

Faculté des bioingénieurs

Étude de l'impact des différents types de paillage sur la santé des sols, le développement des légumes et la gestion des adventices dans un contexte de maraîchage biologique sur petite surface

Auteur : Pierre-André Peters-Dickie

Promoteur : Pr. Guillaume Lobet

Lecteurs : Pr. Yannick Agnan

Mr. Simon Vanderveken

Année académique 2025 – 2026

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

« Si j'ai survécu à Transfert,
je survivrai à mon mémoire »
D'après : moi-même

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon promoteur, le professeur Guillaume Lobet pour sa confiance et son encadrement. Ce mémoire est le fruit, notamment, d'échanges constructifs, d'un cadre méthodologique vertueux, d'une aide précieuse, d'une bonne ambiance au sein de l'équipe, d'une mise en confiance, d'une accessibilité et sympathie rare chez un promoteur. Pour tout cela et plus encore, je le remercie infiniment. Également, je remercie l'ensemble du PEPA, surtout Thomas et Pierre. Ce mémoire n'aurait pas été possible sans les différents acteurs de terrains qui m'ont entouré, aidé et permis de trouver mes marques à la Ferme Universitaire de Lauzelle. Je remercie grandement Clémentine, Stéphanie, toute l'équipe des forestiers, Hugues, ainsi que les jobistes. Clémentine m'a été d'une aide extrêmement précieuse tout au long de mon mémoire, que ce soit par rapport à la mise en place de parcelles, les trucs et astuces de la Ferme de Lauzelle, sa collaboration durant toute l'année pour faire tourner ce (petit) bout de terrain et faire pousser des légumes.

Place à la famille, la liste est longue...

Je remercie Julie, pour tout. Remerciements que je ne saurais résumer en quelques mots. Je la remercie de sa présence au quotidien qui a embelli la majeure partie de mon parcours universitaire et au côté de qui j'ai pu évoluer. Merci pour cette belle aventure partagée qui ne fait que commencer. Merci à mes parents pour leur accompagnement, leur soutien et support pendant toutes ces (nombreuses) années. Ils m'ont toujours poussé à continuer tant que j'en avais l'envie, avec le rêve de devenir bioingénieur, et ce malgré les incertitudes et les inquiétudes que mes difficultés soulevaient. Mille mercis à mon très cher (grand) frère, Dr. Jean-Louis. Il fut (et est toujours) un modèle pour moi depuis tout petit et sans qui ce mémoire n'aurait pas eu la même saveur (en particulier quand il a fallu creuser des trous). Comprises dans le package JL, je remercie ma très chère belle-sœur, Claudia, pour son soutien discret mais infailible, et ma filleule, Ambre qui, malgré sa petite taille, a déjà amené une bonne dose de bonheur dans la famille. Je n'en serais pas là où j'en suis aujourd'hui sans Papy et Babou. Je les remercie pour tout ce qu'ils m'inspirent depuis tout petit, que ce soit dans le relationnel, l'affectif, l'éveil à la curiosité, la bienveillance, la sagesse, l'exploration de la vie, ... Mais surtout pour l'introduction à ce qui est progressivement devenu une passion : le jardinage et le maraîchage. Sans oublier, du côté paternel, Helen et Nannée. Je les remercie pour leur soutien depuis que je suis enfant.

Je remercie Eliot Vas, pour son travail, sa conception et la mise en place de cette plateforme expérimentale. Certes, l'essai reste perfectible, mais c'est aussi ce qui en fait sa beauté et qui rend l'implication des mémorant.e.s successifs pertinente. J'espère de tout cœur que cette expérience pourra mener à des résultats probants, contribuant à faire avancer le maraîchage vers une production plus durable, respectueuse des écosystèmes et des personnes, en questionnant la course à l'industrialisation effrénée aux allures de course droit dans le mur de ces dernières décennies

Merci à P. Bogaert, en qualité de conseiller aux études, pour la dérogation de finançabilité qu'il m'a accordée l'année passée. Même si je me souviendrai de sa petite pique « depuis le temps que vous êtes là, vous faites partie des meubles », taquine mais bienveillante, c'était une décision décisive dans l'arrivée au terme de mon parcours universitaire.

Merci au service Peps, notamment Olivier Lecomte, dont l'accompagnement et le soutien ont été plus que bénéfiques. Merci aux copains, en particulier William pour son soutien, sa bonne humeur, et les bons moments passés ensembles. Merci à tous les autres copains, de LLN et de Navarre. Merci aux copains d'agro intégrée, aux kaps et kapistes, et ceux qui sont venus m'aider pendant mes expériences, à savoir Baptiste, JL, Valentine, Laura et Julie. Je remercie la faculté, les profs, dont notamment Bertin, Draye, Baret et Lobet (bien que ce ne soient pas les seuls) et les assistants.

Contributions

	Pierre-André Peters-Dickie	Autres contributeurs.ices	Intelligence artificielle
Conceptualisation	2025-26 : Reformulation d'objectifs propres, formulation de nouvelles hypothèses	2024-25 : Eliot Vas : Idée de recherche principale, 1ere formulation des objectifs et hypothèses	
Méthodologie	2025-26 : Mise à jour et validation des méthodes d'analyses,	2024-25 : Eliot Vas : Conception plateforme expérimentale, protocole de recherche et méthodes analyses	
Investigation	X.		- NotebookLM : Recherches rapides d'infos dans le rapport d'Eliot ; Retranscription des enregistrements vocaux de mes analyses VESS et test-bêche. - Perplexity : Aide dans la recherche documentaire pour identifier et lister plus rapidement des sources sur certains sujets ; notamment pour l'état de l'art.
Analyse formelle	X		
Validation	X		Aide dans la construction de la réflexion générale des résultats, affinement des analyses et interprétations, recherche d'informations dans la littérature pour, ensuite vérifier manuellement les résultats obtenus et les méthodes
Rédaction	Version originale		Utilisation de Perplexity pour résumer le point sur les origines de la dégradation des sols dans l'état de l'art, sur base d'une version longue écrite par le mémorant
Visualisation	X , direction de l'IA, vérifications et consignes		Large aide dans l'écriture des scripts R utilisés, sur base de consignes fournies par le mémorant

Supervision		Guillaume Lobet (Promoteur, encadrement, conseils), Clémentine Livron (conseils, réflexions et aide actions pratiques de terrain), Thomas Dagbert, Myriam Kains et équipe MOCA (Conseils et aide sur les prélèvements et analyses de sol)	
-------------	--	---	--

Table des matières

1.	Introduction	1
2.	État de l’art	2
2.1.	Le maraîchage	2
2.1.1.	Définition	2
2.1.2.	Le maraîchage dans le paysage agricole belge	2
2.1.3.	Caractéristiques des systèmes maraîchers	3
2.1.4.	Circuits de commercialisation [Annexe]	4
2.2.	Changement climatique et vulnérabilités agricoles	4
2.2.1.	Les tendances climatiques attendues	5
2.2.2.	Impact sur l’agriculture au fil des saisons	6
2.2.3.	La santé des sols dans le contexte de changement climatique	7
2.3.	Les couvertures de sols	9
2.3.1.	Définition	9
2.3.2.	Intérêts agronomiques	9
2.4.	Le paillage dans tous ses états	10
2.4.1.	Les mulches inorganiques – films et bâches plastiques	10
2.4.2.	Les mulches organiques	14
3.	Objectifs du travail	19
3.1.	Objectif général	19
4.	Matériel et méthodes	20
4.1.	Contexte géographique	20
4.2.	Contexte pédoclimatique	20
4.3.	Les paillages à l’essai	21
4.3.1.	La bâche plastique noire	21
4.3.2.	Les paillages organiques morts	21
4.3.3.	Les paillages organiques vivants	22
4.4.	Le design expérimental	23
4.5.	Les cultures	24
4.5.1.	Rotation des cultures	24
4.5.2.	Cultures utilisées	25
4.6.	Antécédents cultureux	26
4.7.	Itinéraire phytotechnique	26
4.7.1.	Automne 2025 – fin des récoltes et essai de semi du trèfle	26
4.7.2.	Hiver 2025-2026 – gestion des parcelles à nues	27

4.7.3.	Printemps 2026 – Fertilisation, paillages vivants et plantation	27
4.7.4.	Été 2026 – Récolte et plantation	28
4.8.	Les méthodes d’analyses mises en œuvre	29
4.8.1.	La composition chimique du sol – pH, N, C et C/N	29
4.8.2.	Dimensions physiques – Structure, température et humidité	30
4.8.3.	Indicateurs biologiques de la santé des sols	32
4.8.4.	Le suivi des cultures et paillages vivants	33
4.8.5.	Le suivi des adventices	34
4.8.6.	Mobilisation des observations de terrain	35
4.9.	Les méthodes de collecte de données et de traitements statistiques	35
4.9.1.	Centralisation et traitements des données	35
4.9.2.	Structure de l’essai	36
4.9.3.	Différences méthodologiques avec 2024-2025	36
4.9.4.	Logiciel et packages d’analyse statistique	36
4.9.5.	Méthodologie statistique 2026	37
5.	Résultats et discussions	40
5.1.	État physique du sol en début de saison	40
5.1.1.	Le BRF présente la meilleure structure de sol	40
5.1.2.	Le réchauffement et le ressuyage du sol au printemps	41
5.2.	Nutrition azotée et développement des cultures	42
5.2.1.	Composition chimique du sol	42
5.2.2.	Dynamique de croissance des cultures	44
5.2.1.	Les corrélations entre les premières variables présentées	46
5.3.	Premier bilan de saison : biomasse des cultures	46
5.4.	Conditions d’entrée des cultures d’été	47
5.4.1.	Approche par indicateurs biologiques	47
5.4.2.	Le développement des paillages vivants	50
5.4.3.	Infiltration	51
5.4.4.	Humidité du sol	52
5.4.5.	Une humidité élevée limite la capacité d’infiltration	53
5.4.6.	Compétition des paillages vivants pour l’eau	54
5.5.	Discussion globale des résultats d’analyses	54
5.5.1.	Différenciations des paillages selon le type d’indicateur	54
5.5.2.	L’impact nuancé de l’hétérogénéité spatiale	55
5.5.3.	L’importance de l’écart temporel pour le lien entre indicateurs	55
5.5.4.	Le découplage entre l’état du sol et les performances des cultures du Miscanthus	55

5.5.5.	Le comportement hydrologique spécifique des paillages vivants	56
5.6.	Suivi des adventices.....	56
6.	Bilan et perspectives.....	57
6.1.	Bilan des méthodes d'analyses	57
6.1.1.	Méthodes pleinement concluantes.....	57
6.1.2.	Méthodes ayant présenté des limites	57
6.1.3.	Suggestion de modification d'approche – couverture foliaire.....	58
6.2.	Bilan et perspectives d'amélioration du dispositif.....	58
7.	Conclusions générales	59

1. Introduction

Dans le contexte actuel marqué, par le changement climatique et par de nombreux enjeux pour le secteur agricole, la nécessité de réduire les impacts de nos systèmes de production et de consommation sur le climat et la biodiversité est aujourd'hui largement reconnue. Le paillage des sols cultivés constitue, dans ce cadre, une pratique agronomique importante. Il contribue à sécuriser les rendements en optimisant l'utilisation de l'eau et des engrais, tout en soutenant la structure des sols, notamment contre l'érosion.

Depuis plusieurs décennies, les paillages plastiques se sont fortement développés, s'étendant à la plupart des productions végétales dans la majorité des régions du globe. Leur généralisation et leur caractère non biodégradable soulèvent cependant des problématiques majeures de pollutions persistante des sols, contaminant l'ensemble des écosystèmes jusqu'aux ressources en eau potable et dans l'alimentation. Face à ce constat, le développement de plastiques de paillage biodégradables constitue une alternative, mais celle-ci s'inscrit davantage dans une logique de substitution que de réelle remise en question du modèle. Le potentiel d'innovation, particulièrement mis en avance pour les grandes cultures, ne répond pourtant pas pleinement aux problématiques inhérentes aux plastiques conventionnels.

Toutefois, les paillages plastiques ne sont ni indispensables, ni forcément adaptés à tous les modèles de production. Dans les systèmes où la préservation de la fertilité des sols, la limitation des intrants et la réduction des impacts environnementaux sont des objectifs centraux, d'autres formes de paillages sont à envisager. Les paillages organiques, qu'ils soient constitués de résidus végétaux ou de couverts vivants, présentent un potentiel intéressant, en particulier pour les systèmes de production de taille modeste. Ils apportent de la matière organique au sol, influencent son fonctionnement hydrique et soutiennent sa structure et les fonctions du sol liées à l'activité biologique. Ils peuvent ainsi contribuer à répondre simultanément à certains enjeux agronomiques et environnementaux.

Chaque modèle de production agricole étant confronté à des contraintes et des opportunités spécifiques, qui doivent être intégrées localement en fonction du contexte pédoclimatique, nous proposons un essai comparatif de cinq modalités de paillages réparties en trois familles. L'ambition est de caractériser l'évolution de la santé des sols et de la production de légumes dans des conditions se voulant représentatives d'un maraîchage biologique professionnel sur petite surface. Initié au sein des Fermes Universitaires de l'UCLouvain à Lauzelle en 2024-2025 par Eliot Vas dans le cadre de son propre mémoire, cet essai s'inscrit dans une plateforme expérimentale de longue durée, prévue pour dix ans, dont le présent travail constitue la seconde année de suivi.

Les questions qui sous-tendent ce dispositif sont simples et complexes à la fois. Le paillage plastique, largement dominant aujourd'hui, y compris en maraîchage, doit-il rester la référence malgré ses inconvénients environnementaux ? Les paillages organiques constituent-ils des alternatives crédibles, capables de concilier productivité, qualité des sols, conditions de travail et viabilité économique ? Ce mémoire s'inscrit dans une démarche de clarification de ce type de questions, apportant une première série de résultats, montrant des effets probants, au terme de la seconde saison culturale du dispositif.

Sur cette base, le présent rapport s'articule de la façon suivante. Le chapitre 2 est consacré à la présentation des connaissances sur le sujet et mobilisées dans le travail. Le chapitre 3 explicite les objectifs généraux et spécifiques du mémoire. Le chapitre 4 décrit le dispositif expérimental et les modalités culturales, ainsi que les méthodes de mesures mises en œuvre. Le chapitre 5 présente, discute et croise les résultats obtenus au cours de l'année 2025-2026. Le chapitre 6 propose une synthèse des principaux enseignements, ouvrant des perspectives pour la suite de l'expérience. Enfin, le chapitre 7 est dédié à la conclusion générale des différents éléments et sujets présentés.

2. État de l’art

Préambule

Emporté par une curiosité débordante, certains sujets ont été explorés et traités largement au-delà des prérequis liés au sujet du mémoire. La plupart d’entre eux concernent l’agriculture et le maraîchage au sens large. Bien que ces derniers occupent une place importante dans le contexte du mémoire, le sujet d’intérêt principal concerne avant tout l’étude des paillages. Dès lors, l’espace qui leur était initialement alloué dans l’état de l’art ne se justifiait pas, en plus de dépasser le nombre de pages autorisé.

Néanmoins, ces parties restent, à mon humble avis, très intéressantes et il aurait été dommage de les écarter purement. La solution de compromis choisie dépend du niveau de pertinence. Les sujets nécessaires mais excessivement approfondis feront l’objet d’un résumé, mentionnant éventuellement la disponibilité de la version longue en dernière annexe, tandis que les thèmes liés au sujet du mémoire mais non nécessaires à la compréhension de ses enjeux seront précédés d’une mention « [Partie non nécessaire à la compréhension du sujet de mémoire] » qui invitera le lecteur à passer au point suivant, à moins qu’il ne souhaite s’y attarder. Enfin, les thématiques les plus éloignées du sujet principal seront intégralement reportées en dernière annexe.

2.1. Le maraîchage

2.1.1. Définition

La filière légumière regroupe deux grands pôles de productions aux finalités distinctes. Le premier concerne les légumes de plein champ, généralement sur des grandes surfaces et destinés à l’industrie. Le second correspond à des systèmes de production de légumes généralement plus diversifiés au sein d’exploitations de surfaces petites à moyennes et orientées vers le marché du frais, par l’intermédiaire de circuits courts et de la grande distribution. Cette seconde catégorie correspond souvent davantage à la conception du maraîchage dans l’imaginaire collectif.

La définition du maraîchage reste sujette à débat selon le paradigme considéré. Dans sa forme la plus consensuelle, le maraîchage pourrait être décrit comme « la culture de légumes de manière professionnelle à usage alimentaire » (Biot, 2026) « [...] en plein air ou sous abri » (Larousse, 2024).

Bien que cette définition puisse paraître floue de prime abord, elle mobilise en réalité d’importantes notions structurantes pour le secteur. Parmi celles-ci, la plus centrale est la recherche de rentabilité et de profit, inhérente à toute activité professionnelle économiquement viable. C’est d’ailleurs principalement cette notion commerciale qui distingue le maraîchage du jardinage amateur, plus que des aspects comme le modèle de production ou de la taille d’une exploitation.

2.1.2. Le maraîchage dans le paysage agricole belge

En Belgique, le secteur horticole¹ connaît une spécialisation accrue depuis 10 à 20 ans, marquée par la concentration de la production dans un nombre décroissant d’exploitations dont la taille moyenne augmente dans le même temps (Statbel, 2024). Cette tendance de fond se traduit par l’augmentation combinée des surfaces, des volumes et de la valeur économique des productions.

¹ Remarque : La plupart des séries statistiques annuelles disponibles à l’échelle nationale (notamment Statbel ou le SPF Finances) portent uniquement sur la totalité du secteur horticole. Celui-ci regroupe les productions comestibles (fruits et légumes) et les non-comestibles (plantes ornementales), dont la proportion est assez marginale. Dès lors, sauf précision contraire, la part non-comestible sera jugée négligeable dans la suite du présent rapport pour simplifier les explications, en l’absence de données plus précises.

Les modèles de production dominants sont les légumes de plein champ, destinés à l'industrie de transformation et de conservation, en particulier les petits pois, haricots, carottes, oignons et épinards (Dumont, 2017; Riera et al., 2020). La production belge est majoritairement tournée vers l'export de légumes transformés, essentiellement intra-UE, et l'import de produits frais (Amron et al., 2023). En effet, bien que les volumes produits dépassent largement la consommation nationale, 80 % de la production totale est en réalité exportée. De ce fait, la part du total restant sur les marchés domestiques (20 % environ) ne permet pas d'en couvrir la demande, ce qui rend paradoxalement le marché belge dépendant des importations pour couvrir sa consommation (Statbel, 2024; VLAM, 2025).

Le secteur horticole est marqué par une productivité économique par surface nettement supérieure à celle des autres activités agricoles. En 2022, l'horticulture représentait 5,1% de la Surface Agricole Utile (SAU) belge, mais 19,6% de la valeur économique du secteur agricole (Statbel, 2024). Cette hausse s'explique en partie par la hausse des volumes produits et de leur qualité, mais elle reflète aussi l'inflation galopante de ces dernières années

La dynamique nationale décrite ci-dessus se décline différemment selon les régions linguistiques. La Flandre se démarque par la concentration la plus marquée de la production légumière dans un nombre réduit de grandes exploitations. Cette dynamique est portée par une spécialisation et une intégration poussées de l'ensemble de la filière, davantage tournée vers la transformation et l'exportation. La région assure ainsi la majorité de la production belge, tant en surface qu'en valeur (Montois et al., 2023). En Wallonie, la production reste davantage diversifiée, partagée entre grandes cultures légumières destinées à l'industrie et une mosaïque de fermes maraîchères de petite et moyenne surface, ces dernières ne représentant qu'une fraction marginale des surfaces cultivées (Montois et al., 2023; Riera et al., 2020). En outre, la Wallonie se distingue par une progression nettement plus marquée de son secteur biologique par rapport à la Flandre (Le Douarin, 2026; SPW ARNE, 2026a).

2.1.3. Caractéristiques des systèmes maraîchers

[Partie non nécessaire à la compréhension du sujet de mémoire, traitant notamment de l'arbitrage entre les convictions agroécologiques d'un maraîcher et sa conception du profit]

En Wallonie, le nombre de fermes maraîchères diversifiées, exploitant généralement moins de 3 ha, augmente depuis plusieurs années (Statbel, 2023). Ce phénomène s'est accentué avec la crise du Covid-19 et les confinements successifs, pendant et à la suite desquels la demande en circuits courts a augmenté (Bulgari et al., 2021; Le Douarin, 2026; Montanari et al., 2021).

L'analyse des systèmes maraîchers s'est longtemps inscrite dans le paradigme productiviste, caractéristique de l'évolution au sens industriel de l'agriculture depuis le milieu du XXe siècle. Selon celui-ci, les grandes exploitations spécialisées, jugées plus efficaces économiquement, étaient opposées aux petites exploitations diversifiées, reléguées à des modèles marginaux. La conception récente du domaine tend cependant à dépasser cette lecture binaire, en plaçant les systèmes de production sur un continuum plutôt que dans des catégories hermétiques distinctes.

Dans cette optique, Antoinette Dumont propose une classification à deux niveaux des exploitations maraîchères wallonnes (Dumont, 2017, p. 99). Le premier, basé sur la surface exploitée, du niveau de motorisation et de la diversité des rotations, distingue quatre orientations techniques : *Maraîchers sur Petites Surfaces (MPS)*, *Maraîchers sur Moyennes Surfaces (MMS)*, *Maraîchers sur Grandes Surfaces (MGS)* et *Producteurs en Grande Culture (PGC)*. Le second, basé sur les principes agroécologiques et socioéconomiques, distingue trois modèles de production : *Biologique et agroécologique (dit agroécologique) (AE)*, *Biologique et non agroécologique (dit biologique) (Bio.)* et *Conventionnel (Conv.)*.

Cette classification reflète en partie la perception du profit et de la durabilité par le maraîcher, deux aspects structurant largement la conception d'une exploitation. En effet, lorsque la conviction

agroécologique domine, le profit est généralement envisagé comme un revenu satisfaisant et juste, compatible avec des conditions de travail et de vu décentes. Dans ce cas, les surfaces exploitées illustrent un compromis entre l'environnement, la rémunération et la charge de travail. Elles restent alors plutôt modestes (moins de 3 à 5 ha), plus favorables à l'adoption de pratiques agroécologiques (Biot et al., 2026). À l'inverse, lorsque le profit est envisagé comme une variable économique à optimiser, la production tend généralement vers la standardisation ainsi qu'une spécialisation dans un nombre réduit de cultures à forte valeur commerciale. Les surfaces exploitées, plus importantes, permettent des économies d'échelle, au détriment des pratiques durables les plus coûteuses ou incertaines.

Toutefois, si les MPS et MMS sont généralement moins mécanisés et diversifient davantage leurs cultures, ce qui crée effectivement un contexte plus favorable à l'adoption de méthodes agroécologiques, ce résultat n'est pas nécessairement automatique. En pratique, il existe de petites exploitations intensives, recourant massivement aux plastiques et aux intrants importés, suivant une logique de rendement proche d'un modèle industriel appliqué à petite échelle (Morel et al., 2017; Navarrete et al., 2015; Riviere et al., 2024). À l'inverse, de grandes surfaces spécialisées n'excluent pas l'adoption de trajectoires plus durables, que ce soit par l'intensification durable ou par la diversification en cherchant à réaliser des économies de gammes (de Roest et al., 2018).

Enfin, si les convictions agroécologiques propres d'un maraîcher se retrouvent généralement bien dans le design initial de son exploitation, elles ne suffisent toutefois pas à en expliquer le fonctionnement à long terme. Ce dernier évolue dans le temps et résulte d'un compromis permanent ses convictions agroécologiques et les contraintes socio-économiques et pédoclimatiques auxquelles il est confronté.

2.1.4. Circuits de commercialisation [Annexe]

Cette partie concerne plusieurs aspects du maraîchage et non les effets des paillages. Elle a donc été entièrement reportée en Annexe A.3 à titre purement informatif. Les principaux sujets traités sont les circuits courts, l'alimentation locale, la ceinture alimentaire (illustrée avec l'exemple de Liège), ainsi que la place et l'intérêt du maraîchage dans les circuits courts.

2.2. Changement climatique et vulnérabilités agricoles

Depuis les travaux de Svante Arrhenius publiés en 1896 dans "On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground", l'action du CO₂ sur le réchauffement de l'atmosphère par effet de serre est connue, quantifiée et surtout prouvée (Arrhenius, 1896; Maussion, s. d.). Si, à cette époque, il n'était pas encore question de changement climatique au sens actuel, les travaux d'Arrhenius constituent un jalon fondamental de la climatologie.

« *Qui aurait pu prédire ?* » (Macron, 2022)

Depuis, nombre de rapports émanant de multiples organismes et groupes d'experts poursuivent et complètent les travaux sur le fonctionnement du climat. Inlassablement, depuis plus de 30 ans, ces rapports continuent de nous alerter sur le lien évident entre la hausse des concentrations de CO₂ et autres gaz à effet de serre (GES) atmosphériques, les émissions anthropiques et les changements climatiques à large échelle.

Il n'est aujourd'hui plus question de savoir si les activités humaines ont un impact sur le climat, mais plutôt l'ampleur à long terme des changements induits ainsi leurs conséquences. À l'heure où j'écris ces lignes, la Belgique traverse la 2^e vague de chaleur de 2026². En France, particulièrement touchée depuis la fin du printemps, on ne compte plus le nombre de records de chaleur et de sécheresse des sols pulvérisés (Météo France, 2026). Plus largement, les dernières années ne manquent pas de manifestations du changement climatique en cours, en témoigne la Figure 1 montrant l'accélération significative du réchauffement climatique (Hawkins, 2026). L'année 2024 est la première année dont le réchauffement global dépasse de plus de 1,5 °C l'ère préindustrielle, suivie de 2025 qui est restée dans la même tendance avec +1,43 °C en moyenne dans le monde (WMO, 2025, 2026).

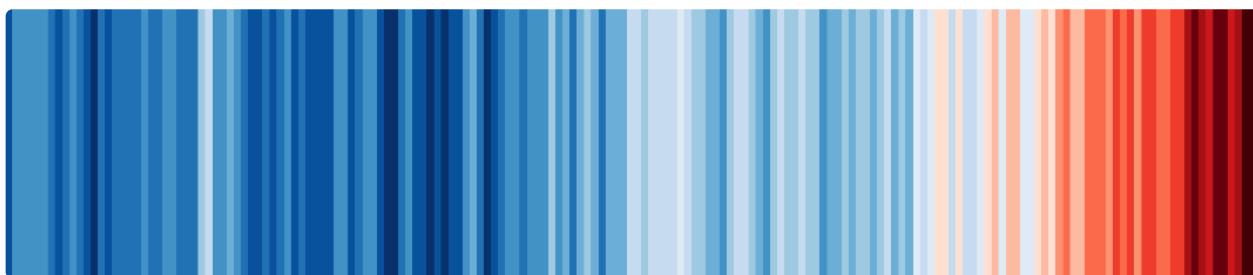


Figure 1 : Écart des températures annuelles moyennes de 1850 à 2025 par rapport aux moyennes de 1961 à 2010. 1 barre = 1 année; l'intensité de la couleur représente l'ampleur de l'écart (rouge = année plus chaude, bleu = plus froide)

2.2.1. Les tendances climatiques attendues

Le réchauffement climatique, touchant déjà toutes les régions du monde à des degrés divers, se poursuivra au moins tant que les émissions nettes de CO₂ resteront positives. Ces dernières années ne manquent pas de manifestations du réchauffement climatique en cours. La quasi-totalité des grands cycles climatiques sont et seront intensifiés : renforcement et accélération du cycle de l'eau, événements météorologiques extrêmes plus intenses et fréquents (vagues de chaleurs, pluies abondantes, sécheresses, inondations, tempêtes ...) avec de multiples boucles de rétroaction amplifiant ces phénomènes (IPCC, 2021c).

Pour l'agriculture mondiale, la principale conséquence est une instabilité croissante des productions, induite par l'action, souvent combinée, des facteurs de stress biotiques et abiotiques plus fréquentes et étendues à l'ensemble des saisons culturales. Les zones déjà plus touchées le seront d'avantage, tandis que les zones jusqu'ici épargnées pourraient voir leurs conditions se dégrader (IPCC, 2022). Toutefois, ces tendances moyennes cachent d'importants contrastes régionaux.

En Europe, la hausse des températures restera supérieure aux moyennes mondiales, avec une hausse plus marquée en hiver (IPCC, 2021b). Le principal changement attendu est la hausse de la variabilité météorologique interannuelle et inter-saisonnière. Celle-ci se traduit par la hausse de la fréquence, de l'intensité et de la durée des événements extrêmes (vagues de chaleur, déficits hydriques estivaux et printaniers, excès d'eau et inondations). En plus des pertes dues aux pluies et orages estivaux plus violents, les sécheresses agricoles seront, elles-aussi, plus régulières, longues et marquées, sous l'action des déficits hydriques et des vagues de chaleur non seulement plus marquées, mais aussi plus précoces (IPCC, 2021a). Dans le même temps, les jours de gel diminueront, suivant un gradient décroissant vers le nord, sans pour autant disparaître complètement. Si les cumuls annuels moyens devraient rester relativement stables (en dehors de l'Europe du Sud), les précipitations auront tendance à se polariser

² N.B : En Belgique, une vague de chaleur climatique implique au moins 25°C relevés à Uccle pendant au moins 5 jours consécutifs, dont 3 jours ≥ 30 °C (IRM, s. d.-b). Or, la station de l'IRM à Uccle n'a enregistré que 3 jours à plus de 30°C en juillet. Ce n'est donc pas, au sens strict, une vague de chaleur. La France, en revanche, est bien touchée par une troisième vague de chaleur depuis le 28 juillet 2026 (Météo-France, 2026).

entre les saisons. Les hivers seront généralement plus humides, surtout au nord, tandis que les printemps seront plus secs, surtout au sud. La répartition intra-saisonnière des précipitations devrait également évoluer, avec des événements pluvieux moins fréquents, mais concentrant des cumuls plus importants. Bien que cette tendance concerne toutes les saisons à l'exception de l'automne, la période estivale sera la plus touchée, avec des orages d'été plus violents.

La Belgique, située au carrefour de l'Europe centrale, du Nord et de l'Ouest, combine des éléments des différentes tendances régionales. De manière générale, certaines années ou saisons seront plus sèches, surtout l'été (1 sur 3 en moyenne), et d'autres seront très humides, surtout l'hiver (Nihoul, 2025). L'ampleur exacte de cette évolution reste incertaine, elle dépendra de l'évolution des émissions de GES et du niveau de réchauffement global atteint (Adapt2Climate, 2019; IRM, 2025).

2.2.2. Impact sur l'agriculture au fil des saisons

Tout comme les effets attendus du changement climatique, les travaux agricoles varient au fil des saisons. De manière générale, l'instabilité croissante des conditions météorologiques sera associée à d'importantes variations de rendements entre les années, le caractère imprévisible des productions représentant un enjeu majeur de l'agriculture en européenne à venir.

Le printemps

Le réchauffement pourrait théoriquement avancer les dates de semis des cultures de printemps de 1 à 3 semaines à l'horizon 2040, voire davantage à la fin du siècle, notamment vers l'Europe du Nord (Gobin, 2018; Olesen et al., 2012). Pourtant, dans les faits, l'avancée constatée reste inférieure à ce potentiel (Kolberg et al., 2019; van Oort et al., 2012), pour trois raisons principales. D'abord, le risque de gelées tardives persiste malgré la baisse du nombre annuel de jours de gel, faisant que les semis précoces restent risqués. Ensuite, les plantes de jours longs (la plupart des céréales cultivées en Belgique) ne peuvent atteindre certains stades phénologiques qu'au-delà d'un certain seuil photopériodique. L'intérêt d'un semis trop précoce reste donc limité sous des températures fraîches et des capacités photosynthétiques réduites. Enfin, l'accessibilité des champs dépend largement de l'humidité du sol. Un sol trop humide, dont la portance est limitée, expose à un risque de compaction lors du passage d'engins lourds. Cette contrainte est plus marquée vers le nord de l'Europe, dont le climat reste plus frais et humide, notamment au début du printemps. Pourtant, l'imprévisibilité accrue du régime de précipitations printanières risque de restreindre les fenêtres d'interventions possibles, exposant plus fréquemment les cultures à des stress hydriques ou des excès d'eau, dès le début de leur croissance.

Les agriculteurs font donc face à un dilemme (emprunté et reformulé de Kolberg et al., 2019) : D'un côté, semer plus tôt expose au risque de dégrader la structure des sols par compaction et tassement, ce qui peut induire un cercle vicieux dans lequel la structure dégradée favorise la stagnation d'eau et rallonge donc le temps de ressuyage au printemps. De l'autre, retarder le travail du sol pour en préserver la structure peut imposer de retarder l'implantation des cultures, ce qui peut exposer davantage ces dernières au déficit hydrique en été.

Les impacts de l'évolution du climat varient fortement en fonction de la culture. Les années chaudes et raisonnablement humides favorisent les cultures de printemps (surtout le maïs et la betterave), tandis que les céréales d'hiver, surtout le blé d'hiver, sont pénalisées par un manque de froid hivernal, notamment si le printemps est chaud lui-aussi.

L'été

En agriculture, le facteur le plus marquant du changement climatique en Belgique est l'accentuation des déficits hydriques en été, favorisés par la hausse des températures et la diminution des pluies à cette saison (Harchies, 2025). A l'inverse, les étés humides, moins fréquents, seront eux-aussi plus marqués. Les étés secs deviendront majoritaires, avec des épisodes pluvieux et orageux moins nombreux mais plus intenses (IPCC, 2021a), augmentant les risques d'érosion sur des sols plus secs et donc moins infiltrants.

La hausse des températures, en accélérant le cycle de croissance des cultures, réduit la durée d'accumulation de biomasse et donc la productivité. Selon la projection et le scénario de baisse des émissions, les prévisions sur les rendements varient de -1 à -22% pour le maïs et jusqu'à -49% pour le blé dans le sud de l'Europe (Hristov et al., 2020). Les pommes de terre et le maïs sont particulièrement pénalisés par la combinaison des températures élevées et des déficits hydriques. À l'échelle du continent, les bassins historiques de certaines cultures migreront progressivement vers le nord, sans toutefois systématiquement bénéficier des mêmes conditions pédologiques favorables.

La hausse de la concentration en CO₂ tend à favoriser la croissance des plantes (SPF SPSCAE, 2020). Cependant, ce bénéfice reste conditionné par la disponibilité en eau, principal facteur limitant en fin de printemps et en été.

L'automne

En Belgique, l'automne est la saison dont les cumuls pluviométriques annuels moyens sont les plus stables depuis le début des relevés en 1833 (IRM, 2020). Bien que cette saison soit moins caractérisée par des événements violents de manière générale, l'automne devrait présenter un profil de plus en plus marqué, alternant années humides et sèches. En automne, ces épisodes auront tendance à s'étendre sur plusieurs jours ou semaines, engorgeant plus durablement les sols lors des années humides. Les opérations les plus à risque à cette période sont aussi cruciales pour les agriculteurs, comme les récoltes tardives (betteraves, pomme de terre et maïs), la préparation des sols et l'implantation des cultures d'hiver. L'automne 2023, particulièrement humide en Belgique, illustre bien ce risque. Les surfaces allouées aux cultures d'hiver avaient été revues à la baisse faute d'accessibilité des champs en des conditions automnales largement dégradées. Cette situation avait largement contribué à la baisse importante des rendements et productions des cultures d'hiver constatées en 2024 (SPW ARNE, 2026c).

L'hiver

L'hiver est la saison dont la pluviométrie et la température moyennes augmentent le plus depuis 1981 en Belgique. Cette tendance devrait se poursuivre, soutenant le rechargement des nappes phréatiques tant que les prélèvements restent stables, bien que cet équilibre soit incertain en raison de l'intensification probable de l'irrigation agricole.

Les jours de gel et vagues de froid continueront de diminuer en fréquence et en intensité, toutefois sans disparaître, avec un hiver « condensé » sur un à deux mois, de janvier à février.

Cette évolution pose la question des besoins de vernalisation de certaines cultures d'hiver, notamment le blé, l'orge et le colza. Ces dernières nécessitent une période de froid prolongée pour amorcer la floraison. Semer ces cultures en automne exploite le besoin de vernalisation pour allonger leur période de croissance avant la floraison, favorisant le développement du système racinaire avant le redoux printanier, ce qui contribue à augmenter la productivité de nombreuses variétés dites d'hiver, notamment les céréales (Cha et al., 2022). Le réchauffement hivernal risque de réduire la disponibilité de périodes de froid suffisantes, ce qui peut perturber la floraison et accroître la vulnérabilité des variétés sensibles (Wu et al., 2017).

2.2.3. La santé des sols dans le contexte de changement climatique

La capacité d'un sol à fonctionner correctement repose sur les interactions entre les écosystèmes du sol et de son environnement global, ce qui implique de préserver simultanément la qualité du sol, de l'eau et de l'air qui lui sont associés.

Le Climate Risk Assessment Center (Cerac) synthétise l'enjeu de la dégradation de la structure et des écosystèmes du sol vis-à-vis de la production alimentaire comme suit : « Bien que les engrais et

l'irrigation puissent dissimuler temporairement les symptômes, ils ne peuvent pas remplacer les fonctions écologiques des sols vivants.» (Extrait de Cerac, 2025b, p. 1).

2.2.3.1. La santé des sols selon un prisme tridimensionnel

Évaluer la fertilité d'un sol à partir d'une seule de ses composantes conduit à une vision partielle, potentiellement trompeuse, de son état réel. Ce dernier résulte en réalité de la combinaison de trois dimensions complémentaires, à savoir ses conditions biologiques, chimiques et physiques. La littérature converge largement vers la nécessité d'intégrer ces trois dimensions pour correctement apprécier l'état de santé d'un sol en tant qu'écosystème, capable d'assurer des fonctions (Baritz et al., 2021; Kotschik et al., 2024). Pourtant, la revue de littérature de Bünemann et al. (2018) montre que la dimension chimique domine largement les études de terrain, la plupart se limitant à la disponibilité en nutriments et en eau.

Pour la dimension chimique, les indicateurs les plus mobilisés concernent la matière organique du et le carbone organique total, le pH et la teneur disponible (Pisani & Soriano Disla, 2025). Pour la dimension physique, les indicateurs liés au cycle de l'eau (capacité de rétention et d'infiltration, conductivité hydraulique, érodibilité ...), à la structure de sol et à la température dominent. Pour la dimension biologique, les indicateurs les plus utilisés sont la biomasse microbienne et l'activité enzymatique, suivies par les indicateurs liés à la faune du sol, en particulier les vers de terre (Bonilla-Bedoya et al., 2023).

La matière organique du sol occupe une place singulière puisque, selon les études et les fonctions prises en compte, elle est parfois considérée comme un indicateur chimique, parfois biologique. Composée majoritairement de carbone (environ 50%), elle regroupe un ensemble d'éléments variés, issus d'organismes vivants ou morts à différents stades de décomposition (Celestina et al., 2019; Kirkby et al., 2011).

Étant donné la récurrence de la matière organique et le carbone organique dans ce rapport, la Matière Organique (du Sol) et le Carbone Organique (du Sol) ou Carbone Organique Total seront respectivement désignés par MO, MOsol, CO, COsol ou COT, à moins que davantage de nuance ne s'impose. La forme MO(sol) sera privilégiée lorsqu'on souhaite rester général, et CO(sol) ou COT pour être plus précis ou quantitatif. Le COT est souvent exprimé en grammes de Carbone par kilogramme de sol sec (g C/kg).

Pour pleinement évaluer la santé d'un sol, il convient également de considérer ses fonctions. La dimension chimique conditionne notamment des fonctions telles que le cycle de l'eau et des minéraux, un effet tampon sur le pH et la mobilité des nutriments. La dimension physique, à travers la structure du sol, fournit la fondation solide nécessaire à la vie terrestre et à la plupart des autres fonctions, en particulier celles liées au cycle de l'eau et aux échanges gazeux. La dimension biologique assure quant à elle la dégradation de la MO et fournit un habitat aux organismes du sol, ces derniers contribuant en retour à ses fonctions physiques et chimiques (Afshar et al., 2026; Pisani & Soriano Disla, 2025). Cette interdépendance illustre pourquoi la structure du sol, la teneur MO ou l'activité biologique ne peuvent pas être interprétées isolément : c'est leur intégration, au travers des fonctions qu'elles soutiennent conjointement, qui permet de rendre compte de la santé réelle d'un sol.

2.2.3.2. Origines de la dégradation des sols

Les éléments ci-dessous correspondent à un résumé condensé d'une section initialement nettement plus détaillée (un peu moins de 4 pages), disponible intégralement en Annexe A.4.

À l'échelle européenne, les activités humaines demeurent la cause principale de la dégradation des sols, bien avant le changement climatique (Akca et al., 2024). Parmi les pratiques agricoles en cause, le travail intensif du sol et le passage répété d'engins lourds comptent parmi les plus dommageables pour la structure du sol, provoquant tassement, perte de porosité et de stabilité des agrégats, avec un risque de compaction difficilement réversible au-delà de 30 cm de profondeur. On estime qu'entre 23 et 32% des

sols agricoles européens sont sévèrement compactés (Akca et al., 2024; Destain, 2014). Ces dégradations physiques limitent l'infiltration et la rétention d'eau, accentuent le ruissellement et l'érosion, et fragilisent la vie du sol, avec un risque d'auto-entretien de la dégradation si les pratiques responsables perdurent. L'usage excessif d'engrais et de pesticides ainsi qu'une gestion inadaptée de l'irrigation contribue également, respectivement, à la diffusion de polluants dans l'eau, l'air et le sol, ainsi qu'à des risques de salinisation dans les zones les plus dépendantes de l'irrigation.

À l'inverse, les pratiques favorisant la teneur en matière organique du sol, comme la couverture végétale ou l'apport de matière organique exogène, jouent un rôle transversal en soutenant simultanément les fonctions physiques, chimiques et biologiques du sol, ce qui contribue à atténuer plusieurs des dégradations évoquées ci-dessus. En Wallonie, la teneur moyenne en carbone organique des sols cultivés est jugée critique et en baisse : en 2019, 90% des sols cultivés se situaient déjà sous le seuil de 20 g C/kg jugé sécuritaire pour la stabilité structurale (SPW ARNE, 2020).

Le changement climatique n'est pas à l'origine de ces dégradations, mais agit comme un catalyseur des fragilités déjà induites par les activités humaines (Afshar et al., 2026). La hausse des températures accélère la décomposition et la minéralisation de la matière organique, tandis que la polarisation saisonnière des précipitations et l'intensification des pluies accentuent les pertes de sol par érosion, en particulier lorsque le sol reste peu couvert. Les sécheresses estivales plus fréquentes et intenses exercent une pression supplémentaire sur l'ensemble des fonctions du sol, renforçant l'urgence d'adapter les pratiques agricoles pour préserver leur résilience.

2.3. Les couvertures de sols

2.3.1. Définition

En agronomie, la couverture du sol désigne la présence d'un élément de protection à la surface du sol. La pratique consiste à recouvrir le sol avec différents types de matériaux, morts comme vivants, pendant une certaine durée et avec un certain degré d'obstruction du sol (Agroscope, 2025; Eurostat, 2024). Formulée par la négative, la couverture du sol désigne l'ensemble des situations où la surface du sol n'est pas laissée à nu.

En outre, on distingue généralement le type de couverture du sol selon la nature du matériau utilisé. Il peut s'agir de matériel végétal vivant ou non-vivant. Le matériel végétal vivant désigne des plantes, correspondant variablement à la culture principale (par exemple, le pouvoir couvrant d'une betterave est meilleur que celui d'un pied de blé), à une culture intermédiaire ou fourragère, ou à un tapis de plantes installées spécifiquement à cet effet et classiquement appelées « couvert végétal » ou simplement « couvert ». Ces plantes peuvent être appliquées temporairement (détruites avant la mise en place de la culture principale par voie chimique (herbicide), mécanique (broyage/fauche) ou par le froid hivernal) ou de façon permanente, auquel cas l'éventuelle culture principale est dite implantée « sous couvert ». Ensuite, les couverts non vivants intègrent un large éventail de matériaux. Il peut s'agir des éléments organiques morts, d'origine végétale (amendements, broyats, paille, résidus de culture et d'industrie agroalimentaire, feutres et dalles de fibres compressées, feuilles, carton, ...), d'origine animale (essentiellement la laine de mouton), d'origine minérale (pouzzolane, parfois graviers), ou d'éléments de synthèse issus de la pétrochimie (films, toiles et bâches plastiques, géotextile, ...).

2.3.2. Intérêts agronomiques

En obstruant la lumière atteignant le sol et en fournissant une protection contre les agressions extérieures, les couvertures de sol contribuent à limiter les adventices, l'évapotranspiration et les dégradations du sol, notamment physiques dues à l'érosion hydrique et éolienne (EEA, 2020; Gillain & Balleux, 2021). Par ailleurs, elles favorisent généralement l'infiltration de l'eau et l'activité biologique,

tout en limitant les pertes dues au transfert d'intrants et résidus vers l'eau et les milieux aquatiques environnants par lessivage, ruissellement ou lixiviation.

2.4. Le paillage dans tous ses états

La littérature considère généralement le paillage comme étant un matériau, organique ou inorganique, appliqué ou semé spécifiquement pour couvrir un sol cultivé (EU CAP Network, 2025; Nature4Cities, 2018). Cette conception exclut de fait les cultures de rente ou fourragères et les prairies, qui pouvaient être considérées comme des couverture de sol. Le paillage se distingue également des amendements, bien qu'ils puissent mobiliser les mêmes matériaux (p.ex. du compost). En effet, le paillage est appliqué en surface du sol, contrairement aux amendements qui sont incorporés à minima dans les premiers centimètres du sol. Le paillage ou mulching désigne donc moins l'objet en lui-même qu'une pratique agronomique reposant sur la couverture des sols cultivés.

Dans la suite de l'état de l'art, l'usage de « paille » et « paillage » se limitera à la tige des céréales et graminées pour éviter tout risque de confusion. Ce choix vise également à refléter la pratique identifiée dans la littérature francophone sur le domaine, laquelle mobilise largement les traductions anglophones « mulching » pour le paillage (l'action de pailler) et « mulch/mulches » pour l'objet, le/les paillis. Une fois ces notions bien établies, les chapitres 4 à 7 (Matériel et méthodes à Conclusion générale) utiliseront plus largement les termes francophones de façon à privilégier le confort et la fluidité de lecture.

2.4.1. Les mulches inorganiques – films et bâches plastiques

Les mulches inorganiques englobent l'ensemble des matériaux non issus de matière végétale ou animale. En pratique, les plastiques dominent les usages de cette catégorie, sous formes de films, bâches, toiles ou géotextiles. D'autres types de mulches inorganiques existent, par exemple certains matériaux d'origine minérale (graviers, pouzzolane, ...) ou à base de caoutchouc recyclé. Leur utilisation reste toutefois cantonnée aux aménagements urbains ou de jardins, absente de l'agriculture professionnelle.

Historiquement, les mulches plastiques sont apparus en maraîchage dans les années 1950, avant s'étendre au reste des productions agricoles (Sun et al., 2020; Zhou et al., 2025). Depuis plusieurs décennies, l'usage des plastiques agricoles connaît une expansion considérable au point de faire émerger et diffuser le terme de plasticulture (Kader et al., 2017; Mormile et al., 2017). Celui-ci englobe tous les plastiques agricoles hors emballage, largement utilisés en productions animales et végétales pour la production et la conservation des denrées agricoles (APE Europe, 2025). Les films plastiques utilisés en productions végétales représentent plus de 80 % des agri-plastiques (FAO, 2021; Hann et al., 2021) utilisés en Europe. Ils servent à couvrir les cultures (serres, tunnels) et les sols (mulches). Le contexte général étant posé, la suite se concentrera uniquement sur les films plastiques de mulching, laissant de côté les autres formes et usages d'agri-plastiques.

Les films plastiques de mulching regroupent en réalité plusieurs formes et compositions possibles. Les films plastiques se distinguent avant tout par leurs propriétés radiatives et de perméabilité, qui déterminent leurs effets de régulation thermique, lumineuse et d'humidité sous le mulch. Les différents types de mulches plastiques sont généralement vendus aux professionnels en rouleaux de 1 à 2 mètres de large. Ils sont installés à la main ou avec une dérouleuse selon le niveau de mécanisation de l'exploitation.

Tout d'abord, la forme la plus répandue, majoritaire en grandes cultures et légumes de plein champ, est le film lisse de faible à très faible épaisseur (existent de 4 à 200 μm , les plus utilisés font 10 à 30 μm) (Henseler, 2024; Y. Huang et al., 2020; L. Wang et al., 2026). Il est généralement imperméable et composé de polyéthylène basse densité (PEBD) (CINEA, 2019; El-Beltagi et al., 2022). Il existe également en PE haute densité (PEHD) ou en PVC. Plus onéreuses et épaisses, ces compositions sont limitées à d'autres usages

minoritaires (horticulture ornementale, par exemple). Neuf, le film lisse se présente avec ou sans préperçage selon l'usage souhaité. La teinte noire est la plus utilisée, car elle s'adapte à la plupart des usages grâce à son action opacifiante maximale et un bon effet thermique en raison de son absorptivité élevée qui réchauffe l'air et la surface du sol.

Les films transparents, comme leur nom l'indique, laissent passer une part importante des rayonnements solaires. Ainsi, l'énergie directement transmise au sol le réchauffe plus rapidement et profondément qu'avec des films teintés pour lesquels le transfert de chaleur doit se faire par convection et conduction. La combinaison de cette propriété avec le piégeage de la chaleur par effet de serre local sous le film explique le pouvoir thermique supérieur des films transparents par rapport aux films teintés (H. Jones et al., 2018). De ce fait, les films transparents sont utiles pour accélérer la germination et la levée des cultures au printemps, typiquement sous climat frais et humide (Gheshm & Brown, 2020). En contrepartie, le *mulching effect* (obstruction de la lumière) très limité ne réduit aucunement la germination des adventices, contrairement aux films opaques. Pire encore, les adventices profitent d'excellentes conditions de germination, ce qui rend cruciale la bonne préparation préalable du sol. Les films transparents trouvent leur principal intérêt en régions plus chaudes et surtout plus ensoleillées. Sous ces conditions, ils constituent un outil intéressant pour lutter simultanément contre nombre d'indésirables sans produit phytosanitaire grâce à la solarisation du sol (O'Callaghan, 2008; Stapleton et al., 2019). Cette méthode consiste à couvrir le sol plusieurs semaines en période chaude avec un film transparent. La surface du sol peut alors atteindre 45 à plus de 60 °C. Répétées journalièrement sur de longues périodes, ces températures suffisent à détruire thermiquement les adventices (graines et plantes) et de nombreux pathogènes et ravageurs du sol, sans nécessiter de chimie.

À l'opposé, les films blancs sont plus utilisés pour préserver les cultures des chaleurs excessives, typiquement en régions chaudes et arides. Ils permettent de garder l'humidité du sol en limitant l'évapotranspiration, tout en réduisant la température du sol grâce à leur forte réflectivité (albédo élevé) qui renvoie la majorité du rayonnement solaire vers l'atmosphère.

Pour clôturer les films lisses, l'arrivée plus récente de plastiques colorés et photosélectifs sur le marché illustre les progrès techniques toujours en cours. Ils filtrent toute ou une partie de la gamme de longueurs d'ondes du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR, 400 à 700 nm), ce qui permet de combiner les atouts thermiques des films transparents et opacifiants des films teintés (Amare & Desta, 2021; Mormile et al., 2017). Ils restent cependant plus onéreux, ce qui freine leur adoption à large échelle.

Ensuite viennent les plastiques tissés et non tissés. Les premiers sont aussi appelés toiles tissées ou bâches de mulching. Ils sont généralement utilisés en maraîchage peu ou légèrement mécanisés (petites et moyennes surfaces). On les installe manuellement ou avec une dérouleuse. Plus épais (entre 150 et 250 µm), ils se composent de fils ou bandelettes de polypropylène (PP) entrelacés, formant des mailles serrées et visibles leur donnant un aspect quadrillé et une texture rugueuse caractéristiques (Planetliner, 2025). Généralement noirs, parfois d'autres teintes (vert notamment), ils sont opaques et perméables à l'eau et l'air. Les seconds, d'apparence se rapprochant de celle d'un feutre ou d'une ouate compacte, sont moins présents en agriculture. Ils sont opaques, de couleurs variables et perméables. Leur épaisseur est plus variable, autour de 0,5 à 2 mm.

S'ils rencontrent autant de succès, c'est que les mulches plastiques ne manquent pas d'atouts agronomiques. Contrairement aux mulches organiques, les films plastiques fournissent leurs effets bénéfiques presque immédiatement sur la structure du sol.

Notamment, plusieurs publications chinoises³ comparent différentes cultures avec mulch plastique et sans mulch et montrent des gains moyens de rendements de l'ordre de 20 à 45 % sur la majorité des cultures, y compris les légumes (Daryanto et al., 2017; T. Huang et al., 2024; Sun et al., 2020; L. Wang et al., 2026; Wei et al., 2024). Il convient cependant de rester prudent quant à la généralisation sans nuance de ces résultats. En effet, bien que le gain de rendement semble largement démontré à travers le monde et pour l'immense majorité des cultures (Gheshm & Brown, 2020; L. Wang et al., 2026), celui-ci résulte d'une combinaison d'effets. La proportion du gain expliquée par l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE), permise en limitant l'évapotranspiration, varie selon le climat. En effet, les régions arides et semi-arides profitent le plus des gains de productivité apportés par ce mécanisme (Qin et al., 2015). Or, certaines études citées ci-dessus se concentraient totalement ou en partie sur des régions du nord et nord-ouest de la Chine, qui présentent précisément ce genre de climat. Par exemple, le Plateau du Loess, dont le climat continental de mousson typique est semi-aride avec des hivers froids et secs et des étés chauds et humides (Kimura & Takayama, 2014). Dans ces conditions, les cultures de printemps bénéficient de bien meilleures conditions grâce aux films de mulching qui réchauffent les sols plus rapidement tout en préservant l'eau en limitant l'évapotranspiration, ce qui permet aussi d'allonger la saison culturale (Sun et al., 2020). Il en résulte une amélioration moyenne de la WUE de 58 %, pouvant même aller jusqu'à doubler (+ 106 %) et des gains de rendements jusqu'à près de 85 % sous certaines conditions sensibles à ces mécanismes.

Plus généralement, les mulches plastiques diminuent les pertes d'eau par évapotranspiration, ce qui aide à maintenir une bonne humidité du sol jusqu'en surface. Ils régulent la température en hiver et en profondeur en été (sauf pour les films transparents, minoritaires), tout en favorisant un réchauffement plus rapide au printemps, ce qui accélère la germination et l'implantation des cultures. Dans le même temps, les films opaques limitent le développement des adventices, surtout lorsqu'ils sont accompagnés d'un travail de sol adéquat.

Les films de mulching agissent comme une protection physique de la structure des sols. Ils réduisent fortement la battance, l'érosion et les pertes de sol arable et de fertilité par ruissellement et lixiviation. Par ailleurs, les pertes d'intrants (engrais et/ou pesticides, selon les pratiques) sont réduites.

La régulation de la température et de l'humidité améliore rapidement la fertilité chimique du sol ainsi que l'efficacité d'utilisation de l'azote (K. Zhang et al., 2022). Cette propriété est liée à la hausse rapide de l'activité microbiologique et enzymatique, qui augmente notamment la minéralisation de l'azote. Les pertes par ruissellement étant limitées, le stock d'azote minéral augmente généralement. Cependant, la hausse de l'activité biologique favorise parallèlement la dégradation de la MOsol. Sans adaptation dans les apports ou le travail du sol, le stock de MOsol peut diminuer, provoquant les multiples conséquences sur les fonctions du sol déjà évoquées.

Au-delà des effets bénéfiques en début et en fin de saison culturale, l'augmentation de la température peut devenir délétère pour l'activité biologique et la croissance des cultures en été. Une élévation excessive de la température dans la zone racinaire et/ou l'air (par exemple au-dessus des mulches plastiques noirs) accélère la sénescence foliaire et réduit la durée de remplissage du maïs (Bu et al., 2013), ainsi que la montaison de nombreux légumes largement cultivés en maraîchage (salade, épinard, choux, radis, oignon, ...) (Gheshm & Brown, 2020; Leblanc, 2008). Dans les deux cas, les pertes de rendement peuvent être lourdes.

A plus long terme, l'évolution de la qualité biologique des sols est plus variable (Tiwari & Sistla, 2024; L. Wang et al., 2026). D'autres paramètres deviennent progressivement plus influents avec les années,

³ La Chine est le premier producteur et consommateur mondial de films plastiques agricoles (40 à 60 %) et de mulches plastiques (plus de 60 % en 2022, soit 1,47 million de tonnes chaque année) (Dai & Ding, 2025; El-Beltagi et al., 2022; Mormile et al., 2017). De ce fait, elle est très active dans la recherche sur les films plastiques de mulching.

dont la nature des engrais (organiques ou de synthèse), le contexte pédoclimatique et la gestion des pratiques culturales (travail du sol) et d'entretien et remplacement des films. Notons également que les mulches plastiques n'apportent pas de matière organique aux sols. Ils n'enrichissent donc pas directement la MOsol ni l'activité biologique, en plus de potentiellement la dégrader à long terme.

Sur le plan environnemental, les films conventionnels ne sont pas biodégradables et restent sensibles aux agressions extérieures (UV, racines, adventices, déchirures, ...). Leur détérioration libère des microplastiques et résidus qui contaminent durablement l'environnement, y compris en dehors des zones de cultures (Hann et al., 2021; L. Wang et al., 2026). À terme, la pollution se propage et s'accumule dans les sols et l'eau, ce qui induit des effets parfois lourds sur la diversité, l'activité et les fonctions des populations microbiennes (bactéries, champignons) du sol et des vers de terre (Beriot et al., 2023). En plus de représenter un risque pour la santé humaine et animale, l'absorption de résidus et microplastiques par les plantes ainsi que leur présence dans le sol peuvent inhiber la croissance des cultures. Par ailleurs, les microplastiques affectent la structure du sol, dégradant la porosité et la circulation de l'air et de l'eau (H. Zhang et al., 2024). À terme, les parcelles dans lesquelles des mulches plastiques sont utilisés sur de longues périodes voient leur sol se concentrer en microplastiques et résidus, ce qui peut aller jusqu'à peser sur la rentabilité des parcelles les plus touchées en raison de la baisse de rendements.

De plus, les bilans économiques et environnementaux doivent intégrer l'ensemble du cycle de vie des films, de la fabrication au traitement des déchets. Or, ces produits issus de la pétrochimie sont intrinsèquement plus émetteurs que d'autres mulches biosourcés. Ils sont également plus chers à l'achat, tandis que le prix des alternatives organiques peut être réduit, voire nul. L'installation et l'entretien réguliers des mulches plastiques sont demandeurs en main-d'œuvre et les coûts de collecte et traitement des films usagés sont importants (Hann et al., 2021). De plus, si les films les plus utilisés (films lisses en PE et bâches en PP) sont théoriquement recyclables, ils sont généralement contaminés par du sol, ce qui complique leur recyclage (CPA, 2020). Ce problème, combiné à une collecte parfois défailante, pousse certains agriculteurs à enfouir ou brûler ces déchets en grandes quantités à proximité des parcelles de culture, accentuant encore l'ampleur des pollutions occasionnées (CINEA, 2019; Y. Huang et al., 2020).

En réaction, on assiste depuis plusieurs années à l'arrivée de films de mulching en plastiques biodégradables⁴ sur le marché. Conçus pour se dégrader et être incorporés à la terre, ils promettent de supprimer les problèmes environnementaux décrits précédemment ainsi que les coûts de traitement des déchets et de main-d'œuvre liée à leur enlèvement.

Cependant, s'ils améliorent effectivement le rendement, la qualité des cultures et la gestion des adventices par rapport à un sol sans mulch, les performances agronomiques des films biodégradables restent généralement inférieures à celles des films conventionnels (Henseler, 2024). Pourtant, les effets bénéfiques rapides et importants des films conventionnels sur la structure du sol, la température, les adventices et l'utilisation de l'eau constituent justement leur principale force de conviction pour les agriculteurs. Le prix des films biodégradables, souvent plus élevé, freine également leur adoption.

Par ailleurs, la biodégradabilité complète de ces films sans effet sur les fonctions du sol et de sa biologie ne semble pas faire l'unanimité dans la littérature scientifique. On peut trouver certaines publications démontrant leur biodégradabilité en conditions de laboratoire et concluant que ces résultats sont raisonnablement transposables au champ (Zumstein et al., 2018). D'autres affirment, avec des réserves nulles à légères, que les éventuels effets négatifs sur le sol sont négligeables (Xu et al., 2025), voire que

⁴ Précision : Bioplastique : partiellement ou totalement biosourcé (composé de polymères d'origine biologique (végétal ou microbien)). Biodégradables ou non selon le choix de fabrication. Plastique biodégradable : composé de polymères biosourcés et/ou fossiles décomposables par des microorganismes (bactéries, champignons) en eau, biomasse, CO₂ et/ou méthane. Plastique compostable : sous-catégorie des plastiques biodégradables dont la dégradation nécessite des conditions de compostage, idéalement industrielles (aérobie, T > 55 °C, humidité élevée). Les bioplastiques ne sont donc pas d'office biodégradables et inversement (FAO, 2021; FEAD, 2022).

l'utilisation de films biodégradables pouvait améliorer la santé globale du sol (K. Wang et al., 2025), sur la fertilité physique et chimique du sol (M. Zhang et al., 2022), ou les fonctions physiques du sol, mais pas sur ses qualités biologiques ou chimiques (Sintim et al., 2019).

D'un autre côté, nombre publications identifient des effets négatifs sur les sols et les plantes (Held, 2019), indépendamment du niveau de décomposition (Zimmermann et al., 2020), ou que la dégradation n'est pas suffisante dans un délai raisonnable, ce qui provoque des complications de gestion en obligeant à éliminer les films biodégradables malgré entre deux saisons culturales (Hann et al., 2021). Il semblerait que la vitesse et le niveau de dégradation dépendent surtout de la composition du film et des conditions biotiques (diversité et activité microbiennes) et abiotiques (humidité, température, chimie du sol) (Kim et al., 2025).

Les plastiques biodégradables et biosourcés (incluant les films de mulching) sont des mélanges complexes de produits chimiques, dont la toxicité du produit fini est souvent supérieure aux matières premières (Zimmermann et al., 2020). Les éléments composant les films biodégradables présentent des effets toxiques non seulement en conditions *in vitro* (laboratoire), mais également en conditions réelles en champs. Notamment, certaines populations bactériennes se montrent affectées à très court terme par les composés issus de films biodégradables (C. Li et al., 2022). A plus long terme, ces effets s'accroissent, puisque le temps d'exposition et les concentrations accumulées augmentent, touchant les bactéries et champignons plus durement et en plus grande diversité (Bandopadhyay et al., 2018; Liu et al., 2025). Or, ces microorganismes représentent un maillon essentiel des fonctions du sol, ce qui se traduit par la détérioration de certains services écosystémiques (dégradation de la MOsol, minéralisation et cycle des nutriments perturbés). En plus des risques sur la fertilité chimique du sol, la présence de résidus et dérivés peut inhiber la croissance des plantes (Zimmermann et al., 2020). Celles-ci absorbent également une partie des substances toxiques, dont certaines présentent des risques pour la santé humaine et animale (toxicité, perturbateurs endocriniens).

Il semble plus largement admis que la plupart des films en plastique biodégradable sont efficacement dégradés dans un composte performant (industriel) donc par définition par sur le champ, ce qui contribue partiellement à résoudre la problématique environnementale liée au traitement des films conventionnels (Kasirajan & Ngouajio, 2012; Sintim et al., 2020). En revanche, les contraintes financières et de charge de travail dues à l'enlèvement et au traitement des déchets, ainsi que les impacts à long terme sur le sol évoqués à l'instant, restent non résolues par les films biodégradables dans ces conditions.

En conclusion, les impacts environnementaux des films plastiques sont d'une ampleur telle que leur utilisation en mulching ne semble pas être une solution durable souhaitable actuellement, quelle que soit leur composition. Cependant, les films biodégradables constituent une piste prometteuse, équivalente ou supérieure aux films conventionnels lorsqu'on intègre le coût environnemental largement plus lourd de ces derniers. La recherche sur le sujet est foisonnante, portée par le monde académique et, vu les enjeux économiques immenses, certains géants de l'agrochimie (BASF par exemple). Des formulations plus sûres et réellement biodégradables en champ existent déjà mais en sont encore au stade de la conception (Bandyopadhyay-Ghosh et al., 2018, cité dans Zimmermann et al., 2020).

2.4.2. Les mulches organiques

Les mulches organiques sont des matériaux vivants ou morts, bruts ou transformés, issus ou composés d'organismes vivants, appliqués ou semés à la surface d'un sol cultivé. La motivation de leur utilisation est fondamentalement similaire à celle des mulches inorganiques (protéger le sol, modifier son microclimat et sa dynamique hydrique), mais également plus complète, puisqu'elle vise à améliorer la fertilité et la biologie du sol par l'apport de matière organique. En outre, la façon d'envisager les mulches organiques diffère fondamentalement d'un mulch inorganique (film ou bâche plastique) en ceci qu'ils suivent des logiques temporelles distinctes. Là où le mulch inorganique produit la quasi-totalité de ses

effets bénéfiques dès son application sur le sol, le mulch organique n'en fournira dans le même temps qu'une faible proportion. Pour atteindre son plein potentiel, un mulch organique nécessite un certain délai après son installation. Il dépend de mécanismes biogéochimiques dont la mise en place est progressive, basés sur des interactions complexes entre le mulch, le sol et le biote.

À conditions pédoclimatiques similaires, ce délai dépend principalement de la composition et de la texture du mulch organique, comme nous le verrons au fil des prochains points.

2.4.2.1. Les mulches organiques morts

Les mulches organiques morts peuvent être composés de matériaux d'origine végétale et/ou animale et être utilisés bruts ou après transformation naturelle ou humaine. Le choix d'un mulch n'est jamais neutre pour un agriculteur ou maraîcher, il répond aux contraintes et à ses objectifs de gestion de l'exploitation, incluant ses pratiques, son organisation de travail et la disponibilité de la biomasse. Dès lors, il est pertinent de regrouper les différents mulches organiques morts en catégories fonctionnelles.

Pour simplifier, considérons l'évolution de la décomposition des mulches organiques dans le temps selon trois groupes de facteurs. Premièrement, le plus connu est le rapport C/N, désignant la proportion d'azote contenue dans le matériau par rapport à la teneur en carbone. Ce rapport est le facteur déterminant dans les premières semaines à premiers mois après l'installation du mulch. Durant cette phase, les composés solubles et peu résistants (sucres, protéines simples) sont consommés rapidement par les microorganismes dont l'activité est principalement limitée par la disponibilité en azote. De ce fait, plus le rapport C/N d'un matériau est bas et plus il est facilement décomposable, en général.

Ensuite, la fraction récalcitrante devient progressivement un meilleur indicateur de décomposition, généralement après 2 à 6 mois selon la composition. La fraction récalcitrante désigne les composés structuraux ou pariétaux du matériau (cellulose, hémicellulose et lignine). Comme leur nom l'indique, ils sont nettement plus résistants à la dégradation microbienne et persistent donc plus longtemps que les composés solubles, surtout la lignine qui est la plus inaccessible des trois. Sur l'ensemble du processus de décomposition, la récalcitrance globale (notamment la teneur en lignine) est l'indicateur dominant la dynamique de dégradation d'un matériau organique, plus influente que le C/N pour expliquer la perte de masse à long terme.

Enfin, la taille et la texture du matériau agissent tout au long du processus de décomposition en modulant la surface accessible aux microorganismes. Schématiquement et à composition biochimique égale, plus un matériau est fragmenté, plus sa décomposition et donc la libération de ses nutriments sont rapides.

Matériaux à décomposition lente - Bois

Les mulches à base de bois (broyats, copeaux, écorce, sciure grossière ...) présentent généralement les rapports C/N les plus élevés, parfois supérieurs à plusieurs centaines, selon l'âge et l'essence de l'arbre, ainsi que de la partie utilisée (écorce, tronc, branches) (Rynk et al., 1992, p. 112). En agriculture et horticulture, il convient d'éviter les matériaux dont le C/N est trop élevé ainsi que certaines essences riches en composés allélopathiques (Sallets & Wiaux, 2018; Triple Performance, s. d.). Ces composés sont en effet capables d'inhiber l'activité Triple Performance nécessaire à leur décomposition, et peuvent affecter les cultures. Notamment, les conifères contiennent des polyphénols, ou encore d'essences comme le chêne, le châtaignier ou l'acacia, dont les écorces contiennent des tannins (famille des phénols).

Les mulches les plus intéressants en agriculture sont donc restreints aux bois jeunes, moins lignifiés et proportionnellement plus riches en azote et en nutriments que le bois ancien, ce qui facilite sa décomposition et réduit les risques d'effets négatifs sur les cultures. Ces considérations expliquent pourquoi le Bois Raméal Fragmenté (BRF) est le mulch à base de bois le plus utilisé, avec un rapport C/N typiquement compris entre 50 et 100-150 maximum. Considéré comme un sous-produit par la

filière sylvicole ou l'arboriculture fruitière, il est issu est de la taille d'entretien des pousses (rameaux) de 1 à 2 ans et de moins de 7 cm de diamètre, broyés par une machine en fragments de 5 à 10 cm maximum. Le broyage sert à augmenter la surface d'exposition du bois pour faciliter la colonisation sa par les microorganismes (notamment champignons) capables de dégrader la lignine, car il leur est difficile de pénétrer l'écorce. Un broyage fin est donc généralement préférable (Projet BRF, 2006).

Bien qu'il soit parmi les moins élevés de sa catégorie, l'enjeu principal du BRF découle de son C/N élevé. Lorsqu'il est nouvellement appliqué sur un sol, la décomposition du BRF mène à une immobilisation de l'azote par les microorganismes, souvent au moins pendant la première année, parfois plus. Toutefois, il est possible de tirer profit de l'immobilisation de l'azote tout en limitant l'impact sur les cultures intégrant le BRF dans la réflexion de la fertilisation. En effet, l'azote immobilisé par les microorganismes est également protégé contre les pertes par ruissellement ou lixiviation, et peut être libéré progressivement, ce qui lisse les pics d'apports d'engrais riches en azote. De plus, le BRF possède un potentiel d'aggradation des sols (par opposition à la dégradation), car sa décomposition alimente en continu le sol en matière organique et en nutriments, libérés par l'activité biologique, elle-même favorisée par ces apports. Ainsi, le BRF améliore significativement la quasi-totalité des indicateurs de santé des sols. De ce fait, le BRF est principalement apprécié en agriculture biologique et en techniques culturales simplifiées ou de préservation du sol, ainsi qu'en maraîchage.

Matériaux à décomposition intermédiaire – pailles

Les pailles de céréales mures et les foin sont caractérisés par des rapport C/N intermédiaires (environ 80 pour la paille de blé) et une teneur en lignine plus modérée que le bois (Sallets & Wiaux, 2018). Ces matériaux assurent une couverture efficace du sol, limitent la croissance des adventices et réduisent l'évapotranspiration, tout en se décomposant plus rapidement que les mulches ligneux. Ils sont de ce fait largement utilisés en maraîchages, en vergers, dans les systèmes biologiques et pour les cultures à forte valeur ajoutée (Chalker-Scott, 2007).

En grandes cultures, la paille est souvent restituée sur la parcelle à la récolte, tandis que l'importation de paille exogène reste plus rare pour des raisons de coûts et de volume. En maraîchage sur petites surfaces, à l'inverse, l'achat ou la production spécifique de ces matériaux pour pailler les légumes est plus courante, malgré les inconvénients de manutention et la main-d'œuvre nécessaire. Les foin secs, issus de prairies ou de couverts herbacés, présentent une décomposition généralement plus rapide et un meilleur apport nutritif que la paille de céréales (Sallets & Wiaux, 2018). Cette propriété peut accélérer la restitution de nutriments au sol.

Similairement aux matériaux ligneux, la granulométrie joue un rôle important pour les résidus herbacés. En général, à origine et composition identiques, les résidus longs retiennent davantage de carbone et d'azote en fin de saison que les résidus courts (Gaitanis et al., 2023). Autrement dit, pour une même paille, la manière dont elle est traitée avant son application en paillage (paille entière, broyée, tassée) conditionne sa vitesse de décomposition, la dynamique d'immobilisation et de minéralisation de l'azote et la durabilité de couverture du paillage.

La paille de miscanthus partage certaines caractéristiques des matériaux ligneux, notamment un rapport C/N plus élevé que la plupart des pailles de céréales ou d'espèces ligneuses, plus proche de celui du BRF jeune, bien qu'inférieur à ce dernier. Le miscanthus contient aussi une forte proportion de fibres structurales. Ses apports en nutriments restent cependant plus modestes que ceux du BRF, le miscanthus contenant moins d'azote par unité de volume, similairement aux pailles. Son intérêt principal consiste donc dans la durabilité de la couverture, la protection physique du sol et la limitation de l'évaporation, plus que dans un rôle nutritif, en comparaison au BRF.

L'immobilisation de l'azote et la faim d'azote

Les matériaux à rapport C/N élevé ont en commun de pouvoir entraîner une immobilisation temporaire de l'azote minéral du sol, en particulier durant les premiers mois suivant leur application. Les microorganismes décomposeurs présentent eux-mêmes un rapport C/N de 8 environ et assimilent une partie du carbone décomposé pour constituer leur propre biomasse. Pour maintenir leur rapport C/N, les microorganismes doivent mobiliser de l'azote minéral du sol lorsque le matériau apporté est trop riche en carbone par rapport à l'azote disponible.

En général, tant que le C/N des paillages et résidus est supérieur à 24, la décomposition se traduit par ce phénomène d'immobilisation de l'azote, impliquant une diminution de l'azote accessible aux cultures ainsi qu'une augmentation de l'azote organique, contenu dans la biomasse microbienne et inaccessible aux plantes (Gaitanis et al., 2023).

Ce phénomène est appelé « faim d'azote » dans le langage courant. Dans cette situation, les plantes présentent des symptômes caractéristiques de carence en azote, notamment si le mulch apporté n'est pas complété par une fertilisation adaptée. A plus long terme, avec le renouvellement et la minéralisation de la biomasse microbienne morte, cet azote immobilisé est restitué de façon progressive au sol sous forme minérale, ce qui contribue à lisser les apports et réduire les pertes par lixiviation et ruissellement, comme expliqué au sujet du BRF.

2.4.2.2. Les mulches organiques vivants

Les mulch organiques vivants sont constitués de plantes semées et maintenues en place à la surface d'un sol cultivé. En pratique, ils sont souvent mis en œuvre comme couverts d'interculture plutôt qu'en paillage accompagnant la culture principale, car leur implantation et leur gestion sur des parcelles déjà cultivées sont plus délicates et imposent une organisation du calendrier cultural plus exigeante.

Les légumineuses, à l'image du trèfle, présentent de nombreux avantages lorsqu'ils sont utilisés en paillage vivant. Le trèfle blanc (*Trifolium repens*), légumineuse pérenne de la famille des Fabacées, est un exemple classique de paillage vivant. Il est apprécié pour sa capacité à fixer l'azote atmosphérique sous forme d'ammonium assimilable par les plantes. Cette propriété est rendue possible par une symbiose avec des bactéries du genre *Rhizobium* induisant la formation de nodosités racinaire chez la légumineuse hôte. Ce faisant, le besoin en fertilisation azotée est fortement réduit. En effet, la part de l'azote fixé symbiotiquement peut couvrir de 80 jusqu'à 100 % de l'azote total consommé par le trèfle, le reste provenant de l'azote minéral du sol absorbé par les racines (PARTAGE, 2021; Voisin et al., 2020)

Par ailleurs, le trèfle blanc présente un port rampant et une hauteur modérée, ne dépassant généralement pas 30 cm à taille adulte (Vas, 2025), ce qui facilite son usage comme paillage vivant en réduisant l'obstruction de la lumière pour les cultures, tout en produisant un effet paillant efficace sur le sol. Son système racinaire dense mais peu profond, combiné à ses stolons, assure une bonne concurrence contre les adventices, en plus du pouvoir couvrant de ses parties aériennes. Son caractère pérenne et sa rusticité en font un candidat adapté pour des paillages vivants de longue durée. En effet, après implantation, le trèfle nécessite moins d'entretien que d'autres espèces annuelles qu'il faut semer chaque année. En contrepartie, comme la plupart des légumineuses, le trèfle peut se montrer sensible aux stress hydriques (Sarep, 2021). Notamment en période de sécheresse, il peut entrer en compétition avec la culture principale pour la ressource en eau pour répondre à ses propres besoins d'évapotranspiration.

Le mélilot jaune (*Melilotus officinalis*), autre légumineuse de la famille des Fabacées, possède des propriétés proches à celles du trèfle, en termes de fixation d'azote et d'apport de matière organique. Son système racinaire est également profond et améliore la structure du sol. Cependant, sa hauteur importante (pouvant atteindre 1 m) lui confère une forte capacité de compétition pour la lumière. Grâce à sa bonne résistance au froid (de -15 à -25 °C), le mélilot jaune est bisannuel dans nos régions

(Tabuteau, 2024; Vas, 2025, p. 26). Cependant, cette résistance n'est valable que lorsqu'il est déjà bien implanté. Pour germer, il nécessite un sol réchauffé à minimum 10 °C, avec un idéal proche de 20 °C (GardenWorld, 2026; Graine de Vie, s. d.). De ce fait, on conseille généralement de le semer au plus tôt en avril, ce qui ne le rend pas réellement adapté aux systèmes maraîchers dont le planning cultural prévoit typiquement de planter des cultures sous un paillage vivant bien développé à cette même période.

Les graminées annuelles ou pérennes peuvent également être utilisées en paillages vivants. Des espèces comme le moha (*Setaria italica subsp. Moharia*), les seigles ou d'autres céréales, contribuent surtout à structurer le sol et à maîtriser les adventices grâce à une croissance rapide et une couverture dense du sol. Leur sensibilité au gel et leurs besoins thermiques pour la germination limitent toutefois leur usage en semis précoces (Tabuteau, 2025). Elles sont en effet souvent plus adaptées en couvert d'interculture que comme paillages vivants, notamment pour les cultures de printemps typiques des systèmes maraîchers.

Les mélanges d'espèces et de variétés, notamment à base de légumineuses et graminées, visent à combiner les fonctions de ces deux familles (fixation d'azote, structuration des sols et couverture). En revanche, ils restent soumis aux contraintes de calendrier et de compétition en lumière et en eau. Lorsque les plantes composant le mélange ne présentent pas les mêmes exigences, l'ensemble se retrouve pénalisé par les besoins de celle-ci. Cet enjeu doit être pris en considération lors de la sélection des variétés constituant le mélange.

Les mélanges de légumineuses et graminées présentant des besoins thermiques imposant de les semer au printemps ne sont donc pas les plus appropriés pour le calendrier culturale typique du maraîchage, où la précocité de plantation des cultures principales est recherchée pour favoriser le rendement et être en mesure d'alterner plus rapidement les cultures dans les champs au sein d'une saison culturale. Une première piste concerne des mélanges annuels ou bisannuels associant des légumineuses rustiques (par exemple le trèfle incarnat ou la vesce velue) à des céréales tolérantes au froid (comme le seigle ou le triticale), semés en automne puis broyés ou roulés avant la mise en culture au printemps. La biomasse produite permet de disposer d'une couverture organique sans devoir implanter le paillage vivant en même temps que les cultures. Toutefois, cette alternative suppose que les cultures principales sont récoltées suffisamment tôt en automne pour laisser le temps au paillage vivant de se développer, ce qui n'est, encore une fois, pas toujours compatible avec les systèmes maraîchers. Une autre option, conservant le même type de mélanges, serait alors de semer les paillages vivants juste après la plantation des cultures principales. Le développement du paillage accompagnerait alors la croissance de la culture, qui ne serait pas plantée sous un paillage développé.

Une seconde piste concerne des mélanges de plantes pérennes de faible hauteur, similaires aux caractéristiques du trèfle, associées à des graminées à port relativement bas telles que certaines variétés de fétuques ou le ray-grass. La composition de ces mélanges doit privilégier une proportion importante de légumineuses fixatrices d'azote afin de bénéficier des effets bénéfiques décrits ci-dessus, tout incluant des graminées à développement plus rapide exerçant une couverture de sol plus rapide et une meilleure inhibition des adventices.

Pour tous ces mélanges, la densité de semi doit être adaptée à l'utilisation. Par exemple un semi automnal peut être plus dense pour favoriser la production de biomasse et assurer une implantation suffisante, tandis qu'un semi ou sur-semi printanier devrait rester plus clair afin de limiter la compétition pour l'eau avec les cultures principales.

3. Objectifs du travail

3.1. Objectif général

Comprendre, suivre et mesurer les effets de différents types de paillages sur la santé des sols, au moyen d'indicateurs et de méthodes de mesures multidimensionnelles, et sur la production de légumes, dans un contexte de maraîchage biologique sur petite surface.

Sélectionner, éprouver et valider différentes méthodes de mesures permettant de comprendre ces effets. Etablir, sur base des méthodes d'analyses définies en 2024-2025, un second niveau de données et d'observations sur la plateforme.

4. Matériel et méthodes

Le chapitre suivant est consacré à la présentation de l'expérience sur laquelle porte ce mémoire, d'un point de vue géographique, matériel, expérimental et phytotechnique. L'année 2025-26 représente la seconde année de la plateforme expérimentale prévue sur 10 ans, mise en place par Eliot Vas dans le cadre de son mémoire en 2025-25. Étant donné que ce dernier visait, entre autres, à constituer et évaluer un socle méthodologique d'analyse pertinent dans le cadre de cette étude, je me baserai parfois fort sur le rapport d'Eliot Vas pour le chapitre 4, lorsque ce sera justifié.

Dès lors, il convient de signaler d'emblée la présence d'un certain degré de similitude avec le rapport d'Eliot Vas. Il sera davantage marqué lorsqu'il s'agira d'éléments de mise en contexte géographique et pédoclimatique, de design expérimental, de modalités de paillages et organisation des cultures, ces éléments ayant vocation à être maintenus au fil des ans. Les crédits du design et de la sélection de la majorité des méthodes de mesures appliquées en 2025-2026 reviennent directement à Eliot Vas.

Par ailleurs, les éléments propres, adaptés, maintenus ou écartés en 2025-26 seront signalés comme tels avec justification des choix. Outre l'importance de la démarche d'honnêteté intellectuelle, l'objectif est également de garantir la reproductibilité et traçabilité de l'expérience à travers le temps et la contribution des mémorants et mémorantes successifs.

4.1. Contexte géographique

La plateforme expérimentale prend place sur le site de Lauzelle des Fermes Universitaires de l'UCLouvain, à proximité de Louvain-La-Neuve, au cœur du Brabant Wallon. Soutenue par le fonds Baillet Latour et administrée par l'UCLouvain, la ferme de Lauzelle est dédiée à l'expérimentation dans le domaine du maraîchage biologique sur petite et moyenne surface sur trois hectares (UCLouvain, s. d.). La gestion au quotidien de la ferme ainsi que le travail d'entretien et de production sont assurés par la maraîchère Clémentine Livron avec l'aide du personnel permanent des Fermes Universitaires et d'étudiants jobistes.

Les quelque 360 m² dédiés à l'étude se situent sur un plateau à environ 170 m d'altitude présentant une légère pente (1 à 2 %) orientée vers le sud. Le dispositif est divisé en 30 parcelles de tailles équivalentes, réparties en trois colonnes de 10 rangs chacune. La section 4.4. sera dédiée à la présentation détaillée du design expérimental.

4.2. Contexte pédoclimatique

Le terrain d'essai se situe en zone de « Sols sablo-limoneux à drainage naturel principalement modéré ou imparfait » (SPW, 2005). Un sol sablo-limoneux est susceptible d'offrir des conditions favorables pour le maraîchage en présentant une structure meuble et facile à travailler. Toutefois, le drainage modéré à imparfait peut nuancer ces qualités avec une tendance à limiter le ressuyage au printemps, ou défavoriser l'aération du sol en favorisant la stagnation de l'eau (dans les creux du relief, par exemple).

La Belgique centrale est caractérisée par un climat tempéré océanique. A Louvain-La-Neuve, il se traduit par une température moyenne annuelle de 10,6 °C et une période de végétation moyenne située entre mai et octobre (température moyenne journalière ≥ 10 °C). Il pleut en moyenne 849,4 mm annuellement, dont la répartition est polarisée selon les saisons (IRM, s. d.-a). Deux creux sont centrés sur avril et septembre, tandis que la période de recharge en eau se trouve en automne et hiver. Bien que les mois de juillet et août présentent un cumul moyen comparable à ceux de novembre à janvier, les pluies y sont généralement concentrées sur des périodes courtes lors d'événements plus extrêmes ou sur des années particulièrement humides. Cette polarisation saisonnière, modérée par rapport à d'autres régions du

monde, représente une contrainte structurelle pour le maraîchage, puisque le déficit printanier coïncide avec l'implantation et la croissance active de nombreuses cultures.

La période de suivi de cette seconde année (automne 2025 - été 2026) a été contrastée. L'automne et l'hiver sont globalement restés dans les normales saisonnières, contrairement au printemps (IRM, 2026). Celui-ci est classé parmi les plus chauds jamais enregistrés en Belgique, marqué par une vague de chaleur, d'ampleur exceptionnelle pour la saison, fin mai. La tendance s'est accentuée dès le début de l'été avec une seconde vague de chaleur extrême fin juin, suivie par un déficit chronique en précipitation menant à une sécheresse importante (10,6 mm en juillet, la normale étant 76,9 mm).

Les parcelles de l'étude sont irriguées par un système d'aspersion lorsque les pluies manquent, du moins jusqu'à un certain niveau. Celui-ci était piloté manuellement à l'appréciation de la maraîchère ou du mémorant jusqu'en juin 2026, avant qu'un système de minuterie ne soit installé pour l'automatiser.

4.3. Les paillages à l'essai

Le dispositif expérimental compare cinq modalités de paillage réparties en trois familles. Les paillages inorganiques et de synthèse sont représentés par la bâche plastique noire. Ensuite, le Bois Raméal Fragmenté (BRF) et la paille de *Miscanthus* appartiennent aux paillages inorganiques morts. Enfin, les paillages organiques vivants sont représentés par un mélange de Trèfle et un mélange de mélilot jaune et de moha, désigné « Mix ».

4.3.1. La bâche plastique noire

La bâche plastique noire constitue la modalité témoin de l'essai, à plusieurs titres. Le premier étant qu'elle représente la pratique dominante en agriculture et en maraîchage, ce qui la rend pertinente lorsqu'on prétend réaliser un essai représentatif des usages réels de la profession. De plus, la bâche plastique fait l'objet de nombreuses études à travers le monde depuis plusieurs décennies, comme nous avons pu le voir dans le chapitre 2, ce qui facilite la prévisibilité et la comparabilité de ses effets avec la littérature. Enfin, son caractère inerte en fait un bon point de comparaison, puisqu'elle n'apporte pas de matière organique, contrairement aux autres modalités à l'essai.

Elle se présente sous la forme de rouleaux de toile tissée de 100 g/m², aux dimensions 2,07×100 m (Vas, 2025, p. 24). Lors de leur première utilisation, les bâches sont déroulées sur les planches de culture avant d'y réaliser des trous de plantation à l'aide d'un chalumeau selon l'espacement souhaité. Lorsque ces trous de plantation sont aux bonnes dimensions, elles sont réutilisées pour les cultures suivantes. Sinon, et tant que les bâches sont en bon état, elles sont stockées en attendant d'être réutilisées à la ferme de Lauzelle. Dans le cadre de cette expérience, les bâches restent en place de façon permanente, sauf en cas de brèves interventions d'entretien. Soulignons qu'il convient de thermosceller, par exemple au chalumeau, les parties coupées des bâches tissées pour éviter que les bandelettes plastiques ne se désolidarisent et polluent les sols et l'environnement.

Enfin, l'itinéraire accompagnant cette modalité est différent des autres, puisqu'elle comprend un apport annuel de fumier sous la bâche plastique, visant à imiter la pratique d'un maraîcher sur petite surface en agriculture biologique. Les autres modalités ne reçoivent pas d'autre apport que le paillage en lui-même.

4.3.2. Les paillages organiques morts

Les deux modalités de paillages organiques morts se distinguent principalement par leur rapport carbone/azote (C/N), leur teneur en composés récalcitrants, leur granulométrie et donc par leur vitesse de décomposition, comme développé au point 2.4.2.1.

Installés respectivement en février et avril 2025, les mesures réalisées en 2026 illustrent donc les effets du miscanthus et du BRF après 12 à 15 mois. Chaque hiver, il convient d'évaluer le besoin de renouveler la couche de paillage de sorte à maintenir une épaisseur d'environ 10 cm.

4.3.2.1. Le Bois Raméal Fragmenté (BRF)

Cette modalité a été choisie, entre autres, pour la proximité du Bois de Lauzelle dont il est issu (Vas, 2025, p. 25). L'approvisionnement local se veut représentatif de la pratique d'un maraîcher sur petite ou moyenne surface soucieux de valoriser les ressources locales, avec l'avantage d'être potentiellement moins cher, voire parfois gratuit.

Le BRF, en raison de ses caractéristiques, est le paillage ligneux le plus utilisé en agriculture. Bien qu'il soit le plus faible de sa catégorie, le C/N du BRF reste le plus élevé de toutes les modalités à l'essai.

Après un remplacement temporaire par des feuilles mortes, le BRF est installé sur les parcelles depuis le 1^{er} avril 2025. Le premier apport était majoritairement composé de hêtre, rechargé avec du BRF de bouleau début février 2026, également issu du Bois de Lauzelle.

4.3.2.2. La paille de miscanthus

La paille de miscanthus, que l'on désignera simplement par « 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 (Vas, 2025, p. 25). En effet, le miscanthus est également largement utilisé pour pailler d'autres productions à la ferme de Lauzelle, ce qui rend ce choix d'autant plus pertinent. Son rapport C/N est inférieur à celui du BRF, tout comme ses apports en nutriments.

Comme le BRF, le miscanthus a été rechargé début février 2026. Cet apport était cependant trop conséquent, illustré par des signes d'asphyxie et d'engorgement en eau importants. L'épaisseur a été ramenée à 10 cm le 01/05/2026 et le restant aéré au râteau.

4.3.3. Les paillages organiques vivants

Le trèfle et un mélange de deux autres espèces constituent les dernières modalités de paillage à l'essai. Les semences proviennent de chez Ecossem à Louvain-La-Neuve.

Les difficultés d'implantation caractéristiques des paillages vivants, présentées au point 2.4.2.2, se sont illustrées dès la première année de l'expérience en raison d'une certaine incompatibilité avec le calendrier des cultures. En 2025, pour privilégier les cultures, le semi des deux modalités repoussées fin avril n'a pas fonctionné. Jusqu'en 2026, les modalités de paillages vivants correspondent donc à une modalité de sol nu. En 2026, nous avons fait le choix inverse : renoncer à cultiver les parcelles en paillages vivants au printemps afin d'en garantir la meilleure implantation possible. Quant à elles, les cultures d'été ont bien pu être plantées sur l'ensemble des parcelles.

La densité de semi du trèfle préconisée l'année passée semblait trop faible pour couvrir rapidement et durablement le sol. Celle-ci a été relevée de 6 kg/ha (soit 7,2 g par parcelle) à 30 g/parcelle de 12 m², soit 25 kg/ha. Étant donné la durée de vie du trèfle, estimée de 4 à 5 ans (AgroLeague, s. d.), il paraissait crucial de sécuriser son implantation au plus vite. À l'avenir, il conviendra d'observer la qualité de couverture du trèfle à chaque début ou fin de saison culturale pour évaluer la nécessité d'un sur-semi.

Similairement au trèfle, la densité du Mix a été revue à la hausse, tout en conservant le rapport suggéré de 2 pour 3. Ainsi, 30 g/parcelle (25 kg/ha) de mélilot jaune et 90 g/parcelle (75 kg/ha) de moha ont été semés à la volée fin avril, 13 jours après le trèfle.

4.3.3.1. Le trèfle blanc

Les atouts du trèfle blanc le rendent particulièrement utile dans le cadre de cette expérience, puisque les modalités de paillages organiques (morts comme vivants) ne reçoivent aucun apport de fertilisation ou amendement en dehors du paillage lui-même. Outre le développement du paillage, la libération d'azote dans le sol par exsudation bénéficie également aux cultures principales.

4.3.3.2. Le Mix

La seconde modalité de paillage vivant associe le mélilot jaune au moha, appartenant respectivement aux légumineuses et aux graminées.

Le mélilot jaune

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 (Vas, 2025, p. 25). Plus précisément, le mélilot jaune (*Melilotus officinalis*) a été préféré par rapport aux autres variétés (selon le même principe que le trèfle), ses propriétés bénéfiques sur la structure du sol, sa moins grande taille et surtout la meilleure accessibilité de ses semences dans le commerce. Bien qu'il soit plus petit que d'autres variétés, le mélilot jaune peut malgré tout atteindre 1 m de haut. De ce fait, il exerce une pression de compétition pour la lumière sur les cultures principales. Cette compétition est renforcée en raison de la croissance plus lente des cultures par rapport au mélilot. D'autres avantages du mélilot jaune comme paillage sont intéressants dans le cadre de l'essai.

Grâce à sa bonne résistance au froid (de -15 à -25 °C), le mélilot jaune est bisannuel dans nos régions (Tabuteau, 2024; Vas, 2025, p. 26). Cependant, cette résistance n'est valable que lorsqu'il est déjà bien implanté. Pour germer, il nécessite un sol réchauffé à minimum 10 °C, avec un idéal proche de 20 °C (GardenWorld, 2026; Graine de Vie, s. d.). De ce fait, on conseille généralement de le semer au plus tôt en avril, ce qui ne le rend pas réellement adapté à un essai en maraîchage dont le planning cultural prévoit de planter des cultures sous un paillage vivant bien développé à cette même période.

Le moha

Le moha (*Setaria italica subsp. moharia*) appartient à la famille des graminées. Originaire d'Asie, le moha exige un sol suffisamment réchauffé pour germer (entre 12 et 14 °C). Il est sensible au gel, même très léger (Tabuteau, 2025). À première vue, ce caractère gélif pourrait sembler intéressant dans le cadre de l'essai. Cependant, similairement au mélilot, son exigence thermique est incompatible avec le calendrier cultural établi pour cette expérience. En effet, comme nous le verrons par la suite, les premières cultures principales sont plantées début avril. Or, à cette date, le semis du moha n'est pas encore possible. Un semis automnal ne sera pas non plus possible, puisque les cultures plantées en début d'été restent en place tardivement en automne et jusqu'aux premières gelées pour certaines d'entre elles. Des situations comme 2025 (sans Mix) ou 2026 (Mix non cultivés au printemps) se répéteront donc inévitablement à l'avenir tant que le moha entre dans la composition du Mix.

4.4. Le design expérimental

Le dispositif expérimental, présenté à la Figure 4 ci-dessous, est subdivisé selon deux niveaux. D'une part, 30 parcelles de 12 m^2 ($8\text{ m} \times 1,5\text{ m}$) sont réparties selon une grille de trois Colonnes (A, B et C) de 10 Rangs chacune. La combinaison Colonne x Rang fournit un identifiant unique pour chaque parcelle. Par exemple, la parcelle « A4 » est au 4^e Rang de la Colonne A. D'autre part, la grille est scindée en deux Blocs Légumes de taille identique. Le Bloc Légume 1 regroupe les parcelles de Rang 1 à 5 de chaque Colonnes, tandis que le Bloc Légume 2 comprend les parcelles de Rang 6 à 10 de chaque Colonne.

Les modalités de paillage sont attribuées aux parcelles via une randomisation contrainte par cette logique de blocage. Les 5 modalités de paillage sont assignées dans un ordre aléatoire à un sous-bloc constitué par la combinaison Colonne×Bloc Légume. Ce faisant, chaque modalité de paillage est présente 1 fois dans chaque sous-bloc, soit 3 répétitions par Bloc Légume et 6 répétitions par modalité au total.

Grâce à la subdivision en deux Blocs Légumes, les effets des paillages peuvent être testés sur deux cultures légumières à la fois. Par ailleurs, répéter les modalités d'intérêt (les paillages) permet de réduire le risque de voir l'entièreté l'essai compromis par un aléa climatique ou sanitaire.

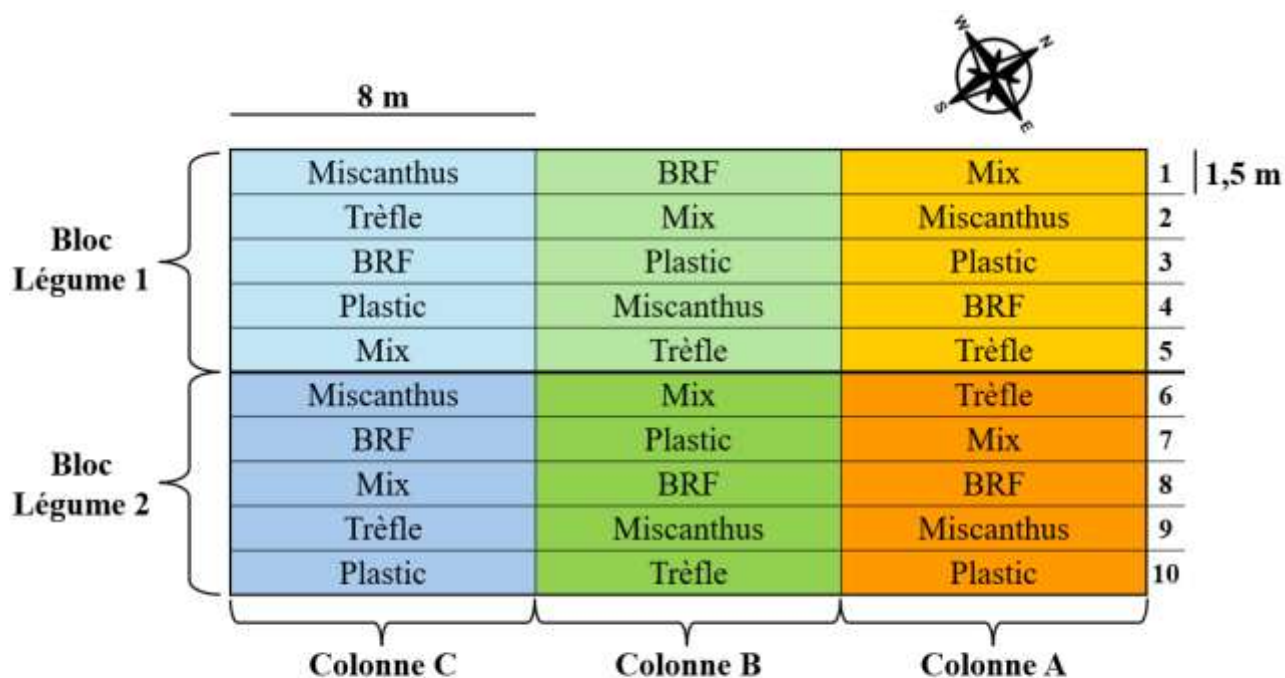


Figure 2 : Design du dispositif expérimental. Reproduit sur base de Vas, 2025.
(Icône points cardinaux : benanibens, s. d.)

4.5. Les cultures

4.5.1. Rotation des cultures

Le volet cultural de la plateforme repose sur trois paires de cultures, où une culture de printemps occupe tout un Bloc Légume avant de laisser la place à son binôme en cours d'année, qui la remplacera sur l'ensemble des parcelles de ce même Bloc Légume (Fig. 5). Ces trois paires sont : épinard-courge, salade-chou kale et oignon-fenouil. Les modalités de plantation sont détaillées au point 4.5.2 ci-dessous.

Dans cette rotation triennale, chaque année, les paires de cultures opèrent un glissement en direction du Bloc Légume suivant. Par exemple, une paire cultivée sur le Bloc Légume 1 la première année passera au Bloc Légume 2 l'année suivante et ne sera pas cultivée la 3^e année. Elle reviendra en année 4 sur le Bloc Légume 1. Ainsi, chaque année, deux paires de légumes sont cultivées et la troisième paire est en attente.

En 2024-2025, le Bloc Légume 1 était cultivé en épinards et courges, tandis que le Bloc Légume 2 accueillait la paire oignons-fenouils. En 2025-2026, la première a migré vers le Bloc Légume 2, la seconde n'était pas cultivée et reviendra en sur le Bloc Légume 1 l'année prochaine (2026-2027).

2024-2025 - Année 1	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
Bloc Légume 1				Épinard				Courge				
Bloc Légume 2					Oignon				Fenouil			
Non cultivé				Salade				Choux kale				
2025-2026 - Année 2	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
Bloc Légume 1				Salade				Choux kale				
Bloc Légume 2				Épinard				Courge				
Non cultivé					Oignon				Fenouil			
2026-2027 - Année 3	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
Bloc Légume 1					Oignon				Fenouil			
Bloc Légume 2				Salade				Choux kale				
Non cultivé				Épinard				Courge				

Figure 3 : Rotation des cultures

En 2025-2026, toutes les cultures ont été achetées sous forme de plantules à l'Archenterre avant d'être replantées directement sur les parcelles de l'essai. Cette ferme en maraîchage biologique diversifié se situe à Walhain.

4.5.2. Cultures utilisées

4.5.2.1. Salade et choux kale

La salade était cultivée pour la première fois 2025-26. Suivant une volonté de diversité dans la production pour plaire à un maximum de clients de l'autocueillette, nous avons souhaité utiliser deux variétés de feuilles de chêne, l'une rouge et l'autre verte. Cependant, les variétés effectivement commandées (Rob et Azerix) se sont toutes deux révélées être des feuilles de chêne rouges.

Rob et Azerix présentent le profil variétal typique des feuilles de chêne rouges modernes destinées au maraîchage professionnel (Bingenheimer Saatgut, 2025, p. 48; Groult, 2024). Elles présentent une bonne résistance au mildiou et à la montaison, ce qui limite les risques de pertes tout en permettant d'étaler la récolte dans le temps.

Les salades ont été plantées sur le Bloc Légume 1 le 7 avril 2026, à l'exception des parcelles Mix et Trèfle, pour les raisons évoquées précédemment. Les premières salades ont pu être récoltées à partir de la troisième semaine de mai et la culture est restée en place jusque mi-juin, soit au-delà de la période prévue. Faute de client suffisant en autocueillette, nous avons choisi de les faire cohabiter avec le chou kale pendant les deux premières semaines de développement de ce dernier, afin de limiter le gaspillage.

Le 9 juin 2026, les choux kale ont pris la place des salades sur le Bloc Légume 1. Contrairement aux salades, les choux ont pu être plantés sur toutes les parcelles. Leur récolte devrait débuter vers la fin septembre 2026 et pourra s'étaler jusqu'en octobre selon leur développement.

4.5.2.2. Épinard et courge potimarron

La variété « Butterfly », retenue en 2024-25 a été réutilisée cette année. Elle se caractérise par une croissance rapide et une montaison retardée, cultivable sur une large fenêtre de dates. Elle exprime mieux son potentiel *dans un sol meuble, frais et riche en matière organique* (Vas, 2025, p. 28) et résiste au froid jusqu'à -5 à -10 °C.

Pour sa seconde année de culture dans l'essai, l'épinard a été planté les 7 et 10 avril 2026 sur le Bloc Légume 2, à l'exception des parcelles en paillage vivant. Les premiers épinards étaient prêts à être récoltés à partir de mi-mai à un stade jeune et tendre. Leur récolte s'est étalée jusque début juin. Certaines parcelles contenaient encore des épinards lors de la plantation des courges, nous les avons donc fait cohabiter quelques jours sur les parcelles, avant de devoir les arracher, car ils montaient en graine, les rendant invendables.

La plantation des potimarrons a eu lieu le 9 juin 2026 pour tout le Bloc Légume 2 à l'exception de la modalité Plastic. En raison de l'espacement nettement plus important par rapport aux épinards, les bâches plastiques ont dû être remplacées pour éviter les trous de plantations vides dans lesquels des adventices se seraient développées. Il a donc fallu attendre la réception des bâches le 19 juin pour finaliser la plantation des courges.

En fonction de l'avancée de leur maturité, les courges devraient être récoltées de fin septembre à fin octobre, début novembre pour les dernières.

4.5.2.3. Oignon et fenouil

Après avoir occupé le Bloc Légume 2 en 2024-2025, cette paire n'était pas présente sur les parcelles cette année. Elle reviendra l'année prochaine sur le Bloc Légume 1.

4.6. Antécédents cultureux

Avant l'installation du dispositif, le terrain était cultivé depuis quelques années à la suite de l'acquisition de la ferme de Lauzelle par l'UCLouvain.

L'installation de l'essai a débuté en septembre 2024 avec la pose de bâches plastiques et du miscanthus selon une première organisation des parcelles. Entre février et le 1^{er} avril 2025, les bâches plastiques, le miscanthus et le BRF ont été installés sur les parcelles du design expérimental définitif, acté en janvier 2025.

En 2025, les épinards et les oignons ont été plantés sur 5 rangs par parcelles, respectivement le 08/04 sur le Bloc Légume 1 et le 15/04 sur le Bloc Légume 2. Une première tentative de semis du Mix fin avril 2025 sur le Bloc Légume 1 s'est soldée par un échec en raison de son caractère trop tardif. La récolte des épinards a eu lieu le 16/04 et celle des oignons s'est étalée de juillet jusqu'à octobre. Plus d'informations sur l'année 2024-25, issues du rapport d'Eliot Vas, sont disponibles en Annexe A.3.

4.7. Itinéraire phytotechnique

Aussi disponible sous forme de tableau chronologique en Annexe A.1.

4.7.1. Automne 2025 – fin des récoltes et essai de semi du trèfle

Les dernières courges du Bloc Légume 1 ont été récoltées fin octobre 2025. Les fenouils et oignons, partageant les parcelles du Bloc Légume 2 à cette date, ont été récoltés entre le 20 et le 28 octobre.

Bien que ce soit tardif, un premier semis de trèfle a eu lieu sur l'ensemble de la modalité les 24 et 31 octobre 2025, en espérant qu'il s'implante correctement et que la modalité puisse être cultivée dès le printemps. Cependant, malgré une levée correcte, les conditions pluvieuses puis rapidement froides n'ont pas permises au trèfle de se développer suffisamment pour passer l'hiver.

4.7.2. Hiver 2025-2026 – gestion des parcelles à nues

Les parcelles Mix, alors à nues, ont été désherbées entre le 28/11 et le 11/12. Ensuite, un labour manuel de surface (5 à 8 cm) a eu lieu, suivi par la pose d'une bâche temporaire pour protéger le sol pendant l'hiver et limiter la repousse d'adventice jusqu'au printemps.

4.7.3. Printemps 2026 – Fertilisation, paillages vivants et plantation

4.7.3.1. Fertilisation sous la bâche plastique

Du fumier, issu du site des Fermes Universitaires de Marbaix, a été épandu sous l'ensemble des bâches plastiques le 18 mars 2026 à raison de 2 brouettes par parcelles (approximativement 40 T/ha). Bien que peu précise, cette unité est probablement plus indicatrice et répétable sur le terrain.

4.7.3.2. Implantation des paillages organiques vivants – Mix et Trèfle

Depuis le retrait des bâches temporaires sur la modalité Mix le 3 mars et jusqu'au semis des paillages vivants en avril, plusieurs désherbages et faux semis se sont succédé sur ces modalités. Le semis du trèfle a eu lieu les 11 et 13 avril et celui du Mix s'est déroulé les 24 et 29 avril. Ces dates représentent le meilleur compromis dans les conditions météo de 2026. À l'avenir, il conviendra de les adapter aux modalités de Mix retenues ainsi qu'à la météo du moment.

Pour rappel, les doses de semences par parcelle de 12 m² étaient de 30 g pour le trèfle et 90 g pour le mélilot jaune et 30 g pour le moha. Pour répartir plus uniformément les semences, celles-ci ont été mélangées avec de la terre fine et une petite quantité de terreau. En plus des désherbages, le lit de semence a été préparé avec un travail fin du sol, sur 5 à 8 cm, le jour même ou les jours précédents. Ensuite, afin de maximiser le contact terre-graine, le sol a été rappuyé à l'aide du dos d'un râteau, puis arrosé. À l'avenir, il serait préférable de disposer d'un rouleau pour accélérer cette opération.

4.7.3.3. Plantation des cultures – salades et épinards

Les cultures de printemps ont été plantées les 7 et 10 avril 2026, uniquement sur les modalités Plastic, BRF et Miscanthus.

Pour les épinards, l'espacement, identique à 2025, était de 20 cm dans le rang sur 5 rangs par parcelles, soit 30 cm d'espace inter-rang. Pour les salades, il était de 35 cm dans le rang avec 4 rangs par parcelle, soit 37,5 cm d'espace inter-rang. En ajoutant 5 % de marge de sécurité, nous avons commandé 2550 plants d'épinard et 1200 plants de salade au total pour les 12 parcelles par culture. Celles-ci sont vendues par caisses de 150 plants à l'Archanterre à Walhain.



Figure 4 Figure 5 : plantation des cultures : salades et épinards

L'excédent d'un peu plus de 5 % de plants commandés a permis de remplacer une partie des nombreux plants morts dans les semaines suivantes. Les salades étaient les plus touchées, surtout sur les paillages morts, subissant la combinaison d'une forte pression de limaces et d'un sol trop humide faisant pourrir le collet. Une protection anti-limaces (granulés bio) a été épandue en dose modérée le 25 avril sur toutes les parcelles cultivées.

4.7.4. Été 2026 – Récolte et plantation

La récolte des épinards, plus précoces, s'est étalée entre le 10 mai (pour les modalités Plastic) et mi-juin. Celle des salades a commencé mi-mai sur les modalités Plastic et s'est poursuivie jusqu'à mi-juin pour toutes les modalités cultivées. Comme mentionné précédemment, les cultures d'été ont cohabité durant les premières semaines avec la fin des cultures de printemps. Ces dernières sont restées en place pour limiter le gaspillage, avant de devenir invendables (montée en graine, feuillages trop vieux) et ne soient arrachées.



Figure 6 photos 10/05, 15/06, 15/06 Figure 7 photos 10/05, 15/06, 15/06 Figure 8 photos 10/05, 15/06, 15/06 : récolte des cultures

Avant la plantation des cultures d'été, les paillages vivants, alors bien développés, ont été débroussaillés à environ 5 cm de haut. Les parties coupées ont été laissées sur le sol pour le protéger et lui apporter de la matière organique.

Les courges ont été plantées à raison d'un rang par parcelle, avec un espacement de 1 m dans le rang, soit 120 plants au total. La plantation des courges (Bloc Légume 2) et du chou kale (Bloc Légume 1) a eu lieu le 9 juin sur l'ensemble des modalités à l'exception de la modalité Plastic du Bloc Légume 2. En effet, la densité de plantation des courges étant nettement inférieure à celle des épinards, les trous de plantations de ces derniers étaient excessivement nombreux. Ces emplacements laissés vacants en grande quantité auraient favorisé le développement des adventices. Pour cette raison, les bâches du Bloc Légume 2 ont été remplacées le 19/06, avant la plantation des courges le jour-même.

Les choux kale ont été plantés sur 3 rangs par parcelles, avec un espacement de 40 à 45 cm dans le rang, soit environ 900 plants au total. Cependant, les caisses de plants, fournies par l'Archanterre à Walhain, présentaient un grand nombre de « ratés » (mottes vides). Deux parcelles de modalité Plastic dans le Bloc Légume 1 n'ont donc pas pu être plantées en 2026 (A3 et B3). Le Plastic a été spécifiquement ciblé sur base de ses résultats de biomasse des salades, plus homogènes entre parcelles par rapport aux autres modalités.

Les paillages vivants, favorisés par la chaleur, le soleil et les arrosages réguliers nécessaires pour le développement des cultures principales, ont rapidement repris leur croissance. De ce fait, l'obstruction de la lumière engendrée était trop importante, pénalisant les cultures principales. Un second débroussaillage a eu lieu le 8 juillet, uniquement sur le Bloc Légume 2 (courges), les choux kale étant trop serrés pour y passer sans les toucher.

4.8. Les méthodes d'analyses mises en œuvre

Préambule

La présentation détaillée des méthodes d'analyses reprises à l'identique depuis 2024-25 n'apporterait que peu d'intérêt pour répondre aux objectifs du mémoire puisqu'elles correspondraient à de simples répétitions. Seules les informations les plus importantes, nécessaires à leur compréhension, seront reprises dans la partie qui suit. Les détails explicatifs supplémentaires, issus du rapport d'Eliot Vas, pourront faire l'objet d'un renvoi en Annexe A.3.

En revanche, les méthodes adaptées ou inédites seront plus amplement détaillées. Dans tous les cas, il sera également précisé dans quelle mesure celles-ci sont modifiées, identiques ou inédites.

4.8.1. La composition chimique du sol – pH, N, C et C/N

Les prélèvements destinés à l'analyse de la fertilité chimique ont été réalisés les 3 et 4 mars 2026, selon le même protocole qu'en 2025. Celui-ci consiste à prélever en zigzag 15 échantillons de 25 cm de profondeur par parcelle à l'aide d'une tarière gouge puis à les homogénéiser dans un seau, dont on conserve 500 g de sol par parcelle dans un contenant adapté et étiqueté. Ensuite, les échantillons sont séchés à l'air libre pendant minimum une semaine avant de passer aux analyses. En pratique, le séchage a duré 3 semaines, en attendant la disponibilité du laboratoire d'analyses.

Contrairement aux prélèvements, l'analyse des échantillons était différente en 2026. Celle-ci s'est déroulée au laboratoire *Mineral & Organic Chemical Analysis* (MOCA) de l'UCLouvain, avec la participation active du mémorant. En 2026, l'analyse portait sur le dosage du pH, du carbone et de l'azote, à partir desquels le rapport carbone/azote (C/N) a été calculé.

La méthode Dumas, utilisée pour le dosage du carbone et de l'azote, consiste en une combustion de l'échantillon à haute température en présence d'oxygène (950 à 1000 °C), visant à convertir le carbone

et l'azote en gaz (CO₂ et N₂). Les gaz récupérés sont ensuite quantifiés par chromatographie. Cette méthode mesure la teneur totale du sol en azote et en carbone, c'est-à-dire principalement la somme des fractions organiques et minérales. Pour le carbone en particulier, certains types de sols peuvent nécessiter le dosage spécifique des carbonates pour être en mesure de séparer la fraction organique de la fraction minérale, majoritairement portée par ces carbonates. L'essai se trouvant sur des sols sablo-limoneux légèrement acides, on peut raisonnablement supposer que la fraction carbonatée est négligeable (pH KCl de 5,83 en moyenne 2025 ; 5,80 en 2026). Cette hypothèse est par ailleurs confirmée par les analyses plus complètes réalisées en 2025. En effet, le carbone total et organique, dosé séparément, présentaient la même teneur pour chacune des parcelles (Vas, 2025: Data, Annexe 9).

4.8.2. Dimensions physiques – Structure, température et humidité

4.8.2.1. Visual Evaluation of Soil Structure (VESS)

La structure du sol a été analysée du 3 au 10 mars 2026 sur l'ensemble des parcelles, en même temps que les lombrics avec la méthode test bêche, présentée au point 4.8.3.1. Le travail du sol réalisé à la même période (9 et 10/03) sur les parcelles Mix n'a eu lieu qu'après l'analyse VESS pour ne pas biaiser les résultats.

Le VESS vise à estimer la structure d'un sol à partir de l'estimation visuelle de la structure d'un bloc et des agrégats. En 2026, les fondamentaux de la méthode appliquée en 2025 ont été conservés, décrits par Eliot Vas comme suit :

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 [...]. 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 » [...]. 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 [...].

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 (Vas, 2025, p. 37).

En 2026, la première modification concerne l'utilisation de l'application VESS mentionnée. Il semblerait que celle-ci ne soit disponible que pour les appareils IOS puisqu'aucune application de ce nom n'a pu être trouvée sur le Play Store pour un téléphone Android. L'attribution des scores s'est donc faite principalement sur base de la grille d'analyse papier. Celle-ci s'est vue complétée par une recherche en ligne en cas de doute sur le score exact à attribuer. Dès lors et malgré cette vérification, il est possible que le score attribué soit entaché d'un biais d'interprétation plus important que dans le cas de l'utilisation de l'application VESS.

Ensuite, puisque la comptabilisation des lombrics se fait sur les mêmes blocs de terre extraits que le VESS, il est apparu nécessaire de creuser plus amplement autour du bloc à dégager afin d'en garantir des dimensions précises et de préserver la structure du bloc.

Enfin, déjà en 2025 et encore plus cette année avec le changement présenté ci-dessus, l'extraction du bloc de terre nécessaire pour le protocole VESS impacte fortement et durablement la structure du sol. Il conviendra dès lors de veiller à ne pas reproduire l'analyse exactement au même emplacement chaque

année, sous peine d'obtenir des résultats biaisés. En 2026, deux analyses par parcelles ont chacune eu lieu entre 1 m et 1,5 m des extrémités environ.

4.8.2.2. Suivi continu de la température et de l'humidité

Depuis le 9 mars 2026, des sondes *Temperature-Moisture-Sensor-4* (TMS-4) de marque TOMST et couramment désignés « Lolly » assurent le suivi de la température et de l'humidité toutes les 15 minutes.

Trois capteurs par sonde mesurent respectivement la température du sol (à -6 cm), de la surface du sol et de l'air (à +15 cm). Un quatrième capteur mesure la teneur en eau volumique des 12 premiers centimètres du sol. Cette mesure repose sur un principe diélectrique où l'appareil émet des impulsions électromagnétiques à haute fréquence le long d'un circuit imprimé courant dans la bandelette plastique enfoncée dans le sol (Wild et al., 2019). Celles-ci voyagent dans le sol et sont détectées par un capteur qui compte le nombre d'impulsions de retour par unité de temps, directement proportionnel à l'humidité du sol. Le résultat brut initial est ensuite converti par le logiciel nécessaire à la lecture des données en teneur en eau volumique (volume d'eau / volume de sol), exprimés en pourcent (TOMST, 2026). Plusieurs paramètres de calibration adaptés à divers types de sol sont enregistrés par défaut dans le logiciel, dont *Silt loam* correspond au sol l'essai.

Les 9 capteurs disponibles cette année ont été regroupés dans le Bloc Légume 1 pour assurer un suivi plus complet. La répartition des capteurs était de 2 en modalité Plastic, 2 en BRF, 3 jusqu'au 29/04 puis 2 en miscanthus, 1 puis 2 à partir du 29/04 en trèfle et 1 en Mix. Cette répartition changeante illustre un compromis arbitré entre les effets jugés négligeables des paillages vivants jusqu'à la fin du mois d'avril et l'intérêt de suivre plus finement les effets des paillages morts sur la température et l'humidité du sol à cette même période.

Les mesures de ces capteurs étant automatiques et continues, il est impossible de les mettre en pause ou de vider la carte mémoire. Dès lors, afin de garantir la qualité du suivi à long terme, l'Annexe A.3 détaille les emplacements exacts de chaque capteur avec son numéro de série.

4.8.2.3. L'infiltration d'eau

Le taux d'infiltration a été mesuré selon la méthode de l'anneau simple. L'ensemble des parcelles ont été mesurées du 15 au 19 juin 2026. Cette méthode est différente de celle de 2025. En effet, celle-ci s'est montrée peu adaptée aux vitesses d'infiltration élevées et les résultats obtenus dépendaient fortement des conditions préalables d'humidité du sol (Vas, 2025, p. 67 et 73).

En pratique, le protocole appliqué en 2026 consiste à enfoncer de 5 cm dans le sol un tube en PVC de 12 cm de diamètre. Un moyen de mesure de la hauteur d'eau est placé verticalement à l'intérieur (latte, mètre ...). Ensuite, on lance un chronomètre et on remplit directement le tube avec de l'eau jusqu'à une hauteur fixe (env. 1 cm du bord supérieur). À intervalle régulier (par exemple 1 minute), on mesure et note la hauteur d'eau dans le tube. Lorsque le niveau a diminué d'environ un tiers à la moitié, le tube est à nouveau rempli jusqu'au niveau initial, ce qui nécessite de préparer suffisamment d'eau accessible à proximité. Durant toute l'opération, à partir du lancement du chronomètre, celui-ci n'est pas mis en pause jusqu'à ce que le débit d'infiltration se stabilise pendant plusieurs mesures successives, marquant la fin des mesures. Ainsi, on obtient une vitesse d'infiltration exprimée en cm/min.

En principe, l'infiltration suit une courbe de décroissance exponentielle, dont le débit initial et final ainsi que le taux de décroissance varient d'un sol à l'autre. Immédiatement après la mise en eau, celle-ci progresse dans un sol encore sec sous l'effet combiné de la gravité et d'une capillarité marquée. Le taux d'infiltration initial est alors élevé et rapidement décroissant. À mesure que le sol se sature localement, la succion capillaire diminue et le taux d'infiltration tend vers une valeur stable dépendant essentiellement de la conductivité hydraulique à saturation du sol (Bagarello et al., 2017). À ce stade, la

phase transitoire capillaire est dissipée et la valeur mesurée. L'effet de l'état initial d'humidité du sol devient négligeable et la valeur mesurée est représentative des propriétés du sol.

Le traitement préliminaire des données d'infiltration a nécessité de s'assurer que l'arrêt de la mesure sur le terrain avait été actée au bon moment, c'est-à-dire après avoir atteint le plateau stable décrit ci-dessus. La procédure a consisté à vérifier que la valeur individuelle des n dernières mesures utilisées soit comprise dans un certain intervalle autour de la moyenne des $n+2$ dernières mesures. Deux cas de figure ont été envisagés. Le premier considère $n = 4$ avec le seuil d'écart à la moyenne fixé à 5 %. Le second concerne $n = 6$ avec un écart à la moyenne compris entre 5 et 10 %. Lorsque le ou les deux derniers points dépassent le seuil fixé, ils sont écartés et la procédure recommencée pour vérifier que le plateau est bien atteint et que l'écart constaté est attribuable à un biais de mesure. Il faut reconnaître que ces seuils et cas de figure n'ont été fixés qu'au moment du traitement des données et ne se basent pas sur une méthode recommandée dans la littérature. Ils illustrent le meilleur compromis obtenu par essai erreur visant à préserver le maximum de réplicats tout en écartant les valeurs extrêmes représentatives d'un artéfact localisé du sol (tassement, fissure ...) et non des propriétés globales de la parcelle. L'impact de cette approche sur l'utilisation des données est présenté au point 5.4.3 du chapitre Résultats et discussions.

L'analyse des données a également mobilisé le modèle de Horton, dont les paramètres décrivent la décroissance exponentielle du taux d'infiltration au cours du temps :

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) e^{-kt}$$

Où f_0 et f_c sont respectivement le débit ou taux d'infiltration initial et final (cm/min), k est la constante de décroissance (min^{-1}) représentant la rapidité avec laquelle le régime d'infiltration stable est atteint (Ehiomogue et al., 2018; Innovyze, 2022). Une valeur de k élevée signifie que le débit se stabilise rapidement, généralement associé à un sol plus poreux et mieux structuré. À l'inverse, une valeur faible traduit une décroissance plus lente et prolongée, potentiellement indicatrice d'un tassement ou d'une porosité dégradée.

4.8.3. Indicateurs biologiques de la santé des sols

4.8.3.1. Lombrics : diversité et population totale - Test-bêche

L'analyse de la population des vers de terre, réalisée du 3 au 10 mars 2026, à raison de deux répétitions par parcelles et suivant la méthode du test-bêche. Le protocole appliqué est rigoureusement le même qu'en 2025.

Celui-ci consiste à effriter les mottes d'un bloc de terre de 20 cm de côté sur 25 cm de haut, également utilisé pour l'analyse visuelle de structure du sol (VESS), pour en extraire manuellement tous les lombrics. Ils sont ensuite comptabilisés dans leur totalité et attribués à 4 groupes fonctionnels : épigés, endogés, épi-anéciques et anéciques stricts. Cette analyse se fait au moyen d'une clé d'identification de l'Observatoire Participatif des Vers de Terre (OPVT).

4.8.3.2. La teneur en carbone microbien

Le dosage du carbone microbien a été sous-traitée au laboratoire du Centre Provincial de l'Agriculture et de la Ruralité (CPAR) situé à la Hulpe, contrairement à 2025 où elle a été réalisée au MOCA (UCLouvain). Toutefois, les méthodes et protocoles renseignés par le CPAR sont identiques.

Brièvement, l'analyse débute par la détermination de la masse d'eau au moyen d'un séchage sous lampe infrarouge. Les échantillons sont ensuite tamisés à 8 mm puis la biomasse microbienne est dosée par fumigation au chloroforme pendant 24h. Le résultat est exprimé en mg de carbone organique total (COT) par kg de sol sec. De plus amples informations théoriques, issues des pages 41-42 du rapport d'Eliot Vas, sont disponibles en Annexe A.4.

Les prélèvements, réalisés du 16 au 18 juin 2026, suivent la même méthode que celle décrite précédemment au sujet de la composition chimique du sol et reprise de 2025. Celle-ci consiste à prélever en zigzag 15 échantillons de 25 cm de profondeur par parcelle à l'aide d'une tarière gouge. Les prélèvements d'une parcelle sont ensuite homogénéisés dans un seau sur place avant de placer 500 g de sol dans un contenant adapté et étiqueté. À la différence de l'analyse chimique du sol, les échantillons doivent impérativement être conservés frais et humides jusqu'à la livraison au laboratoire. Pour cette raison, le CPAR recommande d'éviter les périodes estivales chaudes et sèches pour les prélèvements, mais cela n'a pas été possible d'un point de vue organisationnel. Dès lors, les échantillons ont été conservés dans une boîte en polyester expansé (frigolite) avec des « blocs frigo » dès leur mise en sachet, puis placés en chambre froide jusqu'à la livraison au CPAR le 18/06. Une fois en chambre froide, il faut entrouvrir les sachets pour la respiration des microorganismes.

La mesure de l'humidité des échantillons du carbone microbien est représentative du profil de sol sur 25 cm de profondeur. On pourrait alors être tenté de l'utiliser en complément du suivi continu de l'humidité décrit précédemment, dont les sondes ne mesurent que les 12 premiers centimètres du sol. Toutefois, l'humidité des échantillons de carbone microbien est exprimée en proportion de masse (g d'eau / kg de sol), tandis que celle des capteurs Lolly est exprimée en proportion de volume (volume d'eau / volume de sol). En l'absence de mesure de la densité apparente du sol de la plateforme pour convertir ces données en unités communes, leur comparaison ne peut se faire qu'à titre informatif. Pour cette raison et puisqu'elles ne sont pas situées sur la même temporalité, ces humidités serviront à alimenter la discussion des résultats mais elles ne seront pas rapprochées statistiquement.

4.8.4. Le suivi des cultures et paillages vivants

4.8.4.1. La couverture foliaire

Le suivi du développement des cultures et des paillages vivants a été effectué avec l'application pour smartphone *Canopeo* (disponible sous *IOS* et *Android*), similairement à 2025.

Cette application permet d'analyser une photo en comptant les pixels verts, et fournit ainsi un pourcentage de recouvrement foliaire (Vas, 2025, p. 43). L'ensemble des parcelles a été suivi à quatre dates différentes, entre le 2 et le 16 mai 2026. À chaque date, la valeur de couverture foliaire d'une parcelle correspond à la moyenne de trois photos, chacune prise dans un des trois tiers de la parcelle, toujours dans le même ordre. L'intérêt de cet ordre fixe est d'être en mesure d'affiner l'analyse ultérieurement en reprenant les données individuelles en cas de soupçon d'un gradient spatial. Les photos couvrent un rectangle de 1,4 m sur 1,6 m environ. Etant donné que la surface exacte varie selon le modèle utilisé, il semble préférable d'adapter la position de l'appareil pour que les bords de la parcelle soient juste à l'extérieur de ceux des limites de la photo. Cette remarque est formulée en réponse au protocole suivi en 2025, selon lequel le référentiel de positionnement était fixé à 1,40 m de haut.

Les résultats de l'application sont dépendants des conditions de luminosité d'ambiante et de la présence d'eau en surface du sol ou du feuillage, ce qui impose de réaliser les mesures dans des conditions similaires. Plus précisément, les journées de plein soleil ou à la suite d'une pluie sont à éviter, ces cas de figure induisant un biais systématique à la hausse. L'utilisation du facteur correctif disponible dans l'application, à régler manuellement, doit rester parcimonieuse et homogène pour garantir la cohérence des données.

Dans le chapitre 5, l'analyse statistique se fera distinctement entre d'un côté les modalités cultivées en salades et épinards (BRF, Miscanthus et Plastic) et de l'autre les modalités de paillages vivants, non cultivés au printemps (Trèfle et Mix).

4.8.4.2. Le statut chlorophyllien foliaire des cultures – SPAD

Le statut chlorophyllien des salades et épinards a été mesuré les 8 et 10 mai 2026 à l'aide d'un appareil *SPAD-502Plus* de marque *Konica Minolta*, empruntable au laboratoire PEPA. Cette analyse est ajoutée par rapport à 2025 afin de mieux caractériser la faim d'azote observée visuellement sur les cultures, comme nous le verrons au chapitre 5.

Le SPAD (*Soil Plant Analysis Development*) est un indice de la teneur relative en chlorophylle foliaire. Il est mesuré optiquement et comporte l'avantage de ne pas être destructif pour la culture. Deux LED émettent de la lumière dans deux longueurs d'onde différentes. Le premier faisceau est une lumière rouge émise à 650 nm et fortement absorbée par la chlorophylle, tandis que le second se situe dans les infrarouges (940 nm) et n'est pas absorbée (Süß et al., 2015). L'appareil compare ensuite la transmittance et convertit ce ratio en une valeur numérique, sans unité propre, proportionnelle à la concentration chlorophyllienne du feuillage. La chambre d'analyse de l'appareil mesure environ 2×3 mm (Konica Minolta, s. d.).

Le protocole de mesure appliqué en 2026 vise à couvrir une grande surface par parcelles pour être le plus représentatif possible en évitant les biais induits par l'hétérogénéité intra-parcellaire. Il consiste à mesurer 4 salades suivant 4 diagonales par parcelle. Sur chaque plant, trois feuilles sont mesurées 3 fois chacune en déplaçant l'appareil de quelques millimètres. Les mesures d'un plant sont moyennées automatiquement par l'appareil et correspondent à la valeur utilisée dans les traitements statistiques. Il convient de sélectionner trois feuilles représentatives par plant, en évitant les plus anciennes et abîmées ainsi que les plus jaunes. Pour les épinards, mis à part la mesure de 5 plant sur les 4 lignes diagonales (plantés sur 5 rangs par parcelle contre 4 pour les salades), la méthode est identique à celle des salades.

4.8.4.3. La biomasse produite - Salades et épinards

Les salades et les épinards ont été pesés les 16 et 17 mai 2026, soit après un peu plus d'un mois de croissance. Elles sont restées sur les parcelles entre deux et quatre semaines supplémentaires après la pesée. Cette mesure, déjà présente en 2025, diffère quant à son protocole de mise en œuvre. En 2025, celui-ci consistait à prélever *trois échantillons chacun constitué de neuf plants par parcelle. Chaque groupe de neuf plants étaient regroupés 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* (Vas, 2025, p. 44).

Afin d'éviter tout biais humain lors de la sélection (bien que voulue aléatoire) du groupe de neuf plant, le protocole de 2026 applique la même logique que celui du SPAD décrit ci-avant, tout en observant un décalage d'un plant pour éviter les feuilles abîmées lors de la mesure du SPAD.

Ainsi, 120 salades et 96 plants d'épinards ont été pesés par bloc légume. Similairement à 2025, les mesures correspondent à un « état commercial », c'est-à-dire sans racine ni feuilles abîmées, tel qu'on s'attend à trouver dans le commerce.

Les biomasses des 13 parcelles de fenouils et des 2 parcelles d'oignons du Bloc Légume 2 issues de l'année 2024-2025 ont été mesurées fin octobre 2025. Bien qu'elles ne fassent pas l'objet d'analyse statistique dans le cadre du présent mémoire, elles sont néanmoins compilées dans le recueil de destiné aux prochains mémorants, accessible en Annexe A.3.

4.8.5. Le suivi des adventices

En 2025, la méthode de suivi des adventices reposait sur un cadre en bois de 71 cm de côté subdivisé en carrés de carrés de 5 cm² et couvrant au total 0,5 m². Le cadre, nommé « grillage Wilmus » était

positionné au centre des parcelles. Ensuite, on attribuait aux petits carrés la note de 1 si la végétation couvrait au moins 50 % de la surface dudit carré, 0 si moins de 50 % (Vas, 2025, p. 42-43).

En 2026, les cultures étant trop avancées au moment des mesures (11/05), cette méthode n'a pas pu être appliquée à l'identique. La mesure n'a pas pu avoir lieu plus précocement en raison des désherbages précédents les plantations. Il a donc fallu attendre que les parcelles se « salissent » volontairement. Deux approches complémentaires ont donc été choisies. Tout d'abord, une surface de 0,5 m², matérialisée par le grillage Wilmus sur les modalités de paillage vivant et par un mètre pliant rigide sur les modalités cultivées (BRF, Miscanthus et Plastic), de sorte que toutes les parcelles soient finement analysées sur une surface équivalente. Ensuite, l'ensemble des parcelles ont été passées en revue de façon moins minutieuse, essentiellement pour identifier les espèces et moins pour comptabiliser la totalité des individus présents. A des fins d'uniformité, les résultats ont été convertis en nombre total d'individus par m² et en diversité d'espèces par m².

Similairement à 2025, l'identification de la variété des adventices a bénéficié de l'aide experte de Pierre Vanthorre, technicien du laboratoire PEPA, formé en botanique. En raison d'importantes différences dans la gestion des adventices avant la mesure du 11 mai, il ne sera pas possible de tirer de conclusion solide quant à l'effet des paillages sur les adventices. Ce point sera rappelé au chapitre 5 lors de la présentation des résultats. Après l'analyse exhaustive réalisée avec l'aide de Pierre Vanthorre, la clé d'identification des adventices de l'Institut Royal Belge pour l'Amélioration de la Betterave (IRBAB) a été utilisée de façon ponctuelle pour suivre ponctuellement le développement des adventices. Ces résultats, non exhaustifs, n'entreront pas dans les analyses statistiques mais pourront être mobilisés dans les discussions.

4.8.6. Mobilisation des observations de terrain

Les observations de terrain, réalisées en dehors d'un cadre protocolaire défini, constituent elles-aussi une source d'information pertinente à mobiliser pour alimenter la discussion des résultats d'analyses. En effet, au-delà de ces méthodes strictement encadrées, de multiples facteurs humains et environnementaux interviennent dans l'évolution de l'essai. Les moments passés sur le terrain tout au long de l'année et en particulier de février à juillet 2026, sont autant d'occasions de suivre les comportements de la plateforme qui échappent aux méthodes de mesures codifiées décrites ci-dessus.

Toutefois, il convient de reconnaître que ces observations restent largement dépendantes des connaissances, de la compréhension et des biais personnels de l'observateur qui les formule. Par conséquent, lorsque ces observations seront utilisées, elles seront signalées afin de ne pas tromper l'interprétation des résultats. Elles peuvent ajouter de la profondeur aux résultats d'analyses mais ne doivent pas les remplacer.

4.9. Les méthodes de collecte de données et de traitements statistiques

4.9.1. Centralisation et traitements des données

Les données ont toutes été centralisées et organisées au moyen du logiciel Excel de Microsoft. Le mode de collecte des résultats varie selon le type d'analyse et de la météo du moment. Pour les expériences au champ, celle-ci s'est la plupart du temps déroulée sur papier, enregistrements vocaux ou notes dans le téléphone. Les données ont ensuite été retranscrites dans Excel, organisées d'abord en classeurs distincts puis centralisés en un classeur avec une feuille dédiée par analyse.

En particulier pour les mesures VESS et lombrics, les observations et analyses ont fait l'objet d'enregistrements vocaux, retranscrits avec l'aide de NotebookLM puis vérifiés manuellement.

Les analyses sous-traitées au CPAR (carbone microbien et humidité du sol) n'ont pas fait l'objet de collecte de données, celles-ci étant fournies par le laboratoire. Les analyses de composition chimique du sol au MOCA ont été réalisées en collaboration avec un autre mémorant et deux doctorants issus du PEPA. Nous avons mutualisé les analyses et la collecte des données via un classeur Excel partagé.

4.9.2. Structure de l'essai

En pratique, le dispositif expérimental étant un plan en blocs aléatoires complets, dans lequel la Colonne (de A à C) joue le rôle de facteur de blocage répliqué sur deux blocs légumes (BlocLeg). Les modèles statistiques reposent tous sur cette même structure. Paillage est le facteur d'intérêt (5 niveaux), Colonne et BlocLeg sont des facteurs de blocage et Rang (de 1 à 10) est mobilisé comme covariable continue lorsqu'un gradient spatial est suspecté ou détecté.

Il s'agit ainsi d'un dispositif en blocs aléatoires complets, dans lequel la Colonne joue le rôle de facteur de blocage, répliqué sur les deux blocs légumes. Les modèles statistiques employés (point 4.9.5) reposent directement sur ce découpage

4.9.3. Différences méthodologiques avec 2024-2025

Par rapport à 2025, les facteurs Ligne et Colonne ont été renommés respectivement Colonne et Rang car l'ancienne dénomination était jugée confusante (en tout cas pour moi). Par ailleurs, ces deux facteurs étaient traités comme effets aléatoires dans des modèles mixtes, comparés par modèles emboîtés et un test du rapport de vraisemblance. L'objectif était de neutraliser ces facteurs car ils *constituent des sources de nuisance (gradient de sol, précédents culturaux) 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* (Vas, 2025, p. 46).

En 2026, les facteurs spatiaux (Colonne et BlocLeg) sont traités comme effets fixes, ce qui permet de les tester et les décrire directement. Le but étant qu'un gradient spatial devienne un objet d'analyse à part entière, quitte à ce que les résultats ne soient plus généralisables au-delà du dispositif expérimental. Il s'agit là probablement surtout d'une question de point de vue où, il me semble, Eliot souhaitait que les résultats puissent être plus facilement comparés avec d'autres études, tandis que dans ma conception de l'essai, le but est surtout de suivre plus finement les effets des modalités de paillage pour les comparer au fil des ans, spécifiquement au sein du dispositif de Lauzelle.

4.9.4. Logiciel et packages d'analyse statistique

Les traitements statistiques et les graphiques présentés dans le rapport ont tous été réalisés sur RStudio (version 2026.05.0+218) via des scripts R et fichiers R Markdown (Rmd) développés spécifiquement.

Les packages R utilisés sont les suivants :

- 'readxl' pour la lecture des fichiers de données ;
- 'dplyr' pour la manipulation, le filtrage et l'agrégation des données ;
- 'tidyr' pour la restructuration des tableaux ;
- 'purr' pour la lecture et l'empilement des séries de données répétées (p.ex. sondes Lolly) ;
- 'ggplot2' pour la production de l'ensemble des graphiques (ggplot, ggpairs, ggsave) ;
- 'lubricate' pour la gestion des dates et heures ;
- 'stringr' pour le traitement de chaînes de caractères (extraction et tri de l'identifiant de parcelle) ;
- 'car' pour le test de Levene et les analyses de variance (anova) de type II pour les modèles avec covariable continue ;
- 'emmeans' pour le calcul des moyennes marginales estimées et les comparaisons par paires ajustées lorsqu'une covariable continue (Rang) figurait dans le modèle ;

- 'multcompView' pour générer les lettres de significativité sur les boxplots à partir des p-valeurs ajustées de 'emmeans' ;
- 'agricolae' a été testé pour les lettres de groupements avec le test de Tukey HSD mais il a été écarté car ses résultats étaient moins bons que multcompView ;
- 'effectsize' pour le calcul des tailles d'effet (η^2 partiel) ;
- 'afex' pour le calcul des tailles d'effets de la couverture foliaire spécifiquement (η^2 généralisé) ;
- 'broom', 'lmerTest', 'GGally' et 'patchwork' : pour la mise en forme des résultats et l'exploration de modèle mixte, mais sans usage central dans les résultats principaux.

4.9.5. Méthodologie statistique 2026

Le seuil de significativité utilisé pour l'ensemble des tests est fixé à 5%, soit $p < 0,05$. Lorsque la p-valeur est supérieure à 0,05 mais en reste fort proche, l'effet du facteur est signalé comme tendanciel.

4.9.5.1. Visualisation préliminaire des données

Avant toute analyse statistique, chaque variable a fait l'objet d'une représentation graphique par modalité de paillage, sous forme de boxplot (« boîte à moustache »). Cette étape descriptive permet de commencer par visualiser certaines tendances entre variables, repérer d'éventuelles valeurs sortant particulièrement du lot et orienter le choix des modèles statistiques.

4.9.5.2. Vérification des hypothèses de modèle

Avant toute modélisation, les hypothèses inhérentes aux modèles utilisés par la suite ont été vérifiées au moyen du test Shapiro-Wilk (fonction 'shapiro.test') pour la normalité des résidus et du test de Levene (fonction 'LeveneTest' package 'car') pour l'homogénéité des variances entre modalités de paillage. L'indépendance des observations est en principe assurée par la conception même du dispositif randomisé en blocs.

Dans l'estimation du paramètre k du modèle de Horton (infiltration), le miscanthus semblait masquer l'effet des autres modalités. Un diagnostic supplémentaire par distance de Cook (uniquement utilisé pour k) ainsi qu'une alternative basée sur l'écart interquartile (IQR) ont été essayées. Cependant, aucune des deux n'a montré de résultat probant. L'analyse statistique du facteur k a donc été réalisée sur les données complètes puis en écartant les données de miscanthus.

4.9.5.3. Alternatives non paramétriques – Transformation de variable

Lorsqu'au moins un des deux tests d'hypothèses décrits ci-avant n'était pas validé, une transformation de la variable réponse a été appliquée. La plus fréquente est la transformation logarithmique, qui concerne 3 des 4 paramètres de l'infiltration (Taux d'infiltration stabilisé, débit initial f_0 et constante k du modèle de Horton). Une transformation racine carrée a été appliquée spécifiquement à l'abondance des vers de terre du groupe fonctionnel des endogés.

Après chaque transformation de variable, les deux tests d'hypothèses ont été réappliqués pour s'assurer de la réussite et de l'utilité de ladite transformation.

Pour les cas où la transformation n'aurait pas suffi à corriger complètement une hypothèse et lorsque le résultat restait proche du seuil de validité (0,05), un test complémentaire a été mobilisé pour vérifier la robustesse de l'Anova classique (Welch pour l'homogénéité des variances ; Kruskal-Wallis pour la normalité). Les résultats de ces tests ont ensuite servi à valider les conclusions de significativité de l'Anova. En cas de divergence, la prudence a été privilégiée dans les discussions et la limite signalée.

4.9.5.4. Types de modèles selon les cas de figure

Le cas de figure le plus courant est aussi le plus basique et concerne la quasi-totalité des indicateurs. Il repose sur une analyse de variance (Anova), utilisée dans le cas de variables continues mesurées sur

l'ensemble des 30 parcelles, expliquée par le facteur d'intérêt Paillage et les facteurs de blocage de la plateforme (BlocLeg et Colonne). Le modèle type correspondant est « variable ~ Paillage + BlocLeg + Colonne », d'abord ajusté par régression linéaire puis testé par Anova.

Lorsque l'Anova simple conclut à un effet significatif du facteur Colonne, le Rang est ajouté au modèle en tant que covariable continue (de 1 à 10) afin de tester la présence d'un gradient spatial plus finement par rapport aux Colonnes seules. Le modèle d'analyse de covariance (Ancova) correspondant devient « variable ~ Paillage + Colonne + Rang », testé par 'Anova(type = "II")'. L'inclusion de Rang a été appliquée lorsque l'Anova simple montrait déjà un signal spatial à approfondir (effet de Colonne significatif), mais seuls les cas produisant une information utile supplémentaire ont fait l'objet d'une discussion.

Pour information, un modèle linéaire mixte a été envisagé pour le traitement de la couverture foliaire puisque celle-ci correspond à une mesure répétée 4 fois dans le temps sur des objets identiques (les 30 parcelles). Etant donné le faible nombre de répétitions, les résultats se sont avérés peu probants et n'ont donc pas été utilisés tels quels. Ils ont en revanche été réutilisés pour produire les comparaisons par paires à chaque date avec ajustement de Tukey ainsi que les tailles d'effet associées à ces comparaisons (d de cohen par paire et par date). Malgré tout, la structure en mesures répétées permet d'inclure un facteur Date dans le modèle d'Anova pour tester l'interaction Paillage×Date.

4.9.5.5. Tests de comparaisons par paires

Lorsque l'effet d'un facteur s'avère significatif, les niveaux de ce facteur sont comparés par paires pour déterminer quels niveaux ou groupes de niveaux sont statistiquement similaires et établir un classement dans les effets des niveaux statistiquement distincts.

Pour les modèles sans la covariable continue, les paires sont comparées par le test de Tukey HSD. Pour les modèles intégrant la covariable Rang ou une structure à mesure répétée (couverture foliaire), les comparaisons sont réalisées sur les moyennes marginales estimées ('emmeans') avec correction de Tukey. Les lettres indiquant le groupement statistique entre modalités, ajoutées sur certains boxplots, sont générées à partir des p-valeurs ajustées de Tukey ou de 'emmeans'.

4.9.5.6. Tailles d'effets

Souhaitant caractériser l'effet des modalités de façon plus complète qu'au moyen de la significativité seule, les tailles d'effets ont également été calculées. Techniquement, une taille d'effet quantifie l'ampleur d'une différence ou d'une relation, indépendamment de la taille de l'échantillon.

Êta² partiel (ou η^2p) quantifie l'effet global d'un facteur dans un modèle d'Anova ou d'Ancova (sauf pour la couverture foliaire, à mesures répétées). Il représente la proportion de la variance résiduelle expliquée par ce facteur, une fois la variance expliquée par les autres facteurs du modèle retirée du calcul (Bakeman, 2005; StatMate, 2026). Concrètement, $\eta^2p=0,14$ signifie par exemple que 14% de la variance résiduelle d'une variable est attribuable à ce facteur précis.

Êta² généralisé (ou η^2G) a été spécifiquement utilisé pour la couverture foliaire, imposé par sa structure à mesures répétées (Bakeman, 2005). Il tient compte à la fois de la variabilité entre parcelles et intra-parcelle dans le temps. L'interprétation des valeurs de η^2G est similaire à celle de η^2p .

Le **d de Cohen** (pour *difference* et nommé d'après Jacob Cohen) quantifie l'ampleur d'une différence entre deux modalités précises, calculée à partir de l'écart-type résiduel et des degrés de liberté du modèle (Lakens, 2013; StatMate, 2026). Il ne s'applique donc qu'aux comparaisons par paires.

Les seuils d'interprétations utilisés sont les suivants :

Tableau 1 : seuils d'interprétation des tailles d'effet et du d de cohen. (GraphHelix, 2026; Lakens, 2013; StatMate, 2026)

Ampleur	d de Cohen	η^2p et η^2G
Faible	0,2	0,01
Modérée	0,5	0,06
Élevée	0,8	0,14

Remarque : les seuils cités ci-dessus pourraient laisser penser que ces indicateurs sont bornés entre 0 et 1. Ce n'est vrai que pour η^2p et η^2G . Le d de Cohen n'est borné ni négativement, ni positivement, en témoignent les valeurs présentées dans le chapitre 5 dont la majorité des d se trouvent au-delà de 1,8.

5. Résultats et discussions

Dans la partie suivante, la présentation des résultats se mélangera avec un premier niveau de discussions. J'ai choisi d'organiser le narratif en suivant l'évolution de la saison culturale, tout en regroupant certains paramètres complémentaires dans une logique inspirée des trois dimensions de la santé des sols.

Ainsi, il s'agira d'abord de dessiner les contours de l'état physique et chimique des parcelles en sortie d'hiver, dans lesquelles les salades et épinards ont été plantés. Ensuite, nous verrons comment ces paramètres ont pu influencer les cultures au travers du suivi de plusieurs paramètres de leur dynamique de croissance, aboutissant sur le premier bilan de production de la saison lors de la récolte des salades et épinards.

Dans un second temps, nous compléterons le tableau par la dimension biologique et la suite de la dimension physique, en lien avec un régime météo d'été particulièrement marqué cette année qui a pu exacerber le comportement des paillages à l'étude. Ce faisant, nous aurons également présenté le cadre d'implantation et de développement des cultures suivantes (choux kale et potimarrons).

Enfin, il restera à explorer les interconnexions entre toutes les variables suivies, nécessaires pour une vue d'ensemble cohérente et nuancée des impacts que peuvent avoir les différentes modalités de paillages suivies, lors de la seconde année de cette étude de long court, en préparation à la conclusion.

5.1. État physique du sol en début de saison

5.1.1. Le BRF présente la meilleure structure de sol

Pour rappel, l'évaluation visuelle de la structure du sol par la méthode Visual Evaluation of Soil Structure (VESS) consiste à attribuer un score de 1 (structure idéale) à 5 (structure très dégradée).

L'absence de mulches vivants depuis le début de l'expérience en 2024 permet de vérifier si les modalités installées favorisent la structure physique du sol par rapport à un sol non couvert en dehors des cultures, et donc exposé aux agressions physiques extérieures (notamment la pluie).

Si la modalité de paillage influence significativement le score de VESS, avec une taille d'effet très importante ($\eta^2_p = 0,65$), seul le BRF (VESS moyen = 1,12) présente une structure de sol significativement meilleure aux autres modalités. Ici aussi, les tailles d'effets sont considérables (d compris entre 2,09 (comparaison au Plastic) et 3,13 (comparaison au Miscanthus)).

Les autres modalités (Plastic, Miscanthus et Sol nu) constituent un groupe statistiquement homogène, bien que l'effet de Plastic semble visuellement meilleur (Fig. 8). Rappelons que, bien que les scores de ces modalités soient notablement plus élevés (indiquant une moins bonne structure que le BRF), la structure n'est pas pour autant nécessairement mauvaise. En effet, un score de 2 signifie que le sol est « intact » et un score entre 2 et 3 appelle à un changement de pratique sur le long terme pour éviter que la structure ne se dégrade dans le temps.

Par ailleurs, les résultats ne dépendent pas de la position spatiale de la mesure, ce qui signifie qu'aucune hétérogénéité spatiale n'est détectée au travers de la plateforme (effet des facteurs Bloc Légume et Colonne non significatifs).

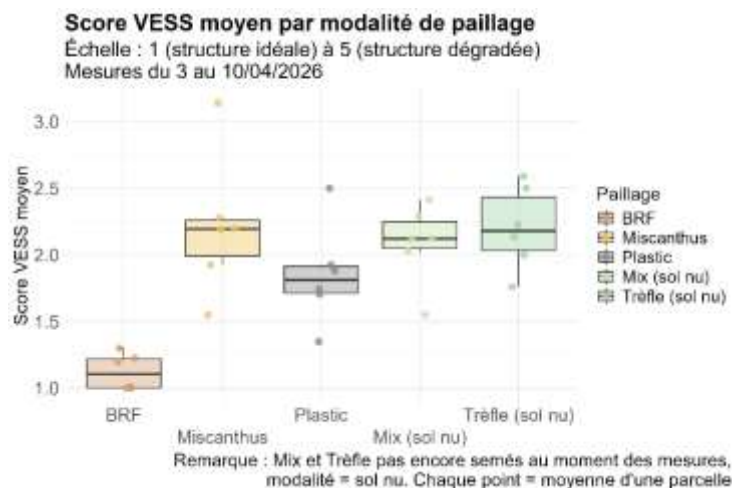


Figure 9 Figure 10 : état physique du sol en début de saison

5.1.2. Le réchauffement et le ressuyage du sol au printemps

Comme évoqué pendant l'état de l'art, le réchauffement et le ressuyage du sol au printemps sont déterminants pour les premières phases de développement des cultures. Ce comportement est illustré par la température de l'air et du sol et l'humidité des premiers centimètres du sol, suivis depuis le 9 mars 2026, aux Figures 9 a et b.

La température se présente sous forme de degrés-jours cumulés depuis le 9 mars ($T^{\circ}\text{Base} = 0^{\circ}\text{C}$), exprimés en termes d'écart par rapport aux degrés-jours cumulés du Plastic pour accentuer les différences.

Du 9 mars au 30 avril 2026, le sol (à -6 cm) de la bâche plastique a cumulé $536^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}$, soit près de 35 et $57^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}$ de plus que le BRF et le miscanthus, respectivement. Le sol de la bâche plastique a cumulé $1,6^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}$ de plus que sa surface, tandis que le BRF et le Miscanthus ont chacun cumulé 2 et $4,7^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}$ de moins dans leur sol par rapport à leur surface, respectivement. Ces écarts, bien que faibles, illustrent la différence de répartition de la chaleur selon la modalité, où Plastic réchauffe légèrement plus son sol que sa surface, et où la chaleur pénètre plus lentement à travers des mulches organiques morts, en particulier à travers le Miscanthus. La modalité « Sol nu »⁵ montre des effets intermédiaires : leur sol cumule $22,3^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}$ de moins que la bâche plastique, mais l'écart entre le sol et la surface est le plus important avec $9,4^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}$ de plus cumulés dans le sol par rapport à leur surface, en moyenne.

Sur la gestion de l'eau, j'ai pu observer début mars que le sol de plusieurs parcelles Miscanthus présentait des signes d'engorgement prolongé en d'eau. Notamment la couleur tirant sur le gris/vert de certains horizons (-5 à -25 cm), caractéristique d'un sol en hypoxie, contrastait avec celle des parcelles voisines sous les autres modalités (Fig.9). Cette observation corrobore l'évolution de l'humidité du sol (12 premiers centimètres) ainsi que la stabilité structurale visuelle (VESS). En effet, l'humidité du Miscanthus (moyenne $40,9\% \text{Vol}$) est presque toujours plus élevée que celle du BRF (moyenne $36,6\% \text{Vol}$), qui, elle-même, est plus élevée que celle du Plastic (moyenne $30\% \text{Vol}$), sauf en fin de période où il a plu. Les bâches plastiques infiltrent plus rapidement l'eau que les mulches organiques morts lorsque ces derniers sont fort secs, comme c'était le cas fin avril, ils ont donc capté une partie de l'eau avant qu'elle ne s'infiltre dans le sol. Le VESS, nettement meilleur pour le BRF, contribue à

⁵ Trèfle et Mix n'ont été semés respectivement que le 11/04 et 24/04. Ils ont émergé très lentement, surtout le Trèfle, leurs effets étaient donc négligeables sur la période considérée ici, du 20 mars au 30 avril.

expliquer que le sol sous cette modalité ne présentait pas de mêmes signes d'asphyxie, alors que son humidité était plus basse de seulement 4,3 points par rapport au Miscanthus.

Enfin, cette humidité excessive est probablement à l'origine de la mortalité élevée constatée sur les salades après plantation, particulièrement en Miscanthus, avec de nombreux cas de pourriture du collet. De ce fait, la marge de sécurité de 5 % appliquée lors de la commande des plants a été entièrement utilisée les 21 et 28 avril pour remplacer la majorité des salades mortes.

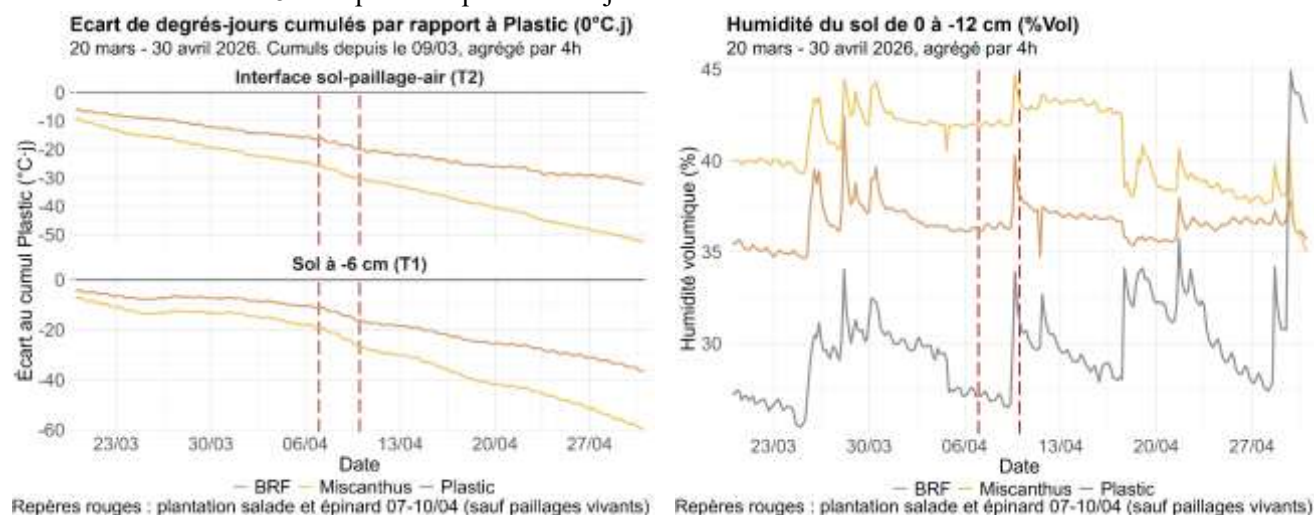


Figure 11

5.2. Nutrition azotée et développement des cultures

Dans cette section, centrée autour de l'azote, nous verrons successivement sa disponibilité, l'état physiologique des cultures, ainsi que les effets mesurés sur leur croissance.

5.2.1. Composition chimique du sol

Les analyses de sol se sont concentrées sur la mesure du pH ainsi que du carbone et de l'azote (%), desquels le rapport C/N a été calculé. Pour rappel, les mulches vivants n'étaient pas encore semés au moment des prélèvements, les 3 et 4 mars 2026. Ces parcelles étaient à nu et cultivées depuis 2024.

L'analyse par un modèle simple (facteurs Paillage, Colonne et Bloc Légume) révèle un contraste entre l'effet de la modalité de paillage uniquement significatif pour la teneur en carbone d'un côté et un effet spatial marqué par le facteur Colonne de l'autre. Colonne affecte significativement toutes les variables et domine l'effet des autres facteurs pour trois d'entre elles, à savoir le pH et la teneur en carbone et en azote (η^2_p Colonne = 0,23 ; 0,52 et 0,64, respectivement).

Outre son effet sur la teneur en carbone (η^2_p = 0,34), Paillage affecte aussi grandement le pH, la teneur en azote et le C/N (η^2_p entre 0,15 et 0,28), toutefois sans atteindre le seuil de significativité. Avec seulement 6 répétitions, le manque de puissance de ce test pourrait cacher un effet réel de Paillage.

Le fait que ces résultats dépendent davantage de la position des mesures que de la modalité de paillage indique la présence d'un gradient d'hétérogénéité spatiale à travers la plateforme, visible à la Figure 10 ci-dessous, qui cartographie la teneur en azote et en carbone de chaque parcelle.

La comparaison par paires des niveaux de Colonne montre un gradient croissant de A vers C, à la fois pour la teneur en azote et en carbone. Le rapport C/N ne suit pas l'ordre des colonnes. En revanche, il est significativement plus élevé dans le Bloc Légume 2 (Rangs de 6 à 10) que dans le premier.

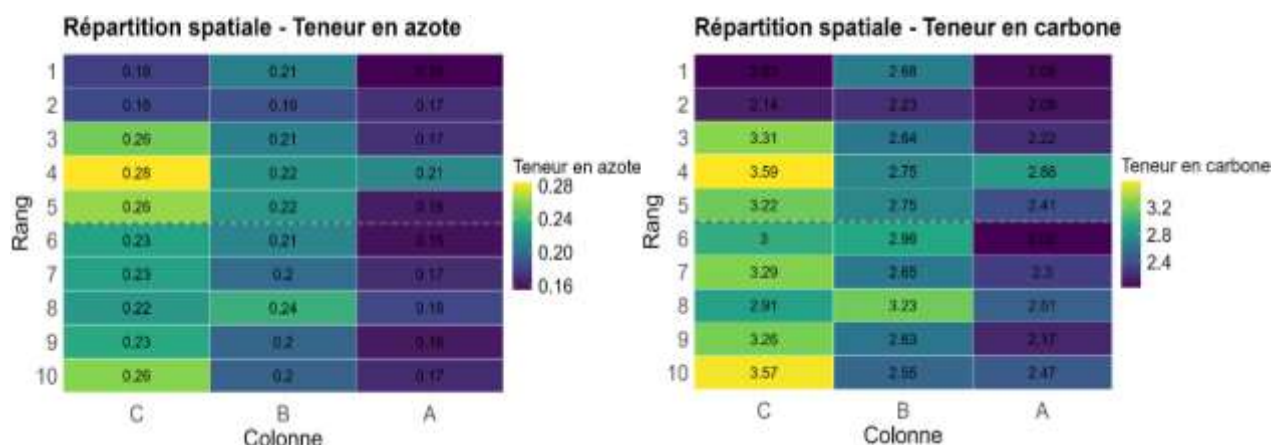


Figure 12

Afin de caractériser plus finement le gradient identifié, le Rang des parcelles est donc ajouté comme covariable continue (de 1 à 10). L'objectif est aussi de mieux répartir la variance entre les facteurs du modèle et vérifier si l'effet de la modalité de paillage est masqué ou non par cette hétérogénéité.

Ainsi, Rang capture un effet propre significatif et de grande taille sur le carbone ($\eta^2_p = 0,28$). Les comparaisons par paires de niveaux de Rang montrent que le gradient spatial du carbone est également croissant avec le numéro du rang (+0,055 point de carbone par unité supplémentaire de Rang).

Ce faisant, la détection de l'effet de Paillage sur la teneur en carbone est plus robuste (η^2_p passe de 0,34 à 0,40) et précise, puisque deux comparaisons par paires de paillages franchissent le seuil de significativité : BRF-Miscanthus ($d=1,84$) et BRF-Trèfle (Sol nu) ($d=1,76$) (Fig. 11).

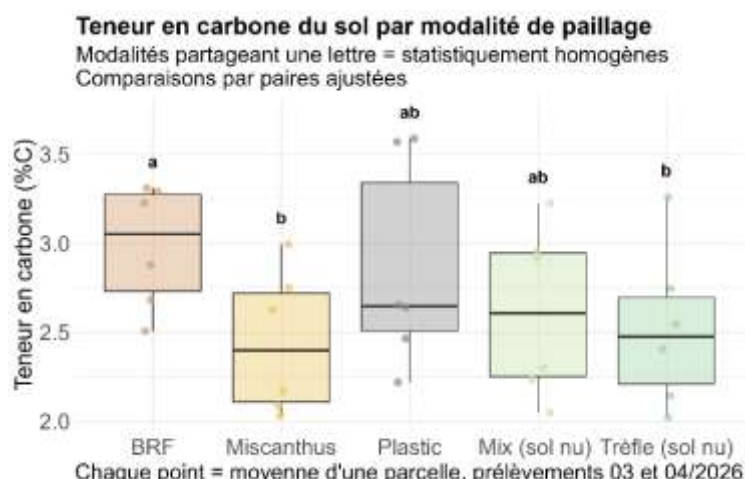


Figure 13

En conclusion, l'ajout de Rang a permis de caractériser finement l'hétérogénéité spatiale de la teneur en carbone (Colonnes $A < B < C$, Rangs $1 < 2 < \dots < 10$), de confirmer que la teneur en azote suit un gradient uniquement selon l'ordre des Colonnes et de révéler que les différences d'effets des modalités de Paillage étaient effectivement masquées dans le modèle simple.

5.2.2. Dynamique de croissance des cultures

Bien que, comme nous venons de le voir, les paillages ne produisent statistiquement pas d'effet notable sur la teneur en azote ou le rapport C/N, les cultures ont par la suite montré des signes manifestes de faim d'azote sur les paillages organiques morts, et particulièrement en *Miscanthus*. Puisque l'analyse de sol, sur des échantillons prélevés début mars, soit plus d'un mois avant les plantations, ne montrait pas de signal évident, nous avons voulu chercher l'explication ailleurs, d'autant que ces signes sont restés visibles tout au long de la culture des salades et épinards, ainsi que sur les courges et choux kale plantés début juin.

5.2.2.1. Statut chlorophyllien foliaire

La mesure de l'indice SPAD sur les salades et épinards après un mois de croissance visait à fournir une mesure indirecte du statut azoté des cultures.

Sur les épinards, ces résultats corroborent les observations de faim d'azote mentionnées ci-dessus. Les effets de Paillage et de Colonne sont chacun significatifs et de taille considérable ($\eta^2_p = 0,98$ et $0,95$, respectivement). La comparaison par paires confirme une hiérarchie complète entre les trois modalités de paillage, où le plastic est largement supérieur au BRF ($d=8,3$), lui-même supérieur au *Miscanthus* ($d=12,6$) (Fig. 12a).

Ici aussi, un gradient entre les Colonnes est détecté, croissant de A vers C ($d = 3,2$ à 7). La présence d'un gradient similaire à celui identifié pour les teneurs en azote et en carbone du sol suggère la présence d'un gradient de fertilité réel du terrain plutôt qu'un biais de mesure. Il convient toutefois de noter que, même si ces résultats sont statistiquement de grande ampleur, ils reposent sur un nombre limité de parcelles, étant donné que celles en paillages vivants n'étaient pas cultivées en salades et épinards, ce qui ne laisse que 4 degrés de liberté résiduels. Dès lors, si les tendances sont robustes, la prudence reste de mise quant à l'ampleur exacte des écarts estimés.

Sur les salades, aucun effet de Paillage ou de Colonne n'a été détecté (Fig. 12b). Les tailles d'effets restent toutefois importantes ($\eta^2_p = 0,30$ pour Paillage et $\eta^2_p = 0,68$ pour Colonne), suggérant que ces facteurs exercent probablement bien une influence, non confirmée en raison d'une puissance de test limitée, comme mentionné pour les épinards.

Outre son exigence en fertilité azotée inférieure à celle des épinards, une explication complémentaire réside dans la pigmentation de la variété feuille de chêne rouge utilisée, due à la présence d'anthocyanes. En effet, la mesure SPAD peut se trouver biaisée, généralement à la baisse, par l'absorbance de ces pigments dans une gamme de longueurs d'onde proche de celle de la chlorophylle mesurée par l'appareil. Cet aspect mérite une analyse plus approfondie, si la faim d'azote persiste les prochaines années et que le SPAD reste utilisé, par exemple par une analyse directe (et destructive) de la teneur

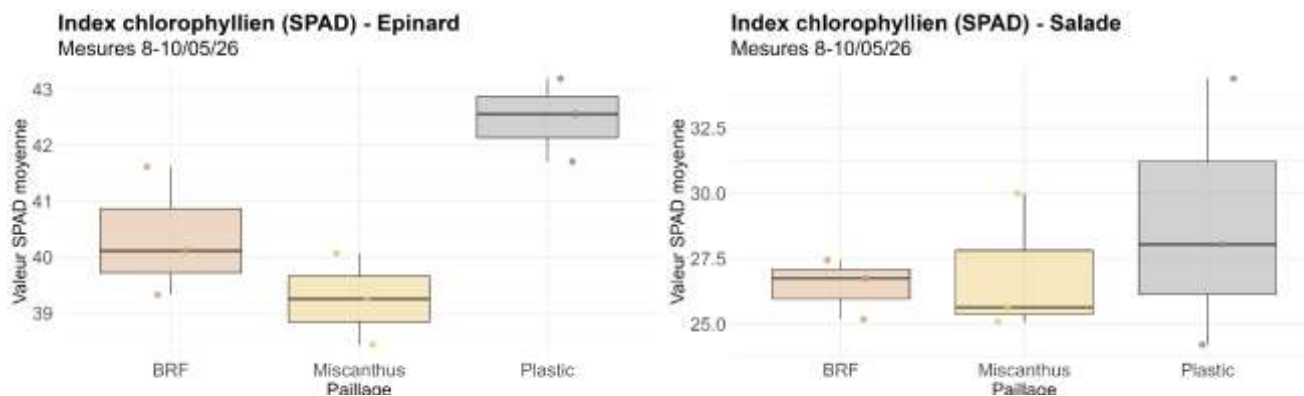


Figure 14

foliaire en azote. Cette limite méthodologique pousse également à la prudence en évitant de comparer les résultats entre les salades et les épinards cette année.

L'effet du Rang a également été exploré en complément de l'effet Colonne, mais ce test de faible puissance n'a montré aucune contribution au modèle.

5.2.2.2. Croissance de la couverture foliaire des cultures

Quatre mesures de couverture foliaire rapprochées ont été réalisées sur la première moitié de mai 2026. Avant toute chose, il convient de signaler que les salades, rouges, ne sont pas détectées par l'application Canopeo, celle-ci mesurant les pixels verts présents sur une photo. Cette limite méthodologique importante, non anticipée, fait écho à celle rencontrée sur le SPAD, et conduira à focaliser la discussion des cultures sur les épinards.

Dès la première mesure, Paillage présente un effet de taille considérable sur la couverture foliaire ($\eta^2G = 0,98$), tandis que Colonne ne l'est jamais. L'interaction Paillage×Date, significative et de très grande ampleur ($\eta^2G = 0,82$), révèle que l'écart de couverture foliaire entre Plastic et le groupe BRF – Miscanthus s'accroît de façon continue avec le temps sur la période suivie (Fig. 13a). Ainsi, l'écart considérable dès la première mesure ($d = -13$ à $-13,4$), atteint des proportions assez extrêmes en fin de suivi ($d = -26,6$ pour BRF-Plastic et $-34,7$ pour Miscanthus-Plastic). BRF et Miscanthus constituent un groupe statistiquement homogène sur les trois premières mesures, avant qu'un écart significatif et de grande ampleur n'émerge à la quatrième mesure (de $d = 3,27$ à la 3^e mesure à $d = 8,07$ à la 4^e mesure). Ces résultats corroborent les observations de faim d'azote et la hiérarchie distincte soulignée dans les résultats de SPAD entre les trois modalités de paillage cultivées au printemps.

Il aurait d'ailleurs été indiqué de réaliser d'autres suivis jusqu'à la récolte, notamment pour vérifier dans quelle mesure les trajectoires de BRF et Miscanthus se sont différenciées. Sur le terrain, j'ai constaté que le développement des épinards suivait la même tendance et recouvraient entre 90 et 99% du sol sur l'ensemble des parcelles Plastic fin mai (mesure ponctuelle uniquement sur ces parcelles, donc non incluse dans l'analyse statistique). L'écart entre BRF et Miscanthus se remarquait davantage sur l'aspect et sur la taille individuelle des épinards (notamment plus petits et jaunes en Miscanthus), a priori plus que sur la couverture foliaire (non mesurée fin mai).

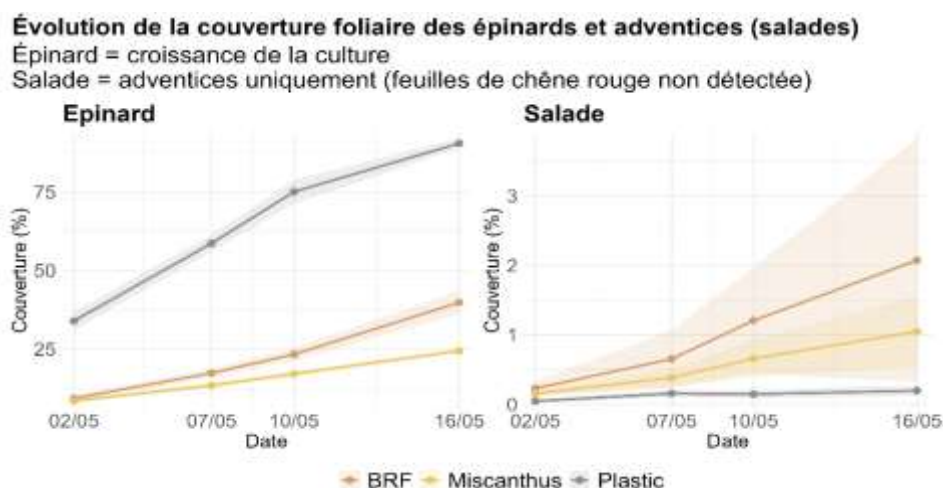


Figure 15

La limite méthodologique des salades rouges pourrait néanmoins représenter une opportunité de suivi approximatif du développement des adventices sur le Bloc Légume 1 par leur couverture foliaire. Bien

que la Figure 13b montre que BRF et Miscanthus semblent se couvrir progressivement davantage que Plastic, l'effet de Paillage reste non significatif et de taille modérée sur toutes les dates, bien qu'en légère hausse à la fin ($d=2,50$), suggérant un effet possiblement réel, mais de faible amplitude, non confirmé avec cet échantillon. Par ailleurs, l'écart de couverture foliaire entre les parcelles de même modalité sur le Bloc Légume 1 est important en BRF. Il convient de rester prudent sur les conclusions, étant donné que le protocole n'a pas été prévu pour suivre les adventices. Nous discuterons du suivi des adventices plus en détail à la section 5.6.

5.2.1. Les corrélations entre les premières variables présentées

Les comparaisons ne peuvent se faire que sur les parcelles partageant les mêmes dénominateurs sur toutes leurs mesures, c'est-à-dire celles du Bloc Légume 2 (épinards), de modalité BRF, Miscanthus et Plastic (donc $n=9$).

Les corrélations, testées par Spearman vu la petite taille de l'échantillon, corroborent globalement les liens déjà évoqués. La corrélation la plus forte relie positivement le SPAD et la dernière mesure de couverture foliaire des cultures ($\rho=0,85$, $p=0,0037$), ce qui semble logique : les parcelles ayant le meilleur statut azoté début mai sont aussi celles dont ces légumes, cultivés pour leurs feuilles, couvriront la plus grande surface deux semaines plus tard.

Ensuite, le carbone et l'azote du sol présentent chacun une tendance positive avec l'indice SPAD, toutefois sans atteindre la significativité statistique sur l'échantillon considéré (carbone-SPAD : $\rho=0,58$, $p=0,099$; azote-SPAD : $\rho=0,53$, $p=0,139$). Pour le carbone, cette relation est vraisemblablement davantage une corrélation qu'une causalité. Le BRF présente simultanément la plus haute teneur en carbone et l'indice SPAD le plus élevé parmi les mulches organiques morts, ce qui peut suffire à générer cette association sans qu'un lien causal direct n'existe entre ces deux variables. Pour l'azote, la tendance observée reste cohérente avec l'hypothèse attendue, puisque davantage d'azote total disponible dans le sol favorise également généralement la fraction azotée biodisponible et donc un statut chlorophyllien meilleur se traduisant par un indice SPAD plus élevé. Cette évolution mériterait toutefois d'être confirmée sur un échantillon plus large les prochaines années.

Enfin, il est intéressant de noter qu'aucun gradient spatial de couverture foliaire n'a été détecté (Colonne toujours non significatif), sur les cultures comme sur les paillages vivants (sur lesquels nous reviendrons au point 5.4.2). À titre de comparaison, rappelons que Colonne affectait significativement le SPAD des épinards ($p=0,0026$) ainsi que la teneur en carbone et en azote du sol. Malgré ces tendances en apparence similaires (prouvées par deux modèles distincts sur deux jeux de données distincts), aucune corrélation directe entre le SPAD et la teneur en azote n'est révélée. Ce constat montre potentiellement que la croissance foliaire précoce dépend davantage des conditions pédoclimatiques, influencées par le paillage lui-même (c.f. 5.1.2), que du stock brut en carbone ou azote du sol.

5.3. Premier bilan de saison : biomasse des cultures

Ici, la biomasse est exprimée par plant, dans un état « commercialisable », c'est-à-dire sans racine ni feuilles abîmées. Sans grande surprise, la production est nettement supérieure sur les bâches plastiques que sur BRF et Miscanthus. Plus spécifiquement, l'effet du paillage est significatif et de très grande ampleur pour les deux cultures ($\eta^2_p=0,97$ pour l'épinard et $\eta^2_p=0,88$ pour la salade), sans effet Colonne détectable.

En moyenne, Plastic a produit des épinards plus lourds de 88,3 g et 77,4 g, respectivement par rapport au Miscanthus ($d=8,03$) et BRF ($d=7,04$). Similairement, l'écart en salades est de 57,4 g et 60,2 g par plant en moyenne ($d=3,7$ Plastic-Miscanthus et $d=3,87$ Plastic-BRF). Pour ces deux cultures, BRF et Miscanthus constituent un groupe homogène (Fig. 14). Ces résultats de biomasse constituent une donnée importante pour le suivi des salades cette année, au vu des limites méthodologiques soulevées précédemment pour la couverture foliaire et le SPAD.

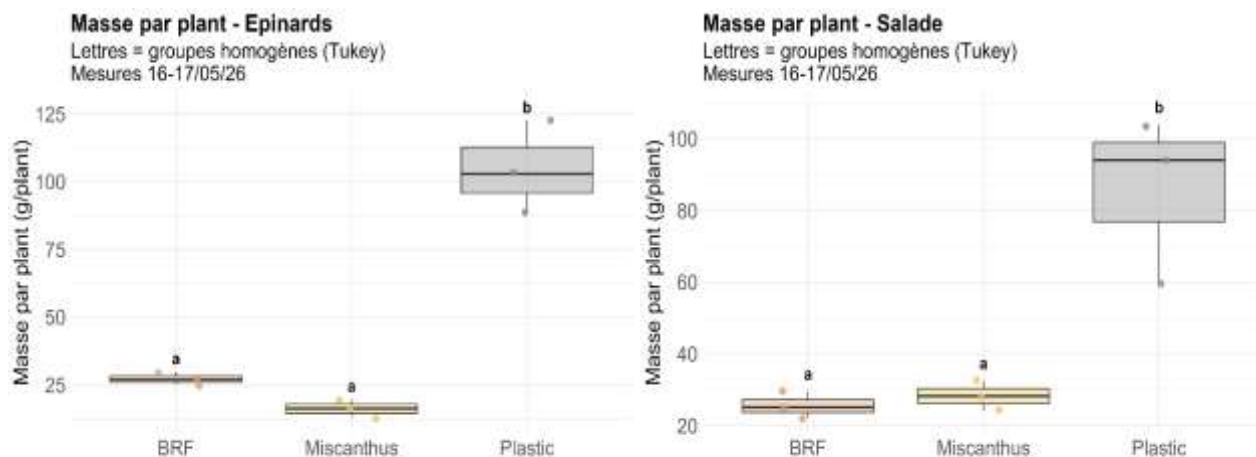


Figure 16

Cette mesure a eu lieu après un peu plus d'un mois de croissance, et alors que les cultures sont restées en place trois semaines environ, au cours desquelles l'écart a visuellement eu tendance à s'accroître entre les modalités de paillages, surtout en épinards où le Miscanthus a décroché par rapport au BRF. Pour les salades, les bâches plastiques ont également creusé leur avance, tandis que BRF et Miscanthus semblaient rester plus proches.

Au terme de la seconde année de culture, on peut donc conclure que la bâche plastique reste de loin la modalité la plus productive pour les salades et épinards, dans les conditions de cette expérience.

Aucune hétérogénéité ou gradient spatial n'a été retrouvé dans la biomasse, même en ajoutant le Rang en covariable. En revanche, la taille de l'échantillon est limitée (3 parcelles par combinaison culture-paillage, seulement 4 degrés de liberté résiduelle une fois Rang ajouté) et n'inclut que 2/3 des parcelles composant le dispositif total (Mix et Trèfle non cultivés au printemps). Dès lors, même si la présence d'un gradient spatial dans la biomasse n'a pas été démontrée par ce test peu puissant, il convient de considérer celui-ci uniquement à titre exploratoire et donc de rester prudent sur la conclusion inverse. Cette question nécessitera de poursuivre les analyses les prochaines années, sur l'ensemble du parcellaire.

5.4. Conditions d'entrée des cultures d'été

5.4.1. Approche par indicateurs biologiques

Bien que la mesure de ces deux variables soit séparée d'environ 2 mois, il est intéressant de regrouper les indicateurs des lombrics (diversité et taille des populations) et la biomasse microbienne, tant leurs fonctions à différents niveaux se complètent. En effet, dans un dispositif de culture sous paillages permanents où le sol n'est pas ou peu travaillé, l'activité microbienne est essentielle pour la décomposition des paillages organiques, tandis que les différents groupes fonctionnels de lombrics agissent conjointement sur la décomposition de la matière organique et la structure du sol en creusant des galeries qui favorisent la circulation de l'air, de l'eau et des racines.

5.4.1.1. Lombrics

Menée du 3 au 10 avril 2026, en même temps que le VESS, l'analyse des lombrics (test bêche) est la première mesure biologique de la saison. Le suivi des lombrics visait à mesurer à la fois la population totale et la répartition par groupe fonctionnel et par paillage. Les résultats obtenus montrent que cette distinction est pertinente, puisque l'effet de Paillage varie fortement en taille d'effet selon le groupe fonctionnel considéré, traduisant des exigences d'habitat différenciées (η^2_p du Paillage de 0,19 pour les épigés à 0,60 pour les endogés).

L'abondance de lombrics est globalement favorisée par les mulches organiques morts. En particulier, Miscanthus se distingue nettement de Mix et de Trèfle (modalités Sol nu, $d = -2,35$ et $-2,01$, respectivement), sans toutefois différer significativement du BRF ou de Plastic (Fig. 15a). Par ailleurs, notons que le Miscanthus performe nettement mieux pour les lombrics que pour le VESS, où il figurait parmi les modalités avec la moins bonne structure, au même niveau que des parcelles à nues depuis plus d'un an.

La réponse à la modalité de paillage dépend fortement du groupe fonctionnel considéré. Les endogés, qui incorporent directement la matière organique dans le profil du sol, présentent l'effet le plus marqué de l'ensemble des groupes ($\eta^2_p = 0,60$). En effet, Miscanthus s'y distingue à la fois de Mix et Trèfle (modalités Sol nu, $d = -2,98$ et $-1,90$, respectivement), tandis que BRF ne se distingue statistiquement que de Mix (Sol nu, $d = -2,44$), suggérant un effet de Miscanthus légèrement plus étendu que celui de BRF sur ce groupe (Fig. 15b).

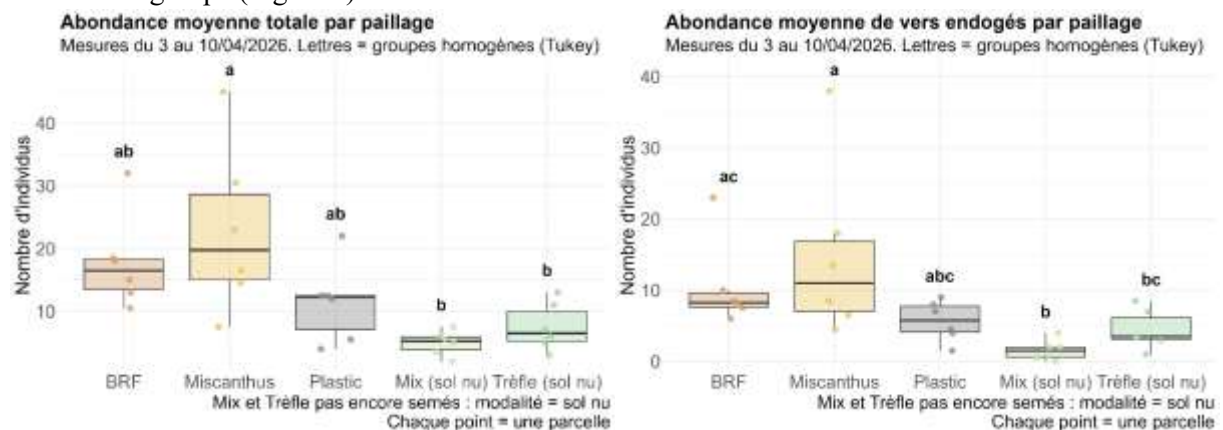


Figure 17

Le groupe des épi-anéciques présente également un effet Paillage important ($\eta^2_p = 0,38$), mais se restreint à une seule comparaison significative de modalités, à savoir BRF-Mix ($d = 1,90$), sans que le Miscanthus ne soit impliqué dans aucune différence significative (Fig. 16).

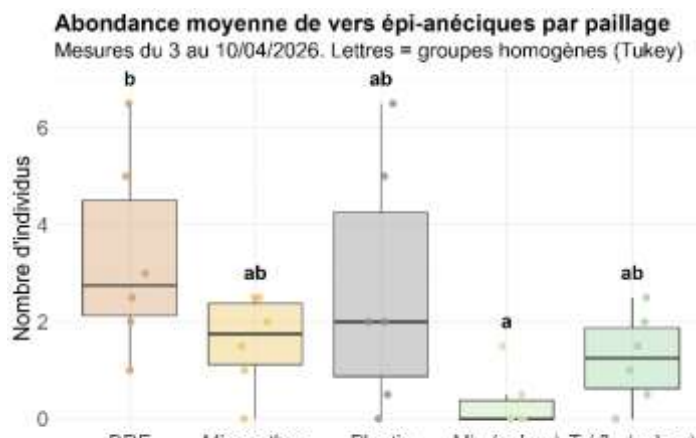


Figure 18

Enfin, les épigés et anéciques stricts ne montrent pas de réponse significative au Paillage, bien que leur taille d'effet reste non négligeable ($\eta^2_p = 0,19$ et $0,23$, respectivement), suggérant un possible manque de puissance statistique plutôt qu'une réelle absence d'effet.

5.4.1.2. Biomasse microbienne

La biomasse microbienne, analysée sur des échantillons prélevés du 16 au 18 juin 2026, est exprimée en mg de carbone organique total (COT) par kg de sol sec. Ici, les paillages vivants étaient bien développés (Trèfle semé le 11/04 et Mix le 24/04), ce qui permet de réellement comparer les modalités à l'essai.

Paillage et Colonne affectent tous deux significativement la teneur en COT, avec des tailles d'effet importantes et comparables ($\eta^2_p = 0,54$ et $0,42$, respectivement). Plus précisément, seul l'écart entre BRF et Plastic est significativement différent, largement en faveur du BRF ($d = 2,88$) (Fig. 17).

Trèfle et Mix constituent un groupe homogène tendant à favoriser la biomasse microbienne par rapport au Plastic ($d = 1,7$ et $1,53$, respectivement), toutefois sans atteindre le seuil de significativité. En revanche, Miscanthus ne se distingue pas significativement de Plastic malgré un écart, une taille et une direction d'effet comparable aux précédents ($d = 1,31$). Ainsi, l'apport de fumier chaque année sous la bâche ne semble pas compenser pleinement l'absence de matière organique en surface, étant donné que la biomasse microbienne est significativement défavorisée par la modalité Plastic par rapport à BRF et tendanciellement par rapport aux paillages vivants. L'apport de matière organique (ancien pour le BRF, plus récent pour Mix et Trèfle) expliquerait donc une grande partie de cet écart.

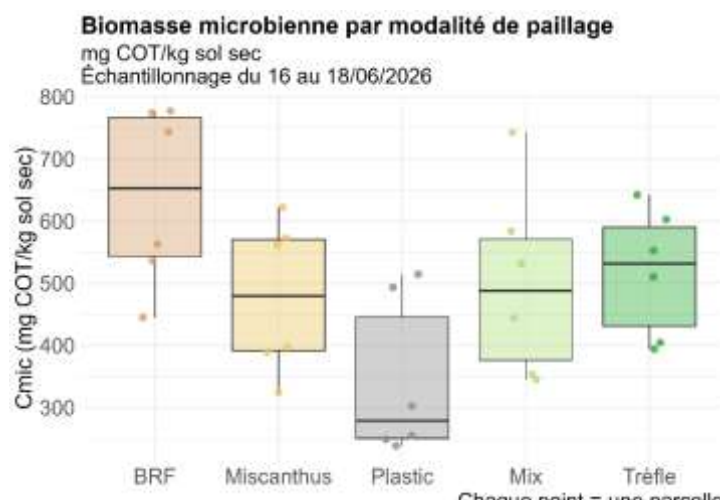


Figure 19

Ici aussi, un gradient spatial se dessine à travers les Colonnes, croissant de A vers C, avec une taille d'effet importante ($\eta^2_p = 0,42$), bien que cette tendance soit statistiquement moins marquée que précédemment. En effet, seule la comparaison des Colonnes A et C est significative (A-C $d = -1,75$), C – B étant tendancielle uniquement ($d = 1,12$) et B–A non significative ($d = 0,62$).

Enfin, la teneur en COT ne montre pas de corrélation significative avec les lombrics, probablement en raison de l'écart temporel important entre ces deux mesures. Au cours des 2 mois les séparant, les parcelles ainsi que la météo ont fortement évolué, avec de nombreuses interventions culturales (désherbages, plantation de cultures, travail du sol, ...), ce qui a pu effacer la relation.

5.4.2. Le développement des paillages vivants

Début juin, lors de la plantation des courges et du chou kale, les paillages vivants étaient largement implantés, après environ 6 semaines de croissance. Ils ont donc été débroussaillés avant la plantation.

Le suivi du développement des paillages vivants s'est également fait via leur couverture foliaire, aux mêmes dates que les cultures de printemps (première moitié de mai). Seul l'effet de Paillage est significatif et de grande ampleur ($\eta^2_G = 0,44$) pour la couverture foliaire des paillages vivants, Colonne et Bloc Légume ne le sont pas.

La levée a été plus lente pour le Trèfle que pour le Mix, probablement à cause des conditions météo moins favorables, à quoi s'ajoute l'implantation du Trèfle tendant souvent être lente. Malgré tout, l'écart de 13 jours dans le semi de ces modalités est visible dans l'écart initial de leur couverture foliaire (Fig. 18). Par ailleurs, cet écart reste stable en proportion sur l'ensemble de la période de suivi, l'interaction Paillage×Date n'étant pas significative, contrairement aux épinards.

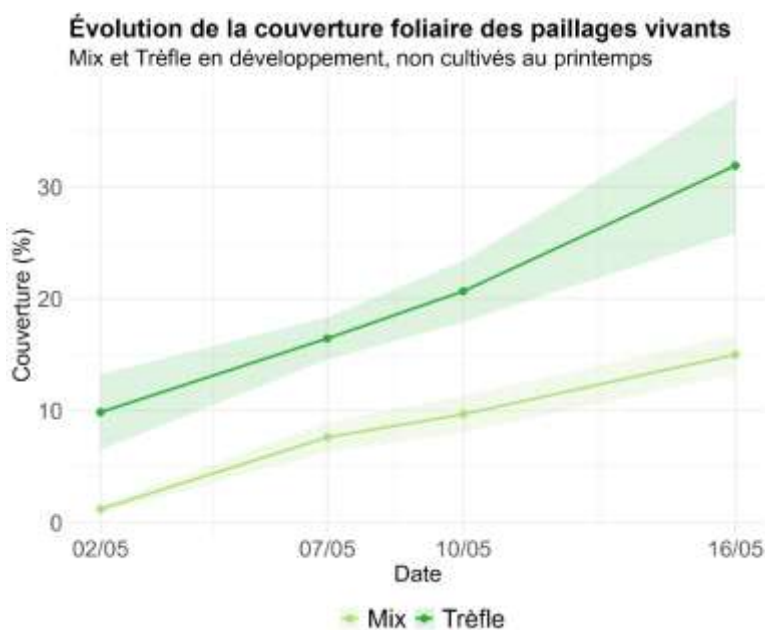


Figure 20 : Suivi de la couverture foliaire des paillages vivants

Je ferai la même autocritique que pour le suivi de la couverture foliaire des cultures de printemps : il aurait été particulièrement utile de continuer à suivre la couverture foliaire du Mix et du Trèfle au-delà du 16 mai pour caractériser leur comportement à plus long terme. Un été chaud et sec

Si le printemps a été plus chaud et humide que les normales de saisons jusqu'à la mi-juin, la suite de la saison a été marquée par d'importants excès de chaleur et un manque d'eau chronique. Depuis le 20

juin, les rares pluies se sont majoritairement concentrées sur 2 dates seulement (27/06, 26/07). Le reste du temps était soit totalement sec, soit les cumuls de 1 à 2 mm n'apportaient pas réellement d'eau aux plantes et mouillaient simplement la surface du sol.

5.4.3. Infiltration

C'est au début de ce contexte que le taux d'infiltration a été mesuré sur l'ensemble des parcelles, du 15 au 20 juin. La durée nécessaire pour atteindre un taux d'infiltration stabilisé était très hétérogène entre les parcelles, parfois même entre répétitions au sein de la même parcelle.

Comme expliqué au point 4.8.2.3 du chapitre Matériel et méthodes, le traitement préliminaire des données intégrait une phase vérifiant que le taux d'infiltration stabilisé était effectivement lors de l'arrêt des mesures sur le terrain. Dans la quasi-totalité des cas, les deux réplicats par parcelle ont pu être conservés intacts. Toutes les parcelles conservent minimum 1 réplicat, à l'exception de B9 (Miscanthus), qui a dû être écartée. En effet, l'infiltration de ses 2 réplicats était de 0,1 en moyenne pendant les 15 premières minutes, avant d'augmenter soudainement de 20 à 25 minutes puis de décroître linéairement jusqu'à 50 minutes où le plateau a bien été atteint. D'ordinaire, on s'attend à observer ce comportement tout au plus sur un seul réplicat non représentatif de la parcelle dans sa globalité, par exemple en raison d'une perturbation locale (tassement). Il est donc étonnant que les deux réplicats de B9 espacés d'environ 2 m suivent cette dynamique. Les parcelles concernées par le rejet d'un de leur deux réplicats sont B4 (Miscanthus), A8 et B1 (BRF), A7 (Mix), B5 (Trèfle) et C10 (Plastic). Les deux répétitions de mesure de toutes les autres parcelles ont pu être conservées, soit 52 séries de mesures sur 60.

Les résultats révèlent que les modalités de paillage influencent significativement le taux d'infiltration stabilisé (Fig. 19a), avec une taille d'effet importante ($\eta^2_p = 0,45$). En particulier, le Miscanthus présente le taux moyen le plus faible (0,41 cm/min), significativement inférieur à celui du Mix (1,02 cm/min, écart de 0,61 cm/min ou 0,069 L/min ; $d = -1,99$) et du Trèfle (1,29 cm/min, écart de 0,88 cm/min ou 0,010 L/min ; $d = -2,17$). Les deux paillages vivants affichent les taux moyens d'infiltration stabilisée les plus élevés et constituent un groupe statistiquement homogène, distinct uniquement de Miscanthus. Ni BRF ni Plastic ne s'en distinguent significativement.

Pour rappel, la seconde méthode d'analyse des résultats consiste à estimer les paramètres du modèle de Horton. Les paramètres f_0 , f_c et k correspondent respectivement aux débits initial et final (cm/min) et à la constante de décroissance (min^{-1}) qui représente la rapidité avec laquelle le régime d'infiltration stable est atteint. Le paramètre f_c représente le plus grand intérêt puisqu'il confirme la tendance du taux d'infiltration final calculé à partir des données de terrain par une autre méthode d'estimation (Fig. 17b). Il présente une taille d'effet et une hiérarchie similaires entre les modalités de paillage ($\eta^2_p = 0,45$; Trèfle–Miscanthus significatif, $d = 2,21$).

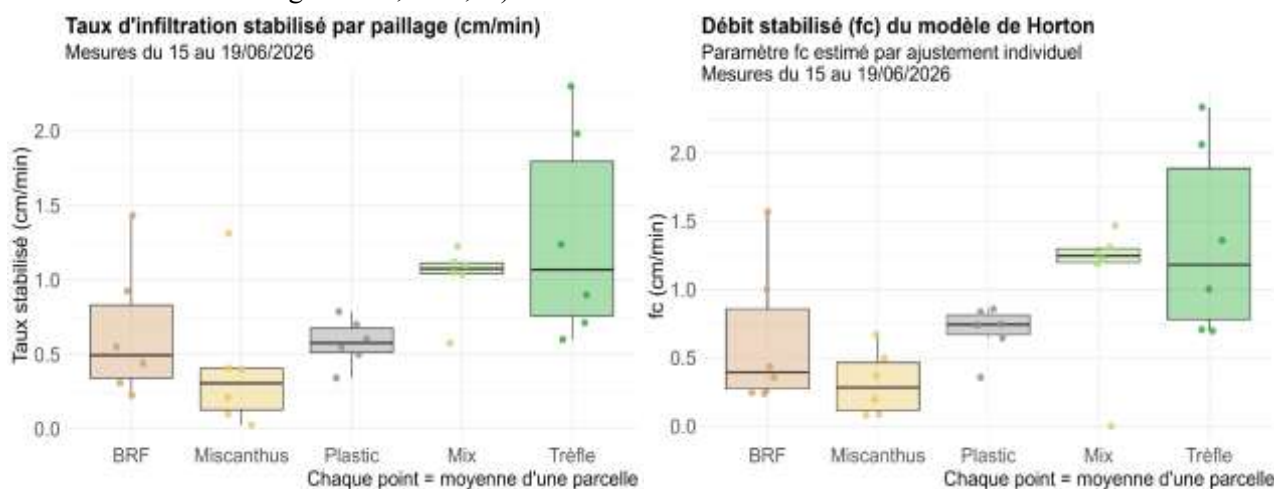


Figure 21 : (A) taux d'infiltration stabilisé ; (B) débit stabilisé du modèle de Horton

Les deux autres paramètres de Horton estimés (f_0 et k) ne montrent pas d'effet significatif du Paillage, bien que le débit initial (f_0 , log-transformé) soit à la limite de la significativité et affiche une taille d'effet importante ($\eta^2_p=0,35$). Ce résultat est possiblement dû à un manque de puissance statistique plus qu'à une réelle homogénéité entre modalités. La constante de décroissance k , en revanche, a nécessité l'exclusion des données de Miscanthus en raison d'une hétéroscédasticité marquée rendant impossible toute interprétation fiable ($\eta^2_p=0,19$ sur les données complètes, mais non robuste). Même après cette exclusion, k ne montre ni significativité ni taille d'effet notable, restant très similaire pour toutes les autres modalités de Paillage.

La comparaison du score VESS et des différents paramètres d'infiltration ne montre aucune corrélation significative. Ici aussi, les causes sont potentiellement nombreuses. L'une d'elles tient à nouveau dans l'écart temporel important séparant ces mesures (3 mois), pendant lequel les interventions ont été nombreuses sur les parcelles, avec notamment le développement et l'enracinement des paillages vivants.

5.4.4. Humidité du sol

L'humidité du sol a été mesurée sur les échantillons du carbone microbien, prélevés du 16 au 18 juin.

L'effet de Paillage sur l'humidité est significatif et de très grande ampleur ($\eta^2_p=0,70$), sans effet de Colonne ni Bloc Légume contrairement à la biomasse microbienne à laquelle Colonne contribuait de façon importante.

Comme le montre la Figure 20, le Trèfle se distingue nettement comme étant la modalité la plus asséchante, avec une humidité significativement inférieure aux quatre autres modalités, y compris Mix. Selon les comparaisons, d varie de $-1,76$ (Mix) à $-3,56$ (BRF). Par ailleurs, le Mix présente également un effet significatif, bien que plus limité que celui de Trèfle. Statistiquement, Mix se distingue du BRF ($d=-1,80$), sans différer de Miscanthus ou Plastic. L'effet des deux modalités de paillages vivants sur la disponibilité en eau n'est donc pas uniforme, le Trèfle exerçant une pression nettement plus marquée et généralisée que le Mix sur ces échantillons.

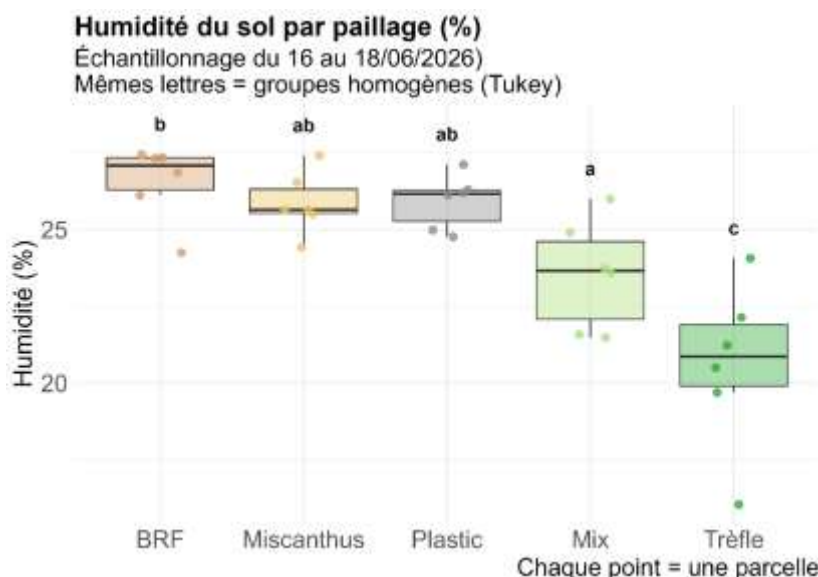


Figure 22 : Humidité moyenne par modalité de paillage

5.4.5. Une humidité élevée limite la capacité d'infiltration

L'humidité du sol est fortement et négativement corrélée au taux d'infiltration stabilisé ($\rho = -0,57$, $p = 0,0011$, $n = 30$ parcelles), comme l'illustre la Figure 21 ci-dessous.

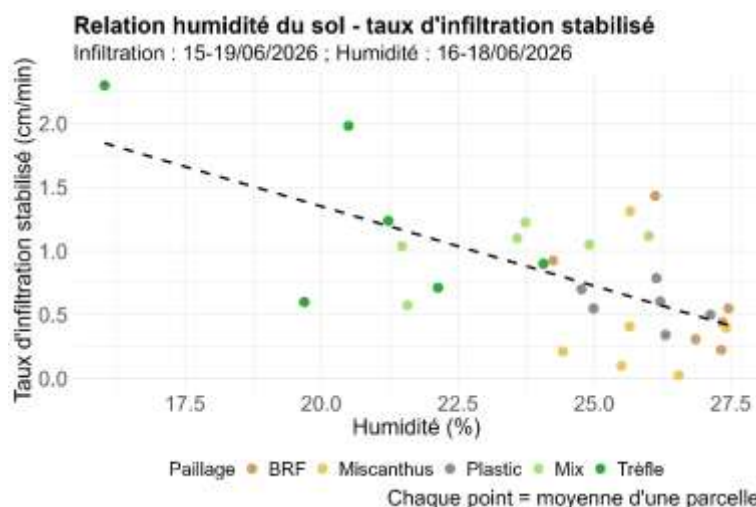


Figure 23Figure 24 : Corrélation entre l'humidité du sol et le taux d'infiltration stabilisé mesuré par la méthode de l'anneau simple

Une humidité antécédente élevée réduit mécaniquement la capacité d'infiltration en saturant partiellement l'espace poral disponible pour l'absorption d'eau supplémentaire (USDA, 2014). D'après Rauber et al., 2024, le taux d'infiltration stabilisé peut chuter jusqu'à un facteur 13 (soit à 7,7 % de sa valeur initiale) entre un sol sec et un sol à forte humidité antécédente. Cette relation dépend également de la perméabilité des couches superficielles. Le résultat obtenu expérimentalement dans le cadre de notre plateforme expérimentale s'inscrit donc pleinement dans ce cadre établi, il s'agit d'une relation attendue.

Deux approches complémentaires peuvent être suivies pour interpréter cette relation et son lien avec le Paillage. D'une part, le mécanisme physique bien documenté décrit ci-dessus, qui dit qu'un sol déjà humide au moment de la mesure présentera une capacité de stockage résiduelle réduite et infiltrera donc plus lentement. Cette perspective serait alors non dépendante de la modalité de paillage en place.

D'autre part, le paillage produit des effets plus ou moins directs et marqués. Par exemple, dans les résultats précédemment exposés, nous avons vu que le Trèfle présentait l'humidité la plus faible au moment de l'échantillonnage. Dès lors, certaines modalités pourraient également afficher une meilleure infiltration en raison de leur effet asséchant, générant une covariation/effet indirect dont Paillage est le dénominateur commun (paillage $\rightarrow$ humidité $\rightarrow$ infiltration), plutôt qu'un lien causal direct entre humidité et infiltration.

Un autre lien est à chercher par le prisme des bioporosités du sol, généralement plus élevées avec des paillages organiques (racines de paillages vivants, lombrics et vie du sol), qui favorise l'infiltration. Dans le même temps, les paillages vivants contribuent à assécher le sol en puisant de l'eau pour leurs propres besoins en évapotranspiration, ce qui explique qu'ils se retrouvent majoritairement à la gauche des paillages organiques morts sur la Figure 21 (corrélations). Par ce mécanisme, la présence de paillages vivants dans le dispositif contribue donc possiblement à réduire la pente négative de la corrélation.

5.4.6. Compétition des paillages vivants pour l'eau

Le suivi continu de l'humidité du sol de 0 à -12 cm montre le même constat (Fig 22). Dès début mai, avant même que les paillages vivants ne développent significativement leurs parties aériennes (c.f. couverture foliaire, point 4.8.4.1), le sol des modalités Mix et Trèfle contiennent moins d'eau. Cet écart se creuse ensuite au rythme du développement des paillages vivants, ceux-ci puisant de l'eau dans le sol pour leur évapotranspiration. Se faisant, ils entrent en compétition avec les cultures pour cette ressource, alors que les autres modalités de paillages conservent un niveau d'humidité bien plus stable jusqu'en fin juin. Notons que le décrochage généralisé fin juin/début juillet coïncide avec une panne du système d'irrigation automatique de quelques jours, juste avant la canicule exceptionnelle fin juin. Même sans cette panne, il faisait tellement chaud la journée que l'irrigation, enclenchée manuellement, n'a pas pu compenser les pertes d'eau pour l'ensemble des paillages et encore plus en paillages vivants.

Les paillages vivants ont toutefois l'avantage d'ombrager le sol tout en favorisant la circulation de l'air jusqu'au sol. Grâce à ça, la température en degrés-jours cumulés, présentée en termes d'écart à la bâche plastique, diminue progressivement sur la période par rapport aux paillages organiques morts et à la bâche, que ce soit dans le sol, à sa surface ou l'air à 15cm (non montré sur la Figure 22). Autrement dit, les paillages vivants continuent d'accumuler des degrés-jours, mais à un rythme nettement inférieur aux autres modalités et tempèrent donc mieux la chaleur excessive.

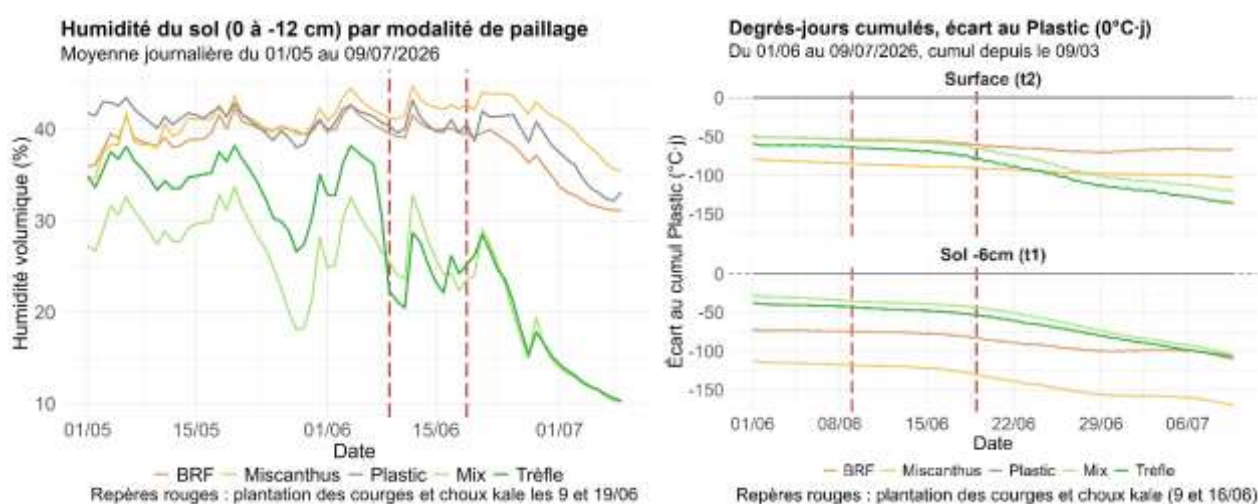


Figure 25 Figure 26 : Suivi de (A) l'humidité du sol et (B) les degrés-jours cumulés de la surface et du sol, du 01/05 au 09/07/2026

5.5. Discussion globale des résultats d'analyses

Les sections précédentes ont successivement analysé chaque groupe de variables, appliquant la logique des trois dimensions de la santé des sols abordée au chapitre 2 et retraçant le suivi de la saison culturale. Cette approche, variable par variable, masque toutefois les tendances transversales aux différents groupes d'indicateurs, auxquelles la section suivante est dédiée.

5.5.1. Différenciations des paillages selon le type d'indicateur

L'ensemble des résultats de cette seconde année montre une hiérarchie dans la sensibilité des indicateurs aux modalités de paillage. Les indicateurs de performance culturale directe, tels que le SPAD, la couverture foliaire ou la biomasse, affichent systématiquement les tailles d'effets les plus importantes (η^2_p et η^2_G de 0,88 à 0,98), avec une hiérarchie remarquablement stable où la modalité Plastic domine largement, suivie de BRF et Miscanthus qui forment un groupe souvent homogène. Les indicateurs

biologiques du sol (lombrics, biomasse microbienne) montrent une sensibilité au paillage plus modérée et surtout dépendante du contexte ou du groupe fonctionnel pour les lombrics. Les vers endogés et le carbone microbien répondent fortement à l'ancienneté du paillage ($\eta^2_p=0,54$ à $0,60$), avec le groupe des paillages organiques morts toujours plus performant par rapport à celui des modalités de sol nu. A l'inverse, d'autres groupes fonctionnels, tels que les vers épigés et anéciques stricts, ne montrent aucun signal détectable cette année et à la date de prélèvement. Les indicateurs chimiques, enfin, se montrent le moins affectés par la modalité de paillage. Seule la teneur en carbone atteint la significativité et des tailles d'effet importantes ($\eta^2_p=0,30$ à $0,40$ selon la modalité), tandis que les autres variables (pH, azote et C/N) affichent des tailles d'effet parfois importantes mais sans jamais atteindre la significativité pour confirmer ces effets statistiquement. Ce contraste suggère que la fertilité chimique du sol évolue plus lentement que les réponses biologiques ou physiologiques des plantes, restant plus sensible à l'historique du terrain qu'aux traitements appliqués, à l'image du gradient spatial montré pour les teneurs en azote et en carbone.

5.5.2. L'impact nuancé de l'hétérogénéité spatiale

Le gradient Colonne (de A vers C), parfois complété par un gradient croissant dans le Rang (pour le carbone), traverse une large partie du dispositif. Il structure fortement la chimie du sol, la biomasse microbienne et le statut chlorophyllien des épinards. En revanche, ce gradient disparaît complètement lorsqu'on observe la couverture foliaire ou la biomasse des cultures de printemps, le facteur Colonne étant non significatif pour ces variables. Cette rupture suggère que l'hétérogénéité de fertilité de base du terrain, bien que réelle et mesurable dans les analyses de sol et du statut chlorophyllien du feuillage, s'efface progressivement au profit de l'effet des paillages à mesure que la culture se développe. Cette hypothèse, peu visible à l'œil nu sur le terrain, reste toutefois à vérifier les prochaines années.

5.5.3. L'importance de l'écart temporel pour le lien entre indicateurs

Le succès des corrélations croisées semble dépendre moins de la plausibilité du lien entre deux variables que de la proximité temporelle entre les mesures. Les corrélations testées sur des mesures très proches ont abouti à des liens forts et significatifs, à l'image des corrélations infiltration~humidité et SPAD~couverture foliaire, tandis que celles séparées de plusieurs mois ont systématiquement échouées, peu importe la plausibilité du lien entre les variables considérées.

5.5.4. Le découplage entre l'état du sol et les performances des cultures du *Miscanthus*

Sur plusieurs indicateurs biologiques du sol liés aux lombrics (abondance totale et du groupe des endogés), le *Miscanthus* se comporte favorablement, de façon similaire voire supérieure au BRF. De plus, le *Miscanthus* n'est jamais statistiquement inférieur au BRF sur la chimie du sol, malgré des tailles d'effet parfois marquées de ces deux modalités. Pourtant, sur les indicateurs de performance culturale (SPAD, couverture foliaire et biomasse), le *Miscanthus* est systématiquement dans le bas du classement, parfois significativement inférieur au BRF (4e mesure de couverture foliaire, le 16/05 ; et biomasse). Ce découplage entre l'état du sol mesuré en début de saison (prélèvements chimiques début mars) et la performance réelle des cultures suggère que d'autres facteurs, tels que la température et l'humidité du sol, pourraient produire un effet non pris en compte ou moduler le comportement des variables mesurées. Il s'agit d'une piste cohérente avec l'immobilisation de l'azote, qui invite à mobiliser les données des sondes Lolly pour explorer ce mécanisme microclimatique en complément des indicateurs mesurés ponctuellement.

5.5.5. Le comportement hydrologique spécifique des paillages vivants

Enfin, les paillages vivants, Mix et Trèfle, se distinguent des autres paillages organiques, BRF et Miscanthus, par un profil hydrologique plus marqué. Les capacités d'infiltration du Mix et du Trèfle sont les plus élevées du dispositif et les deux modalités montrent un assèchement prononcé des sols, en particulier le Trèfle, qui se différencie statistiquement de toutes les modalités, y compris Mix, sur la mesure d'humidité ponctuelle. Ces résultats illustrent l'action du système racinaire des paillages vivant, prélevant de l'eau pour les propres besoins d'évapotranspiration de la plante.

De plus, l'année culturale 2026 a été particulièrement compliquée, marquée par un déficit hydrique chronique et des chaleurs excessives depuis le mois de juin. L'utilisation de plantules en mini-mottes à replanter représente un enjeu supplémentaire à cet égard. Cette pratique, bien que courante en maraîchage, comporte en effet un risque de dommage au système racinaire lors du transport, de la manipulation ou de la plantation même, ainsi qu'un contact sol-racine parfois moins bon en comparaison à une culture semée en place. Pour des espèces à racine pivotante profonde, comme les courges, cette perturbation pourrait limiter l'exploration des couches de sol plus profondes, réduisant ainsi l'accès à l'eau des cultures. Cette vulnérabilité est particulièrement critique pour les cultures d'été, confrontées à des conditions plus sèches que les cultures de printemps, implantées alors que les sols sont encore chargés en eau à la sortie de l'hiver.

5.6. Suivi des adventices

Le suivi des adventices a souffert d'une mise en œuvre hétérogène entre parcelles, tant pour l'identification que pour les modalités de désherbage et de faux semis décrites au chapitre Matériel et méthodes. Ces différences de protocole introduisent des biais majeurs, rendant impossible de distinguer proprement l'effet des paillages de l'effet des pratiques de gestion. Dès lors, les résultats présentés pour la diversité spécifique et la densité d'adventices doivent être considérés comme exploratoires et descriptifs, et ne seront pas analysés plus en profondeur ni utilisés pour tirer des conclusions robustes sur l'impact des modalités de paillage.

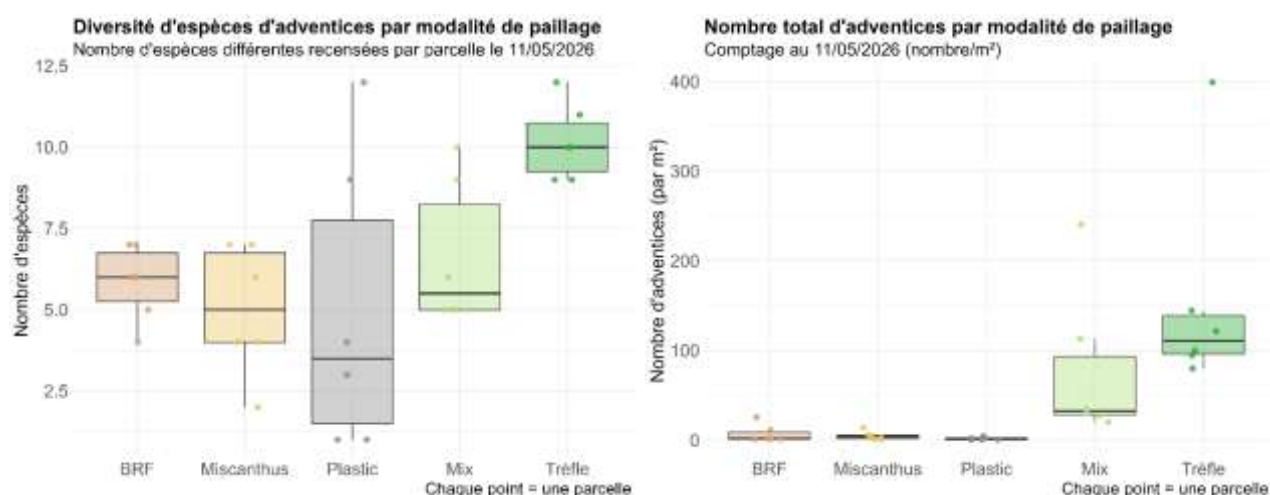


Figure 27 : Figure 28 : diversité des espèces et nombre totale d'adventices

6. Bilan et perspectives

6.1. Bilan des méthodes d'analyses

6.1.1. Méthodes pleinement concluantes

Les analyses de composition chimique du sol (pH, carbone total, azote total et rapport C/N) se sont déroulées sans incident majeur et ont fourni des jeux de données complets pour l'ensemble des parcelles. Ces indicateurs sont directement liés aux effets attendus des mulches sur la matière organique et le fonctionnement azoté, et leur pouvoir discriminant entre modalités justifie pleinement leur reconduction dans les années suivantes.

L'évaluation de l'état physique du sol en début de saison par le protocole VESS, couplée au décompte des lombrics, a également bien fonctionné et permis de mettre en évidence des différences cohérentes entre modalités (par exemple la meilleure structure sous BRF). La méthode est relativement simple à mettre en œuvre, reproductible et fournit des informations interprétables en lien avec l'infiltration et le comportement hydrique du sol, ce qui en fait un outil robuste à conserver. Enfin, le suivi de la croissance, de la biomasse et des rendements des cultures a produit des données centrales pour comparer les performances agronomiques des mulches. Ces mesures sont à maintenir telles quelles.

6.1.2. Méthodes ayant présenté des limites

D'autres méthodes se sont déroulées globalement correctement mais présentent des limites à prendre en compte pour les améliorer à l'avenir. La mesure de la biomasse microbienne a donné des résultats utilisables et, à première vue, de qualité, mais le choix contraint d'une période de prélèvement estivale, moins idéale du point de vue des recommandations du laboratoire, impose une certaine prudence dans l'interprétation des valeurs absolues.

La mesure de l'infiltration par la méthode de l'anneau simple a livré un jeu de données pertinent mais il a demandé un traitement et des manipulations statistiques plus importantes. Notamment, quelques réplicats et une parcelle entière ont dû être exclus, ce qui montre que la méthode reste sensible à des comportements atypiques et nécessite une vérification systématique des courbes avant analyse. Malgré tout, la méthode s'est révélée plus probante que la méthode « Ariane Chabert » mise en œuvre en 2025, qui restait largement impactée par les conditions d'humidité préalable du sol.

Le suivi continu de la température et de l'humidité du sol (sondes Lolly) est très informatif, mais certains épisodes (comme la panne d'irrigation suivie d'une canicule en juin) compliquent la séparation entre les effets de mulch et les événements climatiques ou techniques, même si ces contextes sont bien documentés dans le texte. Le nombre limité de capteurs a aussi représenté un obstacle pour l'analyse plus fine des données. Avec seulement 9 capteurs pour 30 parcelles, il a fallu les concentrer uniquement dans un bloc légume pour en suivre l'évolution. 2026 est donc une première étape pour la mise en place de cette mesure, il conviendra de la conserver et la consolider avec un protocole clair.

Pour le suivi des cultures et paillages vivants, les mesures de couverture foliaire et de SPAD se sont bien déroulées sur le plan technique, mais les variétés de salades feuille de chêne rouges ont introduit des biais optiques qui limitent la comparabilité directe entre modalités. La méthode n'est donc pas en cause, mais cette limite méthodologique non anticipée doit servir d'enseignement pour la suite de l'expérience, afin de ne pas réutiliser ces variétés.

Enfin, le suivi des adventices a été plus problématique. Malgré des mesures réalisées, l'hétérogénéité du protocole de mesure rend leur analyse statistique bancal. Il est en effet impossible de démontrer si les résultats obtenus sont dus aux effets des paillages, aux méthodes d'observations changeantes entre

parcelles cultivées et parcelles non cultivées, ou aux différences de pratiques de désherbage et de gestion entre parcelles. En l'état, les données 2026 sur les adventices restent donc exploratoires et invitent à conserver la méthode de comptage, mais en la couplant impérativement à un protocole de désherbage strictement standardisé si l'on veut produire des résultats statistiquement solides les prochaines années.

6.1.3. Suggestion de modification d'approche – couverture foliaire

Le suivi de la couverture foliaire des cultures montre des résultats interprétables de deux façons. La première est plutôt temporelle, et constate l'écart de couvertures foliaires aux dates de mesure ainsi que l'évolution de cet écart dans le temps. C'est la méthode appliquée dans la discussion des résultats. La seconde méthode utilise les degrés jours cumulés, déjà mobilisés avec les sondes Lolly, qui fournissent une opportunité de prendre le microclimat local de façon fine. Ainsi, l'écart de couvertures foliaires des cultures entre les modalités de paillages peut s'envisager comme un retard de croissance dû à l'évolution de la température du sol et à la dynamique des nutriments du sol. La bâche plastique, en réchauffant plus rapidement le sol et en bénéficiant d'un apport de fumier, soutient une croissance plus rapide dès l'implantation des cultures. A l'inverse, les paillages organiques morts agissent comme une sorte d'isolant sur le sol, en ralentissant la progression de la chaleur et donc l'accumulation de degrés jour. Les implications concernent directement le développement des cultures, ralenti par la température, mais aussi la faim d'azote. En effet, lorsque la température augmente, l'activité biologique du sol s'accélère, dégradant la matière organique fournie par les paillages organiques et l'immobilisation de l'azote. Cette hypothèse est soutenue par l'analyse de composition chimique du sol, dont les résultats ne se retranscrivaient pas dans les observations de faim d'azote ni de SPAD.

6.2. Bilan et perspectives d'amélioration du dispositif

La seconde année de la plateforme montre que le dispositif est désormais bien en place et pleinement opérationnel concernant les modalités de paillages organiques morts. Ces dernières produisent des effets mesurables sur la structure du sol, l'humidité, certains indicateurs biologiques et les performances des cultures, qui ont pu être documentés et analysés de manière statistiquement robuste, ce qui valide la pertinence du dispositif pour étudier leurs effets à long terme.

À l'inverse, les paillages organiques vivants restent marqués par des difficultés d'implantation et de gestion, qui limitent encore la possibilité d'en tirer des conclusions solides sur toute la saison culturale. Les résultats de 2026 confirment aussi une compétition importante pour l'eau en période de développement actif des couverts vivants, ce qui pénalise les cultures par rapport aux paillages organiques morts ou à la bâche plastique. La nécessité de revoir la composition du mélange pour l'adapter au calendrier maraîcher et réduire ces contraintes est donc un enjeu persistant demandant une adaptation dès l'année prochaine.

Deux autres pistes d'amélioration peuvent être formulées pour la suite. D'une part, diminuer la densité de semis des paillages organiques vivants permettrait de limiter leur consommation d'eau et donc la compétition hydrique vis-à-vis des cultures, tout en conservant une couverture suffisante du sol. D'autre part, une augmentation de la densité de plantation des cultures sur paillages organiques, en raisonnant l'objectif de production en biomasse par unité de surface plutôt que par plant, pourrait, au moins en théorie, diminuer l'écart de production avec celle obtenue sous bâche plastique. Cette piste constitue plus une suggestion de réflexion, car elle s'accompagne aussi d'inconvénients tels que les coûts d'achat plus importants et la charge de travail accrue lors de la plantation, qui devront être mis dans la balance avec les gains potentiels de rendement.

7. Conclusions générales

Ce mémoire avait pour but d'évaluer l'impact de différentes modalités de paillage sur la santé des sols, le développement des cultures et la gestion des adventices pour le maraîchage biologique de petite surface. Cela s'inscrit dans la continuité de l'expérience mise en place l'année passée. Celle-ci a permis de définir le dispositif, les modalités de paillage et les principaux indicateurs de suivi. Cette deuxième année vise à poursuivre la collecte des données selon une méthodologie standardisée. Les résultats obtenus constituent ainsi un premier ensemble de données utiles pour préciser les tendances observées et poursuivre l'expérience au cours des prochaines années. Aucune modalité ne s'est révélée supérieure pour l'ensemble des fonctions du sol et de la production.

Dans le cadre et les conditions de l'expérience, la bâche plastique reste la plus performante à court terme pour les cultures de printemps. Elle a permis un réchauffement et un ressuyage plus rapides du sol, ainsi qu'un développement supérieur des salades et des épinards. La biomasse commercialisable par plant était nettement plus élevée sous plastique que sous BRF et *Miscanthus*. Cette modalité demeure donc intéressante pour sécuriser la production maraîchère, malgré les problèmes environnementaux associés à l'utilisation de matériaux non biodégradables.

Les paillages organiques présentent cependant des avantages importants pour le fonctionnement du sol. Le BRF a montré la meilleure structure selon l'évaluation VESS et a favorisé la biomasse microbienne, qui est significativement supérieure à celle mesurée sous bâche plastique. Les paillages organiques morts soutiennent également davantage les populations de lombrics, notamment les vers endogés, qui contribuent à la décomposition de la matière organique et à la formation de bioporosités. Le BRF semble ainsi constituer un compromis intéressant pour améliorer la qualité biologique et physique du sol, même si ses performances productives restent inférieures à celles du plastique.

Le comportement du *Miscanthus* est contrasté. Malgré des effets favorables sur certains indicateurs biologiques, il est associé à une humidité élevée, à des signes d'engorgement et à une structure moins favorable. Cette situation a probablement contribué à la mortalité importante des salades. Les cultures implantées sur cette modalité ont également présenté les signes de faim d'azote les plus marqués et les performances les plus faibles. Ce décalage entre l'état biologique du sol et le développement des cultures suggère l'influence de facteurs tels que la température, l'humidité ou une immobilisation temporaire de l'azote.

Les paillages vivants, le Mix et le Trèfle, ont favorisé l'infiltration de l'eau, probablement grâce à leur système racinaire et aux bioporosités associées. Ils ont toutefois réduit l'humidité du sol par évapotranspiration, avec un effet particulièrement marqué sous trèfle. Cela peut créer une compétition avec les cultures en période sèche. Ils présentent néanmoins l'avantage de mieux tempérer le sol, un atout potentiel dans un contexte de réchauffement climatique. Les conditions estivales de 2026, marquées par une forte chaleur et un déficit hydrique, ont probablement accentué ces différences entre modalités.

Les analyses chimiques ont également mis en évidence un gradient spatial important dans la plateforme, notamment pour le carbone et l'azote. Cette hétérogénéité a parfois masqué les effets du paillage et rappelle la nécessité de tenir compte de l'histoire du terrain. Aucune conclusion solide ne peut être formulée concernant les adventices, en raison de différences dans la gestion des parcelles avant les mesures.

Au terme de cette deuxième année, la bâche plastique demeure donc la modalité la plus productive à court terme, tandis que le BRF présente les effets les plus favorables sur la structure et l'activité biologique du sol. Les paillages vivants offrent un potentiel intéressant pour améliorer l'infiltration et limiter l'échauffement du sol, mais leur consommation en eau doit être maîtrisée. Le choix d'un paillage

ne peut ainsi reposer sur le seul rendement immédiat : il doit intégrer la fertilité à long terme, la disponibilité en eau, les conditions climatiques et les contraintes pratiques du maraîchage. La poursuite de l'essai permettra de vérifier si les bénéfices des paillages organiques et vivants se renforcent avec le temps et contribuent à une meilleure résilience du système.

Références bibliographiques

Adapt2Climate. (2019, juillet 10). *Scénarios*. <https://www.adapt2climate.be/scenarios/>

Afshar, M. H., Hassani, A., Borrelli, P., Panagos, P., Robinson, D. A., Or, D., & Shokri, N. (2026). Soil degradation in Europe is projected to accelerate under changing land use and climate. *Communications Sustainability*, 1(56). <https://doi.org/10.1038/s44458-026-00064-4>

AgroLeague. (s. d.). *Le Trèfle blanc, couvert permanent bon marché fixateur d'azote*. Réussir La Culture Du Trèfle Blanc En Tant Que Couvert Végétal. Consulté <https://www.agro-league.com/trefle-blanc>

Agroscope. (2025, août 7). *Couverture du sol*. <https://www.agroscope.admin.ch/fr/couverture-du-sol-dc-iae>

Akca, E., Aldrian, U., Alewell, C., Anzalone, E., Arcidiacono, A., Arias, N. C., Auclerc, A., Aydinsakir, K., Ballabio, C., Balog, K., Baragaño, D., Baritz, R., Beltrandi, D., Bernatek-Jakiel, A., Bøe, F., Borrelli, P., Breure, T., Briones, M., Broothaerts, N., ... Zupanc, V. (2024, octobre 22). *The state of soils in Europe*. Publications Office of the European Union - Joint Research Centre. JRC Publications Repository. <https://doi.org/10.2760/7007291>

Amare, G., & Desta, B. (2021). Coloured plastic mulches: Impact on soil properties and crop productivity. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8(4). <https://doi.org/10.1186/s40538-020-00201-8>

Amrom, C., & Sytra. (2023). *Identification of Good Food Value Chains*. Uclouvain. <https://sytra.be/publication/goodfoodvaluechains/>

Amron, C., Baret, P., Courtois, A.-M., Montois, R., & Riera, A. (2023). *Soutenir la relocalisation de l'alimentation en Wallonie: Cartographie et analyse de l'offre alimentaire*. Sytra (UCLouvain). <https://sytra.be/fr/publication/soutenir-la-relocalisation-de-l'alimentation-en-wallonie-cartographie-et-analyse-de-loffre-alimentaire/>

APE Europe. (2025, octobre 15). *Statistics*. Agriculture Plastic & Environment (APE) Europe. Plasticulture in Europe. <https://apeeurope.eu/statistics/>

Arrhenius, S. (1896). On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41(251), 237-276. <https://doi.org/10.1080/14786449608620846>

Azima, S., & Mundler, P. (2022). Does direct farm marketing fulfill its promises? Analyzing job satisfaction among direct-market farmers in Canada. *Agriculture and Human Values*, 39(2), 791-807. <https://doi.org/10.1007/s10460-021-10289-9>

Azima, S., & Mundler, P. (2023). Farmer satisfaction and short food supply chains. *Agriculture and Human Values*, 1, 1-6. <https://doi.org/10.1007/s10460-023-10447-1>

Bagarello, V., De Santis, A., Giordano, G., & Iovino, M. (2017). Source shape and data analysis procedure effects on hydraulic conductivity of a sandy-loam soil determined by ponding infiltration runs. *Journal of Agricultural Engineering*, 48(597), 71-80. <https://doi.org/10.4081/jae.2017.597>

Baize, D., & Morlon, P. (2026, février 18). *Lixiviation*. Les Mots de l'agronomie. <https://mots-agronomie.inrae.fr/index.php?title=Lixiviation>

Bakeman, R. (2005). Recommended effect size statistics for repeated measures designs. *Behavior Research Methods*, 37(3), 379-384.

- Bandopadhyay, S., Martin-Closas, L., Pelacho, A. M., & DeBruyn, J. M. (2018). Biodegradable Plastic Mulch Films : Impacts on Soil Microbial Communities and Ecosystem Functions. *Frontiers in Microbiology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00819>
- Bandyopadhyay-Ghosh, S., Ghosh, S. B., Rodriguez, A., & Sain, M. M. (2018). Biosynthesis, Microstructural Characterisations and Investigation of In-Vitro Mutagenic and Eco-Toxicological Response of a Novel Microbial Exopolysaccharide Based Biopolymer. *Journal of Polymers and the Environment*, 26, 365-374. <https://doi.org/10.1007/s10924-016-0925-x>
- Baritz, R., Amelung, W., Antoni, V., Boardman, J., Horn, R., Prokop, G., Römbke, J., Romkens, P., Steinhoff-Knopp, B., Swartjes, F., Trombetti, M., & de Vries, W. (2021, septembre 24). *Soil monitoring in Europe. Indicators and thresholds for soil quality assessments*. European Environment Agency - European Topic Centre on Urban, Land and Soil Systems. Eionet Portal. <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-uls/products/etc-uls-reports/etc-uls-report-2021-soil-monitoring-in-europe-indicators-and-thresholds-for-soil-quality-assessments>
- Bauduin, L. (2021, février 1). *Zoom sur la dynamique des ceintures alimentaires en Wallonie*. Manger Demain. <https://www.mangerdemain.be/2021/02/01/developper-un-projet-de-ceinture-alimentaire-en-wallonie-freins-et-leviers/>
- Beriot, N., Zornoza, R., Lwanga, E. H., Zomer, P., van Schothorst, B., Ozbolat, O., Lloret, E., Ortega, R., Miralles, I., Harkes, P., van Steenbrugge, J., & Geissen, V. (2023). Intensive vegetable production under plastic mulch : A field study on soil plastic and pesticide residues and their effects on the soil microbiome. *Science of The Total Environment*, 900, 165179. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165179>
- Bingenheimer Saatgut. (2025). *Catalogue Organic Seeds 2025/2026*. https://info.bingenheimersaatgut.de/dateien/downloads/2025-2026_Hauptkatalog_EN_web.pdf
- Biot, N. (2026, mars 16). *À propos—Maraîchage en Wallonie*. Maraîchage en Wallonie. <https://maraichage-wallonie.be/about.html>
- Biot, N., Hecquet, C., Maréchal, K., Lobet, G., & Dendoncker, N. (2026). The importance of market gardeners' characteristics, distribution channels and food supply chain challenges for the viability of their farms : Insights from a territorial study in Belgium. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 50(7), 1766-1796. <https://doi.org/10.1080/21683565.2025.2597006>
- Blanchy, G., Bragato, G., Di Bene, C., Jarvis, N., Larsbo, M., Meurer, K., & Garré, S. (2023). Soil and crop management practices and the water regulation functions of soils : A qualitative synthesis of meta-analyses relevant to European agriculture. *SOIL*, 9(1), 1-20. <https://doi.org/10.5194/soil-9-1-2023>
- Bonilla-Bedoya, S., Valencia, K., Herrera, M. Á., López-Ulloa, M., Donoso, D. A., & Macedo Pezzopane, J. E. (2023). Mapping 50 years of contribution to the development of soil quality biological indicators. *Ecological Indicators*, 148, 110091. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110091>
- Bousbaine, A. (2020). *Ville et agriculture face à l'émergence des systèmes agro-alimentaires innovants. Etudes de cas dans deux agglomérations wallonnes : Charleroi et Liège*. [Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en Sciences en Géographie humaine & démographie, ULiège - Université de Liège]. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/246026>
- Brettin, S. (2024). Where value creation meets appreciation and care : Motives of farmers for direct marketing in Brandenburg, Germany. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 20(1). <https://doi.org/10.1080/15487733.2024.2420410>

- Bu, L., Zhu, L., Liu, J., Luo, S., Chen, X., & Li, S. (2013). Source–Sink Capacity Responsible for Higher Maize Yield with Removal of Plastic Film. *Agronomy Journal*, 105(3), 591-598. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0459>
- Bulgari, R., Petrini, A., Cocetta, G., Nicoletto, C., Ertani, A., Sambo, P., Ferrante, A., & Nicola, S. (2021). *The Impact of COVID-19 on Horticulture : Critical Issues and Opportunities Derived from an Unexpected Occurrence*. 7, 124. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7060124>
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Flesskens, L., Geissen, V., Kuiper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Buron, M., Foguene, É., Blondel, A., Marchetti, T., Jeannerod, L., Jacquemart, A.-L., Defourny, P., Radoux, J., & Agnan, Y. (2026). Predicting soil neonicotinoid content in agricultural landscapes using indirect indicators. *Journal of Hazardous Materials*, 501, 140794. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.140794>
- Castel, A. (2018, juin 4). *Comment la grande distribution s'approprie l'image sympathique du petit producteur local*. Réseau des GASAP / Netwerk van SAGAL. <https://gasap.be/grande-distribution-sapproprie-limage-sympathique-petit-producteur-local/>
- CATL. (2026, juin 11). *Qui sommes-nous ?* Ceinture Aliment-Terre Liégeoise. <https://www.catl.be/qui-sommes-nous/>
- Celestina, C., Hunt, J. R., Sale, P. W. G., & Franks, A. E. (2019). Attribution of crop yield responses to application of organic amendments : A critical review. *Soil and Tillage Research*, 186, 135-145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.10.002>
- Cerac. (2025a). *Food*. CERAC - Climate Risk Assessment Center. <https://www.cerac.be/en/bcra/food>
- Cerac. (2025b, novembre). *Risque pour la production alimentaire dû à la dégradation des écosystèmes du sol* [Vulgarisation]. Cerac BCRA - SPF Santé publique, Sécurité de la Chaîne alimentaire et Environnement. https://www.cerac.be/sites/default/files/media/files/2025-11/Voeding/FR/Onepager/cerac_bcra_vulgarisation_alimentation_risque_pour_la_production_alimentaire_du_a_la_degradation_des_ecosystemes_du_sol.pdf
- Cha, J.-K., O'Connor, K., Alahmad, S., Lee, J.-H., Dinglasan, E., Park, H., Lee, S.-M., Hirszt, D., Kwon, S.-W., Kwon, Y., Kim, K.-M., Ko, J.-M., Hickey, L. T., Shin, D., & Dixon, L. E. (2022). Speed vernalization to accelerate generation advance in winter cereal crops. *Molecular Plant*, 15(8), 1300-1309. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2022.06.012>
- Chalker-Scott, L. (2007). Impact of Mulches on Landscape Plants and the Environment—A Review. *J. Environ. Hort*, 24(4), 239-249. <https://doi.org/10.24266/0738-2898-25.4.239>
- Chiaverina, P., Drogué, S., Jacquet, F., Lev, L., & King, R. (2023). Does short food supply chain participation improve farm economic performance? A meta-analysis. *Agricultural Economics*, 54(3), 400-413. <https://doi.org/10.1111/agec.12764>
- Chiffolleau, Y., & Prevost, B. (2012). Les circuits courts, des innovations sociales pour une alimentation durable dans les territoires. *Noroi. Environnement, aménagement, société, Agriculture paysanne, circuits courts, territoires périurbains*, (224), 7-20. <https://doi.org/10.4000/noroi.4245>
- CINEA. (2019). *LIFE AGROPAPER on LIFE Public Database—Towards to zero plastic soil management agricultural practices*. European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency (CINEA). LIFE 3.0 - LIFE Project Public Page.

<https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/project/LIFE19-ENV-ES-000404/towards-to-zero-plastic-soil-management-agricultural-practices>

Comps, S., Claustriau, J.-J., Vandercammen, M., Horge, E., & Lebailly, P. (2011, septembre 2). *Local food systems in Walloon Region (Belgium): Definition and trends in supply and demand*. New Challenges for European Regions and Urban Areas in a Globalised World. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/99451>

Conseil européen. (2025, mai 26). *Règles de financement de la PAC 2023-2027*. Conseil européen - Conseil de l'Union européenne. <https://www.consilium.europa.eu/fr/policies/cap-funding-rules-2023-2027/>

CPA. (2020, juillet). *Circular Plastics Alliance—European State of Play* [Preliminary Report]. Circular Plastics Alliance (CPA) - Agriculture Working Group - Collection & Sorting Workshop. <https://webgate.ec.europa.eu/circabc-ewpp/rest/download/74b3cc17-e42f-48d1-89e6-e3bb99f7a2f7>

Créalim. (2026). *Collectif des ceintures et réseaux alimentaires en Belgique francophone*. <https://www.collectifcrealim.be/>

Dai, J., & Ding, F. (2025). *Plastic film usage and mulching area from 1992 to 2022 [Dated]* (Version 7) [Jeu de données]. Dryad. <https://doi.org/10.5061/DRYAD.6HDR7SRCD>

Daryanto, S., Wang, L., & Jacinthe, P.-A. (2017). Can ridge-furrow plastic mulching replace irrigation in dryland wheat and maize cropping systems? *Agricultural Water Management*, 190, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.05.005>

De Bruyn, R. (2020, avril 15). *Comment manger durable et choisir entre bio, local, équitable ?* Écoconso. <https://www.ecoconso.be/fr/content/comment-manger-durable-et-choisir-entre-bio-local-equitable>

Delmon, X. (2023, mars 29). *Carnet du RwDR n°11—Quelles stratégies pour le maraîchage durable sur petites et moyennes surfaces en Wallonie d'ici 2030 ?* Réseau wallon de Développement Rural. https://reseauwallonpac.be/sites/default/files/rwdr_maraichage_web.pdf

de Roest, K., Ferrari, P., & Knickel, K. (2018). Specialisation and economies of scale or diversification and economies of scope? Assessing different agricultural development pathways. *Journal of Rural Studies*, 59, 222-231. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2017.04.013>

Destain, M.-F. (2014). *La compaction des sols agricoles en Wallonie* (p. 53). SPW (DGARNE). <https://orbi.uliege.be/handle/2268/170422>

De Toffoli, M., Bontemps, P.-Y., & Lambert, R. (2010). Synthèse de résultats d'essais de cultures intermédiaires pièges à nitrate à l'Université catholique de Louvain. *BASE*, 14(1). <http://bibli-cloud15.segi.ulg.ac.be/1780-4507/index.php?id=4915>

Detre, J. D., Mark, T. B., Mishra, A. K., & Adhikari, A. (2011). Linkage between direct marketing and farm income : A double-hurdle approach. *Agribusiness*, 27(1), 19-33.

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* [UCLouvain]. <https://hdl.handle.net/2078.5/56594>

Dupé, P., Dedieu, B., Gasselin, P., & Ollivier, G. (2025). The work of farmers in short food supply chains: Systematic literature review and research agenda. *PLOS ONE*, 20(6), e0314175. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0314175>

- EEA. (2020, mars 26). *Conservation agriculture*. Climate ADAPT- European Environment Agency - European Commission. Adaptation Options. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/adaptation-options/conservation-agriculture>
- Ehiomogue, P., Ojedele, O. S., Ikechuchu-Ede, C. E., Okosa, I., Orji, F. N., & Ahaneku, I. E. (2018). Calibration of Existing Infiltration Models on Different Amended Soils. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 7(6), 224-247.
- 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>
- Enthoven, L., & Van den Broeck, G. (2021). Local food systems : Reviewing two decades of research (Part. 103226). *Agricultural Systems*, 193. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103226>
- ESDAC. (2025, mars). *Soil degradation in the Member States*. European Soil Data Centre (ESDAC) - Joint Research Centre, European Commission. EUSO Soil Degradation Dashboard. <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/esdacviewer/euso-dashboard/>
- EU CAP Network. (2025). *Mulching*. Practice Abstract - Research and innovation. https://eu-cap-network.ec.europa.eu/projects/practice-abstracts/mulching_en
- EUR-Lex. (2021, février 5). 'Farm to fork' strategy for a fair, healthy and environmentally friendly food system. Union européenne. <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/farm-to-fork-strategy-for-a-fair-healthy-and-environmentally-friendly-food-system.html>
- European Evaluation Helpdesk for the CAP. (2026, juin 9). *Évaluation de la place des agriculteurs dans la chaîne alimentaire*. Union européenne. Réseau européen de la PAC. https://eu-cap-network.ec.europa.eu/publications/assessment-farmers-position-food-chain_fr
- Eurostat. (2024, novembre 15). *Glossary: Soil cover*. European Union. Statistics Explained. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Soil_cover
- FAO. (2021). *Assessment of agricultural plastics and their sustainability : A call for action*. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). <https://doi.org/10.4060/cb7856en>
- FAO. (2023, juin 15). *Opportunities and challenges of eating local*. FAO Regional Office for Europe and Central Asia. <https://www.fao.org/europe/news/detail/opportunities-and-challenges-of-eating-local/en>
- FEAD. (2022, octobre 12). *Did you know that bio-based, biodegradable, and compostable plastics are different things?* FEAD - European Waste Management Association. <https://fead.be/fact/single-use-plastics-proposal-importance-of-moving-towards-binding-recycled-content-targets-to-support-the-uptake-of-recycled-plastics/>
- Gaitanis, D., Lukac, M., & Tibbett, M. (2023). Fragment size and diversity of mulches affect their decomposition, nutrient dynamics, and mycorrhizal root colonisation. *Scientific Reports*, 13, 9383. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36457-x>
- Galli, F., & Brunori, G. (2013). *Short Food Supply Chains as drivers of sustainable development* [Evidence Document]. project FOODLINKS. <https://orgprints.org/id/eprint/28858/1/evidence-document-sfsc-cop.pdf>
- Garbarczyk, B. (2017). *Au-delà des circuits-courts, que proposent les ceintures alimentaires ?* [Analyse]. SAW-B - Solidarité des Alternatives Wallonnes et Bruxelloises. <https://saw-b.be/publication/au-dela-des-circuits-courts-que-proposent-les-ceintures-alimentaires/>

- GardenWorld. (2026, avril 12). *Mélilot jaune : Guide complet*. <https://gardenworld.app/fr/blog/planten/melilotus-officinalis>
- Gheshm, R., & Brown, R. N. (2020). The Effects of Black and White Plastic Mulch on Soil Temperature and Yield of Crisphead Lettuce in Southern New England. *HortTechnology*, 30(6), 781-788. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH04674-20>
- Gillain, D., & Balleux, P. (2021, mars). *Bonnes pratiques agroforestières : Dossier – paillages contre les adventices*. Centre de Développement Agroforestier de Chimay (CDAF). https://reseauwallonpac.be/sites/default/files/dossier_-_paillages_contre_les_adventices.pdf
- Giuliani, L. M., Warner, E., Campbell, G. A., Lynch, J., Smith, A. C., & Smith, P. (2024). Advancing nature-based solutions through enhanced soil health monitoring in the United Kingdom. *Soil Use and Management*, 40, e13164. <https://doi.org/10.1111/sum.13164>
- Gobin, A. (2018). Weather related risks in Belgian arable agriculture. *Agricultural Systems, Agricultural Systems*, 159, 225-236. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.06.009>
- Gouvernement wallon. (2018, novembre). *Stratégie « Manger Demain », vers un système alimentaire durable en Wallonie*. Manger demain. <https://www.wallonie.be/fr/manger-demain>
- Graine de Vie. (s. d.). *Mélilot officinal—Melilotus officinalis*. Graine de vie - Pépinière - Plantes aromatiques et médicinales. Consulté 13 août 2026, à l'adresse <https://www.grainedevie.net/graines-melilot-jaune-melilot-officinal.html>
- Greene, R., Timms, W., Rengasamy, P., Arshad, M., & Cresswell, R. (2016). Soil and Aquifer Salinization: Toward an Integrated Approach for Salinity Management of Groundwater. In A. J. Jakeman, O. Barreteau, R. J. Hunt, J.-D. Rinaudo, & A. Ross (Éds.), *Integrated Groundwater Management: Concepts, Approaches and Challenges* (Springer, Cham, p. 377-412). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9_15
- Groult, J.-M. (2024, avril 12). *La laitue Feuille de Chêne: Fiche de culture*. Détente jardin. <https://www.detentejardin.com/plantes/legumes-herbes-et-salades/salades/la-laitue-feuille-de-chene-fiche-de-culture-1056659>
- Hann, S., Fletcher, E., Molteno, S., Sherrington, C., & Elliott, L. (2021, juillet 26). *Conventional and Biodegradable Plastics in Agriculture* [Final report]. Eunomia Research & Consulting Ltd. <https://eunomia.eco/reports/conventional-and-biodegradable-plastics-in-agriculture/>
- Harchies, M. (2025, juin). *Risques climatiques en Wallonie. Rapport final de l'étude de vulnérabilité et d'adaptation de la Wallonie*. Service Public de Wallonie (SPW) - Agence Wallonne de l'Air et du Climat (AWAC). https://awac.be/wp-content/uploads/2025/09/Adaptation-RW-Rapport-Final_VF_Final.pdf
- Hawkins, E. (2026). *Global temperature change (1850-2025)*. University of Reading. Show Your Stripes. <https://showyourstripes.info/l/globe>
- Held, L. E. (2019, juin 7). Organic Farming Has A Plastic Problem. One Solution Is Controversial. *The Plastic Tide*. <https://www.npr.org/sections/thesalt/2019/06/07/729783773/organic-farming-has-a-plastic-problem-one-solution-is-controversial>
- Henseler, M. (2024). Plastic Emissions from Mulch Film and Abatement Measures—A Model-Based Assessment for Germany. *Environmental Modeling & Assessment*, 29, 339-363. <https://doi.org/10.1007/s10666-023-09944-8>
- Hristov, J., Toreti, A., Perez, D. I., Dentener, F., Fellmann, T., Elleby, C., Ceglar, A., Fumagalli, D., Niemeyer, S., Cerrani, I., Panarello, L., & Bratu, M. (2020). *Analysis of climate change impacts on EU agriculture by 2050*. Joint Research Centre of European Commission. <https://doi.org/10.2760/121115>

Huang, T., Wu, Q., Yuan, Y., Zhang, X., Sun, R., Hao, R., Yang, X., Li, C., Qin, X., Song, F., Joseph, C. O., Wang, W., & Siddique, K. H. M. (2024). Effects of plastic film mulching on yield, water use efficiency, and nitrogen use efficiency of different crops in China: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 312(109407). <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109407>

Huang, Y., Liu, Q., Jia, W., Yan, C., & Wang, J. (2020). Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment. *Environmental Pollution*, 260(114096). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114096>

Innovyze. (2022). *Horton Infiltration Model*. https://help2.innovyze.com/infoworksicm/Content/HTML/ICM_ILCM/Horton_Infiltration_Model.htm

IPCC. (2021a). *Climate information relevant for Agricultural and Pasture Systems*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/factsheets/IPCC_AR6_WGI_Sectoral_Fact_Sheet_Agriculture_and_Pasture_Systems.pdf

IPCC. (2021b). *Regional fact sheet—Europe*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/factsheets/IPCC_AR6_WGI_Regional_Fact_Sheet_Europe.pdf

IPCC. (2021c, août 9). *Climate change widespread, rapid, and intensifying*. <https://www.ipcc.ch/2021/08/09/ar6-wg1-20210809-pr/>

IPCC. (2022, octobre). *Fact sheet—Food and Water*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/outreach/IPCC_AR6_WGII_FactSheet_FoodAndWater.pdf

IRM. (s. d.-a). *Statistiques climatiques des communes belges, Ottignies-Louvain-La-Neuve (ins 25121) [Statistiques climatiques]*. Institut Royal Météorologique de Belgique. Consulté https://opendata.meteo.be/ftp/climate/climate_statistics/climate_INS25121_9120_fr.pdf

IRM. (s. d.-b). *Vague de chaleur*. Dico Météo. Consulté 17 juillet 2026, à l'adresse <https://www.meteo.be/fr/infos/dico-meteo/vague-de-chaleur>

IRM. (2020). *Rapport climatique 2020*. Institut Royal Météorologique de Belgique. https://www.meteo.be/resources/misc/climate_report/RapportClimatique-2020.pdf

IRM. (2025, août 29). *Le climat à l'horizon 2100*. Institut Royal Météorologique de Belgique. <https://www.meteo.be/fr/climat/changement-climatique-en-belgique/le-climat-a-lhorizon-2100>

IRM. (2026). *Bilans climatologiques de 2026*. <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/bilans-climatologiques/2026/hiver>

Iweeps. (2026, juin 1). *Artificialisation du sol en Wallonie*. Institut wallon de l'évaluation, de la prospective et de la statistique (IWEPS). Indicateurs statistiques. <https://www.iweeps.be/indicateur-statistique/artificialisation-du-sol/>

Jones, A., Stolbovoy, V., Rusco, E., Gentile, A.-R., Gardi, C., Marechal, B., & Montanarella, L. (2009). Climate change in Europe. 2. Impact on soil. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(3), 423-432. <https://doi.org/10.1051/agro:2008067>

Jones, H., Black, A., & Jassal, P. (2018, juillet). *Effects of various plastic mulches on soil temperature and the surface energy balance [CAI Factsheet]*. Biometeorology and Soil Physics Lab, Faculty of Land and Food Systems, University of British Columbia. https://bcfoodweb.ca/sites/default/files/res_files/FI07-2018-factsheet-Plastic-Mulches%20%281%29.pdf

- Jorenush, M. H., & Sepaskhah, A. R. (2003). Modelling capillary rise and soil salinity for shallow saline water table under irrigated and non-irrigated conditions. *Agricultural Water Management*, 61(2), 125-141. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00176-2](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00176-2)
- Kabato, W., Hailegnaw, N., Mutum, L., & Molnar, Z. (2025). Managing soil health for climate resilience and crop productivity in a changing environment. *Science of The Total Environment*, 1000, 180460. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180460>
- 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>
- Kasirajan, S., & Ngouajio, M. (2012). Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications : A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32, 501-529. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0068-3>
- Kim, S. J., Shim, J.-Y., Park, K. M., Park, D. il, Heo, N. Y., Hwang, S. J., Park, S. H., Chung, H. W., Lee, J. M., & Chung, H. C. (2025). Comparison of decomposition of biodegradable mulching films under variable soil microbial conditions. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1674576. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1674576>
- Kimura, R., & Takayama, N. (2014). Climate of the Loess Plateau. In A. Tsunekawa, G. Liu, N. Yamanaka, & S. Du (Éds.), *Restoration and Development of the Degraded Loess Plateau, China* (p. 23-33). Springer Japan. https://doi.org/10.1007/978-4-431-54481-4_2
- Kirkby, C. A., Kirkegaard, J. A., Richardson, A. E., Wade, L. J., Blanchard, C., & Batten, G. (2011). Stable soil organic matter : A comparison of C:N:P:S ratios in Australian and other world soils. *Geoderma*, 163(3-4), 197-208. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.04.010>
- Kneafsey, M. (2014, janvier 1). *EIP-AGRI Focus Group on Short Food Supply Chain Management* [Discussion Paper]. European Union. https://eu-cap-network.ec.europa.eu/publications/eip-agri-focus-group-short-food-supply-chain-management-starting-paper_en
- Kneafsey, M., Venn, L., Schmutz, U., Balasz, B., Trenchard, L., Eyden-Wood, T., Bos, E., Sutton, G., & Blackett, M. (2013a). *Short Food Supply Chains and Local Food Systems in the EU. A State of Play of their Socio-Economic Characteristics*. JRC Publications Repository. <https://doi.org/10.2791/88784>
- Kneafsey, M., Venn, L., Schmutz, U., Balasz, B., Trenchard, L., Eyden-Wood, T., Bos, E., Sutton, G., & Blackett, M. (2013b, juillet 12). *Short Food Supply Chains and Local Food Systems in the EU. A State of Play of their Socio-Economic Characteristics*. Office of the European Union. JRC Publications Repository. <https://doi.org/10.2791/88784>
- Kolberg, D., Persson, T., Mangerud, K., & Riley, H. (2019). Impact of projected climate change on workability, attainable yield, profitability and farm mechanization in Norwegian spring cereals. *Soil and Tillage Research, Soil & Tillage Research*, 185, 122-138. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.09.002>
- Konica Minolta. (s. d.). *CHLOROPHYLL METER SPAD-502Plus* [Spécifications constructeur]. Consulté https://www.konicaminolta.com/instruments/download/catalog/color/pdf/spad502plus_catalog_eng.pdf
- Kotschik, P., Princz, J., Silva, C. de L. e, Renaud, M., Marti-Roura, M., Brooks, B., Pieper, S., Rijk, I., Simini, M., Andres, S., Scholz-Starke, B., & Grenni, P. (2024). The upcoming European Soil Monitoring Law : An effective instrument for the protection of terrestrial ecosystems? *Integrated Environmental Assessment and Management*, 20(2), 316-321. <https://doi.org/10.1002/ieam.4834>

- Lakens, D. (2013). Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science : A practical primer for t-tests and ANOVAs. *Frontiers in Psychology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00863>
- Larousse, É. (2024). *Définitions : Maraîchage - Dictionnaire de français Larousse* [Dictionnaire en ligne]. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/mara%C3%A9chage/49331>
- Le Douarin, S. (2026, février). *L'agriculture bio dans l'Union européenne—Carnet 2026*. Agence française pour le développement et la promotion de l'agriculture biologique - Agence BIO. https://www.agencebio.org/wp-content/uploads/2026/03/Carnet_BIO_UE_2026.pdf
- Leblanc, M. (2008, avril 1). *La montaison prématurée des légumes*. Agri-Réseau, CRAA Québec. <https://www.agrireseau.net/legumeschamp/documents/La%20montaison%20pr%C3%A9matur%C3%A9e%20des%20l%C3%A9gumes.pdf>
- Li, C., Cui, Q., Li, Y., Zhang, K., Lu, X., & Zhang, Y. (2022). Effect of LDPE and biodegradable PBAT primary microplastics on bacterial community after four months of soil incubation. *Journal of Hazardous Materials*, 429, 128353. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128353>
- Li, S., Zhao, L., Wang, C., Huang, H., & Zhuang, M. (2023). Synergistic improvement of carbon sequestration and crop yield by organic material addition in saline soil : A global meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 891, 164530. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164530>
- Liu, X., Wen, Z., Zhou, W., Dong, W., Ren, H., Liang, G., & Gong, W. (2025). Effect of Multiyear Biodegradable Plastic Mulch on Soil Microbial Community, Assembly, and Functioning. *Microorganisms*, 13(2), 259. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13020259>
- Macron, E. (2022, décembre 31). *Vœux 2023 aux Français*. elysee.fr. <https://www.elysee.fr/emmanuel-macron/2022/12/31/voeux-2023-aux-francais>
- Maussion, A. (s. d.). *Svante Arrhenius « On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground » PDF*. Consulté 11 juillet 2026, à l'adresse https://www.academia.edu/42086224/Svante_Arrhenius_On_the_Influence_of_Carbonic_Acid_in_the_Air_upon_the_Temperature_of_the_Ground
- McCool, D. K., & Williams, J. D. (2008). *Soil Erosion by Water* (S. E. Jørgensen & B. D. Fath, Éd.s.; p. 3284-3290). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00296-2>
- Météo France. (2026, juillet 3). *Bilan climatique de juin 2026 : Le mois de juin le plus chaud jamais enregistré avec une canicule historique* [Communiqué]. https://meteofrance.com/sites/default/files/files/editorial/20260703_Bilan-climatique-juin-2026-meteo-france.pdf
- Météo-France. (2026, juillet 28). *Changement climatique : Quel impact sur les vagues de chaleur ?* <https://meteofrance.com/le-changement-climatique/quel-climat-futur/changement-climatique-quel-impact-sur-les-vagues-de-chaleur>
- Meyer, N., Bergez, J.-E., Constantin, J., Belleville, P., & Justes, E. (2020). Cover crops reduce drainage but not always soil water content due to interactions between rainfall distribution and management. *Agricultural Water Management*, 231, 105998. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105998>
- Michigan State University. (2002). *RUSLE - On line soil erosion assessment tool*. Institute of Water Research, Michigan State University. K Factor. <http://www.iwr.msu.edu/rusle/kfactor.htm>
- Montanari, F., Ferreira, I., Lofstrom, F., Varallo, C., Volpe, S., Smith, E., Kirova, M., Wion, A., Kubota, U., & Albuquerque, J. D. (2021). *Research for Agri Committee – Preliminary impacts of the COVID-19 pandemic on European agriculture : A sector-based analysis of food systems and market resilience* (p. 118). European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies.

[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/690864/IPOL_STU\(2021\)690864_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/690864/IPOL_STU(2021)690864_EN.pdf)

Montois, R., Baret, P., Courtois, A.-M., Amrom, C., & Riera, A. (2023, mars 13). *Soutenir la relocalisation de l'alimentation en Wallonie : Cartographie et analyse de l'offre alimentaire - Filière wallonne des légumes*. UCLouvain. Sytra. <https://sytra.be/fr/publication/soutenir-la-relocalisation-de-l'alimentation-en-wallonie-cartographie-et-analyse-de-loffre-alimentaire/>

Morel, K., San Cristobal, M., & Gilbert Léger, F. (2017). Small can be beautiful for organic market gardens : An exploration of the economic viability of French microfarms using MERLIN. *Agricultural Systems*, 158, 39-49. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.08.008>

Mormile, P., Stahl, N., & Malinconico, M. (2017). The World of Plasticulture. In M. Malinconico (Éd.), *Soil Degradable Bioplastics for a Sustainable Modern Agriculture* (Springer, p. 1-21). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54130-2_1

Nature4Cities. (2018). *Le mulching* [Fiches sur les Solutions Fondées sur la Nature]. projet H2020 Nature4Cities.

Navarrete, M., Dupré, L., & Lamine, C. (2015). Crop management, labour organization, and marketing : Three key issues for improving sustainability in organic vegetable farming. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 13(3), 257-274. <https://doi.org/10.1080/14735903.2014.959341>

Nihoul, P. (2025, août). *Projections climatiques pour la Wallonie, De quoi parle-t-on ? Grandes lignes marquantes vues par un œil extérieur d'agronome* [Article]. SPW-ARNE, Service du Développement et de la Vulgarisation. [https://agriculture.wallonie.be/files/accueil/Recherche%20et%20d%20c%3a9veloppement/Secheresse/r%20c%3a9silience%20grande%20culture/Projections%20climatique%20pour%20la%20Wallonie%20\(1\).pdf](https://agriculture.wallonie.be/files/accueil/Recherche%20et%20d%20c%3a9veloppement/Secheresse/r%20c%3a9silience%20grande%20culture/Projections%20climatique%20pour%20la%20Wallonie%20(1).pdf)

O'Callaghan, A. (2008). *Soil Solarization to Control Garden Pests*. College of Agriculture, Biotechnology & Natural Resources University of Nevada. Extension. <https://extension.unr.edu/publication.aspx?PubID=3178>

Olesen, J., Børgesen, C., Elsgaard, L., Palosuo, T., Rötter, R. P., Skjelvåg, A., Peltonen-Sainio, P., Börjesson, T., Trnka, M., Ewert, F., Siebert, S., Brisson, N., Eitzinger, J., Asselt, E., Oberforster, M., & Van der Fels-Klerx, H. (Ine). (2012). Changes in time of sowing, flowering and maturity of cereals in Europe under climate change. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 29(10), 1527-1542. <https://doi.org/10.1080/19440049.2012.712060>

Park, T., Mishra, A. K., & Wozniak, S. J. (2014). Do farm operators benefit from direct to consumer marketing strategies? *Agricultural Economics*, 45(2), 213-224. <https://doi.org/10.1111/agec.12042>

PARTAGE. (2021). *Légumineuses, une entrée d'azote dans les systèmes : Comment ça marche et à quelles conditions ?* (N° 2; La gazette de l'azote, p. 3). Téléchargeable à l'adresse : <https://www.terresinovia.fr/fr/informations-techniques/quel-est-le-processus-de-la-fixation-azotee-symbiotique>

Petel, T. (2023, juillet). *La Lettre Paysanne n°134—Aides bio pour le maraîchage diversifié : Rappel des principales règles*. FUGEA. <https://www.fugea.be/la-lettre-paysanne>

Pisani, C., & Soriano Disla, J. M. (2025). *D3.1 Catalogue of soil health indicators* (D3.1). Project innovative CO-creation for Soil HEalth in Living Labs (iCOSHELLs). https://www.icoshells.eu/wp-content/uploads/2025/05/D3.1-Catalogue-of-soil-indicators-iCOSHELLs_current-V2.pdf

Planetliner. (2025). *What Is Woven Landscape Fabric For Weed Control And Ground Stabilization?* China Geomembrane Geotextile Manufacturer. <https://planetliner.com/woven-landscape-fabric/>

- Projet BRF. (2006, juin). *Mise en œuvre de la technique du Bois Raméal Fragmenté (BRF) en agriculture wallonne*. [Rapport final de projet]. <http://andre.emmanuel.free.fr/brf/articles/rapportBRF.pdf>
- Qin, W., Hu, C., & Oenema, O. (2015). Soil mulching significantly enhances yields and water and nitrogen use efficiencies of maize and wheat: A meta-analysis. *Scientific Reports*, 5(16210). <https://doi.org/10.1038/srep16210>
- Rauber, L. R., Reinert, D. J., Gubiani, P. I., & Fachi, S. M. (2024). Steady infiltration rate : Relation to antecedent soil moisture, soil permeability, and measurement method and period. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 48, e0240007. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20240007>
- Regulation (EU) No 1305/2013, 347 OJ L 487 (2023). <http://data.europa.eu/eli/reg/2013/1305/2023-01-01>
- Riera, A., Antier, C., & Baret, P. (2020). *État des lieux et scénarios à horizon 2050 de la filière légumière en Région wallonne* (Sytra). Earth and Life Institute - UCLouvain. <https://sytra.be/fr/publication/filiere-legumiere-wallonie/>
- Ritchie, H. (2020, janvier 24). *You want to reduce the carbon footprint of your food? Focus on what you eat, not whether your food is local*. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/food-choice-vs-eating-local>
- Riviere, S., Conseil, M., Morel, K., de Lapparent, A., Berry, D., Hervouet, C., Herbeth, N., Arnaud-Dupont, A., Delestre, A.-C., & Mothes, S. (2024). A technical and economic approach to the viability of small-scale organic market gardening. *Agronomic Innovations*, 94, 61-76. <https://doi.org/10.17180/ciag-2024-Vol94-art05-GB>
- Roose, E. (1994). Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES): Part. 2. Chapitre 5 : L'érosion en nappe ou le stade initial de l'érosion hydrique - L'érodibilité des sols. *Bulletin pédologique de la FAO*, 70. <https://www.fao.org/4/t1765f/t1765f00.htm#Contents>
- Rynk, R., Kamp, M., Willson, G., Singley, M., Richard, T., Kolega, J., Gouin, F., Laliberty, L., Kay, D., Murphy, D., Hoitink, H., & Brinton, W. (1992). *On-Farm Composting Handbook* (NRAES-54). https://www.researchgate.net/publication/238283750_On-Farm_Composting_Handbook
- Sallets, P., & Wiaux, F. (2018, septembre). Les paillages végétaux en maraîchage. *Itinéraire bio*, 42, 45-47.
- Sarep. (2021, février 19). *White Clover*. Sustainable Agriculture Research & Education Program. White Clover. <https://sarep.ucdavis.edu/covercrop/whiteclover>
- Schrack, D., Coquil, X., Ortat, A., & Marc, B. (2009). Rémanence des pesticides dans les eaux issues de parcelles agricoles récemment converties à l'Agriculture Biologique. *Innovations Agronomiques*, 4, 259-268. <https://doi.org/10.17180/7kzk-x557>
- Shahid, S. A., Zaman, M., & Heng, L. (2018). Soil Salinity : Historical Perspectives and a World Overview of the Problem. In *Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques* (p. 43-53). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3_2
- Sintim, H. Y., Bandopadhyay, S., English, M. E., Bary, A. I., DeBruyn, J. M., Schaeffer, S. M., Miles, C. A., Reganold, J. P., & Flury, M. (2019). Impacts of biodegradable plastic mulches on soil health. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 273, 36-49. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.12.002>
- Sintim, H. Y., Bary, A. I., Hayes, D. G., Wadsworth, L. C., Anunciado, M. B., English, M. E., Bandopadhyay, S., Schaeffer, S. M., DeBruyn, J. M., Miles, C. A., Reganold, J. P., & Flury, M. (2020).

In situ degradation of biodegradable plastic mulch films in compost and agricultural soils. *Science of The Total Environment*, 727, 138668. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138668>

SPF SPSCAE. (2020, janvier 3). *Changement climatique—Conséquences sur l’agriculture*. SPF Santé publique, sécurité de la chaîne alimentaire et environnement. Climat.be. <https://climat.be/changements-climatiques/consequences/agriculture>

SPW. (2005, décembre 1). *Carte des Principaux Types de Sols de Wallonie à 1/250000*. Géoportail de la Wallonie. <https://geoportail.wallonie.be/catalogue/64bbc088-367c-485c-bd7c-d2d08baedf9d.html>

SPW. (2026). *Réduire l’artificialisation*. SPW Territoire, Logement, Patrimoine, Énergie. Le territoire en Wallonie. <https://territoire.wallonie.be/fr/page/reduire-lartificialisation>

SPW ARNE. (s. d.). *Pesticides*. SPW Agriculture, Ressources naturelles et Environnement. L’Environnement en Wallonie. Consulté <https://environnement.wallonie.be/home/gestion-environnementale/environnement-sante/risques-pour-la-sante/pesticides.html>

SPW ARNE. (2020, décembre 10). *Matière organique dans les sols agricoles*. Direction de l’état environnemental (DEE) - SPW Agriculture, Ressources naturelles et Environnement. Etat de l’environnement wallon. <https://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/SOLS 2.html>

SPW ARNE. (2025, septembre 5). *Eutrophisation des cours d’eau*. Direction de l’état environnemental (DEE) - SPW Agriculture, Ressources naturelles et Environnement. État de l’environnement wallon. <https://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/EAU 5.html>

SPW ARNE. (2026a). *Etat de l’Agriculture Wallonne 2024* (p. 596). Etat de l’Agriculture Wallonne - SPW Agriculture, Ressources naturelles et Environnement. https://etat-agriculture.wallonie.be/files/Etudes/Etat%20_Agriculture_2024.pdf

SPW ARNE. (2026b, février 26). *Pac 2023-2027—Description des interventions*. Agriculture en Wallonie - SPW Agriculture, Ressources naturelles et Environnement. Portail de l’agriculture wallonne. <https://agriculture.wallonie.be/home/aides/pac-2023-2027-description-des-interventions.html>

SPW ARNE. (2026c, mars 10). *Etat de l’Agriculture Wallonne—2024*. Direction de l’Analyse Economique Agricole, SPW Agriculture, Ressources Naturelles et Environnement. https://etat-agriculture.wallonie.be/files/Etudes/Etat%20_Agriculture_2024.pdf

SPW ARNE. (2026d, avril 7). *Conditionnalité renforcée (Nouveauté 2026)*. Agriculture en Wallonie - SPW Agriculture, Ressources naturelles et Environnement. Portail de l’agriculture wallonne. <https://agriculture.wallonie.be/home/aides/pac-2023-2027-description-des-interventions/conditionnalite-renforcee.html>

SPW-DGO3. (2018). *State of Environment Report—Wallonia 2017 (SOERW 2017)*. SPW Éditions. <https://etat.environnement.wallonie.be/contents/publications/state-of-environment-report---wallonia--2017.html>

Stapleton, J. J., Molinar, R. H., & Wilen, C. A. (2019, mai). *Soil Solarization for Gardens & Landscapes*. University of California, Agriculture and Natural Resources - Statewide Integrated Pest Management Program (UC IPM). Home and Landscape. <https://ipm.ucanr.edu/home-and-landscape/soil-solarization-for-gardens-landscapes/>

Statbel. (2023). *Exploitations agricoles et horticoles—Chiffres agricoles de 1980 à 2023*. <https://statbel.fgov.be/fr/themes/agriculture-peche/exploitations-agricoles-et-horticoles/plus>

Statbel. (2024, juillet 25). *Chiffres clés de l’agriculture belge 2024*. <https://statbel.fgov.be/fr/propos-de-statbel/que-faisons-nous/visualisations/chiffres-cles-de-lagriculture-belge>

- StatMate. (2026, juillet 31). *How to Report ANOVA Results in APA 7th Edition—Partial Eta Squared Effect Size, F-Statistic & Post-Hoc*. <https://statmate.org/blog/anova-apa-reporting>
- Sun, D., Li, H., Wang, E., He, W., Hao, W., Yan, C., Li, Y., Mei, X., Zhang, Y., Sun, Z., Jia, Z., Zhou, H., Fan, T., Zhang, X., Liu, Q., Wang, F., Zhang, C., Shen, J., Wang, Q., & Zhang, F. (2020). An overview of the use of plastic-film mulching in China to increase crop yield and water-use efficiency. *National Science Review*, 7(10), 1523-1526. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa146>
- Süß, A., Danner, M., Obster, C., Locherer, M., Hank, T., & Richter, K. (2015). *Measuring Leaf Chlorophyll Content with the Konica Minolta SPAD-502Plus* [GFZ Data Services - EnMAP Consortium]. GFZ Data Services. <https://doi.org/10.2312/ENMAP.2015.010>
- Tabuteau, G. (2024, février 8). *Mélilot : Plante médicinale, aromatique et engrais vert naturel*. Agryco. <https://www.agryco.com/blog/cultures/melilot>
- Tabuteau, G. (2025, avril 11). *Moha : Culture, rendement et utilisation*. Agryco. <https://www.agryco.com/blog/cultures/moha>
- Tiwari, E., & Sistla, S. (2024, octobre). Agricultural plastic pollution reduces soil function even under best management practices. *PNAS Nexus*, 3(10), pgae433. <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgae433>
- TOMST. (2026). *Software & Data—Lolly software*. <https://tomst.com/web/en/systems/tms/software/>
- Triple Performance. (s. d.). *Bois raméal fragmenté* [Fiches techniques]. Consulté [//wiki.tripleperformance.fr/wiki/Bois_ram%C3%A9al_fragment%C3%A9](http://wiki.tripleperformance.fr/wiki/Bois_ram%C3%A9al_fragment%C3%A9)
- UCLouvain. (s. d.). *Le maraîchage—Ferme de Lauzelle*. Université catholique de Louvain. Consulté <https://uclouvain.be/fr/facultes/agro/ferm/maraichage-ferme-de-lauzelle>
- USDA. (2014, juin 11). *Soil Infiltration* [Soil Health - Guides for Educators]. U.S. Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Soil%20Infiltration.pdf>
- van Oort, P. A. J., Timmermans, B. G. H., & van Swaaij, A. C. P. M. (2012). Why farmers' sowing dates hardly change when temperature rises. *European Journal of Agronomy*, 40, 102-111. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.02.005>
- Vanwelde, M. (2020, juin). *Bio, circuits-courts, local... Comment s'y retrouver?* [Analyse]. SAW-B Fédération d'économie sociale. <https://saw-b.be/publication/bio-circuits-courts-local-comment-sy-retrouver/>
- Vas, E. (2025). *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*. <https://thesis.dial.uclouvain.be/entities/masterthesis/834c2cc5-03ce-4bbc-8e5f-b0daef03a21>
- VLAM. (2025). *Groenteproductie 2015-2024*. VLAM - Vlaams Centrum voor Agro- en Visserijmarketing. <https://www.vlaanderen.be/vlam/sites/default/files/publications/2025-09/groenteproductie%202015-2024.pdf>
- Voisin, A.-S., Cellier, P., & Jeuffroy, M.-H. (2020). Fonctionnement de la symbiose fixatrice de N₂ des légumineuses à graines : Impacts agronomiques et environnementaux. *Innovations Agronomiques*, 43, 139-160. <https://doi.org/10.17180/3dfn-2r33>
- Wang, K., Flury, M., Sun, S., Cai, J., Zhang, A., Li, Q., & Jiang, R. (2025). In-field degradation of polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT) films, microplastic formation, and impacts on soil health. *Environmental Research*, 272, 121086. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121086>

- Wang, L., Guo, S., Ge, T., Mancl, K. M., Hijri, M., Iseri, Y., Lee, S.-J., Feng, S., Wang, L., Ji, H., Sun, D., Wei, Z., Zhang, Y., Lu, P., Zhang, X., Yang, W., He, C., Zhang, J., Zhao, Y., ... Gan, G. Y. (2026). Plastic mulch productivity-sustainability tradeoffs and pathways toward an eco-friendly framework : Insights from a global meta-analysis. *Nature Communications*, 17(1924). <https://doi.org/10.1038/s41467-026-68798-2>
- Wei, H., Zhang, K., Chai, N., Wang, Y., Li, Y., Yang, J., Harrison, M. T., Liu, K., Wan, P., Zhang, W., Sun, G., Li, Z., & Zhang, F. (2024). Exploring low-carbon mulching strategies for maize and wheat on-farm : Spatial responses, factors and mitigation potential. *Science of The Total Environment*, 906(167441). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167441>
- Wild, J., Kopecký, M., Macek, M., Šanda, M., Jankovec, J., & Haase, T. (2019). Climate at ecologically relevant scales : A new temperature and soil moisture logger for long-term microclimate measurement. *Agricultural and Forest Meteorology*, 268, 40-47. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.12.018>
- Winkel, J. (2023, février 1). *Alimentation : La guerre du local*. Alter Echos. Alter Echos n°508. <https://www.alterechos.be/alimentation-la-guerre-du-local>
- WMO. (2025, mars 19). *State of the Global Climate 2024*. World Meteorological Organization. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate/state-of-global-climate-2024>
- WMO. (2026, mars 23). *State of the Global Climate 2025*. World Meteorological Organization. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate/state-of-global-climate-2025>
- Wu, X., Liu, H., Li, X., Tian, Y., & Mahecha, M. D. (2017). Responses of Winter Wheat Yields to Warming-Mediated Vernalization Variations Across Temperate Europe. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 5. <https://doi.org/10.3389/fevo.2017.00126>
- Xu, Z., Zhang, L., Jiang, G., Ding, X., Guo, Y., & Tian, Y. (2025). Degradation of mulch films in different soils and its effects on soil properties and ecotoxicology. *Environmental Geochemistry and Health*, 47(9), 345. <https://doi.org/10.1007/s10653-025-02651-1>
- Yao, Y., Liu, J., Wang, Z., Wei, X., Zhu, H., Fu, W., & Shao, M. (2020). Responses of soil aggregate stability, erodibility and nutrient enrichment to simulated extreme heavy rainfall. *Science of The Total Environment*, 709. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136150>
- Zhang, H., Zhang, Z., Liu, Z., Lei, T., Zhang, J., Müller, C., Aloufi, A. S., Filimonenko, E., Kuzyakov, Y., & Jiang, R. (2024). Nitrogen transformations in plastic-film mulched soils. *Plant and Soil*, 501, 409-424. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06520-1>
- Zhang, K., Li, Y., Wei, H., Zhang, L., Li, F.-M., & Zhang, F. (2022). Conservation tillage or plastic film mulching ? A comprehensive global meta-analysis based on maize yield and nitrogen use efficiency. *Science of The Total Environment*, 831(154869). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154869>
- Zhang, M., Xue, Y., Jin, T., Zhang, K., Li, Z., Sun, C., Mi, Q., & Li, Q. (2022). Effect of Long-Term Biodegradable Film Mulch on Soil Physicochemical and Microbial Properties. *Toxics*, 10(3), 129. <https://doi.org/10.3390/toxics10030129>
- Zhou, C., Zhao, M., Chen, N., Du, Y., Huang, Y., Zhang, C., Wang, X., Xiao, Y., Ye, S., Huang, J., & Shi, Z. (2025). Tracking Intra-annual plasticulture covering cycles using dense Sentinel-2 time-series. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 144, 104906. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104906>
- Zimmermann, L., Dombrowski, A., Völker, C., & Wagner, M. (2020). Are bioplastics and plant-based materials safer than conventional plastics ? In vitro toxicity and chemical composition. *Environment International*, 145, 106066. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106066>

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>

Annexes

A.1. Récapitulatifs chronologiques des opérations culturales et des mesures

A.1.1. Opérations culturales 2025-2026

Date	Localisation	Résumé de l'opération
Du 20 au 25/10/25 et 28/10/25	Bloc Légume 2 (12 parcelles)	Récolte et pesée des fenouils sur toutes les parcelles du Bloc Lég. 2 sauf B7 et B8 (en oignons)
24/10/25	Bloc Lég.1 Col.C (C1-C5)	Récolte des dernières courges et arrachage des plants
28/10/25	B7 et B8 (Bloc Légume 2)	Récolte et pesée des oignons
31/10/25	Trèfle Bloc Lég. 2	Désherbage et préparation du sol (parcelles A6, B10 et C9) pour le semi du trèfle
24 et 31/10/25	Toute modalité trèfle	Essai de semis, non fructueux; germination ok mais développement insuffisant pour passer l'hiver
28/11 et 11/12/25	Toute modalité Mix	Désherbages, labour superficiel (5 à 8cm) et pose des bâches temporaires pour protéger le sol en hiver
11 et 16/12/25	B7 et B8 (Bloc Légume 2)	Fin de récolte des oignons, après premières gelées
3 et 04/03/26	Modalité Mix	Retrait des bâches temporaires (sauf parcelle C8)
9 et 10/03/26	Toute modalité Mix, sauf C8	Désherbage et faux semis (travail manuel du sol sur 5 à 8cm)
18/03/26	Toute modalité Plastic	Épandage du fumier sous les bâches, ± 2 brouettes/parcelle; légèrement incorporé au sol
30/03/26	C8 (Mix)	Débâchage et travail manuel du sol (5 à 8cm)
02/04/26	A9 (Miscanthus)	Désherbage et diminution du paillage à 10cm
03/04/26	Paillages organiques	Désherbage des parcelles A5,A6,A8,A9; B10; C2,C8
07/04/26	Bloc Lég. 1 et 2; Modalités Plastic, BRF et Miscanthus	Plantation des salades (tout B.L.1) et épinards (B.L.2 sauf A9, A10 et C6)
11 et 13/04/26	Toute modalité Trèfle	Préparation au semi : Désherbage et travail fin du sol sur 5 à 7cm) pour préparer le lit de semence
11 et 13/04/26	Toute modalité Trèfle	Semis du trèfle puis rappui du sol avec le dos d'un râteau et arrosage
16/04/26	Mix	Désherbage et faux semis (travail manuel du sol sur 5 à 8cm), sauf A7 et B6)

21/04/26	Toutes parcelles salades (Bloc Lég.1)	Remplacement de 85 salades mortes (humidité excessive, pourriture du collet, pression des limaces). Répartition : 3+15+6+18+4+6+10+9+4 salades, respectivement sur les parcelles A2,A3,A4,B1,B3,B4,C1,C3,C4
24/04/26	Mix (A7 et B6)	Préparation au semi : Désherbage et travail fin du sol sur 5 à 7cm) pour préparer le lit de semence
24/04/26	Mix (A7, B6, C5, C8)	Semi du Mix, rappui du sol avec le dos d'un râteau et arrosage
25/04/26	Toutes modalités cultivées (BRF, Plastic, Miscanthus)	Application localisée de granulés antilimaces bio. Forte pression de limaces, surtout en salades miscanthus et Plastic)
28/04/26	Toutes parcelles	Entretien et désherbage entre parcelles; débroussaillage du pourtour de toute la plateforme
28/04/26	Salades (Bloc Lég.1)	Re-remplacement de salades mortes avec les dernières restantes
29/04/26	A1 et B2 (Mix)	Semi du Mix, précédé de désherbage et préparation du sol (c.f. plus haut), suivi par rappui du sol et arrosage
du 2 au 08/05/26	Tous paillages vivants	Irrigations des jeunes paillages vivants (2 par BlocLég) car temps chaud et sec
Du 10/05 au 15/06/26	Epinards (Bloc Lég. 2)	Récolte des épinards en commençant par parcelles Plastic, plus précoces
Du 15/05 au 15/06/26	Salades (Bloc Lég. 1)	Récolte des salades en commençant par parcelles Plastic, plus précoces
07/06/26	Tous paillages vivants	Débroussaillage des paillages vivants ($\pm$ 5cm) avant les plantations. Résidus laissés sur le sol pour le couvrir et nourrir
09/06/26	Toutes modalités, sauf Plastic Bloc. Lég 2	Plantation courges et choux kale sur toutes les parcelles, sauf Plastic B.L.2 (courges), attente nouvelle bâche
09/06/26	Epinards (Bloc Lég. 2)	Arrachage des derniers épinards, montés en graine
19/06/26	Modalité Plastic Bloc Lég.2	Installation nouvelles bâches + plantation courges
08/07/26	Paillages vivants Bloc Lég 2	Débroussaillage des paillages vivants (que B.L.2 (courges), les choux kale étant trop serrés). Reprise de croissance ++ depuis le 07/06, concurrence pour la lumière trop forte sur les cultures
De mai à fin d'été	Toutes parcelles	Irrigation des parcelles, selon la météo. Système automatique (minuterie) installé à partir du 15/06 environ

A.2. Extrait méthodologique du rapport d'Eliot Vas

A.2.1. Dosage du carbone microbien :

« 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 fumer 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.

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 (C_{mic}) 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. » (Vas, 2025, p. 41-42)

A.3. Lien OneDrive vers les jeux de données :

[https://uclouvain-](https://uclouvain-my.sharepoint.com/:f/g/personal/guillaume_lobet_uclouvain_be/IgAWGs4MmtfnQL60OVe31RHPASiAIezLnShshEsC0GUzg3Q?e=SQ9rz0)

[my.sharepoint.com/:f/g/personal/guillaume_lobet_uclouvain_be/IgAWGs4MmtfnQL60OVe31RHPASiAIezLnShshEsC0GUzg3Q?e=SQ9rz0](https://uclouvain-my.sharepoint.com/:f/g/personal/guillaume_lobet_uclouvain_be/IgAWGs4MmtfnQL60OVe31RHPASiAIezLnShshEsC0GUzg3Q?e=SQ9rz0)

A.4. Parties écartées de l'état de l'art

A.4.1. Circuits de commercialisation

Numérotation initiale : 2.2, avant le changement climatique (alors numéroté 2.3)

Le cadrage portant sur l'agroécologie, l'arbitrage économique et la dépendance aux contraintes qui façonnent les activités maraîchères réalisé précédemment ne prend son sens qu'en étant replacé dans les systèmes de commercialisation utilisés. En effet, ceux-ci amènent eux aussi leur lot d'enjeux, opportunités et contraintes entre lesquels les maraîchers doivent faire des choix en permanence, tâchant d'identifier les compromis représentant les meilleures options possibles.

La section suivante s'inscrit dans cette optique. Nous y examinerons, sous le prisme des exploitations maraîchères sur petites et moyennes surfaces, les circuits courts et les ceintures alimentaires qui en sont l'une des traductions. Les exploitations de petite et moyenne surface jouent un rôle clé en matière de durabilité (socio-économique et environnementale), tout en faisant face à des contraintes techniques, organisationnelles et économiques spécifiques.

Nous laisserons de côté le maraîchage sur grande surface et les cultures légumières de plein champ, intégrées à des filières propres et qui mériteraient à elles seules des travaux entiers pour correctement en aborder la complexité.

Bien que les législations à différents niveaux restent encore lacunaires, le positionnement clé des exploitations MPS et MMS est de plus en plus reconnu dans les décisions politiques (Delmon, 2023). Au niveau européen, la Politique Agricole Commune (PAC) 2023-2027 prévoit notamment une redistribution des paiements directs en faveur des petites et moyennes fermes ainsi que les éco-régimes valorisant des pratiques agroécologiques. Elle soutient également les circuits courts, les organismes de producteurs et les schémas de qualité en tant que leviers pour renforcer la position des agriculteurs dans la chaîne alimentaire, sans oublier la stratégie Farm to Fork du Green Deal européen, qui appuie et renforce cette orientation (Conseil européen, 2025; EUR-Lex, 2021; European Evaluation Helpdesk for the CAP, 2026). Même si les MPS et MMS ne sont pas directement visées par ces mécanismes, elles correspondent majoritairement aux conditions d'accès et sont considérées comme visées explicitement par cette stratégie de la PAC.

Les États membres doivent retranscrire la PAC dans leurs plans nationaux. Ceci se traduit, par exemple en Wallonie, par le Plan stratégique wallon PAC 2023-2027 qui a introduit une aide spécifique pour le maraîchage diversifié bio (et en conversion) à hauteur de 4 000€/ha et pour un maximum de 3ha de maraîchage diversifié sur l'exploitation (Petel, 2023). Par ailleurs, cette aide exclut les fermes de plus de 10ha et celles non bio.

A.4.1.1. Les circuits courts

La définition exacte d'un circuit court, ou Chaîne d'approvisionnement courte (CAC), reste sujette à débat. Elle dépend notamment de la volonté de son/ses auteur(s) à adopter une vision plus ou moins systémique en y intégrant plus ou moins d'enjeux liés aux circuits de commercialisation.

Le niveau minimum unanimement retenu est le nombre réduit d'intermédiaires entre producteur et consommateur. Celui-ci doit être de 1 maximum et idéalement nul, en vente directe (Kneafsey, 2014). Trois critères supplémentaires sont presque systématiquement associés, formant un socle commun correspondant à la définition dans la PAC et la plupart des règlements (Kneafsey et al., 2013b; Regulation (EU) No 1305/2013, 2023). Premièrement, les produits doivent être identifiés et traçables à un producteur. Deuxièmement, la vente doit se faire dans une zone géographiquement proche du lieu de production pour renforcer la création de valeur des territoires, bien que le rayon considéré comme acceptable varie d'une région à l'autre. Troisièmement, la relation sociale doit être directe ou renforcée entre consommateurs et producteurs.

Bien que commun, ce socle est le minimum nécessaire, mais il ne fait que sous-entendre d'autres implications pourtant importantes, ce qui le rend non suffisant pour correctement évaluer l'intérêt des circuits courts. Au niveau social et économique, l'importance est également donnée à la rémunération juste du producteur, le maintien de la valeur créée sur ou proche du lieu de production, l'emploi rural, la cohésion sociale et l'implication des citoyens (Delmon, 2023; Galli & Brunori, 2013). Au niveau de la durabilité, il est recommandé de tenir compte de la cohérence entre circuits courts et pratiques de productions agroécologiques pour renforcer leur rôle dans la transition des systèmes alimentaires (Amrom & Sytra, 2023). Pour améliorer la lecture des consommateurs, il est nécessaire de renforcer les labels existants et/ou d'en créer des nouveaux plus identifiables pour en améliorer la clarté et la confiance (Vanwelde, 2020). Ceux-ci doivent mieux intégrer et combiner les différents critères précédemment détaillés pour limiter les dérives de « local washing » fréquemment observés dans la grande distribution.

Comme le montrent les équipes de Sytra (Amron et al., 2023, p. 5-21), le potentiel de développement des circuits courts existe en Belgique. L'enjeu actuel est donc davantage d'en identifier les freins correctement. Côté producteurs, on pointe notamment les lacunes structurelles en matière de transformation et de valorisation directe. Pour y remédier, le développement de dispositifs collectifs et de mutualisation des moyens est mis en avant afin de démocratiser le recours aux circuits courts. À l'autre bout de la (très courte) chaîne de valeur, côté consommateurs, bien que la majorité des Belges estiment que les circuits courts sont importants et que la demande est particulièrement forte pour les fruits et légumes, le prix reste un frein important pour étendre leur adoption. Il est donc nécessaire de repenser l'organisation économique globale du secteur, bien au-delà de la simple question du local.

A.4.1.2. Alimentation locale : idées reçues et réels bénéfices

Leurs différences étant parfois ténues, alimentation locale et circuits courts sont souvent confondus, utilisés comme des équivalents dans le débat public et l'imaginaire collectif (Castel, 2018; Winkel, 2023). Plus problématique encore, certaines études mélangent, délibérément ou non, ces deux concepts en considérant par exemple le faible nombre d'intermédiaires comme un paramètre caractérisant un système alimentaire local et non un circuit court, ce qui alimente encore plus la confusion générale (Comps et al., 2011). De ce fait, il paraît utile de rapidement faire le point sur ce qu'une alimentation locale implique réellement.

L'alimentation locale désigne un système alimentaire fondé avant tout sur la proximité et un ancrage territorial fort. Cette proximité couvre trois domaines : bien sûr la proximité géographique, qui constitue le socle des systèmes alimentaires locaux, mais aussi la proximité relationnelle (liens entre les acteurs de la chaîne alimentaire) et la proximité de valeurs (importance donnée à certains aspects des produits comme la traçabilité, l'origine, la qualité, ...) (Enthoven & Van den Broeck, 2021).

Comme pour les circuits courts, la définition de l'alimentation locale reste cependant floue et dépend du point de vue des auteurs, des pays et des objectifs recherchés. Aux États-Unis, par exemple, la proximité géographique est toute relative, puisqu'un produit est catégorisé comme local s'il est vendu à moins de 644km (400 miles) de son lieu de production ou dans l'État dans lequel il a été produit, ce qui peut encore augmenter la distance.

Dans l'Union européenne, la réglementation donne des lignes directrices sans fixer de cadre législatif précis imposé à l'ensemble des États membres. La charge de fixer et adopter une définition pour les systèmes alimentaires locaux revient à ces derniers. Il en résulte une forte hétérogénéité au sein de l'UE.

La Belgique ne dispose pas de réglementation précise sur l'alimentation locale ou les circuits alimentaires locaux au niveau fédéral. En Wallonie, l'alimentation locale est davantage considérée comme un objet de politique publique, mobilisée pour soutenir le développement territorial via la proximité, les débouchés locaux et la relocalisation (Gouvernement wallon, 2018). La Wallonie n'impose pas non plus de définition contraignante fondée sur la proximité géographique.

En conclusion, l'alimentation locale peut être considérée comme un des leviers favorisant les circuits courts et leurs bénéfices au sens large, tel que décrit dans la section précédente. Toutefois, il est à noter que l'alimentation locale ne rime pas automatiquement avec durabilité des systèmes alimentaires (FAO, 2023). En effet, la composition du régime alimentaire, notamment par les produits animaux, et la façon de produire un aliment ont généralement un plus grand impact environnemental que son transport, même lointain (De Bruyn, 2020; Ritchie, 2020).

A.4.1.3. La ceinture alimentaire

Au fil des discussions des deux sections précédentes sur les circuits courts et l'alimentation locale, plusieurs enjeux émergent et tendent à converger dans une même direction. Le concept de ceinture alimentaire est l'une des alternatives afin de conjuguer ces enjeux. Là encore, il n'y a pas de définition officielle claire ni d'activité précise à réaliser pour être considérée comme telle. En effet, la ceinture alimentaire est surtout à voir comme un projet de collaboration collectif, prenant ses racines au niveau de l'aspiration grandissante des citoyens et producteurs de reprendre la main sur leurs circuits d'approvisionnement alimentaires. Les formes exactes prises par ces associations collectives diffèrent donc en fonction des opportunités d'un territoire donné et des personnes à l'origine du mouvement.

A.4.1.3.1. La Ceinture Aliment-Terre Liégeoise (CATL)

L'émergence des ceintures alimentaires résulte, d'une part, d'une série de scandales sanitaires (vache folle (ESB), dioxine) poussant la population à repenser ses choix et exigences alimentaires et d'autre part du contexte agricole wallon montrant ses limites (Bousbaine, 2020). Dès les années 1990, alors que la demande pour des produits locaux traçables et de qualité augmentait, le système agricole wallon montrait d'importants signes de difficulté économique. On assistait à la diminution du nombre d'agriculteurs, au recul de l'élevage la spécialisation croissante des exploitations dont les productions perdaient en diversité. Couplée à une rupture des relations entre consommateurs et producteurs, cette situation a mené à l'émergence d'initiatives de Systèmes Agro-Alimentaires Alternatifs (généralement simplifié en S3A), dont les circuits courts alimentaires sont une des composantes élémentaires (Chiffolleau & Prevost, 2012).

Une multitude d'initiatives et de groupements citoyens ont ainsi progressivement vu le jour, construisant graduellement un terreau de réflexion favorable. Ces groupes avaient notamment pour objectif de préserver ou recréer le lien de confiance et de coopération entre les consommateurs citoyens et les producteurs en général, mais surtout périurbains. La plupart de ces groupements souffraient de lacunes structurelles cristallisées par un manque de coordination, enfermées dans une logique de niches déconnectées entre elles.

Face aux limites de ces initiatives dispersées, le besoin d'une structure fédératrice plus ambitieuse se faisait alors de plus en plus sentir. C'est dans ce contexte que le projet de ceinture alimentaire a émergé, nourri par le tissu associatif ancien et dynamique de Liège (CATL, 2026). L'ambition principale est de recréer du lien entre les acteurs d'un territoire, d'en améliorer la résilience et de fournir une alimentation de qualité produite localement, le tout *dans un esprit de coopération, de durabilité, d'équité* (Garbarczyk, 2017).

Depuis son lancement en 2013, la CATL a inspiré d'autres projets similaires dans d'autres agglomérations en Wallonie. À ce jour, cinq villes wallonnes possèdent une telle initiative opérationnelle, regroupées au sein du Collectif Créalim (Créalim, 2026). Six autres sont en projet à des stades plus ou moins avancés (Bauduin, 2021).

A.4.1.4. Quelle place pour le maraîchage ?

En raison de la nature de leur production, les maraîchers (surtout MPS et MMS) occupent une place centrale dans les ceintures alimentaires wallonnes. La filière des légumes frais est généralement plus encline à s'intégrer aux chaînes alimentaires locales promouvant autant les circuits courts que d'autres spéculations, notamment animales (Dupé et al., 2025). Les légumes frais sont très fréquents dans les circuits courts, en particulier parce qu'ils nécessitent peu (ou pas) de transformation et se prêtent bien à la vente directe sous diverses formes (paniers avec ou sans abonnements, marchés, magasins de producteurs, magasins de producteurs, ...). Par ailleurs, les petites et moyennes exploitations en circuits courts sont généralement plus diversifiées, ce qui leur permet de mieux remplir les attentes d'offre variée des consommateurs (Bousbaine, 2020). Le contact direct avec le consommateur final est aussi souvent plus aidé, ce qui renforce le lien, la collaboration et, *in fine*, la mise en place de vente directe. Il en résulte une surreprésentation du maraîchage dans les circuits courts et les ceintures alimentaires par rapport à d'autres productions (céréales, grandes cultures, produits animaux transformés).

Ces dernières sont en effet souvent plus dépendantes d'autres acteurs en amont et en aval. Principalement pour la viande, la chaîne de valeur compte généralement plus d'intervenants avant que le produit n'arrive au consommateur final. Bien sûr, ce n'est pas une généralité absolue, et de nombreux exemples de colis de viande en vente directe existent. Cependant, la littérature souligne que les contraintes sanitaires, réglementaires et logistiques sont généralement plus lourdes, particulièrement en ce qui concerne la transformation et la commercialisation. Ces étapes sont essentiellement assurées par une minorité d'acteurs plus imposants, en aval des éleveurs.

Bien qu'ils y soient surreprésentés, constituant le maillon de production le plus mobilisé des ceintures alimentaires et circuits courts, les maraîchers restent les acteurs les plus précaires du système qu'ils participent à alimenter (Dumont, 2017; Morel et al., 2017). Cette situation paradoxale tient aux importantes contraintes et charges de travail, particulièrement élevées en MPS et MMS. Les maraîchers peuvent être réticents à délaisser les circuits de vente traditionnels orientés vers la grande distribution leur assurant un débouché régulier. Intégrer une ceinture alimentaire et les circuits courts qui la composent implique un certain investissement humain et en temps pour la communication et l'entretien des relations caractéristiques des ceintures alimentaires. Cet investissement vient s'ajouter à la charge de travail déjà particulièrement lourde à laquelle sont confrontés les maraîchers.

L'impact sur le revenu et l'épanouissement professionnel

Le débat sur l'augmentation des revenus que l'intégration de circuits courts pourrait fournir aux producteurs et en particulier aux maraîchers reste largement ouvert. Plusieurs visions s'opposent, avec chacune leur postulat de départ qui impacte ensuite fortement l'analyse et les conclusions, dans un sens comme dans l'autre. Ayant trouvé plusieurs sources crédibles à des degrés divers défendant les deux positions, je ne m'estime pas en mesure de trancher avec suffisamment de certitude si un producteur, et en particulier un maraîcher, a systématiquement un intérêt financier à mettre en place un circuit court

ou à rejoindre une ceinture alimentaire. Globalement, la vente directe peut augmenter la part de valeur captée par le producteur car le nombre d'intermédiaires est fortement réduit voire supprimé. La valorisation du produit profite donc mieux à l'agriculteur (Chiaverina et al., 2023; Dupé et al., 2025). En revanche, les exploitations en circuits courts ne semblent pas générer systématiquement plus de revenus. Si la tendance semble plus favorable pour le maraîchage que pour d'autres filières, il faut cependant nuancer ce point par la surcharge de travail générée notamment à cause de la logistique et de la commercialisation. Le trop-plein de travail engendré doit être pris en compte dans la rémunération horaire du producteur, ce qui mitige le gain de revenu, voire l'annule parfois (Detre et al., 2011; Kneafsey et al., 2013a; Park et al., 2014). Par ailleurs, l'évolution du revenu dépend fortement du succès global de la ceinture alimentaire, conditionnée par les aides publiques et à l'adhésion suffisante des consommateurs du territoire. L'intérêt financier est loin d'être la seule motivation pour un producteur à rejoindre une ceinture alimentaire, mais il n'en reste pas moins décisif pour autant.

La littérature statue toutefois sur un meilleur épanouissement professionnel des agriculteurs utilisant des circuits courts et/ou rejoignant des initiatives comme les ceintures alimentaires (Azima & Mundler, 2022, 2023). Les aspects positifs les plus souvent cités sont le renforcement du lien avec la population, la meilleure reconnaissance de leur travail et un sentiment gratifiant de contribuer à la transition alimentaire (Brettin, 2024). En retrouvant un certain plaisir à exercer leur profession, le revenu des agriculteurs peut donc dans certains cas être plus facilement satisfaisant, même s'il n'a pas significativement augmenté. L'amélioration de la satisfaction professionnelle reste malgré tout conditionnée à la gestion de la charge de travail reposant sur l'agriculteur. Les ceintures alimentaires et les structures publiques peuvent contribuer à cet aspect grâce à la mise en place de stratégies d'accompagnement des producteurs.

En conclusion, les maraîchers peuvent être vus comme des indicateurs de la faisabilité du projet ainsi que des acteurs clés de la relocalisation. En effet, les maraîchers s'intègrent particulièrement bien aux objectifs des ceintures alimentaires parce qu'ils permettent de rapidement combler les « chaînons manquants » dans la production. De ce fait, la présence de maraîchers parmi les producteurs membres d'une ceinture alimentaire participe activement à rendre l'offre cette dernière plus crédible dès le départ. En revanche, leur présence ne suffit pas à elle seule. Une ceinture alimentaire fonctionnelle suppose une gouvernance (souvent participative), l'implication citoyenne d'acteurs à plusieurs autres niveaux que la production, des débouchés crédibles, un accès facilité à la terre et une bonne collaboration entre tous les acteurs impliqués.

Partie initialement intégrée entre les dimensions de la santé des sols et les couvertures de sol, ayant fait l'objet d'un résumé inclus en lieu et place.

A.4.1.5. L'état des sols en Europe et en Belgique

En Europe, on estime que minimum 63% des sols sont touchés par une forme de dégradation ou plus (Akca et al., 2024). Ce chiffre monte à 75% lorsqu'on considère uniquement les terres agricoles.

La plupart des sols non sains sont touchés simultanément par plusieurs formes de dégradation. Les plus récurrentes sont la réduction du COsol, la perte de biodiversité ainsi que le risque de dégradation des tourbières et de la ressource en eau potable. D'autres formes de dégradation, prépondérantes en zones agricoles, sont largement préoccupantes, comme la dégradation structurale des sols, l'érosion (surtout hydraulique), la compaction ou encore l'artificialisation et l'imperméabilisation des terres.

En comparaison aux autres États membres, la Belgique figure parmi les trois plus mauvais élèves par rapport à l'état global de ses sols (ESDAC, 2025). Outre la pollution importante de certains sites, héritée de leur passé industriel, la Belgique est particulièrement concernée par l'artificialisation des terres En

raison de sa densité de population élevée (Iweps, 2026; SPW-DGO3, 2018, p. 152). La Belgique figure également parmi les deux plus mauvais élèves d'UE en termes de fragmentation des habitats.

A.4.2. Origines de la dégradation des sols

Plus que toute autre cause, les activités humaines sont responsables de l'essentiel des dégradations des sols. Bien que ce fait puisse paraître trivial, il est essentiel à intégrer dans la construction des programmes de préservation des sols.

Sauf mention contraire, la plupart des explications de cette section sont issues du rapport *The state of soils in Europe* publié en 2024 par le Joint Research Centre, rattaché à la Commission européenne (Akca et al., 2024).

En Europe et dans la plupart des régions à hauts revenus, l'artificialisation des terres est majoritairement causée par l'expansion des zones urbaines, sans toutefois s'y limiter (SPW, 2026). L'imperméabilisation de larges zones qui en découle bloque très largement l'infiltration, ce qui accentue le ruissellement de l'eau qui se charge en polluants au passage. Il en résulte un risque accru d'inondations et la propagation des pollutions des milieux. Les implications socio-économiques sont également nombreuses et évoluent de la dégradation de qualité du cadre de vie à l'intensification des pressions sur le foncier et l'accessibilité des terres agricoles.

Nous l'avons vu, les pratiques agricoles non durables dégradent une multitude de fonctions du sol. Les conséquences en cascade sur les milieux en aval peuvent se produire très loin du lieu d'émission. Pour schématiser, nous pourrions regrouper les pratiques agricoles en quatre pôles principaux.

Le premier pôle englobe les dégradations de la structure des sols causées par la répétition du travail intensif du sol (labour, émiettement fin) et du passage d'engins agricoles lourds (en particulier lors des récoltes).

Les dommages sur la structure du sol prennent plusieurs formes : tassements, réduction de la porosité et de la stabilité des agrégats. Également la compaction, qui peut être particulièrement problématique lorsqu'elle dépasse 30 cm de profondeur où elle est difficilement récupérable. Or, certaines récoltes tardives, comme la betterave, se font avec des machines pouvant dépasser 10 tonnes par essieu. Le sol peut être affecté jusqu'à 60 cm de profondeur. On estime que la structure de 23 à 32% des surfaces agricoles européennes sont sévèrement dégradées par compaction (Akca et al., 2024; Destain, 2014).

Les conséquences touchent la majorité des indicateurs et fonctions physiques évoqués précédemment. Elles concernent, entre autres : la limitation de l'infiltration, de la rétention d'eau et de la teneur en MO ; et l'augmentation du ruissellement, de la sensibilité à l'érosion (pertes de sol et dommages sur les cultures en hausse), du risque d'inondation, du transport et de la diffusion de polluants. La vie du sol est également sévèrement impactée, ce qui réduit les capacités de régénération des sols et induit le risque d'auto-entretien de la tendance si les pratiques néfastes perdurent (Afshar et al., 2026; Michigan State University, 2002; Yao et al., 2020).

Le second pôle regroupe l'usage d'intrants, en particulier les engrais (azotés et phosphorés) et les pesticides. La diffusion, parfois très lointaine, des substances épandues et de leur métabolite dans l'ensemble des milieux (eau, air, sol) constitue la principale dégradation occasionnée. Elle est inévitable dès qu'un produit est épandu, mais explose en cas d'excès et de débordement des capacités d'assimilation des milieux. On estime que 74% des terres agricoles de l'UE reçoivent trop d'azote et sont concernées par des pertes par ruissellement, que 66% présentent des émissions d'ammoniac et que 18% sont concernées par la perte d'azote par lixiviation, en plus du ruissellement. Étant donné les très nombreuses formes de conséquences selon les milieux, il sera impossible d'être exhaustif.

Sur le cycle de l'eau, la diffusion des engrais par les eaux de ruissellement⁶ vers les milieux aquatiques terrestres et océaniques expose ces derniers à des risques d'eutrophisation, de dérèglement et de perte de biodiversité et peut contribuer à leur acidification lors de la dégradation des engrais (Akca et al., 2024; SPW ARNE, 2025). Du fait de leur caractère soluble, les engrais et leurs métabolites sont également lixiviés vers les eaux souterraines et engendrent un risque de pollution des ressources en eau potable (De Toffoli et al., 2010). Les pesticides suivent la même tendance mais la durée de leur rémanence dans les milieux très variables selon la substance peut accentuer les conséquences. Le caractère diffus de la pollution aux pesticides est souvent mis en avant pour souligner son omniprésence. En effet, ces contaminations, pouvant persister plusieurs décennies après l'arrêt de leur utilisation, se retrouvent jusque dans des zones protégées (Buron et al., 2026; Schrack et al., 2009; SPW ARNE, s. d.). Les potentielles conséquences sur la santé humaine et animale sont aussi nombreuses que complexes, allant des perturbations endocriniennes aux risques de cancers.

Par rapport à la ressource en sol, outre les pollutions, certaines formes d'engrais contiennent des sels solubles pouvant accentuer la salinisation et l'acidification des sols. En conséquence, la solubilité et la mobilité de certains éléments toxiques du sol peuvent augmenter, accentuant les risques de pollutions. La pression sur la biodiversité et les fonctions du sol s'accroît encore en raison de la sensibilité de certains groupes de la faune du sol (vers de terre et certaines bactéries notamment) à ces phénomènes.

Concernant le volet de l'air, les pertes par volatilisation (notamment sous forme de NH_3) et les dégagements azotés gazeux (surtout N_2O par dénitrification) accentuent la pollution atmosphérique en plus de représenter une perte économique. Le N_2O est un puissant GES et la dénitrification contribue à acidifier les sols. La formation d'aérosols et la pollution aux particules fines sont accentuées, représentant un risque pour la santé humaine et animale.

Le troisième pôle concerne la gestion de l'eau et l'irrigation. Selon les conditions pédoclimatiques, elles peuvent dégrader la dimension chimique du sol et du sous-sol par la salinisation et la pollution, ainsi que la dimension physique en favorisant l'érosion et en altérant la structure des sols et sous-sols. Lorsque l'évapotranspiration est supérieure aux apports par la pluie (typiquement les régions arides et semi-arides), l'irrigation est vitale pour l'agriculture. Or, les conditions pédologiques de ces zones sont aussi les plus sujettes à la salinisation, en particulier lorsque l'irrigation est excessive, mal gérée ou utilise une eau de mauvaise qualité (souvent par défaut). Au-delà de la dégradation de la fertilité pouvant mener à l'abandon des terres rendues non cultivables, la salinisation peut s'étendre aux sources d'eau potable et d'irrigation par boucle de rétroaction positive (Jorenush & Sepaskhah, 2003; Shahid et al., 2018).

En évacuant l'eau d'irrigation contaminée et en contrôlant le niveau des nappes perchées parfois chargées en sels, la mise en place d'un système de drainage suffisant peut limiter localement ces phénomènes (Greene et al., 2016). Toutefois, cette solution transfère la pollution en aval, où les dégradations peuvent se répéter si les aménagements manquent.

Le réchauffement climatique risque d'accroître et d'étendre la salinisation des sols, y compris dans des régions peu touchées jusqu'à présent, comme la moitié nord de l'Europe. De plus, la préservation de la ressource en eau ne se limite pas à ce phénomène. En effet, l'accroissement en durée et intensité des sécheresses agricoles estivales assèche les sols plus profondément. Or, la capacité d'un sol à fonctionner durablement en tant qu'écosystème vivant, partie intégrante de la santé de celui-ci, implique la présence d'un minimum d'humidité (Bünemann et al., 2018; Kabato et al., 2025). En l'absence d'adaptation

⁶ Lixiviation et lessivage sont souvent utilisés à tort comme des synonymes pour décrire le transport de matériaux par l'eau (Baize & Morlon, 2026). La lixiviation désigne spécifiquement le transport vertical dans le sol d'éléments solubles par infiltration. Le lessivage désigne spécifiquement le transport de particules solides non solubles (p.ex. les argiles). Je privilégierai donc des formulations se référant au ruissellement lorsque le transport d'éléments solubles reste en surface, lixiviation lorsqu'il s'agira de transport vertical (dans le sol) et lessivage lorsqu'il s'agira effectivement d'éléments non solubles.

anticipative suffisante, la dégradation du pouvoir filtrant des milieux et l'assèchement des zones humides, induites par la hausse des prélèvements liés aux activités humaines, pourrait compromettre qualitativement et quantitativement la ressource en eau d'un nombre croissant de régions du monde.

Enfin, le quatrième pôle, le plus transversal, regroupe des actions visant à favoriser la teneur MOsol, telles que la couverture végétale ou l'apport de matière organique extérieure. En soutenant la plupart des fonctions issues par les dimensions physique, biologique et chimique, la MOsol contribue à moduler plusieurs dégradations induites par les trois premiers pôles. Par exemple, la stabilité structurale d'un sol est généralement meilleure lorsqu'il est couvert et riche en MO. De ce fait, il résiste mieux à la battance et à l'érosion (pôle 1), les pertes par ruissellement ou lessivage diminuent en même temps que la structure structurale se renforce, tandis que l'efficacité des engrais augmente (pôle 2) et la capacité d'infiltration et de rétention d'eau s'améliore, soutenant l'efficacité de l'irrigation (pôle 3) (Celestina et al., 2019; Giuliani et al., 2024; S. Li et al., 2023).

En Belgique, on considère que les sols agricoles contenant moins de 20gC/kg présentent des risques accrus d'instabilité structurale pouvant accentuer l'érodibilité⁷ (SPW ARNE, 2020). En Wallonie, la teneur moyenne de COT est critique et en baisse, surtout dans les zones de grandes cultures en Région limoneuse. En 2019, 90% des sols wallons cultivés étaient sous le seuil de 20gC/kg.

Notons que le COT n'est pas le seul facteur déterminant dans la stabilité structurale des sols. D'autres, dont la texture et le pH en particulier, interviennent également. Si la texture est difficilement modifiable via des apports de MO, les effets de la plupart des autres facteurs sont favorisés par la MO du sol par le renforcement global des fonctions du sol (Yao et al., 2020).

Par ailleurs, la ressource en eau et la recharge des nappes semblent davantage dépendantes par les pratiques culturales et le contexte pédoclimatique local. Notamment, une destruction tardive du couvert de sol tend à en limiter les bénéfices, voire induire des impacts négatifs sur la disponibilité en eau pour les cultures. À l'inverse, la restitution au sol d'un couvert temporaire broyé en automne ou début d'hiver bénéficie généralement à la culture principale suivante en favorisant de meilleures conditions de structure, de disponibilité en eau, de MOsol et d'activité biologique (Blanchy et al., 2023; Meyer et al., 2020).

A.4.2.1. Le changement climatique, un catalyseur

La résilience des sols, pourtant essentielle au maintien de leurs fonctions, est sévèrement entamée par les dégradations causées par les activités humaines, telles que décrites précédemment. Dans ce contexte, le changement climatique représente un facteur d'accentuation des faiblesses du sol, plutôt qu'une cause à part entière.

Notamment, la MOsol est exposée par plusieurs formes de dégradations alors qu'elle joue un rôle central dans le fonctionnement des sols décrits plus tôt. L'augmentation de la température favorise la décomposition de la MO et la minéralisation, ce qui participe à la diminution des stocks de MOsol.

La polarisation saisonnière des pluies concentre les précipitations lors de périodes où le sol est généralement moins couvert (automne et hiver principalement), exposant celui-ci à davantage d'érosion et donc de pertes de sol, de MO et de fertilité conséquentes (A. Jones et al., 2009). Toute l'année, l'augmentation de la fréquence des pluies les plus intenses fait courir le même type de risque, en plus d'accentuer les risques de dommages sur les cultures.

⁷ En géologie et en agronomie, l'érodibilité d'un sol désigne sa résistance aux dégradations induites par la battance (impact des gouttes de pluies) et le ruissellement (arrachement de particules de sol). Elle diffère de l'érosivité, qui désigne la capacité d'un agent extérieur (généralement l'eau ou le vent) à provoquer de l'érosion, c'est-à-dire arracher, fragmenter et emporter une certaine quantité de sol (McCool & Williams, 2008; Roose, 1994).

Les sécheresses estivales, dont la fréquence, l'intensité et la durée augmentent, affectent de plus en plus profondément les sols, ce qui ajoute une pression sur l'ensemble des dimensions, à commencer par le cycle de l'eau, la vie du sol et la production alimentaire.

En résumé, le changement climatique accélère la dégradation des sols (Afshar et al., 2026). Les conséquences en cascades sur l'ensemble des écosystèmes et fonctions des sols sont nombreuses et incroyablement interconnectées. Toutefois, certains changements profonds dans les pratiques agricoles peuvent contribuer à limiter les impacts.

Au-delà des fonctions déjà abordées, les sols sont capables de se comporter comme des puits de carbone. Or, ce potentiel est largement dégradé et sous-exploité, en particulier dans les sols agricoles. Certaines initiatives, encore timides et/ou difficiles à généraliser à grande échelle, visent à mobiliser cet effet.

L'avenir du secteur agricole dépendra de la résilience des agroécosystèmes, dont la résilience de ses sols avant tout. La résilience d'un système permet d'amortir une crise et de disposer des ressources nécessaires pour redémarrer. En revanche, la résilience ne se réalise pas au moment de la crise. Elle doit être anticipée en amont.

Rappelons que la situation actuelle impose une évolution profonde et urgente de nos modèles de production, transformation et consommation à tous les niveaux. Les changements requis ne se feront pas sans l'implication et la coordination de l'ensemble des acteurs, du citoyen consommateur au producteur, ni sans une volonté politique forte et le soutien aux agriculteurs (Cerac, 2025a). L'Europe semble progressivement intégrer cette nécessité en intégrant à la PAC 2023-2027 plusieurs mécanismes incitatifs ou contraignants (SPW ARNE, 2026b, 2026d). Citons l'exemple des Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales (BCAE) ajoutées aux règles conditionnant l'accès aux aides. Celles-ci visent à renforcer la durabilité des pratiques en mettant l'accent sur la préservation des sols et de leur structure, du cycle de l'eau et de la biodiversité (notamment des oiseaux). Cette volonté s'illustre (en simplifiant) par le maintien des prairies permanentes et l'interdiction de convertir ou labourer les prairies permanentes sensibles catégorisées Natura2000, la protection des zones humides et tourbières, une couverture minimale des sols (instauration de zones tampons avec couverture le long des cours d'eau, couvertures minimales du parcellaire en périodes et zones sensibles), l'amélioration du travail du sol, la rotation et diversification des cultures et enfin l'interdiction de la taille des haies et arbres en période de nidification.

Étude de l'impact des différents types de paillage sur la santé des sols, le développement des légumes et la gestion des adventices dans un contexte de maraîchage biologique sur petite surface

Pierre-André Peters-Dickie

Dans un contexte marqué par le changement climatique et la nécessité de réduire les impacts environnementaux de l'agriculture, le paillage constitue une pratique importante en maraîchage biologique. Il limite l'évaporation, protège la structure du sol et optimise l'utilisation de l'eau. Cependant, l'usage des bâches plastiques soulève des préoccupations liées à leur caractère non biodégradable. Les paillages organiques, vivants ou non-vivants, apparaissent comme des alternatives intéressantes pour le maraîchage petite surface. Ce mémoire compare cinq modalités de paillage afin d'évaluer leurs effets sur la santé des sols, le développement des légumes et la gestion des adventices, dans le cadre de la deuxième année d'un essai de longue durée mené aux Fermes universitaires de l'UCLouvain à Lauzelle.

Les résultats montrent que les effets des paillages varient en fonction des indicateurs étudiés. En début de saison, le BRF présente la meilleure structure du sol. Le Miscanthus est associé à une humidité excessive et à des signes d'engorgement, ayant probablement contribué à la mortalité de plusieurs salades. La bâche plastique favorise un réchauffement et un ressuyage plus rapides du sol au printemps. Elle permet aussi le meilleur développement des épinards et des salades, qui présentent une biomasse commercialisable nettement supérieure à celle des cultures implantées sur BRF et Miscanthus. Cependant, ces résultats s'accompagnent de signes de faim d'azote sur les paillages organiques morts, particulièrement sous Miscanthus, malgré l'absence d'effets chimiques clairement significatifs sur l'azote du sol.

Les indicateurs biologiques mettent en évidence les bénéfices des paillages organiques. Le BRF et le Miscanthus favorisent davantage les populations de lombrics que les modalités de sol nu. De même, la biomasse microbienne est significativement plus élevée sous BRF que sous bâche plastique, ce qui souligne l'importance des apports de matière organique en surface pour soutenir l'activité biologique du sol.

Les paillages vivants, à savoir le mix et le trèfle, favorisent les taux d'infiltration les plus élevés, probablement grâce à leur système racinaire. Ils réduisent néanmoins l'humidité du sol par évapotranspiration et peuvent ainsi entrer en compétition avec les cultures pour l'accès à l'eau, surtout durant les périodes chaudes et sèches. Enfin, les différences de gestion des parcelles ne permettent pas de conclure précisément sur leur effet concernant les adventices.

Dans les conditions de l'essai, la bâche plastique demeure donc la modalité la plus productive à court terme. Les paillages organiques et vivants présentent toutefois des avantages importants pour la structure, l'activité biologique et le fonctionnement hydrologique du sol. La poursuite de l'expérience sera nécessaire afin de confirmer ces tendances et d'évaluer les effets à plus long terme sur la fertilité et la durabilité du système maraîcher.