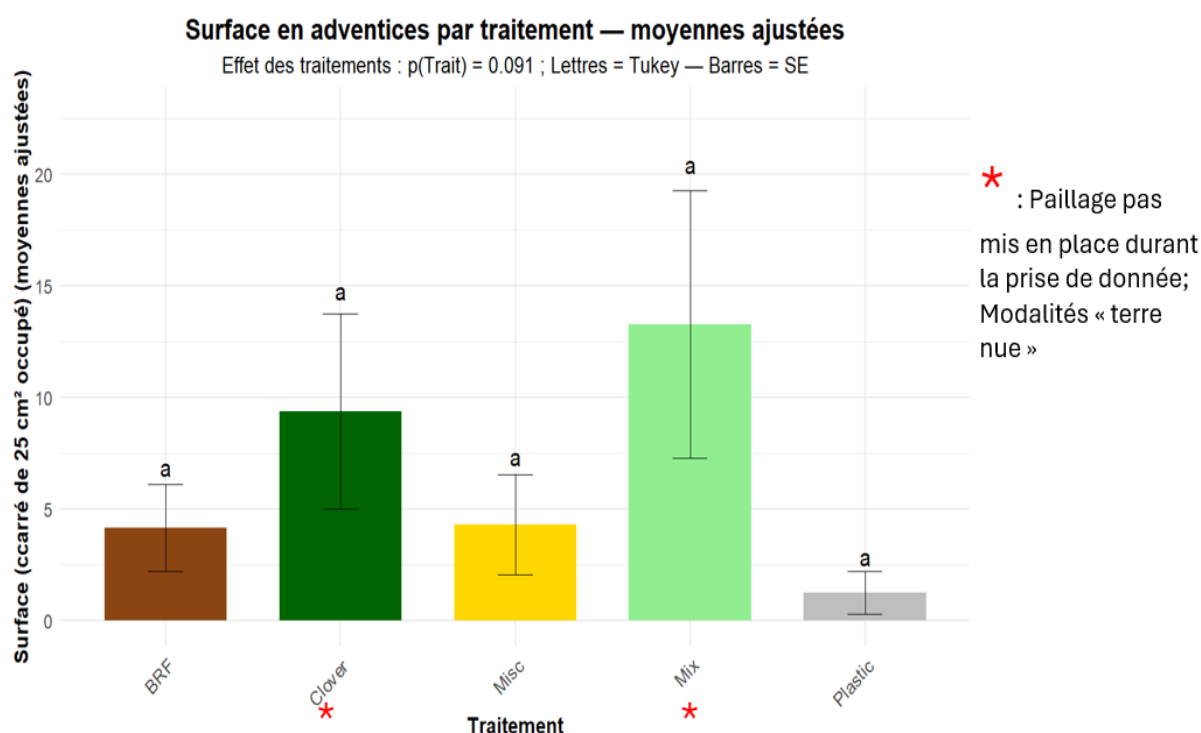


Figure 29 Moyenne ajustée par traitement de la surface occupée par des adventices. Les traitements partageant une même lettre ne sont pas significativement différents à un seuil de 5% pour un même paramètre

L'analyse par paires ne met pas en évidence de différences strictement significatives. Deux signaux méritent toutefois une attention. D'abord, la différence entre *Mix* et *Plastic* est proche de la limite de significativité ($p = 0,075$). Ceci indique que la bâche plastique a tendance à mieux gérer les adventices en comparaison du paillage miscanthus. Ensuite, la comparaison entre *Bloc_Leg1* et *Bloc_Leg2* suggère des valeurs plus élevées dans le *Bloc_Leg1* ($p = 0,059$).

L'analyse ANOVA I ne révèle aucun effet de position spatiale (*Col, Row*) sur la surface en adventices total. Ni les lignes ($p = 0,70$) ni les colonnes ($p = 0,55$) ne sont significatives.

5.2.2. La richesse des espèces d'adventices identifiées

Le modèle mixte retenu intègre l'interaction entre le traitement et le bloc légume ainsi que l'effet aléatoire de colonne. Il explique une part importante de la variance observée pour la richesse (R^2 marginal = 0,587, R^2 conditionnel = 0,705). L'effet principal des traitements est significatif ($p = 0.032153$ *), tandis que l'effet des blocs légumes seuls n'est pas détectable. En revanche, l'interaction Trait $\times$ Bloc_Leg est également significative ($p = 0.017725$ *), ce qui indique que la réponse aux traitements dépend en partie du bloc légume.

Comme illustré en figure 30, une analyse par paires (Tukey) globale, réalisée et indique que le *BRF* et le plastique présentent des valeurs de richesse en adventices significativement plus faibles que le trèfle (*Clover*) et le *Mix* (modalité « Terre nue »).

L'analyse des interactions met en évidence certaines combinaisons *Trait* × *Bloc_Leg* qui se distinguent nettement. Par exemple, le traitement *Plastic* en bloc légume 1 présente des écarts marqués par rapport à *Clover* en bloc légume 2 ou *Mix* en bloc légume 2. De même, le traitement *BRF* en bloc légume 2 diffère clairement de *Clover* et de *Mix* du même bloc.

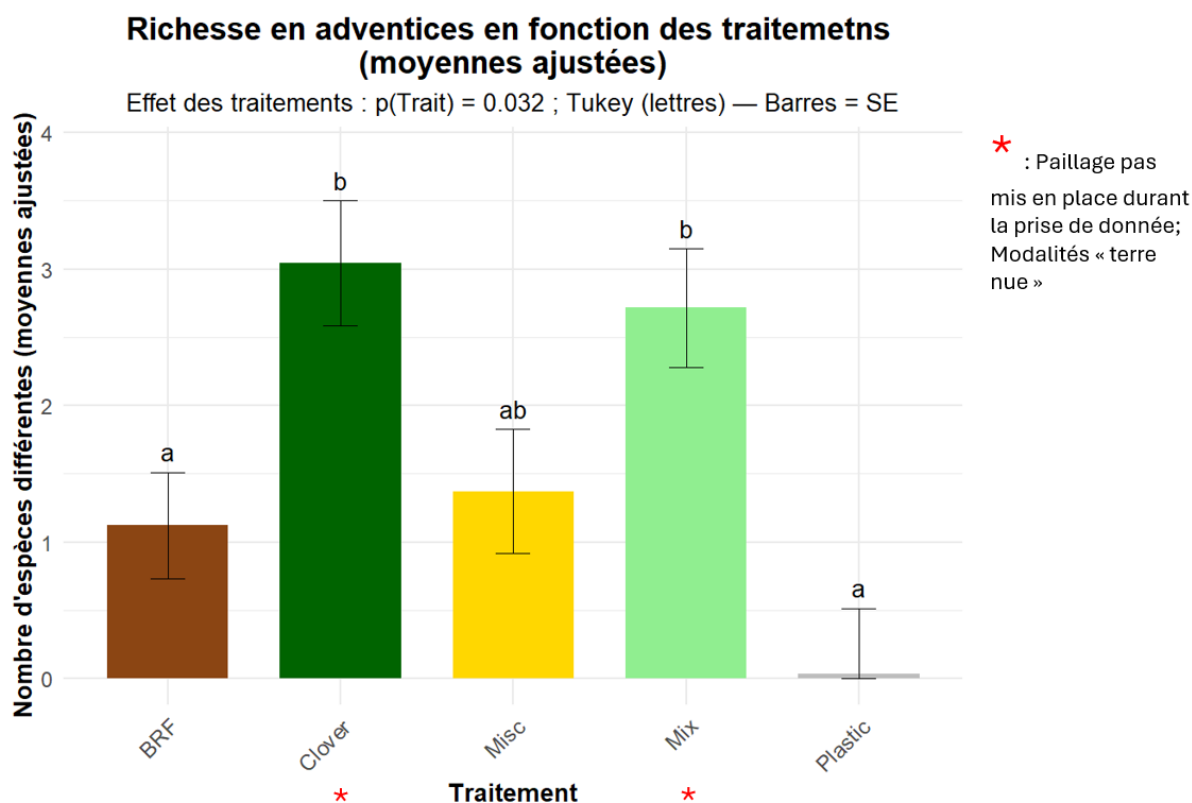


Figure 30 Moyenne ajusté par traitement de richesse en espèces d'adventices. Les traitements partageant une même lettre ne sont pas significativement différents à un seuil de 5% pour un même paramètre

Ces résultats montrent que la combinaison du traitement et du bloc légume peut produire des effets spécifiques que ne reflètent pas les seuls effets principaux. Cela justifie pleinement le maintien de l'interaction dans le modèle, afin de tenir compte de cette dépendance contextuelle. Dans certains cas, les différences observées sont suffisamment marquées pour être considérées comme statistiquement significatives.

Compte tenu de la significativité de cette interaction *Trait* × *Bloc_Leg*, il a semblé pertinent de représenter en figure 31 les résultats du modèle ajusté pour chaque bloc légume. Cette représentation révèle qu'aucune différence significative n'apparaît dans le bloc légume 1 (épinard). En revanche, dans le bloc légume 2, les paillages *Clover* et *Mix* (modalité « terre nue ») présentent un nombre d'espèces d'adventices significativement plus élevé que les paillages *BRF* et *Plastic*.

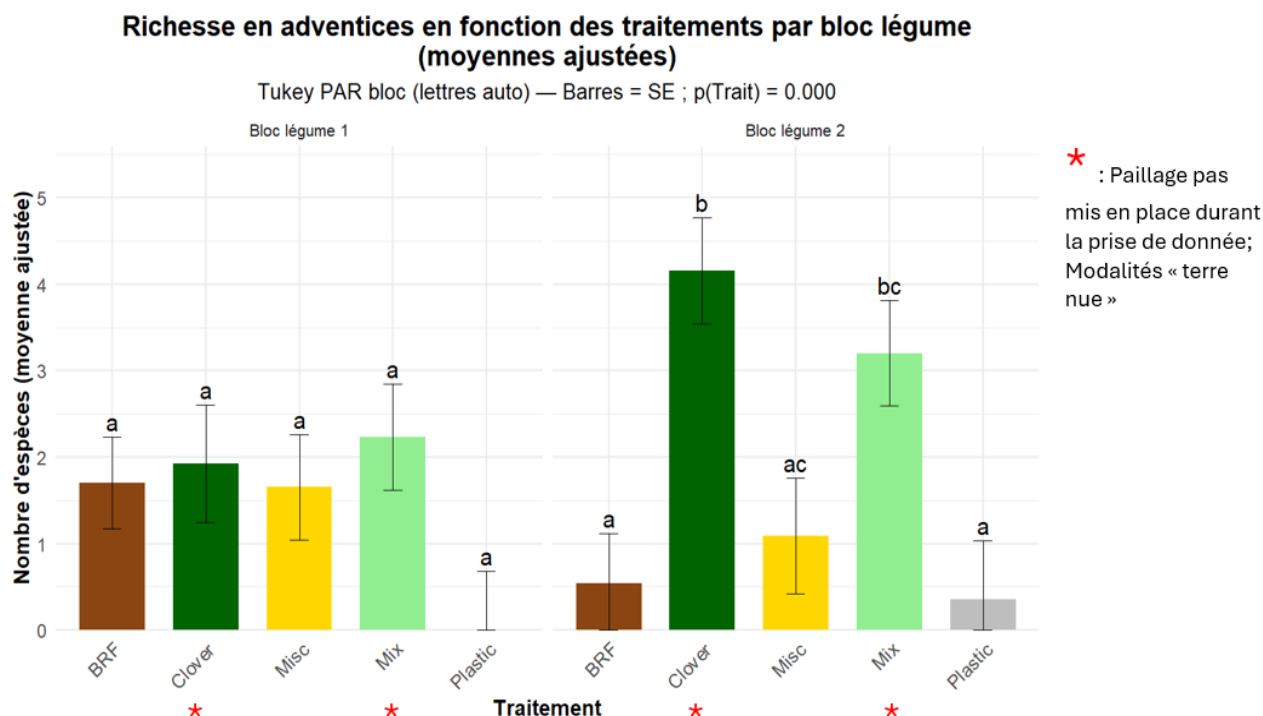


Figure 31 Moyenne ajustée par traitement et par bloc légume de la richesse en espèces d'adventices. Les traitements partageant une même lettre ne sont pas significativement différents à un seuil de 5% pour un même paramètre

5.3. Les résultats du pourcentage de recouvrement de la surface foliaire pour chaque légume.

Concernant la surface foliaire du légume, il a été décidé d'analyser séparément les blocs légumes. En effet, il n'était pas pertinent de comparer directement la surface foliaire de deux légumes présentant des caractéristiques phénotypiques différentes. Comme précisé dans la section 4 « *Matériel et méthodes* », le bloc légume 1 n'a fait l'objet que d'une seule mesure de surface foliaire, tandis que le bloc légume 2 a bénéficié de deux relevés, effectués les 29 avril et 26 mai 2025.

5.3.1. La surface foliaire du légume 1 à la date du 29 avril 2025

Le modèle retenu a le traitement en facteur fixe et le facteur colonne en aléatoire. L'analyse des R^2 suggère que l'effet aléatoire colonne explique une grande partie du modèle (R^2 marginal = 0.354 , R^2 conditionnel = 0.842). Le traitement y est fortement significatif ($p=0.000155$ ***). Les comparaisons par paire montrent que le miscanthus a des valeurs de surface foliaire significativement plus faible que le plastique ($p=0.0249$ *) comme nous pouvons le constater en figure 32.

Un test Anova I sur les facteurs spatiaux met en évidence démontre que la colonne 5 a des valeurs significativement plus élevées que la colonne 1 ($p=0.0119$ *).

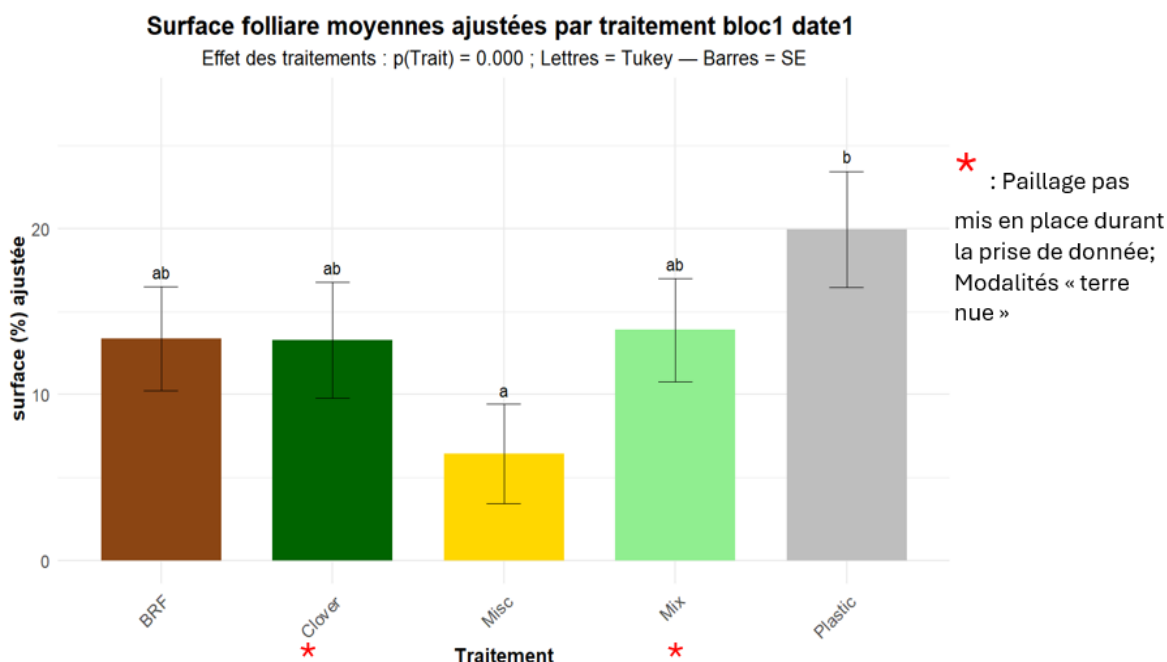


Figure 32 Moyenne ajustée par traitement de la surface foliaire du légume 1 (épinard) à la date du 29 avril 2025. Les traitements partageant une même lettre ne sont pas significativement différents à un seuil de 5% pour un même paramètre

5.3.2. La surface foliaire du légume 2 à la date du 29 avril 2025

Le modèle retenu comprend *Trait* en effet fixe et *Row* en effet aléatoire. L'effet global du traitement est significatif ($p = 0,0284$). La composante fixe explique environ 42 % de la variance et, en incorporant la structure aléatoire par *Row*, la variance expliquée atteint environ 69 %. La figure 33 illustre une tendance où le BRF a des valeurs plus faibles que la bâche plastique ($p = 0.0514$).

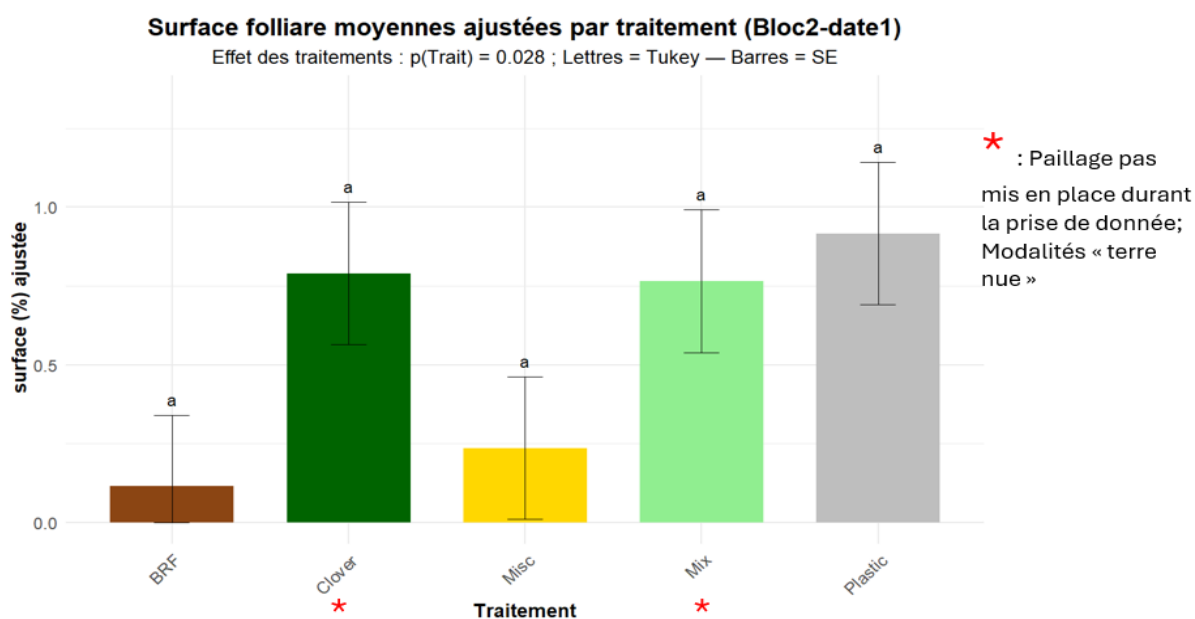


Figure 33 Moyenne ajustée par traitement de la surface foliaire du légume 2 (oignon) à la date du 29 avril 2025. Les traitements partageant une même lettre ne sont pas significativement différents à un seuil de 5% pour un même paramètre

Le test d'Anova I de *Row* et *Col* ne montrent aucun effet significatif.

5.3.3. La surface foliaire du légume 2 à la date du 26 mai 2025

Le modèle retenu inclut l'effet fixe du traitement (*Trait*) et un effet aléatoire de rangée (*Row*). La composante fixe explique environ 42 % de la variance totale, et en intégrant l'effet aléatoire de rangée on monte à 85.5 %, ce qui indique qu'il existe une structure résiduelle spatiale prise en compte par *Row*.

L'effet du traitement est significatif ($p = 0,028$), et les comparaisons par paires ajustées (Tukey) mettent en évidence des différences marquées entre certains traitements. Le paillage de trèfle et le mixte vivant (modalités « terre nue ») présentent des valeurs significativement plus élevées que les trois autres modalités, comme illustrée en figure 34.

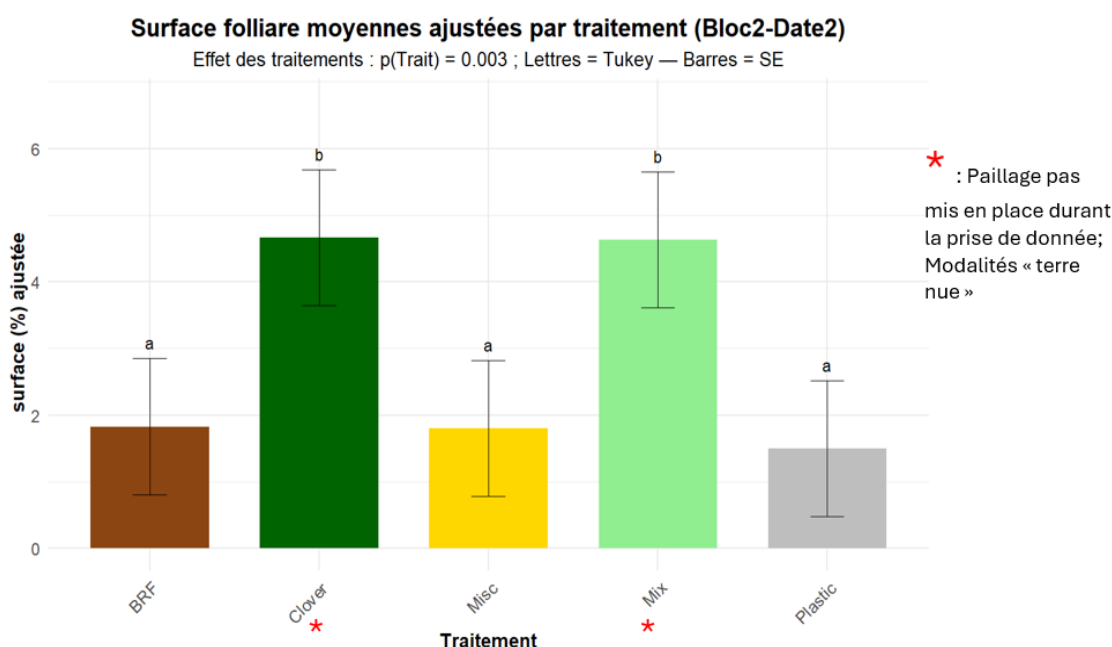


Figure 34 Moyenne ajustée par traitement de la surface foliaire du légume 2 (oignon) à la date du 26 mai 2025. Les traitements partageant une même lettre ne sont pas significativement différents à un seuil de 5% pour un même paramètre

En figure 35, les paillages *Mix* et *Clover*, ainsi que *BRF* et *Misc*, ont suivi une évolution similaire dans le temps. Le cas le plus surprenant concerne le couvert plastique. A la date du 29 avril, il affichait la moyenne de surface foliaire la plus élevée (0,9167 %), mais cette valeur n'a que peu progressé par la suite (1,4983 %). Cette stagnation est probablement le résultat de l'attaque par un rongeur d'une partie des jeunes pousses d'oignons, en particulier dans les rangées A et B.

Évolution de la surface foliaire moyenne entre le 29/04/2025 et le 26/05/2025

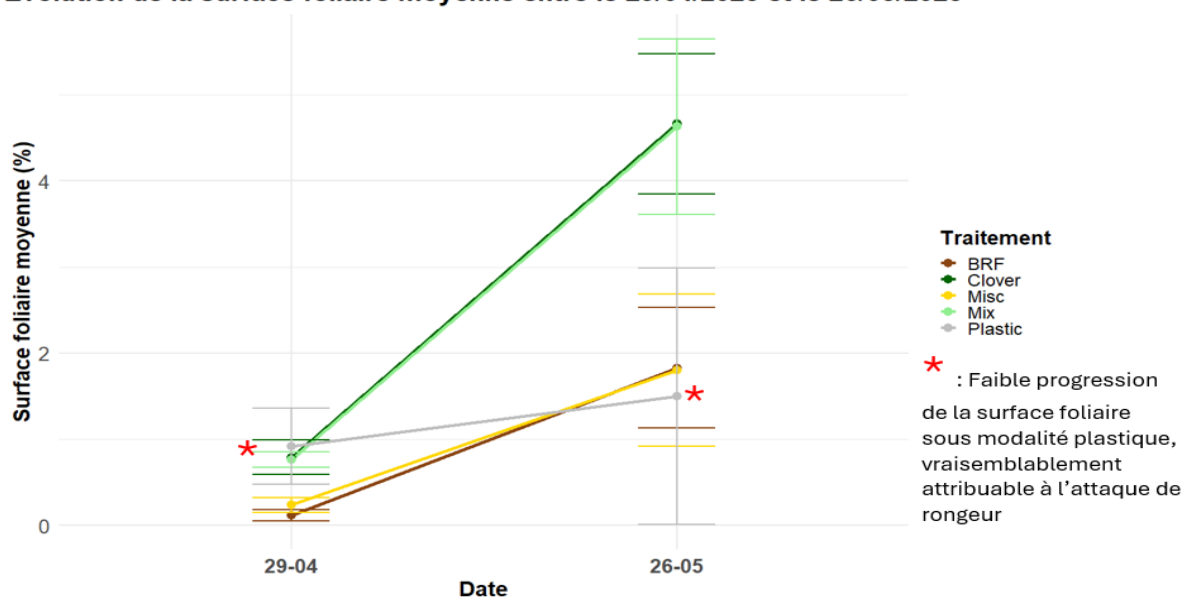


Figure 35 : Graphique de l'évolution de la surface foliaire par traitement pour le légume 2 (oignon aux dates du 29 avril et 26 mai 2025)

Le test ANOVA I de Row et Col montre que Row a des effets significatifs ($p=0.04694^*$). La ligne C a des valeurs faiblement plus élevées que la colonne A ($p=0.04966^*$).

5.4. Les résultats de la biomasse mesurée

Concernant la biomasse, le modèle mixte retenu est un modèle sans interaction, intégrant uniquement les colonnes comme effet aléatoire. L'analyse a été réalisée sur la racine carrée de la biomasse afin de respecter les hypothèses de l'ANOVA.

La variance expliquée par les effets fixes est déjà importante (R^2 marginal = 0,679) et, en ajoutant l'effet aléatoire de colonne, elle atteint une valeur très élevée (R^2 conditionnel = 0,931). Cela indique que le traitement, combiné à la structure en colonnes, explique presque toute la variation observée.

Comme illustré en figure 36, toutes les paires de traitements présentent des différences significatives, à l'exception de *Mix* et *Clover*. Le traitement *Plastic* (moyenne ajusté $\approx 911g$) se distingue nettement avec une biomasse significativement que les autres paillages. À l'inverse, le traitement *Misc* (moyenne ajusté $\approx 142g$) affiche les valeurs les plus faibles.

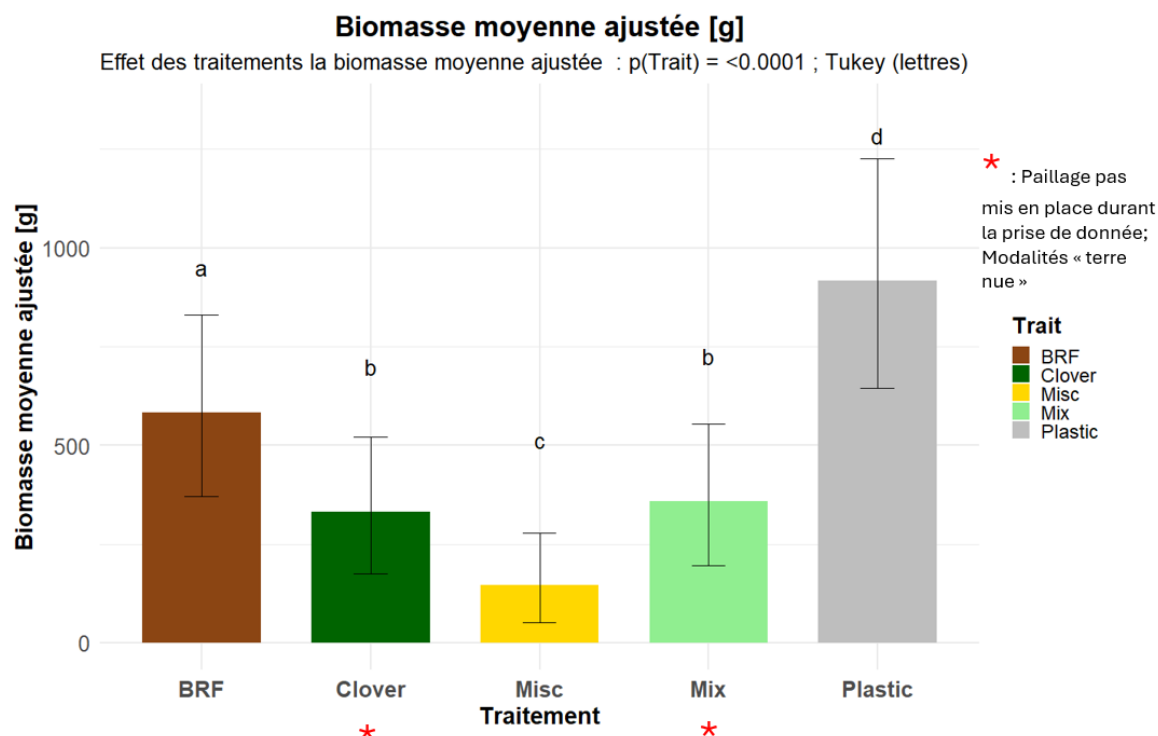


Figure 36 Moyenne ajustée par traitement de la biomasse du légume 2 (épinard). Les traitements partageant une même lettre ne sont pas significativement différents à un seuil de 5% pour un même paramètre

Les tests uni-factoriels n'ont pas laissé présager un effet spatial qui aurait un impact significatif sur la biomasse moyenne des parcelles.

5.5. La corrélation entre les mesures de fertilité, de biomasse et de surface foliaire.

Il paraissait pertinent d'évaluer les corrélations entre les mesures de fertilité et les résultats de biomasse ainsi que de surface foliaire obtenus. En effet, le lien entre la fertilité du sol et les rendements agricoles est bien établi.

La matrice de corrélation (figure 37) a été établie pour chaque parcelle du bloc légume 1, en croisant les indicateurs de fertilité avec la biomasse moyenne et la surface foliaire (leaf area).

Une forte corrélation est observée entre la surface foliaire et la biomasse moyenne ($r \approx 0,75$), ce qui est attendu dans le cas de l'épinard, puisque seule la partie aérienne est récoltée. En revanche, les comparaisons directes entre les mesures de fertilité et la surface foliaire n'ont pas donné lieu à des corrélations significatives ($p > 0,05$), comme l'indiquent les valeurs marquées d'une croix dans la matrice.

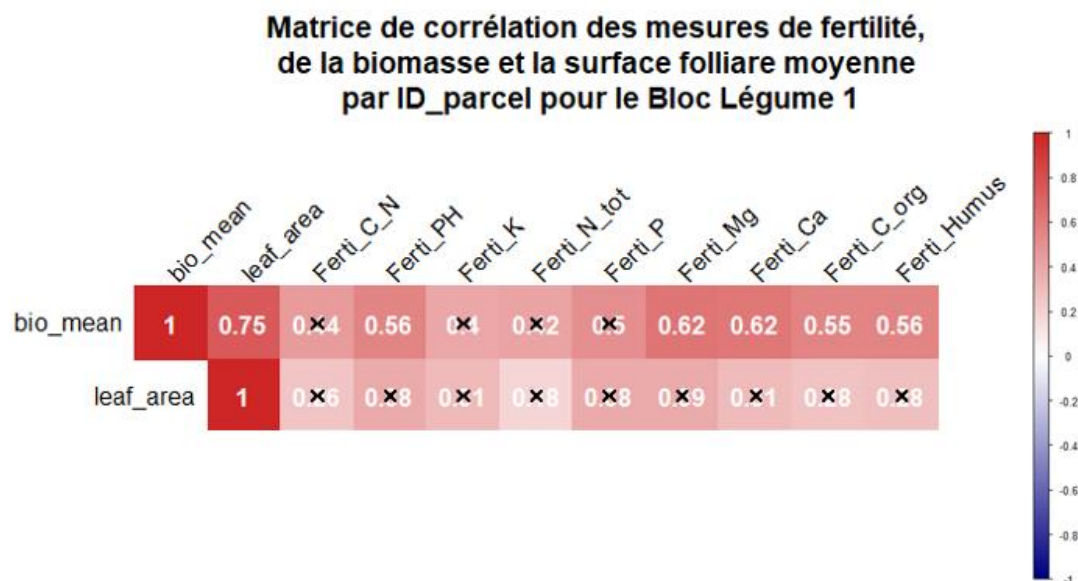


Figure 37 Corrélation des mesures de fertilité (Ferti_), de la biomasse (bio_mean) et de la surface foliaire (leaf_area) pour le légume 1 (épinard), les croix indiquent que le test de corrélation n'a pas atteint le niveau de significativité requise ($p > 0.05$)

Concernant la biomasse moyenne, des corrélations modérées mais positives sont observées avec les variables de fertilité, avec des coefficients compris entre 0,55 et 0,62. Cela suggère que, bien que les traitements de mulch aient un effet dominant, la fertilité initiale des parcelles a également pu influencer la production de biomasse.

6. Discussion des résultats

6.1. Les résultats comparés à la littérature

6.1.1. Les effets sur la fertilité chimique

Tableau 7 : Comparaison des données observées sur le terrain avec celles de Requasud (2013-2023)

Variable	Moyenne mesuré	SD mesuré	Moyenne de référence	SD de référence
C/N	11.867	1.074	—	—
Carbone total (g/kg)	23.047	5.971	18	14.20
Ca (mg/100gTS)	172.467	49.151	281.83	269.210
Humus (%)	4.607	1.203	—	—
K (mg/100gTS)	26.300	9.671	26.30	18.240
Mg (mg/100gTS)	12.567	33.081	16.69	9.73
N total	0.190	0.0397	0.149	0.077
P (mg/100gTS)	2.950	1.508	14.96	13.480
PH KCl 1N	5.833	0.429	6.49	0.570

Nous avons comparé nos valeurs aux données mises à disposition par le réseau de laboratoires Requasud. Nous avons retenu la période 2013 à 2023 afin de disposer d'une plage de valeurs étendue. Ces données, centrées sur des parcelles maraîchères en région sablo-limoneuse, constituent une référence précise et pertinente (Requasud, 2013)

Le tableau 7 met en évidence une différence globalement faible entre les moyennes mesurées et celles de référence. En effet, hormis des valeurs de carbone plus élevées et des concentrations en calcium, phosphore et potassium plus faibles, on reste proche des moyennes de référence.

De plus, les écarts types sont tout de même importants, malgré la petite taille des parcelles et leur proximité immédiate. À titre de comparaison, les écarts types de référence, bien que souvent plus élevés, regroupent un volume de données beaucoup plus important, issu de parcelles de plus grande taille et, certes situées dans une même région, mais spatialement plus éloignées.

6.1.2. Le score USDA

Mise à part les données présentées dans le mémoire de Nicolas Biot, aucune référence directement comparable à la méthode USDA n'a été trouvée. Selon Biot et al.(2020), les grandes cultures sur sols limoneux et sablo-limoneux affichent un score moyen d'environ 4,5, tandis que les prairies permanentes atteignent en moyenne 6. Dans notre étude, les moyennes par traitement oscillent entre 5 et 6, avec un minimum de 3 et des maximums de 6, ce qui reste cohérent avec les travaux de Biot. Il faut toutefois garder à l'esprit que l'échelle USDA a une amplitude réduite, ce qui limite la variabilité apparente des résultats.

6.1.3. Le score VESS

L'échelle des scores VESS varient sur une plage étroite de 1 à 5, ce qui limite les écarts possibles avec les résultats présents dans la littérature. En Belgique des scores de 2,9 à 3,4 en champs cultivés et de 2,6 à 2,8 en prairies non pâturées ont été observé pour des sols limono-sableux (Pulido Moncada et al., 2014). Les données de Nicolas Biot montrent un contraste plus marqué en sols limoneux et sablo-limoneux, avec des moyennes de 3 à 4 en grandes cultures et de 2,0 à 2,3 en prairies (Biot et al., 2020). Dans notre étude, les valeurs sont plus faibles, avec des moyennes comprises entre 1,5 et 2,0, mais proches de celles observées en prairies permanentes.

6.1.4. La vitesse d'Infiltration

Dans sa thèse, Ariane Chabert ne fournit pas de valeurs brutes obtenues avec sa méthode d'infiltration et présente directement les résultats des analyses statistiques (Chabert & Sarthou, 2017). Dans le mémoire de Nicolas Biot (Biot et al., 2020), on ne dispose que d'un graphique des moyennes et des erreurs standards. Il aurait été intéressant de comparer nos valeurs brutes aux leurs. Le travail de Biot donne un ordre de grandeur des vitesses d'infiltration, exprimées en mm/h. Ses résultats vont de valeurs très proches de zéro jusqu'à des maxima autour de 500 mm/h. Nos mesures sont globalement plus élevées, avec des minima d'environ 262 mm/h et des maxima proches de 1 375 mm/h. Les contextes diffèrent toutefois. Biot a travaillé dans la même région pédoclimatique que la nôtre, sur des sols limoneux et sablo-limoneux du Brabant wallon, mais en grandes cultures et en prairies permanentes. Il ne s'agissait pas de sols maraîchers, ce qui peut expliquer une part de la variabilité observée entre ses résultats et les nôtres.

6.1.5. Le test bêche

Aucune donnée de référence spécifique au test bêche n'a été trouvée pour la Wallonie. En revanche, des données existent pour le test à la moutarde, qui donnent des ordres de grandeur utiles. Les médianes régionales seraient de l'ordre de 50 individus par m² en agriculture biologique et de 70 individus par m² en agriculture de conservation. Les données sont aussi classées en grammes comme suit : faible de 0 et 70, moyenne de 70 et 147, élevée de 147 et 250 individus par m² (Quentin et al., 2019). Ces valeurs

proviennent toutefois d'une méthode différente et ne sont pas directement comparables avec un test bêche.

Les références du FiBL sont plus proches de notre protocole. D'après leurs indications, des échantillons de 10 × 10 cm sur 25 cm de profondeur contiennent en moyenne 1 à 2 vers dans un sol limoneux mi-lourd et fertile, ce qui correspond à environ 100 à 200 vers par m² après extrapolation (FiBL, 2023).

Dans nos propres relevés avec le test bêche, la motte échantillonnée mesurait 20 × 20 cm sur 25 cm de profondeur, soit 0,04 m² en surface. Nous avons donc extrapolé la densité au mètre carré en multipliant le nombre de vers observés par 25. Les moyennes obtenues restent indicatives mais se situent dans une fourchette d'environ 45 à 235 individus par m².

En bref, nos densités estimées se situent globalement dans la zone haute par rapport aux repères disponibles. Il faut toutefois éviter les comparaisons directes entre méthodes. Pour renforcer l'interprétation, il serait utile de disposer de références locales fondées sur le test bêche.

6.1.6. Le carbone microbien par fumigation et la méthode MPN

Dans la littérature, des travaux ont mobilisé la même méthode de fumigation dans les sols agricoles wallons (Quentin et al., 2019). Les données sont classées en grammes comme suit : très faible de 0 à 0,107 (mg C/g de sol), faible de 0,107 à 0,212, moyenne de 0,212 à 0,549, élevée de 0,549 à 1,088, très élevée de 1,088 à 1,200. La médiane est d'environ 0,400 mg C/g en agriculture biologique et 0,540 mg C/g en agriculture de conservation (Quentin et al., 2019).

Nos mesures se situent entre 0,45 à 0,827 mg C/g, ce qui correspond à des niveaux principalement moyens à élevés, sans valeur aberrante. Étant donné qu'il s'agit ici de parcelles de maraîchage biologique de petite surface, obtenir des valeurs proches de celles observées en agriculture de conservation est cohérent, les méthodes d'agriculture biologique et le travail du sol limité pouvant favoriser une biomasse microbienne importante.

Concernant la méthode MPN pour caractériser la concentration propagules par g de sol sec, aucune donnée de la littérature ne s'est révélée pertinente dans notre contexte spécifique. Les études disponibles portent surtout sur des essais en zones tropicales et subtropicales (Sene et al., 2012). Aucune donnée de référence pour la Belgique n'a été trouvée.

6.1.7. Le suivi d'adventices et de surface foliaire des légumes par Wilmus

La revue de littérature a mis en avant le mémoire de Wilmus (Wilmus, 2021) qui propose une méthode et des données proches des nôtres, même si le traitement des résultats diffère. Wilmus ayant surtout porté son étude sur l'évolution de la diversité des adventices. La comparaison directe possible porte sur la richesse spécifique totale, avec

22 espèces recensées dans le travail de Wilmus contre 11 espèces dans notre étude. Cet écart s'explique probablement par un temps de développement des adventices plus court dans notre dispositif. Par ailleurs, nous n'avons trouvé aucune donnée sur le recouvrement foliaire des légumes obtenu via l'application Canopeo.

6.1.8. La biomasse des épinards « Butterflay »

Pour la biomasse, les données disponibles sont fournies par le fournisseur Agrosems pour la variété d'épinard Butterflay (*Agrosems, Graines de Semences Bio EPINARD Butterflay*, s. d.). Ces données indiquent un rendement théorique en plein champ de 1,2 à 2,2 kg/m². N'ayant pas prélevé la biomasse sur une surface exactement égale à 1 m², il a été impossible de comparer directement nos résultats.

6.2. Discussion des résultats Les résultats des méthodes de caractérisation de la santé du sol

6.2.1. La fertilité chimique

Des enrichissements localisés en carbone organique, phosphore, calcium, potassium et magnésium ont été constatés. Cette variabilité s'explique en partie par les antécédents cultureux, comme décrit dans la section 4.5.1 « *Les antécédents cultureux et phytotechniques* » de ce travail. Les analyses suggèrent un impact durable de ces interventions. La colonne 4, en particulier en position C, présente des valeurs régulièrement plus élevées pour les indicateurs liés au carbone ainsi que pour le pH, ce qui évoque l'existence d'un gradient spatial. Une pente et des dynamiques hydriques propres au terrain pourraient également contribuer à amplifier ce gradient. Après investigation, les données du SPW 2013-2014 sur les reliefs de la Wallonie disponibles sur WalOnMap situent le site sur un plateau à cent trente-six mètres d'altitude avec une légère pente dans la partie sud du terrain, estimée entre un et trois pour cent. Cette hétérogénéité constitue un facteur de confusion potentiel pour l'évaluation des effets des paillages. L'usage de modèles mixtes intégrant les effets de position et des tests de vraisemblance est indispensable pour limiter les erreurs d'attribution

6.2.2. La structure physique

La méthode USDA n'a pas mis en évidence d'effet des paillages sur la stabilité des agrégats ni de différence nette liée à la position. Une différenciation était pourtant attendue entre miscanthus et les autres modalités, car seul le miscanthus n'a pas subi le labour superficiel. Une explication plausible est que le travail du sol a surtout fragmenté les agrégats de grande taille, tandis que la méthode USDA, appliquée sur des agrégats plus fins (1cm³), n'a pas capté cet effet. Il serait pertinent de réaliser à nouveau cette mesure afin de voir si la méthode permet de déceler des différences entre les traitements.

La méthode VESS a été conduite avant les opérations de travail du sol et ne pouvait pas refléter l'impact des paillages. Elle met néanmoins en évidence des scores significativement plus élevés en rangée C par rapport aux rangées A et B ce qui indique

une structure plus dégradée et une compaction marquée au sud du terrain. Cette tendance rejoint les observations de fertilité et renforce l'hypothèse d'une variabilité spatiale intrinsèque à surveiller.

L'infiltration constitue la première variable montrant des effets significatifs des paillages. La modalité miscanthus présente des scores significativement plus faibles que les paillages vivants et que la bâche plastique, ce qui est cohérent avec un sol moins travaillé et donc plus compact sous miscanthus. À l'inverse, la bâche plastique atteint fréquemment le maximum de l'échelle utilisée, avec une moyenne ajustée très élevée autour de 11,34, signe d'une absorption rapide. Cette situation met en lumière une limite du protocole d'Ariane Chabert et suggère que la différence en faveur du plastique serait encore plus marquée si la vitesse d'infiltration maximale était mieux intégrée. Cet effet corrobore les résultats rapportés dans la littérature, où la bâche plastique est réputée améliorer à court terme les propriétés physiques et hydriques du sol (Maida et al., 2019; Qi et al., 2020).

Le rapport en matière sèche, mesuré dans le cadre du protocole de fumigation pour le carbone microbien, reste une lecture descriptive faute de réplicats par traitement. Les résultats ne révèlent pas de différence marquée entre paillages. Nous ne disposons en outre que de cinq parcelles, ce qui demeure faible et probablement insuffisant pour détecter des écarts entre paillages, particulièrement lors d'une première année.

6.2.3. La vie biologique

Les populations de lombrics ne montrent pas d'effet des paillages, ce qui était attendu compte tenu du calendrier d'implantation des couverts. Une hétérogénéité spatiale modérée apparaît toutefois, avec des effets du bloc légume et de la colonne. Deux parcelles se distinguent, 2A et 10B, avec des densités supérieures à la moyenne, au-delà de dix individus. Ces maximas pourraient refléter des effets de bord liés à l'emplacement des parcelles. Il faut aussi rappeler que les comptages ont été réalisés juste avant le labour de désherbage et que la plupart des modalités, à l'exception de la bâche plastique et du miscanthus, étaient alors colonisées par des adventices, ce qui peut brouiller les écarts entre traitements (section 4.5.3). La richesse en groupements fonctionnels suit la même tendance, sans différence claire entre modalités, avec une hétérogénéité interparcellaire persistante.

Pour les indicateurs microbiens, l'analyse reste descriptive faute de réplicats par traitement. Les tendances suggèrent un avantage du BRF sur les autres paillages pour le carbone microbien. Cette tendance est cohérente avec les valeurs MPN observées. La corrélation forte entre les valeurs de MPN et de carbone microbien indique que ce dernier constitue un bon indicateur de la richesse globale en micro-organismes du sol. Les modalités nues, mix et trèfle, semblent moins favorables à la vie microbienne. Le score nul pour la modalité mix avec la méthode MPN constitue un point de vigilance. Il faut toutefois garder à l'esprit le déroulement imparfait du protocole MPN, avec une valeur manquante pour trèfle et des pertes de réplicats.

6.3. La discussion des résultats des méthodes de mesure de la population et la diversité en adventices.

La surface occupée par les adventices présente des tendances et des interactions sans franchir les seuils de significativité. Les résultats suggèrent que l'effet du type de couverture dépend du légume cultivé. La bâche plastique affiche des valeurs moyennes ajustées plus faibles que les modalités nues mix et trèfle, ce qui indique une potentielle efficacité dans la gestion des adventices. Les autres couverts se situent à des niveaux intermédiaires.

La richesse en espèces varie également avec la combinaison des traitements et des légumes. Elle est relativement homogène entre modalités dans le bloc légume 1 consacré à l'épinard et devient très hétérogène dans le bloc légume 2 consacré à l'oignon. Une explication plausible est attribuable aux vitesses de croissance contrastées des deux légumes. Les épinards, plus rapides que les oignons, exercent une compétition plus forte qui limite à la fois la surface occupée et la diversité des adventices.

6.4. La discussion des résultats des méthodes de caractérisation de développement des légumes

Les paillages influencent de façon significative la croissance foliaire. Pour le bloc légume 1 consacré aux épinards, la bâche plastique présente une moyenne supérieure aux autres couverts, tandis que le miscanthus affiche des valeurs significativement inférieures à celles de la bâche plastique.

Pour le bloc légume 2 consacré aux oignons, le premier relevé ne met pas en évidence de différences significatives entre traitements, même si la bâche plastique présente encore la moyenne la plus élevée. Lors du second relevé, les modalités nues, mix et trèfle dépassent significativement les autres traitements. La modalité plastique, performante au départ évolue ensuite peu. Cela s'explique probablement par une attaque de rongeurs ayant touché de nombreuses parcelles, notamment une grande partie des modalités plastiques. Le risque de biais est donc réel et impose une lecture prudente de ces résultats.

L'analyse de la biomasse récoltée dans le bloc légume 1 consacré aux épinards met en évidence un effet marqué des paillages sur la production finale, critère essentiel pour les maraîchers. La bâche plastique domine avec la biomasse moyenne ajustée la plus élevée, suivie du BRF. Les modalités mix et trèfle, assimilables à une terre nue, se situent plus bas, tandis que le miscanthus présente la valeur la plus faible. Cette contre-performance est cohérente avec les valeurs de vitesse d'infiltration. Ces résultats confirment l'intérêt agronomique à court terme de la bâche plastique pour la croissance aérienne et le rendement, tout en renvoyant aux considérations environnementales discutées dans la section 2.2.1 « *Les paillages inorganiques* ».

6.5. L'impact global des paillages (mulch) sur les indicateurs mesurés

De façon générale, la bâche plastique se distingue par une amélioration nette des fonctions hydriques, avec une infiltration plus rapide, et par une tendance à réduire la couverture et la diversité des adventices. Cette combinaison favorise une installation rapide des cultures et se traduit, chez l'épinard, par une biomasse et une surface foliaire significativement plus élevées. Ces bénéfices à court terme sont connus et documentés dans la littérature ((Dai et al., 2024; Kader et al., 2017; Maida et al., 2019).

Le paillage de miscanthus présente une situation plus contrastée. L'absence de labour superficiel a vraisemblablement maintenu un sol plus compact, ce qui se traduit par une infiltration plus faible et par un rendement d'épinards significativement réduit. Il faudra vérifier à plus long terme si cette compaction se résorbe. L'hétérogénéité des interventions de labour constitue un biais important dans l'analyse des résultats du miscanthus.

Le BRF offre des signaux encourageants du point de vue biologique. Les tendances descriptives indiquent une activité microbienne et un potentiel de mycorhization plus élevés que sous les autres paillages, ce qui est cohérent avec la littérature (Kader et al., 2017; Ortiz-Ceballos & Fragoso, 2004) Ces éléments restent toutefois à confirmer, l'absence de réplicats limitant l'inférence, ce qui justifie un plan d'échantillonnage renforcé l'an prochain.

Les paillages vivants n'ont pas pu exprimer leur potentiel cette saison. Leur implantation tardive pour l'épinard et leur absence pour l'oignon ont conduit, dans les faits, à des modalités proches d'une terre nue. Les effets observés sur la colonisation et la richesse en adventices, ainsi que l'absence de signal positif en biologie du sol, s'expliquent en grande partie par ce contexte d'installation inachevée.

7. Bilan et perspectives des méthodes mobilisées

Un des objectifs de ce travail était de servir de base méthodologique pour la suite d'une expérimentation à long terme (10 années). Il s'agissait donc à la fois de démontrer des effets significatifs immédiats des traitements, mais aussi d'évaluer, sur le terrain, la pertinence de protocoles d'expérimentation, d'indicateurs pertinents, de modalités d'analyse en vue d'une réplication dans les prochaines années.

7.1. Les limites et les pistes d'amélioration

L'une des limites les plus importantes de ce mémoire a été le calendrier. Le rythme des cultures maraîchères ne coïncide pas avec celui d'un mémoire académique et les premières plantations ne peuvent débuter qu'au début du mois d'avril. Ce manque de synchronisation a eu plusieurs conséquences. Tout d'abord, le fait que certains paillages, en particulier le mixte et le trèfle, n'ont pas pu être mis en place correctement ou dans les temps. En effet, il a fallu privilégier la mise en place des légumes pour les prises de données. Ensuite, cette contrainte temporelle n'a permis de récolter des données de biomasse que pour une seule espèce légumière. La prise de données s'est terminée fin juin, ce qui a réduit le temps disponible pour l'analyse statistique et la rédaction de ce mémoire. Un délai d'analyse plus long aurait permis d'approfondir les interactions entre variables. Notre suggestion est de démarrer les prises de données durant l'été précédent l'année académique de remise du mémoire pour permettre aux futurs mémorants de suivre davantage de cultures tout en disposant d'un temps supplémentaire pour traiter les données de manière approfondie.

Une seconde limite porte sur le nombre et la promiscuité des petites parcelles étudiées. Au total, trente parcelles devaient être testées avec un maximum de méthodes de mesure. Cela impose de sélectionner des méthodes efficaces et rapides ou, pour les méthodes plus complexes comme la MPN, de ne retenir qu'un sous-ensemble de parcelles à analyser. Ces contraintes de temps disponible de traitement, de nombre de parcelles et de promiscuité de celles-ci constituent un risque que certaines mesures manquent de précision.

Une troisième limite concerne la topographie des parcelles étudiées. Une analyse plus fine de la topographie et du comportement hydrique du terrain serait pertinente. Elle pourrait aider à expliquer certaines hétérogénéités observées entre parcelles ainsi que les gradients spatiaux identifiés dans les résultats et la discussion des résultats. Il faudrait également évaluer si le biais lié à l'absence de labour sous la modalité miscanthus peut s'atténuer à moyen ou long terme. Si ce n'est pas le cas, il serait judicieux d'envisager un travail du sol ciblé sous ce paillage afin de limiter ses sous-performances.

7.2. La pertinence des méthodes testées

D'un point de vue pratique, les méthodes testées sur le terrain ont donné des résultats variés, mais plusieurs d'entre elles se révèlent prometteuses pour des travaux de recherche futurs. Certaines nouvelles méthodes seraient peut-être à approfondir pour les prochaines années

7.2.1. Les analyses de fertilité

La mesure des paramètres de fertilité a été sous-traité à un laboratoire externe, ce qui a facilité la mise en œuvre. Il semble pertinent de maintenir ces mesures chaque année pour suivre l'évolution de la fertilité dans le temps.

7.2.2. La structure du sol et lombrics (VESS, USDA, test bêche)

La méthode VESS s'est avérée être une méthode simple, rapide et efficace pour évaluer la santé structurale générale du sol. Dans le cadre de ce travail, un second test VESS, réalisé après le labour superficiel, aurait été particulièrement utile pour valider les observations empiriques de tassement du sol sous miscanthus. Mais, pour tester davantage de méthodes, il a été décidé d'utiliser la méthode USDA pour essayer de capter ces variations de structure.

La méthode USDA, bien que peu concluante dans le cadre de ce travail, reste une méthode rapide et simple à mettre en œuvre. Il pourrait être judicieux de la conserver comme complément de la méthode VESS dans des travaux futurs pour estimer si elle est capable de déceler ou non les variations de structure des agrégats entre les parcelles.

Le test bêche lombrics, bien que peu révélateur cette année, devrait également être maintenu. Sa simplicité, sa reproductibilité et sa compatibilité avec la petite taille des parcelles en font un outil adapté. D'autres méthodes, comme le test à la moutarde ou les « paniers à vers de terre », ont été écartées. Effectivement, la première demande trop d'espace (OPVT et al., s. d.), et la seconde s'est avérée obsolète dans des contextes de forte proximité entre parcelles (Leveaux Lola, communication personnelle, 2025).

L'avantage de ces trois méthodes (VESS, USDA, test bêche) est qu'elles peuvent être facilement combinées pour maximiser les mesures durant un échantillonnage. En effet, la méthode VESS et la méthode du test bêche ont déjà été combinées dans le cadre de ce travail, mais on peut très bien prélever les agrégats des couches superficielles nécessaires pour la méthode USDA durant ce même échantillonnage.

7.2.3. L'infiltration de l'eau (méthode « Ariane Chabert »)

La méthode d'infiltration développée par Ariane Chabert présente l'avantage d'être rapide, simple à mettre en œuvre et adaptée à des suivis de terrain fréquents. Elle a permis de mettre en évidence des différences significatives entre traitements dès cette première année, ce qui est encourageant.

Cependant, comme souligné dans la partie discussion, cette méthode présente une limite technique majeure. En effet, elle est plafonnée lorsque la vitesse d'infiltration

dépasse un certain seuil. Concrètement, si l'eau contenue dans le tube s'infiltre en moins de cinq minutes, le protocole ne permet pas de distinguer les vitesses d'infiltration plus rapides, réduisant ainsi la sensibilité de la mesure pour les traitements très perméables, comme les bâches plastiques.

Il conviendrait donc d'envisager soit une adaptation du protocole existant, soit l'utilisation d'une autre méthode plus robuste. La méthode de l'anneau simple (Biot et al., 2020), qui consiste à mesurer la vitesse d'infiltration dans un anneau cylindrique sous charge hydrostatique constante, permet de calculer la conductivité hydraulique à saturation K_s [m/s] sur la base de l'équation de Reynolds et Elrick (1990). Elle pourrait constituer une alternative pertinente. Bien qu'elle demande plus de temps de mise en œuvre, elle offrirait une mesure plus précise, notamment dans les sols à forte infiltration, et permettrait une comparaison avec des données robuste de la littérature. L'usage d'un infiltromètre de terrain ou d'autres capteurs d'humidité pourrait également enrichir la compréhension des propriétés hydriques du sol.

7.2.4. Les indicateurs biologiques (MPN, carbone microbien)

La méthode MPN s'est révélée extrêmement longue et fastidieuse. La première phase de prélèvement, séchage, tamisage et préparation des dilution de sol prend un temps considérable surtout avec 5 parcelles a analysé (ce qui est dans notre cas le minimum).

La phase d'incubation s'étend sur une période de minimum six semaines, même si elle n'est pas fastidieuse. Enfin la dernière phase de collecte, préparation et observation microscopique des racines est par contre un processus très lourd à gérer. De ce fait, la méthode MPN ne devrait pas être mobilisée en priorité pour un suivi annuel, mais pourrait être mobilisée tous les trois ans, en complément d'indicateurs plus rapides et agiles.

À l'inverse, la méthode du carbone microbien est une méthode rapide et pratique. Réalisée en collaboration avec le laboratoire MOCA de l'UCLouvain, elle permet d'obtenir des résultats en une semaine avec quelques heures de travail par jour pour un maximum de 7 échantillons en simultanée. Son seul inconvénient est sa relative nouveauté et son protocole toujours en cours d'ajustement au sein du laboratoire MOCA, ce qui limite encore les comparaisons avec la littérature et réduit la confiance des résultats.

Les mesures de matières sèches sont aussi combinées avec cette méthode car elles sont nécessaires durant la réalisation du protocole. C'est un point positif quand on sait que le paillage a des effets documentés sur la conservation de l'humidité du sol. (Chen et al., 2007; Dai et al., 2024; Kader et al., 2017).

Une méthode alternative explorée pour évaluer l'activité biologique du sol est celle des Lamina Sticks (ELIA, 2024). Ces bandes de PVC de 16 cm percées de 16 trous remplis de cellulose, flocons de céréales et charbon actif sont insérées dans le sol. Quinze jours plus tard, on compte les trous vidés, fournissant un indicateur d'activité de la faune du sol, et indirectement de la minéralisation de l'azote.

Cette méthode a été standardisée par Terra Protecta et utilisée dans plus de 300 études depuis les années 1990, notamment en agriculture (ELIA, 2024). Elle pourrait donc être

intégrée au dispositif expérimental, en complément des mesures de carbone microbien. Son principal inconvénient reste le coût du matériel. La méthode est proche, dans l'esprit, du Tea Bag Index, qui n'a pas été retenu ici, car jugé trop peu sensible aux effets d'itinéraires culturaux des parcelles agricoles (Leveaux Lola, communication personnelle, 2025) (ELIA, 2024). De plus il est difficile à appliquer en raison de la disparition progressive des références commerciales de thé utilisées dans le protocole.

7.2.5. Les adventices et le recouvrement foliaire (méthode inspirée de Wilmus, application Canopeo)

La méthode utilisée pour mesurer la quantité et la diversité spécifique des adventices, telle que décrite dans les travaux de Wilmus (Wilmus, 2021) s'est révélée à la fois pratique, rapide et aisément reproductible. Un de ses atouts majeurs réside dans la possibilité de l'associer à la mesure de la surface foliaire en utilisant le même quadrat de grillage, ce qui permettrait une optimisation du temps passé sur le terrain. Ceci n'a pas été fait durant cette année car il semblait intéressant de tester une autre méthode d'évaluation du recouvrement foliaire, celle utilisant l'application Canopeo.

La principale difficulté liée à cette méthode concerne l'identification précise des adventices. En effet, si des applications telles que PlantNet version 3.23.4 (App Store, 2025b) ou PictureThis version 5.26 (App Store, 2025c) permettent généralement une reconnaissance correcte au niveau du genre, elles rencontrent des limites notables lorsqu'il s'agit de déterminer l'espèce exacte, en particulier chez les plantules ou les taxons morphologiquement proches. Dès lors, la présence sur le terrain d'un personnel formé à l'identification des adventices s'avère indispensable pour garantir la qualité et la fiabilité des données collectées sur la diversité des adventices.

L'application Canopeo, utilisée pour estimer la couverture foliaire du légume par analyse d'image, est également intéressante de par sa simplicité d'usage et sa rapidité. Cependant, elle comporte deux limites méthodologiques.

D'abord, le résultat dépend des conditions de luminosité au moment de la photo, ainsi que de l'angle de prise de vue et de la hauteur de l'appareil, introduisant une variabilité non contrôlée. Ensuite, Canopeo ne permet pas de distinguer la surface foliaire des cultures de celle des adventices, ce qui peut brouiller l'interprétation des résultats.

À l'inverse, la méthode du quadrat grillagé permet une différenciation visuelle directe entre cultures et adventices, ce qui en fait une solution plus fiable pour les mesures simultanées

7.2.6. La biomasse récoltée

La méthode utilisée pour mesurer la biomasse récoltée s'est montrée robuste, reproductible et efficace sur le terrain. Elle a permis de générer des données exploitables et pertinentes, avec des différences significatives détectées entre modalités. Il serait judicieux de maintenir cette méthode lors des prochaines années de suivi, en veillant

toutefois à assurer des conditions de prélèvement homogènes et à compléter l'analyse par un suivi plus fin des facteurs de croissance (foliaires et phénotypiques).

7.2.7. La biodiversité macroscopique : méthodes complémentaires

Il serait également pertinent d'intégrer un indicateur de biodiversité à une échelle macroscopique, autre que la population de lombrics, et en complément des analyses microbiennes du sol. L'idée d'installer des pièges à carabes ou d'autres types de pièges à entomofaune avait été envisagée en amont, mais la pertinence d'une telle approche sur des parcelles de petite taille et très proches les unes des autres restait incertaine.

Cependant, certaines observations de terrain suggèrent déjà des tendances visibles à l'œil nu. Par exemple, les limaces semblaient se concentrer sous les bâches plastiques, probablement attirées par une humidité plus élevée, tandis que les arachnides, coléoptères et autres insectes paraissaient plus abondants sur les paillages organiques, notamment le BRF.

Dès lors, une quantification des populations de faune macroscopique selon les modalités de paillage pourrait enrichir l'analyse écologique globale du système. Toutefois, le protocole expérimental adapté à ce type de mesure, dans un contexte aussi restreint, reste à définir

7.3. La synthèse des avantages et inconvénients des méthodes mobilisées

Tableau 8 : Synthèse des méthodes testées durant ce travail ou d'intérêt pour le futur avec leurs avantages et inconvénients

Type de mesure	Facilité d'utilisation	Rapidité	Précision	Testée sur le terrain	Pertinence
Analyse de fertilité (sol labo)	+++	+++	+++	Oui	Données fiables et comparables dans le temps. Mesures à maintenir pour suivre l'évolution
Test VESS	++	++	++	Oui	Permet une évaluation visuelle rapide de la structure du sol, combinable avec d'autres tests.
Méthode USDA (stabilité agrégats)	+++	+++	-	Oui	Faible différenciation observée, mais protocole rapide. À maintenir en complément du VESS.
Test bêche lombrics	++	++	++	Oui	Simple et informatif. Adapté aux petites parcelles. Peut-être combiné avec VESS et USDA.
Méthode MPN	---	---	++	Oui	Très lourde en temps et en travail. À espacer dans le temps (tous les 3 ans par ex.).
Carbone microbien (MOCA)	++	++	+	Oui	Méthode prometteuse, plus rapide que MPN. Moins documentée, mais bien corrélée au MPN.
Diversité de la macrofaune	À définir	À définir	À définir	Non	Aucune méthode formalisée cette année , difficulté liée à la petite taille et promiscuité des parcelles.
Méthode d'infiltration (Chabert)	+++	+++	-	Oui	Simple et efficace, mais plafonnée. Ne différencie pas bien les vitesses très élevées.
Méthode infiltration (anneau)	++	-	++	Non	Plus longue à mettre en œuvre mais plus robuste. Permet des mesures plus précises.
Infiltromètre	-	-	+++	Non	Appareil coûteux mais très précis. Pour futures études approfondies.
Grillage surface foliaire + adventices	++	++	++	Oui	Bonne méthode pour combiner observations foliaires et adventices. Aide pour l'identification des adventices nécessaire.
Application Canopeo	+++	+++	-	Oui	Très rapide, mais fiabilité varie selon lumière et angle. Ne distingue pas adventices/culture.
Mesure biomasse (pesée)	++	++	++	Oui	Méthode fiable et directe. Donne des résultats comparables, à conserver dans le protocole.
Lamina Sticks	++	++	++	Non	Méthode standardisée pour quantifier l'activité biologique.

8. Conclusions générales

Tout d'abord, il est utile de rappeler l'objectif du mémoire. Il s'agissait de lancer une expérimentation d'une portée de dix années afin d'évaluer l'impact de différents types de paillage sur la santé du sol, le développement de légumes et la gestion des adventices dans un contexte de maraîchage biologique sur petite surface.

Un enjeu important consistait à choisir les méthodes et les indicateurs pertinents. Les variables que nous avons choisi de mobiliser pour étudier ces différents impacts ont permis de couvrir un large spectre : la fertilité chimique du sol, la structure physique du sol, l'activité biologique, la dynamique des adventices, la surface foliaire et la biomasse produite par les légumes observés. La période d'une année liée à ce travail a permis de poser les bases méthodologiques indispensables à une expérimentation à long terme. Ce mémoire a également permis de dégager plusieurs premiers résultats concrets et de mettre en lumière plusieurs limites qui ont été répertoriées et discutées.

Dès le départ, l'ambition de ce mémoire n'était pas de mettre en évidence des effets immédiats et significatifs des paillages, étant donné la période d'observation trop courte. L'enjeu était surtout de tester sur le terrain la faisabilité et la pertinence de plusieurs méthodes, d'identifier les indicateurs les plus prometteurs pour un suivi sur le long terme et de valider les protocoles d'expérimentation. Cette année peut donc être considérée comme une année zéro, une phase test qui servira, nous l'espérons, de socle pour la suite de la recherche expérimentale.

Le travail s'est articulé en trois grandes phases :

Une première phase de recherche bibliographique et d'échanges avec des équipes de chercheuses et chercheurs de l'UCLouvain et des membres de laboratoire (Pr. Declerck Stéphane, assistante Leveaux Lola, assistant Biot Nicolas et des membres des laboratoires PEPA/MUCL/MOCA) afin de sélectionner des méthodes adaptées. Cette phase a constitué une part importante du travail afin de sélectionner les méthodes et les indicateurs les plus pertinents pour répondre aux spécificités de l'expérience à savoir des parcelles de petite surface et adjacentes l'une à l'autre avec volonté d'un suivi sur le long terme.

Une seconde phase de mise en place sur le terrain des paillages et de suivi des cultures. Cette phase de mise en place expérimentale a demandé plusieurs ajustements.

Tout d'abord, le design expérimental a été revu en janvier 2025 pour limiter les effets de bord. Ensuite, le calendrier académique inhérent à un mémoire de fin d'études s'est révélé peu compatible avec le rythme des cultures maraîchères, dont les premières plantations ne peuvent débuter qu'au début du mois d'avril. Pour pouvoir suivre une culture complète, nous avons donc donné priorité à la plantation de légumes (épinards et oignons) au détriment des paillages vivants (mixte de moha mélilot et le paillage de trèfles). Ces contraintes ont limité *de facto* la capacité des paillages à produire des effets mesurables sur le court terme.

Sur le plan méthodologique, cette première année a permis de tester divers protocoles et de collaborer concrètement avec plusieurs laboratoires précédemment cités. Cette approche pratique a permis de mieux cerner les contraintes techniques et logistiques des mesures choisies, tout en ouvrant la voie à des améliorations méthodologiques futures.

Une troisième phase s'est centrée sur la collecte et l'analyse des données, leurs discussions et d'une mise en perspective. Bien que peu d'effet statistiquement significatif ait été mis en évidence entre les traitements, certaines tendances se dessinent.

Une hétérogénéité spatiale importante est apparue comme un des facteurs de confusion important. En effet, des différences selon les colonnes et lignes des cultures sont attribuables aux antécédents culturels, aux amendements différenciés ainsi qu'au non-labour de la modalité miscanthus. Ces variabilités masquent une partie des effets des paillages, surtout à court terme.

Malgré ces limites, certains résultats convergent vers une efficacité agronomique notable des bâches plastiques à court terme. Elles se distinguent par une production significativement plus élevée de biomasse et un effet significativement positif sur la vitesse d'infiltration de l'eau alors qu'elles ont tendance à réduire la surface colonisée par les adventices. Ces observations confirment les effets attendus à court terme des mulch inorganiques, tels que décrits dans la littérature (Dai et al., 2024; Grassbaugh et al., 2004; Maida et al., 2019).

Il apparaît aussi que l'interaction entre l'espèce cultivée et le paillage influe sur les résultats, en particulier pour la diversité des adventices. Cet effet invite à approfondir l'étude des combinaisons légume-paillage afin d'optimiser les stratégies de gestion intégrée selon les cultures.

Parallèlement, plusieurs indicateurs biologiques, comme le carbone microbien et la méthode MPN, suggèrent un effet positif des paillages organiques, en particulier du BRF, sur l'activité microbienne du sol. Ces effets restent modestes à ce stade, mais ils pourraient s'avérer bénéfiques à moyen et long terme pour la structuration et la fertilité biologique. Ils devront être confirmés avec un plan d'échantillonnage réplicable.

En résumé, cette première année d'expérimentation a permis de valider une partie importante du dispositif expérimental, d'identifier les ajustements nécessaires pour l'avenir et d'installer une dynamique d'observation et de prise de mesure rigoureuse. Elle confirme que, dans un essai à long terme, certains effets ne pourront être jugés qu'après plusieurs saisons, lorsque les processus biologiques et structuraux auront eu le temps de faire leur œuvre.

9. Bibliographie

Agro transfert. (2023). *Guide méthodique du test bêche Structure et Action des vers de terre*.

AgroLeague. (s. d.). *Le Trèfle blanc, couvert permanent bon marché fixateur d'azote*. AgroLeague. Consulté 4 juin 2025, à l'adresse <https://www.agro-league.com/trefle-blanc#Caracteristique>

Agrosemens, Graines de Semences Bio EPINARD Butterfly. (s. d.). Consulté 16 août 2025, à l'adresse <https://www.agrosemens.com/jardin-graine-bio-epinard/720-EPINARD-Butterfly.html>

Agryco. (s. d.). *Mélilot : Plante médicinale, aromatique et engrais vert naturel*. Agryco. Consulté 10 août 2025, à l'adresse <https://www.agryco.com/blog/cultures/melilot>

Apaq-W. (2022). *Informations générales sur les légumes | l'Apaq-W*. <https://www.apaqw.be/fr/informations-generales-sur-les-legumes>

App Store. (2025a). *Application VESS* [Billet]. apps.apple.com/ca/app/vess/id1436905528?l=fr

App Store. (2025b, août 11). *PlantNet*. App Store. <https://apps.apple.com/fr/app/plantnet/id600547573>

App Store. (2025c, août 18). *PictureThis : Fleurs et arbres*. App Store. <https://apps.apple.com/fr/app/picturethis-fleurs-et-arbres/id1252497129>

App Store, & Oklahoma State University. (2025). *Application Canopeo*. App Store. <https://apps.apple.com/us/app/canopeo/id929640529>

Arulingam, I., Brady, G., Chaya, M., Cont, M., Kgomotso, P. K., Korzenszky, A., Njie, D., Schroth, G., & Suhardiman, D. (2022). *Small-scale producers in sustainable agrifood systems transformation*. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome.

Arvalis. (s. d.-a). *Moha + Trèfle d'Alexandrie—Fiches couverts végétaux ARVALIS-infos.fr*. Les Fiches ARVALIS. Consulté 4 juin 2025, à l'adresse https://fiches.arvalis-infos.fr/couverts/fiche_couvert.php?mode=fc&type_couv=melanges&id_couvert=363

Arvalis. (s. d.-b). *Moha—Fiches couverts végétaux ARVALIS-infos.fr*. Les Fiches ARVALIS. Consulté 4 juin 2025, à l'adresse https://fiches.arvalis-infos.fr/couverts/fiche_couvert.php?mode=fc&type_couv=pures&id_couvert=136

Bajgai, Y., Kristiansen, P., Hulugalle, N., & McHenry, M. (2014). EFFECT OF RESIDUE MANAGEMENT AND CONVENTIONAL AND ORGANIC SOIL MANAGEMENT SYSTEMS ON CROP YIELDS AND WEED BIOMASS. *Acta Horticulturae*, 1018, 227-234. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1018.23>

Ball, B. C., Batey, T., & Munkholm, L. J. (2007). Field assessment of soil structural quality – a development of the Peerlkamp test. *Soil Use and Management*, 23(4), 329-337. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00102.x>

Bantle, A., Borken, W., Ellerbrock, R. H., Schulze, E. D., Weisser, W. W., & Matzner, E. (2014). Quantity and quality of dissolved organic carbon released from coarse woody debris of different tree species in the early phase of decomposition. *Forest Ecology and Management*, 329, 287-294. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.06.035>

Berti, A., Marta, A. D., Mazzoncini, M., & Tei, F. (2016). An overview on long-term agro-ecosystem experiments : Present situation and future potential. *European Journal of Agronomy*, 77, 236-241. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.01.004>

Bertin, P. (2023). *cours LBIRA2109 : Systèmes agraires* [Diapositive].

Betancur, M., Retamal-Salgado, J., López, M. D., Vergara-Retamales, R., & Schoebitz, M. (2023). Novel Approach to Organic Mulching from Natural-Based Solutions to Enhance Soil Health and Functional Value of Calafate Fruit. *Horticulturae*, 9(11), 1202. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9111202>

Biot, N., Hecquet, C., Maréchal, K., Lobet, G., & Dendoncker, N. (2024, mai 30). *The importance of distribution channels and food supply chain challenges on the viability of market gardening farms : Insights from market gardeners in Belgium at a territorial level*. <https://hal.science/hal-04594127>

Biot, N., Leveau, L., & Bertin, P. (2020). *Comparaison de méthodes d'évaluation de la fourniture du service écosystémique de la stabilité structurale sur des sols limoneux et limono-sableux en Belgique*. <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:25112>

Brett, C., Pretty, J., Gee, D., Bragg, R., Mason, C., Morison, J., Rayment, M., Bijl, G., & Dobbs, T. (2001). Policy Challenges and Priorities for Internalizing the Externalities of Modern Agriculture. *Journal of Environmental Planning and Management*, 44, 263-283. <https://doi.org/10.1080/09640560120033740>

Cambridge University. (2025, janvier 22). *Meaning of market gardening in English*. <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/market-gardening>

Canali, S., Diacono, M., Montemurro, F., & Delate, K. (2017). Enhancing multifunctional benefits of living mulch in organic vegetable cropping systems. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 32(3), 197-199.

Canali, S., Ortolani, L., Campanelli, G., Robačar, M., Von Fragstein, P., D'Oppido, D., & Kristensen, H. L. (2016). Yield, product quality and energy use in organic vegetable living mulch cropping systems : Research evidence and farmers' perception. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 32(3), 200-213. <https://doi.org/10.1017/S1742170516000314>

Chabert, A., & Sarthou, J.-P. (2017). *Expression combinée des services écosystémiques en systèmes de production agricole conventionnels et innovants : Étude des*

déterminants agroécologiques de gestion du sol, des intrants et du paysage.
<https://theses.hal.science/tel-04214988v1>

Chalker-Scott, L. (2007). Impact of Mulches on Landscape Plants and the Environment—A Review. *Journal of Environmental Horticulture*, 25(4), 239-249.
<https://doi.org/10.24266/0738-2898-25.4.239>

Chauhan, S., Basnet, B., Adhikari, S. K., Budhathoki, P., & Shrestha, A. K. (2024). Innovative farming techniques for superior okra yield in Chitwan, Nepal : The benefits of plastic film mulch and pest exclusion net on soil properties, growth, quality and profitability. *Ecological Frontiers*, 44(1), 23-32.
<https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2023.05.007>

Chen, S. Y., Zhang, X. Y., Pei, D., Sun, H. Y., & Chen, S. L. (2007). Effects of straw mulching on soil temperature, evaporation and yield of winter wheat : Field experiments on the North China Plain. *Annals of Applied Biology*, 150(3), 261-268.
<https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2007.00144.x>

Ciaccia, C., Kristensen, H. L., Campanelli, G., Xie, Y., Testani, E., Leteo, F., & Canali, S. (2017). Living mulch for weed management in organic vegetable cropping systems under Mediterranean and North European conditions. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 32(3), 248-262. <https://doi.org/10.1017/S1742170516000016>

Dagnelie, P. (2012). *PRINCIPES D'EXPÉRIMENTATION Planification des expériences et analyse de leurs résultats*. LES PRESSES AGRONOMIQUES DE GEMBLOUX.

Dai, Y., Zhang, P., Chao, J., Liu, G., Guo, L., & Senge, M. (2024). Effects of inorganic mulching on soil hydrothermal environment and tomato characters in the presence of unheated greenhouse cultivation. *Scientific Reports*, 14(1), 4337.
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-54896-y>

Depalo, L., Burgio, G., Von Fragstein, P., Kristensen, H. L., Bavec, M., Robačar, M., Campanelli, G., & Canali, S. (2017). Impact of living mulch on arthropod fauna : Analysis of pest and beneficial dynamics on organic cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis*) in different European scenarios. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 32(3), 240-247. <https://doi.org/10.1017/S1742170516000156>

Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and Assessing Soil Quality. In *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment* (p. 1-21).
<https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>

Dumont, A. (2017). *Analyse systémique des conditions de travail et d'emploi dans la production de légumes pour le marché du frais en Région wallonne (Belgique), dans une perspective de transition agroécologique* [UCL - Université Catholique de Louvain].
<https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal:192704>

Dupré, L., Lamine, C., & Mireille, N. (2017). Short Food Supply Chains, Long Working Days : Active Work and the Construction of Professional Satisfaction in French Diversified

Organic Market Gardening: Short food supply chains, long working days. *Sociologia Ruralis*, 57, 396-414. <https://doi.org/10.1111/soru.12178>

El-Beltagi, H. S., Basit, A., Mohamed, H. I., Ali, I., Ullah, S., Kamel, E. A. R., Shalaby, T. A., Ramadan, K. M. A., Alkhateeb, A. A., & Ghazzawy, H. S. (2022). Mulching as a Sustainable Water and Soil Saving Practice in Agriculture : A Review. *Agronomy*, 12(8), 1881. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081881>

ELIA (Éd.). (2024). *ELIA protocole PEPA018, Décomposition de la matière organique incorporée dans le sol*.

European Commission. (s. d.). *Soil protection—European Commission*. Consulté 23 janvier 2025, à l'adresse https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-activities-z/soil-protection_en

Eurosta. (2023). *Statistics | Eurostat*. <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tag00115/default/table?lang=fr>

FAO. (2024). *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2024*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cd2616fr>

FiBL. (2023). *Vers de terre – architectes des sols fertile (1619)*. <https://www.fibl.org/fileadmin/documents/shop/1619-vers-de-terre.pdf>

Filière wallonne des légumes. (2021). sytra , wagraim. <https://sytra.be/wp-content/uploads/2023/03/2-fiche-legumes.pdf>

Georges, J., Lurkin, L., Khadija, R. M., & Verhelst, S. (2023). *Identification de stratégies de couverts de sol et amendements en maraîchage de petite surface*. AgroLouvain.

Goodman, B. A. (2020). Utilization of waste straw and husks from rice production : A review. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 5(3), 143-162. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2020.07.001>

Grand Dictionnaire Terminologique. (1992). *Maraîchage*. Office québécois de la langue française. <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/17018835/maraichage>

Grand Garten. (2023). *Market Gardening A successful tradition revitalized*. Grand Garten. https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/default/files/field_core_attachments/market_gardening_intor_english.pdf

Grassbaugh, E. M., Regnier, E. E., & Bennett, M. A. (2004). COMPARISON OF ORGANIC AND INORGANIC MULCHES FOR HEIRLOOM TOMATO PRODUCTION. *Acta Horticulturae*, 638, 171-176. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.638.22>

Haapala, T., Palonen, P., Korpela, A., & Ahokas, J. (2014). Feasibility of paper mulches in crop production—A review. *Agricultural and Food Science*, 23(1), 60-79. <https://doi.org/10.23986/afsci.8542>

Hazell, P., & Wood, S. (2007). Drivers of change in global agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 495-515. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2166>

Hegan, D., Liu, T., Zhiquan, H., Qinming, S., & Ru, L. (2015). Determining time limits of continuous film mulching and examining residual effects on cotton yield and soil properties. *Journal of Environmental Biology*, 36, e677-e684.

Heine, B., Gaspart, F., & Biot, N. (2025). Developing indicators to assess the viability of small- and medium-scale farms : A case study of market gardening farms at the regional scale. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1608860>

Isabelle, F. (2022, mai). *Covid, Ukraine... Du Nord au Sud : Un système agro-alimentaire à réinventer*. <https://entraide.be/publication/analyse-2022-06/>

Kader, M. A., Senge, M., Mojid, M. A., & Ito, K. (2017). Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment. *Soil and Tillage Research*, 168, 155-166. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.01.001>

Kibblewhite, M. G., Ritz, K., & Swift, M. J. (2008). Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 363(1492), 685-701. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2178>

Knapp, A. K., Smith, M. D., Hobbie, S. E., Collins, S. L., Fahey, T. J., Hansen, G. J. A., Landis, D. A., La Pierre, K. J., Melillo, J. M., Seastedt, T. R., Shaver, G. R., & Webster, J. R. (2012). Past, Present, and Future Roles of Long-Term Experiments in the LTER Network. *BioScience*, 62(4), 377-389. <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.4.9>

La Boîte à Graines. (s. d.). Oignon Jaune Sturon Bio. *La Boîte à Graines*. Consulté 10 août 2025, à l'adresse <https://www.laboiteagraines.com/boutique/legumes/oignons/oignon-jaune-sturon-bio/>

L'archenterre. (s. d.). *Accueil*. L'archenterre maraichage biologique. Consulté 18 août 2025, à l'adresse <https://www.larchenterre.be/lesite/index.html>

Larkin, R. P. (2015). Soil Health Paradigms and Implications for Disease Management. *Annual Review of Phytopathology*, 53(1), 199-221. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080614-120357>

Le Guen, M. E. (s. d.). *AMÉLIORER LES SOLS AVEC LE PAILLAGE (MULCH)*. Réseau Sahel désertification.

Le Trèfle blanc, couvert permanent bon marché fixateur d'azote. (s. d.). Consulté 10 août 2025, à l'adresse <https://www.agro-league.com/trefle-blanc>

Loodts, N. (2020, décembre 16). *Le maraichage biologique sur petite surface en 5 objets*. Laap. <https://sites.uclouvain.be/laap-anthropologie-prospective/le-maraichage-biologique-sur-petite-surface-en-5-objets/>

Maida, P., Bisen, B. P., & Diwan, G. (2019). Effect of Plastic Mulch on Growth and Yield of Chilli (*Capsicum annuum* L.). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(12), 2056-2062. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.812.243>

Maraîchage. (2024). In *Wikipédia*. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Mara%C3%AEchage&oldid=221581330>

Market garden. (2024). In *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Market_garden&oldid=1240800956

Mazollier, C., & Védie, H. (2008). *LES ENGRAIS VERTS EN MARAICHAGE BIOLOGIQUE*. Grab. <https://www.grab.fr/wp-content/uploads/2020/02/FICHE-GRAB-engrais-verts.pdf>

Milford, A. B., & Reed, M. (2024). Fresh vegetables with a story : Market gardening for a sustainable food transition. In *Plant-Based Food Consumption* (p. 277-295). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-98828-5.00003-6>

MOCA. (2024, mars 29). *DOSAGE DU CARBONE ORGANIQUE DES SOLS : Stable, Labile, Oxydable, Microbien*

Montemurro, F., Diacono, M., Ciaccia, C., Campanelli, G., Tittarelli, F., Leteo, F., & Canali, S. (2017). Effectiveness of living mulch strategies for winter organic cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. *Botrytis*) production in Central and Southern Italy. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 32(3), 263-272. <https://doi.org/10.1017/S1742170516000107>

OPVT, Université de rennes, Observatoire de Rennes, & Terre, écosystème et société (Éds.). (s. d.). *Protocole Moutarde*. Consulté 14 novembre 2024, à l'adresse https://drive.google.com/file/d/1qFDKBRv2CHfTvdfJG4T6qg67x3G_u87H/view

Ortiz-Ceballos, A. I., & Fragoso, C. (2004). Earthworm populations under tropical maize cultivation : The effect of mulching with velvetbean. *Biology and Fertility of Soils*, 39(6), 438-445. <https://doi.org/10.1007/s00374-004-0732-8>

Payne, R. W. (2015). The Design and Analysis of Long-Term Rotation Experiments. *Agronomy Journal*, 107(2), 772-785. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0411>

Prosensols. (2023). *La méthode USDA*. <https://www.paysdescollines.be/prosensols/>

Pulido Moncada, M., Helwig Penning, L., Timm, L. C., Gabriels, D., & Cornelis, W. M. (2014). Visual examinations and soil physical and hydraulic properties for assessing soil structural quality of soils with contrasting textures and land uses. *Soil and Tillage Research*, 140, 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.02.009>

Qi, Y., Ossowicki, A., Yang, X., Huerta Lwanga, E., Dini-Andreote, F., Geissen, V., & Garbeva, P. (2020). Effects of plastic mulch film residues on wheat rhizosphere and soil properties. *Journal of Hazardous Materials*, 387, 121711. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121711>

Qi, Y., Yang, X., Pelaez, A. M., Huerta Lwanga, E., Beriot, N., Gertsen, H., Garbeva, P., & Geissen, V. (2018). Macro- and micro- plastics in soil-plant system : Effects of plastic

mulch film residues on wheat (*Triticum aestivum*) growth. *Science of The Total Environment*, 645, 1048-1056. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.229>

Quentin, V., Chartin, C., Krüger, I., van Wesemael, B., & Carnol, M. (2019). *Guide sur les indicateurs biologiques et le carbone organique des sols agricoles en Wallonie* La qualité biologique et le carbone organique des sols agricoles en Wallonie (1). SPW. <https://sol.environnement.wallonie.be/files/Document/Guides/192063-SPW-VOLUME%20CARBIOSOL.pdf>

Requasud. (2013, 2023). *Qualité des sols*. https://www.requaconsult.requasud.be/requaconsult_sol

Riera, A., Antier, C., & Baret, P. (2020). *État des lieux et scénarios à horizon 2050 de la filière légumière en Région wallonne*.

Sallets, P., & Wiaux, F. (2020). *Les paillages végétaux en maraichage*. Biowallonie.

Sarthou, J.-P. (2016). *Santé des sols : Définition*. INRAE. <https://doi.org/10.17180/R87S-BD84>

Semailles. (s. d.-a). *Plants bio : Oignon Sturon - 250gr*. Semailles. Consulté 10 août 2025, à l'adresse <https://www.semaille.com/fr/oignons/635-oignon-sturon--250gr-5415166026026.html>

Semailles. (s. d.-b). *Semences bio et reproductibles d'Épinard Butterflay*. Semailles. Consulté 10 août 2025, à l'adresse <https://www.semaille.com/fr/epinard/1288-epinard-butterflay-5415166024657.html>

Sene, G., Thiao, M., Manga, A., Kane, A., Samba-Mbaye, R., Mbaye, M. S., Khasa, D., & Sylla, S. N. (2012). Arbuscular mycorrhizal soil infectivity and spores distribution across plantations of tropical, subtropical and exotic tree species : A case study from the forest reserve of B andia, Senegal. *African Journal of Ecology*, 50(2), 218-232. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2028.2011.01315.x>

SPW. (2015). *WalOnMap | Géoportail de la Wallonie*. WalOnMap. https://geoportail.wallonie.be/walonmap#MY_MAP_ID=4703ba18-e582-4a24-ae41-07acd052f4e6#BBOX=167501.71572482795,167796.3298557229,152237.58724347816,152369.8791747287

StatBel. (2024). *Chiffres clés de l'agriculture 2024*. <https://statbel.fgov.be/fr/chiffres-cles-de-lagriculture-2024-0>

SYTRA, & Wagarlim. (2023). *Filière wallonne des légumes*. <https://sytra.be/wp-content/uploads/2023/03/2-fiche-legumes.pdf>

Trinchera, A., Testani, E., Ciaccia, C., Campanelli, G., Leteo, F., & Canali, S. (2017). Effects induced by living mulch on rhizosphere interactions in organic artichoke : The cultivar's adaptive strategy. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 32(3), 214-223.

Triple Performance. (s. d.-a). *Comprendre et éviter une faim d'azote*. Triple Performance. Consulté 23 janvier 2025, à l'adresse [//wiki.tripleperformance.fr/wiki/Comprendre_et_%C3%A9viter_une_faim_d%27azote](https://wiki.tripleperformance.fr/wiki/Comprendre_et_%C3%A9viter_une_faim_d%27azote)

Triple Performance. (s. d.-b). *Moha*. Triple Performance. Consulté 10 août 2025, à l'adresse [//wiki.tripleperformance.fr/wiki/Moha](https://wiki.tripleperformance.fr/wiki/Moha)

UCLouvain. (s. d.). *Le maraîchage—Ferme de Lauzelle | Université catholique de Louvain*. Consulté 22 mai 2025, à l'adresse <https://www.uclouvain.be/fr/facultes/agro/ferm/maraichage-ferme-de-lauzelle>

Wezel, A., Casagrande, M., Celette, F., Vian, J.-F., Ferrer, A., & Peigné, J. (2014). Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(1), 1-20. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0180-7>

Willekens, K., Vandecasteele, B., Buchan, D., & De Neve, S. (2014). Soil quality is positively affected by reduced tillage and compost in an intensive vegetable cropping system. *Applied Soil Ecology*, 82, 61-71. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.05.009>

Wilmus, M. (2021). *Bilan en carbone et azote en culture maraîchère après prairie permanente : Étude de trois espèces légumières* [UCLouvain]. <https://hdl.handle.net/2078.2/23630>

Withers, P. J. A., Neal, C., Jarvie, H. P., & Doody, D. G. (2014). Agriculture and Eutrophication: Where Do We Go from Here? *Sustainability*, 6(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/su6095853>

Xie, Y., Tittarelli, F., Von Fragstein, P., Bavec, M., Canali, S., & Kristensen, H. L. (2017). Can living mulches in intercropping systems reduce the potential nitrate leaching? Studies of organic cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis*) and leek (*Allium porrum* L.) production across European conditions. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 32(3), 224-239. <https://doi.org/10.1017/S1742170516000211>

Yin, W., Feng, F., Zhao, C., Yu, A., Hu, F., Chai, Q., Gan, Y., & Guo, Y. (2016). Integrated double mulching practices optimizes soil temperature and improves soil water utilization in arid environments. *International Journal of Biometeorology*, 60. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1134-y>

Youssef, M. A., AL-Huqail, A. A., Ali, E. F., & Majrashi, A. (2021). Organic Amendment and Mulching Enhanced the Growth and Fruit Quality of Squash Plants (*Cucurbita pepo* L.) Grown on Silty Loam Soils. *Horticulturae*, 7(9), 269. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7090269>

Zacahrie, A. (2022, mai). *La guerre en Ukraine et l'insécurité alimentaire mondiale*. CNCD-11.11.11. <https://www.cncd.be/La-guerre-en-Ukraine-et-l>

Zumstein, M. T., Schintlmeister, A., Nelson, T. F., Baumgartner, R., Woebken, D., Wagner, M., Kohler, H.-P. E., McNeill, K., & Sander, M. (2018). Biodegradation of synthetic polymers

in soils : Tracking carbon into CO₂ and microbial biomass. *Science Advances*, 4(7), eaas9024. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aas9024>

10. Annexes

Annexe 1 : Bulletin d'analyse chimique de terre pour la parcelle 1A à titre illustratif	90
Annexe 2 : Grille de cotation de la méthode VESS	92
Annexe 3 : Clés d'identification de lombriciens en 4 groupes fonctionnels.....	93
Annexe 4 : Résumé des résultats statistiques significatifs pour les tests ANOVA I et Kruskal-Wallis	94
Annexe 5 : Résumé des tests statistiques significatifs ANOVA II et ANOVA III	96
Annexe 6 : Résumé des moyennes ajustées des résultats avec erreur standard	97
Annexe 7 : Présentation des analyses significatives ou tendanciennes par paire des variables.....	102
Annexe 8 : Résumé des moyennes ajustées avec transformation en racine carré des valeurs	105
Annexe 9 : Lien vers le « drive » où sont stockés les données expérimentales et les codes Rstudio utilisés dans le cadre de ce mémoire	106

Annexe 1 : Bulletin d'analyse chimique de terre pour la parcelle 1A à titre illustratif



CENTRE PROVINCIAL DE L'AGRICULTURE ET DE LA RURALITE.
17, rue Saint-Nicolas B-1310 La Hulpe
Tél: 02/656 09 70
Membre de REQUASUD

UCLouvain
Monsieur Lobet Guillaume
Croix du Sud, 2
1348 Louvain-la-Neuve

BULLETIN D'ANALYSE CHIMIQUE DE TERRE

(BA N° T25/0225)

Date d'échantillonnage :	24/01/25	Echantillonneur :	Le demandeur	N° d'analyse chimique :	T25/0225
Date de réception :	24/01/25	N° de boîte :			
Date d'édition :	13/02/25	Profondeur de prélèvement :	25 cm		
Dates d'analyses :	Du 24/01/25 au 13/02/25	Etat de l'échantillon à la réception :	Bon		

1. Renseignements concernant la parcelle

Nom de la parcelle : **1 A**
Superficie : **Non communiqué**
Texture : **Limon**

2. Renseignements concernant l'échantillonnage

Echantillonnage réalisé par le demandeur

3. Renseignements phytotechniques

Culture précédente : **Culture non indiquée**
Culture projetée : **Culture non indiquée**

4. Tableaux des résultats

PTCP82 : Prétraitement des échantillons. Méthode dérivée de NF ISO 11464 : sol séché (T° < 40°C) et broyé à 2 mm. Utilisation d'un broyeur à brosses.

Éléments	Teneurs mg/100g de terre sèche	Méthodes
» Phosphore ¹ P	1,4	PTCS10-Colorimétrie au bleu de Molybdène. Méthode propre.
» Potassium ¹ K	12	PTCS12-Spectrophotométrie d'absorption atomique. Méthode propre
» Magnésium ¹ Mg	8	
» Calcium ¹ Ca	112	
» pH KCl 1N	5,3	PTCS3-NF ISO 10390
» Carbone organique	14,2 g/kg	PTCS8-Dérivée de NF ISO 10694
» Humus	2,8 %	Valeur calculée. Carbone organique x 2. D.W. Pribyl-2010
» Carbone total : 14,2 g/kg		PTCS8-Dérivée de NF ISO 10694
CaCO3 :		PTPS2-dérivée de NF ISO 10693

¹ Nature de l'extractif: Acétate d'ammonium 0,5N - EDTA 0,02M, pH 4,65 - LAKANEN-ERVIO (1971) CWEA 8-II-12, points 6 et 7.1 (PTCS8)
L'incertitude de mesure sur les résultats d'analyses et d'échantillonnage accrédités peut être obtenue sur simple demande.



» Analyses réalisées sous accréditation BELAC.

Les données présentées en gris souligné dans ce bulletin ont été communiquées par le client. Si celles-ci affectent la validité des résultats, le laboratoire ne peut en être tenu responsable.

N° 280-TEST

Page 1/2

Ce rapport ne concerne que l'échantillon soumis aux analyses. Les résultats s'appliquent à l'échantillon tel qu'il a été reçu. Ce rapport doit être reproduit dans son intégralité.

N° d'analyse : T25/0225

UCLouvain Lobet Guillaume
Croix du Sud, 2
1348 Louvain-la-Neuve

Paramètres	Méthodes	Teneurs
Fer ¹ Fe	PTC812-Spectrophotométrie d'absorption atomique. Méthode propre	
Manganèse ¹ Mn		
Cuivre ¹ Cu		
Zinc ¹ Zn		
Sodium ¹ Na		
▶ Azote total	PTC88-Dérivée de NF ISO 13878	0,14 %
Carbone/Azote	Valeur calculée.	10
Chlorure de sodium	Méthode de Mohr	
Conductivité	PTC815-ISO 11265	
pH_eau	PTC83-NF ISO 10390	
Capacité d'échange cationique		
Calcaire Actif		%

¹ Nature de l'extractif: Acétate d'ammonium 0,5N - EDTA 0,02M, pH 4,65 - LAKANEN-ERVIO (1971) CWEA 8-II-12, points 6 et 7.1 (PTC88)

L'incertitude de mesure sur les résultats d'analyses et d'échantillonnage accrédités peut être obtenue sur simple demande.

La Responsable du pôle Laboratoires d'analyses agricoles,
Dr. Ir. M. Renneson

Les informations obtenues ou générées au cours des activités des laboratoires ainsi que les informations obtenues par d'autres sources que le client sont maintenues confidentielles entre les laboratoires et le client. Les données à caractère personnel sont recueillies et traitées dans le but de répondre à la demande d'analyse et de conseil. Elles ne seront pas utilisées à des fins commerciales. Par demande écrite, vous pouvez faire rectifier ou supprimer les données vous concernant via l'adresse mail dpo@brabantwallon.be. Les coordonnées géographiques couplées aux résultats d'analyses de vos parcelles agricoles peuvent être transmises à l'asbl REQUASUD afin d'établir des statistiques rendues anonymes, sur l'état des sols wallons.

BELAC ▶ Analyses réalisées sous accréditation BELAC.

Les données présentées en gris souligné dans ce bulletin ont été communiquées par le client. Si celles-ci affectent la validité des résultats, le laboratoire ne peut en être tenu responsable.

N° 280-TEST

Page 2/2

Ce rapport ne concerne que l'échantillon soumis aux analyses. Les résultats s'appliquent à l'échantillon tel qu'il a été reçu. Ce rapport doit être reproduit dans son intégralité.

VESS 2020 Version 10.06.2020	Couche entière: taille des agrégats/mottes	Agrégat/motte intact		Résistance [observable seulement en conditions d'humidité optimales, sinon se référer à "aspect après ouverture"]	Ouvrir (briser) la motte	Taille et forme des agrégats/fragments ouverts	Aspect après "ouverture"		Racines et couleurs (racines observables uniquement quand les cultures sont bien établies)
		Taille	Forme				Forme	Porosité	
Sq1 Très bien (friable)		La plupart font moins de 6 mm [critère à exclure si travail du sol récent -- > se référer uniquement à la forme]	Grumeleux. Agrégats petits et arrondis	Agrégats se désagrègent très facilement avec les doigts	Motte poreuse (ouverte): motte colonisable par des racines. Lorsqu'on ouvre la motte, elle se brise de façon irrégulière, composée de plus petits agrégats. Motte non poreuse (fermée): motte difficilement ou pas colonisable par les racines. Lorsqu'on ouvre la motte, elle se brise exactement où on veut ou bien le long de fissures et révèle des faces planes.	 1.5 cm	Les agrégats sont composés de plus petits agrégats, maintenus ensemble par des racines	Très poreux	Racines à l'intérieur des agrégats
Sq2 Bien (intact)		De 2 mm à 7 cm [critère à exclure si travail du sol récent -- > se référer uniquement à la forme]	Agrégats arrondis. Pas de mottes fermées	Agrégats se désagrègent facilement avec les doigts		 6 cm	L'ouverture des agrégats révèle quelques agrégats plus petits et des faces irrégulières	Poreux	Racines à l'intérieur des agrégats
Sq3 Moyen (ferme)		De 2 mm à 10 cm. 2/3 font plus de 2cm	Mélange d'agrégats arrondis de différentes tailles. Mottes anguleuses fermées aussi possible	La plupart des agrégats se désagrègent facilement entre les doigts		 faces légèrement irrégulières	L'ouverture révèle des faces plus ou moins rugueuses. Possibilité de faces planes	Peu poreux. Présence possible de quelques macropores et fissures.	Racines en général dans les agrégats
Sq4 Mauvais (compact)		Environ 2/3 des mottes font plus de 10 cm. 1/3 des mottes peuvent faire moins de 7 cm	Motte fermée sub- angulaire. Possibilité de bords anguleux. Structure lamellaire ou fissurée	Assez difficile de briser les mottes avec une seule main	Motte non poreuse (fermée): motte difficilement ou pas colonisable par les racines. Lorsqu'on ouvre la motte, elle se brise exactement où on veut ou bien le long de fissures et révèle des faces planes.	 13 cm macropores distincts	L'ouverture des mottes révèle des faces plutôt planes	Peu ou pas de porosité visible sauf macropores biologiques	Racines généralement regroupées dans les macropores et fissures ou autour des mottes fermées
Sq5 Très mauvais (très compact)		La plupart font plus de 10 cm	Motte fermée anguleuse	Très difficile de briser les mottes avec la main		 bords anguleux racines restreintes 45 cm	Révèle des faces planes avec des bords anguleux. Possible de faire des cubes à bords nets	Non poreux. Porosité restreinte à quelques macropores et fissures	Zones anoxiques avec couleur gris- bleu possible. S'il y a des racines, elles sont uniquement dans les fissures ou autour des mottes

Annexe 4 : Résumé des résultats statistiques significatifs pour les tests ANOVA I et Kruskal-Wallis

Variables	Facteurs	Test statistique F ou χ^2 (df)	Test statistique p-value	Méthode utilisée
C/N	Col	F = 2.4259; df = 9	p = 0.04743 *	ANOVA I
C/N	Bloc Leg	χ^2 = 4.0675; df = 1	p = 0.04371 *	Kruskal-Wallis
C_organic	Row	χ^2 = 4.0675; df = 2	p = 0.00307 **	Kruskal-Wallis
Humus	Row	χ^2 = 11.556; df = 2	p = 0.003095 **	Kruskal-Wallis
K	Row	F = 5.1541 ; df = 2	p = 0.01271 *	ANOVA I
N tot	Row	F = 0.1849; df = 4	p = 0.001258 **	Kruskal-Wallis
pH	Col	F = 4.9642; df = 9	p = 0.001386 **	ANOVA I
USDA	Col	χ^2 = 18.938; df = 9	p = 0.02572 *	Kruskal-Wallis
VESS	Row	F = 12.26 ; df = 2	p = 3.73e-05***	ANOVA I
$\sqrt{}$ (Lombric)	Trait	F = 1.62 ; df = 4	p = 0.18184	ANOVA I
$\sqrt{}$ (Lombric)	Bloc Leg	F = 4.16; df = 1	p = 0.04591 *	ANOVA I
$\sqrt{}$ (Lombric)	Col	χ^2 = 17.90 ; df = 9	p = 0.0363 *	Kruskal-Wallis
Richesse lombric	Row	χ^2 = 0.533 ; df = 2	p = 0.7661	Kruskal-Wallis
Richesse lombric	Col	F = 2.523 ; df = 9,55	p = 0.0169 *	ANOVA I
Richesse lombric	Bloc_Leg	χ^2 = 5.266, df = 1	p = 0.02175 *	Kruskal-Wallis
Infiltration	Row	χ^2 = 0.3081 ; df = 2	p = 0.8572	Kruskal-Wallis
Infiltration	Col	F = 1.518 ; df = 9	p = 0.209	ANOVA I
Infiltration	Bloc_Leg	χ^2 = 0.0439 , df = 1	p = 0.8341	Kruskal-Wallis
Surface foliaire 29 avril leg 1	Row	F = 0.1510 ; df = 2	p = 0.8614	ANOVA I
Surface foliaire 29 avril leg 1	Col	F = 5.3216 ; df = 4	p = 0.01468*	ANOVA I

Variables	Facteurs	Test statistique F ou χ^2 (df)	Test statistique p-value	Méthode utilisée
Surface foliaire 29 avril leg 2	Row	F = 2.3729 ; df = 2	p = 0.1354	ANOVA I

Surface foliaire 29 avril leg 3	Col	$\chi^2 = 4.099$; df=4	p = 0.3928	Kruskal-Wallis
Surface foliaire 26mai leg2	Row	F = 3.9898 ; df = 2	p = 0.04694	ANOVA I
Surface foliaire 26mai leg2	Col	F = 0.0888 ; df = 4	p = 0.9839	ANOVA I
Biomasse	Row	F=0.714 ;df=2	p = 0.496	ANOVA I
Biomasse	Col	F=2.304 ;df=4	p = 0.075	ANOVA I

Les étoiles indiquent le niveau de significativité : * p < 0,05 ; ** p < 0,01 ; *** p < 0,001

Annexe 5 : Résumé des tests statistiques significatifs ANOVA II et ANOVA III

Variables	Facteurs	Test statistique F ou χ^2 (df)	Test statistique p-value	Méthode utilisée
Infiltratio n	Trait	χ^2 28.989 ; df=4	p=7.856e-06 ***	ANOVA III
log(Adv_S urf_tot+1)	Trait	F= 2.2993 ; df = 4	p = 0.09099 .	ANOVA II
log(Adv_S urf_tot+1)	Bloc_Le g	F= 0.1601, df = 1	p = 0.69295	ANOVA II
log(Adv_S urf_tot+1)	Trait Bloc_Le g	F = 2.6938 ; df =4	p = 0.05754 .	ANOVA II
Richesse Adv	Trait	χ^2 = 10.5472 ; df =4	p = 0.001018 **	ANOVA III
Richesse Adv	Bloc_Le g	χ^2 = 0.125691 ; df = 1	p = 0.397506	ANOVA III
Richesse Adv	Trait : Bloc_Le g	χ^2 = 0.017725 * 3.6559 ; df= 4	p = 0.019817 *	ANOVA III
Surf foliaire 26 avril leg1	Trait	χ^2 =22.56 ; df = 4	p = 0.000155 ***	ANOVA II
$\sqrt{}$ (Biomass e)	Trait	F = 58.999 ; df= 4	P= 0.00001***	Anova II

Les étoiles indiquent le niveau de significativité : * p < 0,05 ; ** p < 0,01 ; *** p < 0,001

Annexe 6 : Résumé des moyennes ajustées des résultats avec erreur standard

Variables	Trait	Mean adjusted	SE Ajusted	df	Lower (IC95)	Upper (IC95)
USDA	BRF	5.620996	0.2337142	4.170084	5.149242	6.092751
USDA	Clover	5.237492	0.2378683	4.619400	4.758742	5.716242
USDA	Misc	5.468893	0.2444000	4.509530	4.976675	5.961111
USDA	Mix	5.285569	0.2228729	3.846139	4.834565	5.736574
USDA	Plastic	5.498130	0.2482355	3.781149	4.995522	6.000739
VESS	BRF	1.533810	0.2601185	0.929466	0.948212	2.119407
VESS	Clover	1.832227	0.2601036	0.929484	1.246665	2.417790
VESS	Misc	1.967775	0.2600479	0.928479	1.382245	2.553305
VESS	Mix	1.883992	0.2569335	0.906110	1.303365	2.464619
VESS	Plastic	1.881567	0.2632429	0.950107	1.290823	2.472310
Rich. Lomb.	BRF	1.332265	0.3623768	30.8226	0.5930208	2.071510
Rich. Lomb.	Clover	1.994530	0.3712580	33.4316	1.2395702	2.749490
Rich. Lomb.	Misc	1.982404	0.3707449	33.7093	1.2287204	2.736088
Rich. Lomb.	Mix	0.347393	34.00801	0.92289	2.334865	0.3473938
Rich. Lomb.	Plastic	0.366586	24.88216	1.09312	2.603481	0.3665864

Variables	Trait	Mean adjusted	SE Adjusted	df	Lower (IC95)	Upper (IC95)
Rich adv	BRF	1.1225	0.3886434	1.85722	0.307799	1.937
Rich adv	Clover	3.042168	0.4574872	1.93532	2.0858	3.999
Rich adv	Misc	1.37295	0.4522781	2.03594	0.430585 8	2.315
Rich adv	Mix	2.71618	0.4330539	2.08767	1.8153	3.617
Rich adv	Plastic	0.0359	0.4792617	1.80939	-0.9706	1.042
Rich adv leg 1	BRF	1.70084	0.5301274	19.3002	0.592440 3	2.809245
Rich adv leg 1	Clover	1.92639	0.6791166	17.6287	0.497464 9	3.355321
Rich adv leg 1	Misc	1.65336	0.6094294	21.2151	0.386772 2	2.919963
Rich adv leg 1	Mix	2.22953	0.6152823	20.5611	0.948318 6	3.510748
Rich adv leg 1	Plastic	-0.28177	0.6790909	17.6612	-1.710459	1.146904
Rich adv leg 2	BRF	0.544175	0.5684537	17.8679	-0.650734	1.739085
Rich adv leg 2	Clover	4.157944	0.6131712	20.9564	2.882623 9	5.433266
Rich adv leg 2	Misc	1.092541	0.6684442	19.4050	-0.304554	2.489637
Rich adv leg 2	Mix	3.202841	0.6095658	21.1629	1.935773	4.469909
Rich adv leg 2	Plastic	0.353649	0.6764635	18.5236	-1.064672	1.771973
Surf.Fol leg 1 29 avril	BRF	13.38571	3.123803	6.91699	5.981086 5	20.79034
Surf. Fol leg1 29 avril	Clover	13.28455	3.486650	7.66657	5.183054 0	21.38606
Surf. Fol leg1 29 avril	Misc	6.453229	2.984399	6.76621	-0.653484	13.55994

Variables	Trait	Mean adjusted	SE Ajusted	df	Lower (IC95)	Upper (IC95)
Surf. Fol leg1 29 avril	Mix	13.89228	3.123803	6.91699	6.487661 8	21.29692
Surf. Fol leg1 29 avril	Plastic	19.95754	3.486650	7.66657	11.85603 9	28.05905
Surf Fol leg 2 26 mail	BRF	1.828333	1.020163	3.07531	-1.373761	5.030427
Surf Fol leg 2 26 mail	Clover	4.665000	1.020163	3.07531	1.462906	7.867094
Surf Fol leg 2 26 mail	Misc	1.798333	1.020163	3.07531	-1.403761	5.000427
Surf Fol leg 2 26 mail	Mix	4.633333	1.020163	3.07531	1.431239	7.835427
Surf Fol leg 2 26 mail	Plastic	1.498333	1.020163	3.07531	-1.703761	4.700427
Surf Fol leg 2 29 avril	BRF	0.115000	0.2261993	5.33586	-0.455626	0.685626 0
Surf Fol leg 2 29 avril	Clover	0.790000	0.2261993	5.33586	0.219374	1.360626 0
Surf Fol leg 29 avril	Misc	0.236666	0.2261993	5.33586	-0.333959	0.807292 6
Surf Fol leg 2 29 avril	Mix	0.765000	0.2261993	5.33586	0.194374 0	1.335626 0
Surf Fol leg 2 29 avril	Plastic	0.916666	0.2261993	5.33586	0.346040 7	1.487292 6
Biomasse	Mix	352.3646	70.47895	5.21945	196.1686 2	553.9777

Variables	Trait	Mean adjusted	SE Ajusted	df	Lower (IC95)	Upper (IC95)
Biomasse	Plastic	911.4132	118.77598	6.02389	644.1832 0	1224.893 4
Adv tot	BRF	3.750118	19.319.700	22	1.0435	10.041
Adv tot	Clover	8.295514	43.655.482	22	2.5097	23.618
Adv tot	Misc	3.755100	22.331.866	22	0.7954-	11.593
Adv tot	Mix	11.77487	59.995.947	22	3.8235	32.833
Adv tot	Plastic	1.030095	0.9534144	22	-0.2334	4.376
Advent leg 1	BRF	11.58904	8.147155	22	2.236639 4	34.17290 0
Advent leg 1	Clover	5.149634	4.671267	22	0.244112 9	18.55514 4
Advent leg 1	Misc	12.08503	9.939402	22	1.647191 3	40.60893 0
Adv leg 1	Mix	13.48452	11.002456	22	1.930317 9	45.05915 4
Adv leg 1	Plastic	0.246777	0.947053	22	-0.747768	2.964611
Adv leg 2	BRF	1.495164	1.614776	22	-0.358494	5.971310
Adve leg 2	Clover	20.84113	16.590548	22	3.418611 4	68.45236 3
Adv leg 2	Misc	1.686100	2.040364	22	-0.456583	7.541496
Adv leg 2	Mix	16.51405	13.303688	22	2.543211 9	54.69271 0
Advleg2	Plastic	4.138324	3.903076	22	0.039518 1	15.33929 4
Lombric tot	BRF	5.405443	1.3456294	24	2.984927 5	8.539413
Lombric tot	Clover	6.963749	1.5273248	24	4.168233 3	10.47272 0
Lombric tot	Misc	2.105760	0.8398743	24	0.729072 1	4.195903

Variables	Trait	Mean adjusted	SE Ajusted	df	Lower (IC95)	Upper (IC95)
Lombric tot	Mix	8.289696	1.6663995	24	5.207143 7	12.08570 3
Lombric tot	Plastic	11.37486	1.9520139	24	7.702831 1	15.76034 9
Infiltration	BRF	5.405.44 3	13.456294	24	29.84927 5	8.539413
Infiltration	Clover	6.963749	15.273248	24	41.68233 3	10.47272 0
Infiltration	Misc	2.105760	0.8398743	24	0.729072 1	4.195903
Infiltration	Mix	8.289696	16.663995	24	52.07143 7	12.08570 3
Infiltration	Plastic	11.37486	19.520139	24	77.02831 1	15.76034 9

Annexe 7 : Présentation des analyses significatives ou tendancielle par paire des variables

Variables	Factors	Contrast	Estimâtes/ difference	p_value	Method
Ferti C/N	Col	4 vs1	2.6667	0.0399*	Tukey
Ferti_C/N	Bloc_Leg	2 vs 1	1	0.0460*	Wilcoxon
Ferti_C_org	Row	B vs A	7	0.0140*	Wilcoxon
Ferti_C_org	Row	C vs A	9.71	0.0120*	Wilcoxon
Ferti_Humus	Row	B vs A	1.4	0.0150*	Wilcoxon
Ferti_Humus	Row	C vs A	1.91	0.0120*	Wilcoxon
Ferti_K	Row	B vs A	12	0.0108*	Tukey
Ferti_PH	Col	4 vs 1	0.8333	0.0491*	Tukey
Ferti_PH	Col	4 vs 9	1.3333	0.0149*	Tukey
Ferti_PH	Col	4 vs 10	1.3333	0.0005***	Tukey
Ferti_PH	Col	8 vs 10	0.8333	0.0491*	Tukey
Surf Foliaire	Row	C vs A	29.900	0.04966	Tukey
Surf Foliaire	Col	5 vs 1	167.417	0.0119	Tukey
VESS	Row	C vs A	0.5899	0.0008***	VESS
VESS	Row	C vs B	0.7095	0.0006***	VESS
VESS	Row	A vs B	-0.1196	0.7171	VESS
Log(Adv_Surf_tot+1)	Bloc Leg	Mix vs Plastic	1.8394	0.0751	Tukey
log(Adv_Surf_tot+1) (Trait=BRF)	Bloc Leg	Blc Leg1 vs Blc Leg2	1.62	0.0592	Tukey
Richesse lombric	Col	5 vs 2	-2.1428	0.01298*	Tukey
Richesse lombric	Bloc Leg	Blc Leg2 vs 1	3.1523	0.0090**	Wilcoxon (BH)
Richesse adv	Bloc Leg	BRF vs Clover	-1.920	0.0249*	Tukey
Richesse adv	Clover	Bloc L1 vs Bloc L2	-2.232	0,0245	Tukey

Variables	Factors	Contrast	Estimâtes/ difference	p_value	Method
Richesse adv	Bloc Leg	BRF vs Mix	-1.594	0.0472*	Tukey
Richesse adv	Bloc Leg	Clover vs Plastic	3.006	0.0010**	Tukey
Richesse adv	Bloc Leg	Mix - Plastic	2.680	0.0031**	Tukey
Richesse adv	Bloc Leg	Clover - Misc	1.669	0.0672	Tukey
$\sqrt{((Lombric))}$	Bloc Leg	BlocL1 vs BlocL2	0.495	0.0459 *	Tukey
Surf Foliaire L2 29 avril	Bloc Leg	BRF vs Clover	0.101	1.000	Tukey
Surf Foliaire L2 29 avril	Bloc Leg	BRF vs Misc	6.932	0.1951	Tukey
Surf Foliaire L2 29 avril	Bloc Leg	BRF vs Mix	-0.507	0.9999	Tukey
Surf Foliaire L2 29 avril	Bloc Leg	BRF vs Plastic	-6.572	0.2108	Tukey
Surf Foliaire L2 29 avril	Bloc Leg	Clover vs Misc	6.831	0.3278	Tukey
Surf Foliaire L2 29 avril	Bloc Leg	Clover vs Mix	-0.608	0.9992	Tukey
Surf Foliaire L2 29 avril	Bloc Leg	Clover vs Plastic	-6.673	0.5863	Tukey
Surf Foliaire L2 29 avril	Bloc Leg	Misc vs Mix	-7.439	0.1557	Tukey
Surf Foliaire L2 29 avril	Bloc Leg	Misc vs Plastic	-13.504	0.0249*	Tukey
Surf Foliaire L2 29 avril	Bloc Leg	Mix vs Plastic	-6.065	0.5702	Tukey
Surf Foliaire L2 26 mai	Bloc Leg	BRF vs Clover	-28.367	0.0262*	Tukey

Variables	Factors	Contrast	Estimâtes/ difference	p_value	Method
Surf Foliaire L2 26 mai	Bloc Leg	BRF vs Mix	-28.050	0.0278*	Tukey
Surf Foliaire L2 26 mai	Bloc Leg	Clover vs Misc	28.667	0.0248*	Tukey
Surf Foliaire L2 26 mai	Bloc Leg	Clover vs Plastic	31.667	0.0145*	Tukey
Surf Foliaire L2 26 mai	Bloc Leg	Misc vs Mix	-28.350	0.0263*	Tukey
Surf Foliaire L2 26 mai	Bloc Leg	Mix vs Plastic	31.350	0.0153*	Tukey

Les étoiles indiquent le niveau de significativité : * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$

Annexe 8 : Résumé des moyennes ajustées avec transformation en racine carré des valeurs

Variable	Contraste	Estimate	SE	df	t-ratio	P-value ajustée	Méthode utilisée
$\sqrt{\text{Infil}}$	Clover – Misc	1.219	0.395	21.2	3.087	0.0396*	Tukey
$\sqrt{\text{Infil}}$	Misc - Mix	-1.621	0.395	21.3	-4.106	0.0040**	Tukey
$\sqrt{\text{Infil}}$	Misc – Plastic	-1.925	0.434	25.0	-4.437	0.0014**	Tukey
$\sqrt{\text{(Biomasse)}}$	BRF - Clover	6.109	1.410	37.1	4.333	0.0010***	Tukey (emmeans)
$\sqrt{\text{(Biomasse)}}$	BRF - Misc	12.186	0.989	35.1	12.323	<0.0001***	Tukey (emmeans)
$\sqrt{\text{(Biomasse)}}$	BRF - Mix	5.350	1.197	36.6	4.468	0.0007***	Tukey (emmeans)
$\sqrt{\text{(Biomasse)}}$	BRF - Plastic	-6.168	0.955	34.7	-6.456	<0.0001**	Tukey (emmeans)
$\sqrt{\text{(Biomasse)}}$	Clover - Misc	6.077	1.184	36.1	5.132	0.0001***	Tukey (emmeans)
$\sqrt{\text{(Biomasse)}}$	Clover - Plastic	-12.277	1.584	37.5	-7.751	<0.0001***	Tukey (emmeans)
$\sqrt{\text{(Biomasse)}}$	Misc - Mix	-6.835	0.989	35.1	-6.913	<0.0001***	Tukey (emmeans)
$\sqrt{\text{(Biomasse)}}$	Misc - Plastic	-18.354	1.184	36.1	-15.500	<0.0001***	Tukey (emmeans)
$\sqrt{\text{(Biomasse)}}$	Mix - Plastic	-11.518	1.410	37.1	-8.169	<0.0001***	Tukey (emmeans)

Les étoiles indiquent le niveau de significativité : * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$

Annexe 9 : Lien vers le « drive » où sont stockés les données expérimentales et les codes Rstudio utilisés dans le cadre de ce mémoire

https://uclouvain-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/guillaume_lobet_uclouvain_be/ErNKfBsRpwxLhm6_zrBlg_QB8PUOliEuA_B8WdBVqH9bDg?e=5vWzKA

Étude de l'impact du paillage (« mulch ») sur la santé des sols, le développement des légumes et la gestion des adventices dans un contexte de maraîchage biologique sur petite surface en Belgique.

Présenté par Eliot Vas

Le maraîchage biologique sur petite surface apparaît comme une voie crédible pour rendre nos systèmes alimentaires plus durables et résilients face aux défis du XXI^e siècle. Les chocs récents sur les chaînes d'approvisionnement auront remis la souveraineté alimentaire au cœur du débat. Dans ce contexte, des maraîchers ont exprimé le besoin d'être mieux informés sur les effets des pratiques de paillage afin d'orienter leurs choix. C'est l'objet de cet essai de longue durée, conçu pour s'étendre sur dix ans, de manière à couvrir plusieurs cycles de culture et à capter des dynamiques biologiques lentes.

Cette première année a permis de mettre en place le dispositif expérimental, de tester et de valider les méthodes de mesure, et d'établir l'état initial du terrain d'essai. Les modalités de paillage évaluées auront inclus la bâche plastique, la paille de miscanthus et du bois raméal fragmenté (BRF). Les paillages vivants prévus n'ayant pas pu être implantés durablement, ont été remplacés par une modalité « terre nue ».

À court terme, des tendances nettes se dégagent. La bâche plastique arrive en tête. Elle a accéléré l'infiltration de l'eau, a limité la couverture d'adventices, a favorisé une installation rapide des cultures et a conduit à des gains de biomasse chez l'épinard. Le paillage BRF, pour sa part, montre un potentiel biologique intéressant, avec des signaux positifs pour l'activité microbienne et le potentiel de mycorhization. Ces résultats doivent néanmoins être interprétés avec prudence étant donné la mise en place tardive de certains paillages.

Ce travail propose plusieurs recommandations et pose des bases méthodologiques solides qui garantissent la pérennité de l'expérimentation à long terme. Les perspectives portent sur la poursuite du suivi pluriannuel, tout en renforçant le dispositif méthodologique mis en place afin d'intégrer finement l'hétérogénéité spatiale du terrain et documenter conjointement les performances agronomiques et les effets environnementaux. Les résultats à venir permettront de proposer aux maraîchers des recommandations opérationnelles, concrètes et adaptées aux besoins spécifiques du maraîchage biologique sur petite surface.

Mots-clefs : Paillage, Mulch, Expérience Long Terme , Santé Du Sol, Maraîchage,