

Étude de l'impact de l'application de produits de biocontrôle sur les maladies fongiques du froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.)

Auteur : Lamarche, Alexandre

Promoteur(s) : Dumont, Benjamin

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences agronomiques, à finalité spécialisée

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/24272>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

ÉTUDE DE L'IMPACT DE L'APPLICATION DE PRODUITS DE BIOCONTRÔLE SUR LES MALADIES FONGIQUES DU FROMENT D'HIVER (*TRITICUM AESTIVUM L.*)

LAMARCHE ALEXANDRE

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER
BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2024 - 2025

PROMOTEUR : Pr. Benjamin DUMONT

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique¹ de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

¹ Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par les promoteurs·trices membres du personnel enseignant de GxABT.

ÉTUDE DE L'IMPACT DE L'APPLICATION DE PRODUITS DE BIOCONTRÔLE SUR LES MALADIES FONGIQUES DU FROMENT D'HIVER (*TRITICUM AESTIVUM L.*)

LAMARCHE ALEXANDRE

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER
BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2024 - 2025

PROMOTEUR : Pr. Benjamin DUMONT

Remerciements

Avant toute chose, je souhaite remercier chaleureusement mon promoteur, Monsieur Benjamin Dumont, sans qui ce travail de fin d'études n'aurait pas eu lieu. Merci de la confiance qu'il m'a accordée, de son accompagnement rigoureux ainsi que de ses nombreuses remarques constructives qui m'ont été d'une grande aide tout au long de l'année.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance à l'équipe du CePiCOP (Centre Pilote Céréales et Oléo-Protéagineux) pour leur accueil et la mise à disposition de leur local technique. Un remerciement plus particulier est adressé à Noémie Vannoppen, membre du CePiCOP pour son encadrement lors de mes prises de mesures. Merci d'avoir été autant disponible pour répondre à mes questions. En son absence, l'accomplissement de ces tâches aurait été plus ardues et complexes. Merci également aux techniciens d'avoir traité mes parcelles au moment opportun.

Je remercie ensuite Coline Crevits de m'avoir accompagné et supervisé lors de la réalisation de mon stage au département du Livre Blanc du CRAW, m'ayant notamment montré le fonctionnement des champs d'essais ainsi que tout ce qui les entoure. Merci pour tout ce qu'elle m'a appris.

De plus, une pensée va à mes colocataires pour l'aide apportée lors de mes prises de mesures, et plus particulièrement à Damien, sans qui, les longs moments de prises d'échantillons auraient été moins amusants.

Un grand merci à tous ceux qui ont fait partie de près ou de loin à ma vie gembloutoise. Je commencerai évidemment par remercier les meilleurs : mes colocataires du Kot'eau. Damien, Erwan, Gaëtan, Tobias, Yanis et la jolie Lola qui m'ont fait passer une dernière année aussi bibitive que riche en bêtises. Merci pour les multiples débats interminables et pour les soirées de Champions League. Je remercie également les copains du Daoust pour ces deux années passées à leur côté ainsi qu'à tous les autres pour les soirées gembloutoises. Sans oublier l'équipe Soft, qui m'a fait passer les deux dernières éditions des brouettes mémorables.

Enfin, je tiens à remercier ma famille de m'avoir dirigé vers ces belles études.

Résumé

Le blé (*Triticum aestivum* L.) est parmi les plantes les plus largement cultivées en Belgique et en Europe, se classant parmi les céréales les plus produites au niveau mondial. Il constitue une ressource essentielle dans de nombreux pays, notamment en raison de son rôle majeur dans de nombreux domaines tel que l'alimentation humaine et animale ou encore la production de bioéthanol. En Belgique, au cours de son cycle de croissance, le blé est exposé à plusieurs maladies fongiques, dont les maladies foliaires telles que la septoriose (*Zymoseptoria tritici*), la rouille jaune (*Puccinia striiformis*) et la rouille brune (*Puccinia triticina*). Afin de maintenir des rendements satisfaisants pour soutenir la demande mondiale, il est primordial de limiter le développement de ces maladies et leurs impacts sur la culture. Cependant, au vu des effets néfastes liés à l'utilisation des pesticides sur l'environnement et la santé humaine, il est devenu essentiel que ce secteur se transforme afin de mieux répondre aux attentes de la société et de faire face aux défis environnementaux.

Dans une optique de durabilité et de diminution des intrants issus d'une synthèse chimique, une piste intéressante consiste à substituer l'emploi de tels intrants par l'emploi d'agents de biocontrôle. L'objectif de l'utilisation des agents de biocontrôle reste de protéger les plantes, et dans le contexte plus particulier de la lutte contre les maladies fongiques, d'inhiber ou freiner le développement des agents pathogènes fongiques. A cette fin, la mise en œuvre d'agents de biocontrôle peut se faire par l'emploi de micro-organismes (e.g. bactéries, etc.) ou de substances naturelles (d'origine minérale, végétale, etc.).

Pour tester l'efficacité d'alternatives aux solutions conventionnelles, des essais en micro-parcelles ont été implantés à Lonzée, en Belgique. Neuf modalités de traitements fongiques ont été étudiées lors de la saison culturale 2024-2025. Ce travail s'est concentré sur un recours aux bactéries de type *Bacillus* - soit par application directe du *Bacillus*, soit celle de leurs lipopeptides pré-synthétisées - ainsi qu'à l'emploi de substances tels que le phosphonate et le souffre. Leurs effets sur le développement des trois principales maladies foliaires et celui de la culture ont été mesurés.

Les résultats montrent que les conditions climatiques de l'année ont permis de limiter la pression fongique et d'offrir des conditions de croissance intéressantes pour la culture. Cependant, des différences significatives de rendement ont été observées entre les traitements, les valeurs allant de 8 590 à 9 140 kg/ha. Plusieurs tendances se dégagent par ailleurs des résultats. Le second traitement chimique n'a procuré aucun avantage supplémentaire dans ce contexte de faible pression fongique. Bien que présentant des sévérités de pression maladie légèrement supérieures, certaines modalités de biocontrôle permettent d'assurer des niveaux de rendement satisfaisant. Parmi celles-ci, la modalité employant une combinaison de lipopeptides au stade 32 suivi d'un traitement chimique au stade 55 est apparue comme étant la plus adéquate dans le cadre d'une stratégie de protection intégrée. De plus, les traitements à base de lipopeptides semblent avoir favorisé un développement foliaire plus important et plus homogène en début de saison.

Mots-clés : biocontrôle, bio-pesticide, éliciteurs, froment, SDP, fongicide, PGPR, *Zymoseptoria tritici*, *Puccinia striiformis*, *Puccinia triticina*.

Abstract

Wheat (*Triticum aestivum* L.) is one of the most widely cultivated plants in Belgium and Europe, ranking among the most produced cereals worldwide. It is an essential resource in many countries, particularly due to its major role in many fields such as human and animal food or even bioethanol production. In Belgium, during its growth cycle, wheat is exposed to several fungal diseases, including leaf diseases such as septoria (*Zymoseptoria tritici*), yellow rust (*Puccinia striiformis*) and brown rust (*Puccinia triticina*). In order to maintain satisfactory yields to support global demand, it is essential to limit the development of these diseases and their impacts on culture. However, in view of the harmful effects related to the use of pesticides on the environment and human health, it has become essential that this sector be transformed in order to better meet society's expectations and face environmental challenges.

With a view to sustainability and reduction of inputs from chemical synthesis, an interesting approach is to replace the use of such inputs by the use of biocontrol agents. The objective of using biocontrol agents remains to protect plants, and in the more specific context of combating fungal diseases, to inhibit or slow down the development of fungal pathogens. To this end, the implementation of biocontrol agents can be done by using microorganisms (e.g. bacteria, etc.) or natural substances (of mineral, vegetable origin, etc.).

To test the effectiveness of alternatives to conventional solutions, micro-plot trials were implemented in Lonzée, Belgium. Nine fungal treatment modalities were studied during the 2024-2025 growing season. This work focused on the use of *Bacillus*-type bacteria - either by direct application of *Bacillus*, or that of their pre-synthesized lipopeptides - as well as the use of substances such as phosphonate and sulfur. Their effects on the development of the three main leaf diseases and that of the crop were measured.

The results show that the climatic conditions of the year made it possible to limit fungal pressure and offer interesting growth conditions for cultivation. However, significant differences in yield were observed between the treatments, with values ranging from 8,590 to 9,140 kg/ha. Several trends are also evident from the results. The second chemical treatment did not provide any additional advantage in this context of low fungal pressure. Although exhibiting slightly higher disease pressure severity, certain biocontrol modalities allow for satisfactory yield levels. Among these, the modality employing a combination of lipopeptides at stage 32 followed by a chemical treatment at stage 55 appeared to be the most appropriate as part of an integrated protection strategy. In addition, treatments based on lipopeptides seem to have favored a more significant and more homogeneous leaf development at the beginning of the season.

Keywords : biocontrol, biopesticide, elicitors, wheat, plant defence stimulation, fungicide, PGPR, *Zymoseptoria tritici*, *Puccinia striiformis*, *Puccinia triticina*.

Tables des matières

1. Introduction	1
2. Etat de l'art	2
2.1 Enjeux sociétaux.....	2
2.2 Le froment d'hiver.....	2
2.2.1 Perspectives de la filière du froment	2
2.2.2 Ecophysiologie	3
2.2.3 Stress du froment d'hiver	4
2.3 Principales maladies foliaires du froment en Belgique	6
2.3.1 La septoriose	6
2.3.2 La rouille jaune.....	7
2.3.3 La rouille brune	8
2.4 Lutte contre les maladies fongiques	9
2.4.1 Approche IPM	9
2.4.2 Lutte agronomique	9
2.4.3 Observations - Seuil	10
2.4.4 Lutte biologique, mécanique et physique.....	10
2.4.5 Lutte chimique.....	10
2.4.6 Définition de biocontrôle	10
2.5 Spécificités des agents de biocontrôle étudiés dans ce travail.....	13
2.5.1 Effet biologique.....	13
2.5.2 Effet physique	14
2.6 Implémentation du biocontrôle en lutte fongique au regard des interactions GEM.....	14
3. Objectifs	16
4. Matériel et méthodes	17
4.1 Site expérimental	17
4.2 Données météorologiques.....	18
4.3 Propriété de la variété utilisée	19
4.4 Dispositif expérimental.....	19
4.4.1 Disposition de l'essai	19
4.4.2 Itinéraire technique général	20
4.4.3 Itinéraire technique pour la lutte fongique	21
4.5 Mesures et Cotations de maladies	22
4.5.1 Échantillonnage au champ	22
4.5.2 Indice de surface foliaire (LAI).....	23

4.5.3 Prélèvement de biomasse	25
4.5.4 Evaluation du rendement et de ses composantes	25
4.5.5 Cotations des maladies fongiques	25
4.6 Analyse des données.....	27
4.6.1 Etude statistique de l'effet des traitements sur les sévérités maladies	27
4.6.2 Etude statistique de l'effet des traitements sur le développement de la plante	28
5. Résultats	30
5.1 Dynamique des maladies	30
5.1.1 Septoriose	31
5.1.2 Rouille jaune	35
5.1.3 Rouille brune	38
5.2 Impact des traitements fongiques sur le développement de la plante.....	41
5.2.1 Evolution du LAI	41
5.2.2 Biomasse	43
5.2.3 Rendements agronomiques	48
6. Discussion	50
6.1 Effet des traitements sur les sévérités maladies.....	50
6.1.1 Septoriose	50
6.1.2 Rouille jaune et Rouille brune.....	51
6.2 Effet des traitements sur le développement de la plante	52
6.2.1 Éco-physiologie.....	52
6.2.2 Rendement.....	53
7. Conclusion et perspectives	55
8. Bibliographie	56
9. Annexes	I

Liste des figures

Figure 1 : Echelle du développement phénologique du froment d'hiver (Syngenta, 2016).	4
Figure 2 : Périodes d'infection des différentes maladies fongiques selon le stade de culture du froment d'hiver (Livre Blanc Céréales, 2018).	6
Figure 3 : Septoriose sur les feuilles de froment d'hiver (Syngenta, 2025).	7
Figure 4 : Présence des symptômes de la rouille jaune sur les feuilles du blé d'hiver (Syngenta, 2025).	8
Figure 5 : Symptôme de la rouille brune sur le froment d'hiver (Livre Blanc Céréales, 2024c).	9
Figure 6: Triangle illustrant le concept d'Integrated Pest Management (Collier, 2023).	9
Figure 7 : Schéma illustrant les différentes réactions d'une plante simple (bleu) vis-à-vis d'une plante primée (rouge) (Martinez-Medina et al., 2016).	12
Figure 8 : Carte numérique des sols de Wallonie (WalOnMap, 2025).	17
Figure 9 : Diagramme ombrothermique de Gaussen lors de la saison 2024-2025 vis-à-vis des normales de 1991-2020.	18
Figure 10 : Schéma de la parcelle expérimentale (création excel).	20
Figure 11 : Schéma d'une micro-parcelle expérimentale incluant les bordures (création excel)..	20
Figure 12 : Image du prélèvement d'une ligne de semis sur une longueur de 50 cm pour la mesure du LAI (photo A. Lamarche, 2025).	24
Figure 13 : Image d'une feuille A4 contenant les feuilles étalées avant de calculer leur LAI (photo A. Lamarche, 2025).	24
Figure 14 : Visualisation du traitement d'image pour l'estimation d'un indice foliaire (LAI). A) Masque binaire appliqué à l'image d'entrée pour isoler les parties végétatives (blanc) du fond (noir). B) Carte de l'indice foliaire à partir de l'image brute, où les valeurs sont normalisées (-0.5 à +0.5).	24
Figure 15 : Images illustrant la prise de biomasse sur le terrain (photo A. Lamarche, 2025) .	25
Figure 16 : Variation temporelle de la sévérité moyenne de la septoriose sur le froment d'hiver sous différents régimes de traitements fongiques.	31
Figure 17 : Répartition de la sévérité moyenne de la septoriose par étages foliaires selon les différentes modalités (l'étage foliaire est précisé en haut).	33
Figure 18 : Variation temporelle de la sévérité moyenne de la rouille jaune sur le froment d'hiver sous différents régimes de traitements fongiques.	35
Figure 19 : Répartition de la sévérité moyenne de la rouille jaune par étages foliaires selon les différentes modalités (l'étage foliaire est précisé en haut).	37
Figure 20 : Variation temporelle de la sévérité moyenne de la rouille brune sur le froment d'hiver sous différents régimes de traitements fongiques.	38
Figure 21 : Répartition de la sévérité moyenne de la rouille brune par étages foliaires selon les différentes modalités (l'étage foliaire est précisé en haut).	40
Figure 22A : Boxplots des LAI totaux entre le témoin, la modalité chimique et la modalité LipoMyco. 22B : Boxplots des LAI des feuilles entre le témoin, la modalité chimique et la modalité LipoMyco. 22C : Boxplots des LAI des tiges entre le témoin, la modalité chimique et la modalité LipoMyco.	41
Figure 23A : Boxplots des LAI totaux entre le témoin, la modalité chimique et la modalité LipoMyco. 23B : Boxplots des LAI des feuilles entre le témoin, la modalité chimique et la	

modalité LipoMyco. 23C : Boxplots des LAI des tiges entre le témoin, la modalité chimique et la modalité LipoMyco.	42
Figure 24 : Dynamique de l'évolution de la biomasse des différents organes de la plante selon le stade BBCH. A) Biomasse totale. B) Biomasse des feuilles. C) Biomasse des tiges. D) Biomasse des épis.....	43
Figure 25: Boxplots illustrant la biomasse au stade Z30 selon les différentes modalités de traitement.....	44
Figure 26 : Boxplots illustrant la biomasse au stade Z32 selon les différentes modalités de traitement.....	45
Figure 27 : Boxplots illustrant la biomasse au stade Z39 selon les 9 modalités de traitement.	45
Figure 28 : Boxplots illustrant la biomasse au stade Z69 selon les 9 modalités de traitement.	46
Figure 29 : Boxplots illustrant la biomasse au stade Z89 selon les 9 modalités de traitement.	47
Figure 30 : Boxplots illustrant les rendements des 9 modalités de traitement.	48
Figure 31 : Boxplots illustrant les épis/m ² selon les 9 modalités de traitement.	49
Figure 32 : Boxplots illustrant les poids de 1000 grains selon les 9 modalités de traitement..	49

Liste des tables

Tableau 1 : Paramètres expérimentaux requis aux développements de la septoriose (Verreet et al. 2000).....	7
Tableau 2 : Paramètres expérimentaux nécessaires aux développements de la rouille jaune (Roelfs et al., 1992).	8
Tableau 3 : Paramètres expérimentaux nécessaires aux développements de la rouille brune (Roelfs et al., 1992).	8
Tableau 4 : Synthèse de la résistance de la variété KWS Keitum face aux quatre maladies fongiques principales (Livre Blanc Céréales, 2024e).	19
Tableau 5 : Itinéraire phytotechnique de la parcelle étudiée.	20
Tableau 6 : Représentation des 12 modalités de traitement de l'expérimentation	21
Tableau 7 : Récapitulatif des quantités de substances nécessaires pour la bouillie.	22
Tableau 8 : Synthèse des mesures prises.....	23
Tableau 9 : Liste des packages utilisés pour l'analyse statistique.	27
Tableau 10 : Comparaison de la sévérité moyenne de la septoriose selon diverses modalités de traitement.....	31
Tableau 11 : Comparaison de la sévérité moyenne de la rouille jaune selon diverses modalités de traitement.....	35
Tableau 12 : Comparaison de la sévérité moyenne de la rouille brune selon diverses modalités de traitement.....	39

Introduction

Le monde agricole d'aujourd'hui est confronté à plusieurs défis comme la stagnation des rendements, la réduction de superficie des terres agricoles, l'insécurité alimentaire ainsi que la croissance démographique (Popp *et al.*, 2013). D'après la FAO (Food and Agriculture Organization), la population mondiale pourrait arriver à plus de 9 milliards de personnes en 2050 (United Nations, 2017). Pour satisfaire cette augmentation future, des fertilisants chimiques et des traitements phytosanitaires sont plus que nécessaires afin d'assurer et d'intensifier la production agricole (Alori *et al.*, 2017). Néanmoins, face à la sensibilité grandissante des consommateurs concernant les répercussions de l'agriculture sur l'environnement et la santé humaine, ainsi que face aux règles européennes mises en place pour utiliser moins d'intrants chimiques, il devient impératif que l'agriculture évolue pour répondre aux attentes sociétales et relever les défis environnementaux actuels (Finocchiaro, 2024). Dans cette perspective d'une agriculture plus écologique, l'adoption des produits de biocontrôle apparaît comme une solution prometteuse.

Le froment d'hiver, plus connu sous le nom de *Triticum aestivum* L. (ARVALIS, 2017), est considéré comme la deuxième céréale la plus répandue (Igrejas & Branlard, 2020). Cette céréale est cependant soumise à de nombreuses contraintes biotiques et abiotiques pouvant impacter significativement son rendement comme, par exemple, les maladies fongiques (Platel, 2025). En région wallonne, la septoriose (*Zymoseptoria tritici*), la rouille jaune (*Puccinia striiformis*) et la rouille brune (*Puccinia triticina*) sont les trois maladies affectant fréquemment le blé d'hiver.

Face à cet enjeu, l'objectif de ce mémoire est d'examiner l'efficacité de plusieurs types de produits fongiques dont des produits de biocontrôle luttant contre les maladies fongiques du froment d'hiver. Si leur efficacité est validée, leur utilisation permettrait de diminuer les quantités de produits fongiques chimiques sur nos cultures et donc, d'adopter une agriculture plus durable pour notre société. Ainsi, la sévérité des trois maladies étudiées sera comparée suivant les modalités avec traitements chimiques, traitements de biocontrôles et traitements physiques. Une analyse des rendements suivant les diverses modalités sera également réalisée.

Etat de l'art

2.1 Enjeux sociétaux

L'un des grands challenges auquel le monde est confronté aujourd'hui est une insécurité alimentaire qui ne cesse d'augmenter, une disponibilité limitée en terres agricoles et une croissance démographique accrue (FAO, 2025b). En effet, les Nations unies annoncent plus de 9,8 milliards de personnes sur terre pour 2050, soit une augmentation de 28% (United Nations, 2017). Afin de nourrir cette population, la production alimentaire devrait alors augmenter de 70% (Popp *et al.*, 2013). Ceci pose un défi majeur pour maintenir les niveaux de production agricole nécessaires à satisfaire la demande alimentaire mondiale (United Nations, 2025). Sur base de cette hausse, il est impératif, à l'heure actuelle, de revoir ses habitudes afin de réduire l'impact sur l'environnement et donc, sur le climat. Bien que l'utilisation de produits phytosanitaires soit généralement nécessaire pour lutter contre les maladies foliaires, pouvant entraîner une perte de rendement (Alori *et al.*, 2017), ces produits chimiques peuvent avoir des finalités négatives en plus de toutes celles impactant l'environnement. Par exemple, certains d'entre eux possèdent une toxicité aiguë pour l'homme, voire même mortelle dans certains cas (Cherin *et al.*, 2012).

C'est dans ce contexte que de nombreuses lois et législations ont fait surface. Suite à la directive 2009/128/CE du Parlement européen établissant un cadre d'action communautaire pour parvenir à une utilisation durable des pesticides (Commission European, 2019) et encourager l'introduction de méthodes de substitution (SPW, 2024), l'Europe, dont la Belgique et la Wallonie, ont mis en place diverses mesures pour mettre en œuvre cette diminution de produits chimiques. De plus, l'Europe a appuyé la tendance à réduire l'utilisation des produits de protection des plantes par la stratégie "Farm to Fork", dont le but est de réduire à l'horizon 2030 notre empreinte « pesticides » de 50 %. Cela consiste, entre autres, à réduire de 50% l'utilisation de produits phytopharmaceutiques et leurs risques pour l'environnement mais aussi de réduire de 50% l'utilisation des pesticides les plus dangereux (Wesseler, 2022). D'un point de vue belge, le pays transpose la directive européenne via son plan NAPAN, le Plan d'Action National qui comprend les plans fédéral, flamand, bruxellois et wallon. La Wallonie, elle, a mis en place le PWRP 3 (PWRP 2023 - 2027), qui répond à l'objectif initial de l'Union Européenne (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023).

Toutes ces législations tendent à une utilisation plus réduite d'intrants et à une volonté de développer des pratiques agricoles plus durables. Dans cette optique, l'emploi de biocontrôle devient intéressant. D'autant plus que, sur le terrain, deux tiers des agriculteurs, qui n'ont pas encore adopté les solutions de biocontrôle, prévoient de les intégrer à leurs pratiques au cours des prochaines années (Syngenta, 2023a).

2.2 Le froment d'hiver

2.2.1 Perspectives de la filière du froment

Le froment d'hiver est une culture fortement répandue dans le monde. Il s'agit de la deuxième céréale la plus cultivée après le maïs (Igrejas & Branlard, 2020). En 2024, la production céréalière mondiale s'élevait à 841 millions de tonnes, ce qui représente le deuxième plus haut niveau de production jamais enregistré (FAO, 2025a). Cette culture ancestrale possède

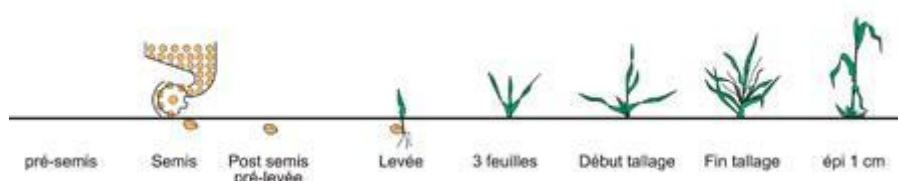
de nombreux atouts pour s'intégrer à l'agriculture traditionnelle partout dans le monde. Sa grande diversité génétique, avec plus de 25 000 variétés répertoriées (Feldman *et al.*, 1995), lui permet de s'adapter à une large gamme d'environnements tempérés et de résister aux stress biotiques et abiotiques (Shewry, 2009). Ce blé est la principale source de nourriture sur terre (Igrejas & Branlard, 2020).

Selon la FAO, l'Union Européenne en est la deuxième productrice mondiale avec plus de 128 millions de tonnes, mais est également la seconde consommatrice après la Chine (FAO, 2024). En effet, de par ses 27 États membres, l'Union Européenne dispose de 22 millions d'hectares dédiés à la culture du blé, représentant 10 % de la surface mondiale. Les rendements européens sont parmi les plus élevés dans le monde grâce à leurs pratiques culturales performantes et le climat. Ce climat tempéré et humide est propice à la culture du blé, car les événements climatiques extrêmes y sont moins fréquents que dans d'autres zones du globe, permettant ainsi une plus grande stabilité de production (Albis, 2023).

En Belgique, la superficie agricole est restée stable par rapport à 2023 (Statbel, 2024a). Toutefois, la production de froment d'hiver a diminué de 30% en 2024, notamment à cause des conditions climatiques humides de l'automne 2023, ayant entraîné une réduction importante des semis des cultures d'hiver. Malgré cette diminution, elle reste la céréale la plus cultivée sur le territoire belge (Statbel, 2024b). Concernant son rendement moyen, celui-ci s'approche des 9 tonnes par hectare, ce qui est largement supérieur aux rendements standards des autres continents (SPW, 2024).

2.2.2 Ecophysiologie

Le blé tendre, autrement appelé *Triticum aestivum* L. est une céréale, issue de la famille des Poaceae (ARVALIS, 2017). À une échelle plus large, cette céréale appartient au groupe des plantes à fleurs monocotylédones, également appelées angiospermes. L'évolution du blé est décrite sur l'échelle BBCH de *Zadoks et al.* (1974) (figure 1, annexe 1) allant de la germination du grain jusqu'à l'épiaison et la maturation des grains en passant par le tallage (Syngenta, 2016). Le développement du blé d'hiver se déroule en deux étapes principales : d'une part, la phase de croissance végétative est l'étape durant laquelle la plante développe différents organes (des feuilles, des tiges et des racines) ; d'autre part, la phase de reproduction, marquée par l'émergence de l'épi contenant des fleurs, qui donneront naissance aux grains. Le semis du froment d'hiver a lieu en automne afin que la plante développe ses thalles (pousses secondaires) au printemps (ARVALIS, 2017). Il faut savoir que la transition florale est déclenchée par les conditions hivernales de l'environnement. Ainsi, pour induire la phase reproductive, la plante a besoin d'une période d'exposition au froid et à des journées courtes, processus mieux connu sous le nom de vernalisation (Taulemesse, 2015).



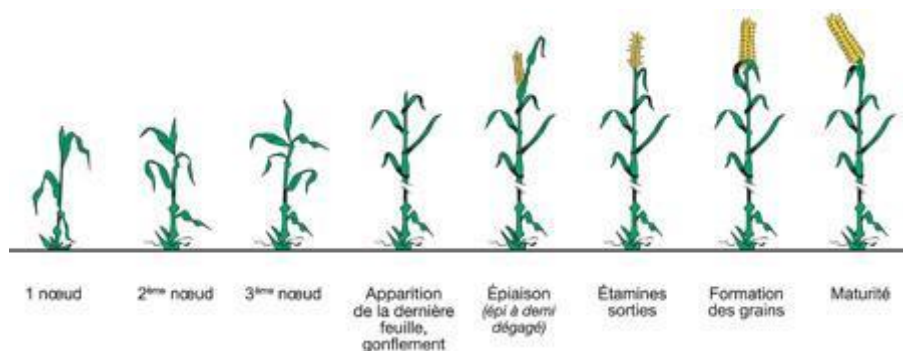


Figure 1 : Echelle du développement phénologique du froment d'hiver (Syngenta, 2016).

La nutrition azotée représente un point primordial dans le développement du froment (Dumont *et al.*, 2016). Avec l'eau, elle constitue les deux facteurs les plus limitants pour la croissance des grandes cultures (Liu *et al.*, 2017). En effet, passée la montaison, ces deux éléments deviennent essentiels et peuvent provoquer, en cas de manquement, des pertes significatives de rendement (Bodson & Falisse, 1996). D'une part, le froment d'hiver est vulnérable face à un stress hydrique, montrant une corrélation fortement négative avec la productivité du blé, notamment durant la phase végétative de son développement (Semenov & Shewry, 2011). D'autre part, concernant l'apport azoté, celui-ci est réalisé en 3 fertilisations, au moment du tallage (BBCH 23), du redressement (BBCH 30) et de la dernière feuille (BBCH 39). Cette troisième période est décisive puisqu'elle correspond à la période où plus des deux tiers de la matière sèche sont accumulés. Or, le rendement en grains est directement conditionné à l'intensité et à la durée de l'activité photosynthétique dans les organes verts de la plante. Ainsi, une carence en azote à ce stade pourrait limiter la productivité et affecter le rendement final (Lenoir *et al.*, 2023).

2.2.3 Stress du froment d'hiver

Tout au long de sa croissance, le blé peut être soumis à divers stress biotiques et abiotiques susceptibles de compromettre son développement et sa productivité (Shewry, 2009 ; Hyles *et al.*, 2020).

D'une part, le froment d'hiver est vulnérable à des stress abiotiques. Selon le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), si les émissions de gaz à effet de serre continuent à augmenter au rythme actuel, la température mondiale pourrait s'élever de 1,5°C à 2,7°C d'ici 2050 (Réseau Action Climat, 2018), ce qui aurait une influence directe sur l'augmentation des stress abiotiques telles que la chaleur et la sécheresse (Humintech, 2025). Une étude de Girousse *et al.* (2018) a mis en évidence une diminution significative du rendement en grain lors de fortes chaleurs pendant la phase reproductive du blé (Girousse *et al.*, 2018). Dans le cadre de stress abiotiques, l'utilisation de biofertilisants est assez répandue. Leur objectif principal est de stimuler le développement des plantes ainsi que de réduire le stress abiotique en aidant la plante à absorber les nutriments de manière plus efficace (Abd El-Daim *et al.*, 2019). Contrairement aux engrais et aux pesticides, les biostimulants n'agissent ni comme source directe de nutriments ni comme agents phytosanitaires. Leurs fonctionnements sont plutôt basés sur la modification de l'environnement physiologique de la plante, en activant ses mécanismes naturels pour améliorer sa croissance, sa résilience et l'assimilation des éléments nutritifs (Humintech, 2025). Par exemple, ils stimulent la physiologie de la plante en régulant l'activité, tout en favorisant la production de métabolites. Certains produits réduisent la transpiration foliaire, tandis que d'autres interfèrent directement avec les propriétés du sol, en

favorisant la décomposition de la matière organique (Biostimulants Agriculture, 2024). Il est important de signaler qu'un biostimulant diffère aussi d'un pesticide, car il ne possède pas d'action directe sur les pathogènes (Humintech, 2025).

D'autre part, le froment d'hiver peut également être vulnérable à des stress biotiques tels que les champignons, les bactéries, les virus et les nématodes. Ces agents pathogènes peuvent nuire au développement de la plante (Verly, 2019). Parmi les maladies les plus répandues et les plus préjudiciables à cette culture, celles d'origine fongique sont généralement les plus problématiques. Ainsi, les trois maladies fongiques les plus souvent observées sur le blé sont la **rouille jaune** (*Puccinia striiformis* Westend.), la **rouille brune** (*Puccinia triticina* Eriks.) et la **septoriose** (*Zymoseptoria tritici* Desm.) (Morais, 2015 ; Syngenta, 2025). D'autres maladies telles que la **fusariose** et l'**oïdium** peuvent également toucher le blé dans une moindre mesure. Si ces trois maladies principales ne sont pas traitées, elles impacteront directement le rendement, pouvant aller jusqu'à 4 tonnes par hectare (BASF, 2025). Par exemple, la septoriose est la maladie la plus susceptible de provoquer des pertes importantes (Bataille *et al.*, 2024). Présente dès le début de la culture, elle peut fragiliser considérablement les variétés les plus vulnérables, diminuant leurs rendements de 40 à 50% (Morais, 2015). La rouille jaune, quand elle survient, peut aussi engendrer des dégâts significatifs sur les variétés sensibles. Enfin, la rouille brune limite uniquement son effet sur le rendement suite à son apparition plus tardive dans le développement de la céréale (Livre Blanc Céréales, 2024a). C'est dans ce cadre de lutte contre les maladies fongiques qu'intervient le sujet de ce travail, l'application de produits de biocontrôle.

En plus des pathogènes fongiques, le froment d'hiver peut subir d'autres stress biotiques liés aux mauvaises herbes mais aussi aux insectes ravageurs comme les pucerons et les charançons (Sorahia *et al.*, 2025). En effet, les adventices peuvent représenter une perte de rendement conséquente puisque celles-ci sont en concurrence avec la culture lors du développement de cette dernière (Gyawali *et al.*, 2022). Néanmoins, la lutte intégrée mise en œuvre par les agriculteurs réduit ces deux phénomènes de stress de par des mesures prophylactiques efficaces et de par un traitement optimal une fois le seuil de tolérance atteint (approche IPM 2.4.1).

2.3 Principales maladies foliaires du froment en Belgique

Avant d'aborder en détail les trois maladies foliaires étudiées lors de cette expérimentation, voici une brève figure représentant les moments de développement de la culture où le froment d'hiver est touché par les différentes maladies (figure 2).

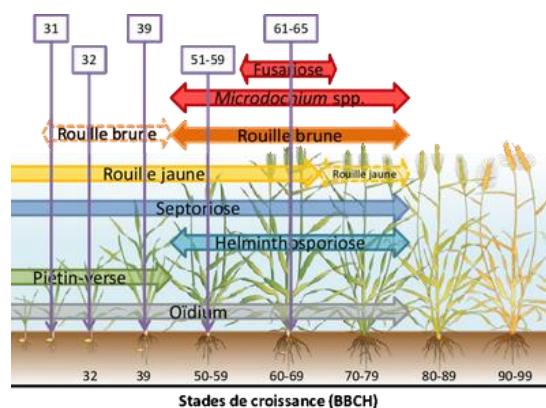


Figure 2 : Périodes d'infection des différentes maladies fongiques selon le stade de culture du froment d'hiver (Livre Blanc Céréales, 2018).

2.3.1 La septoriose

Cette maladie est reconnue comme celle causant le plus de dégâts en Wallonie. Elle est induite par deux champignons : *Stagonospora nodorum* et *Zymoseptoria tritici*, bien que la seconde espèce soit la plus dominante en Belgique (Livre Blanc Céréales, 2018).

Cette maladie se manifeste très tôt dans la saison, sur les premières feuilles du blé. Au printemps, plusieurs cycles de pycnidiospores se développent sur le feuillage, entraînant la progression de la maladie des parties inférieures vers les feuilles supérieures. Cette dispersion se réalise principalement par projections de gouttes de pluie, transportant les spores d'un niveau foliaire à l'autre. En été, les débris de feuilles contaminées par les pycnides deviennent le foyer de formation des structures reproductrices sexuées. Ces dernières, ainsi que les pycnidiospores persistants dans les résidus de culture, serviront de source d'infection pour les nouveaux semis de blé à l'automne (Slimane, 2010). Après l'infection initiale de la spore sur la feuille, une phase de latence, c'est-à-dire une phase sans symptôme, apparaît et peut aller jusqu'à 28 jours (Verreet *et al.*, 2000).

Lorsqu'une feuille est contaminée, les premiers signes se révèlent par de petites taches brunes. Celles localisées sur les bords du limbe ont souvent une forme asymétrique, tandis que celles situées au centre présentent des motifs plus réguliers, s'étendant longitudinalement le long des nervures. Progressivement, ces taches s'élargissent pour fusionner et former ainsi de larges zones irrégulières pouvant entraîner la nécrose partielle voire même totale de la feuille. En fin de saison, elles peuvent prendre une teinte gris clair et devenir visibles sur les deux faces du limbe (Livre Blanc Céréales, 2024b). C'est à ce stade que le champignon fructifie de manière asexuée sous forme de petits points noirs présents dans les tissus nécrosés, plus connus sous le nom de pycnides (Morais, 2015). La principale cause de dissémination de la septoriose vers les feuilles supérieures lors de la montaison est la reproduction asexuée via les pycnides. Cette diffusion est d'autant plus facilitée que, d'une part, l'inoculum est présent en masse près des feuilles supérieures non infectées et d'autre part, les conditions météorologiques (tableau 1) sont propices (Moreau & Maraite, 1999). Néanmoins, les paramètres climatiques, et plus

précisément la température a un impact moindre sur le développement de la septoriose que sur celui des rouilles (Savary *et al.*, 2016). De manière générale, l'eau est un élément clé en phase de germination lors des propagations de maladies foliaires, alors que le vent joue plutôt un rôle en phase de croissance et de sporulation (Roelfs *et al.*, 1992).

Tableau 1 : Paramètres expérimentaux requis aux développements de la septoriose (Verreet *et al.* 2000).

Stade de développement	Températures (min - max)	Température optimal
Germination	2-37 °C	22-24 °C
Croissance	18-25 °C	/
Sporulation	16-21 °C	/

La présence de la septoriose sur la culture est également influencée par la date de semis (Daamen & Stol, 1992). En effet, les froments semés le plus tôt dans la saison sont davantage propices à être atteints par la septoriose (figure 3) à la sortie de l'hiver, de par leur développement avancé ainsi que par le temps plus long que la maladie a eu pour s'implanter (Seutin *et al.*, 2011). Ce n'est que lorsque les trois dernières feuilles sous l'épi sont touchées que les pertes de rendement deviennent significatives (Moreau & Maraite, 1999 ; Slimane, 2010).



Figure 3 : Septoriose sur les feuilles de froment d'hiver (Syngenta, 2025).

2.3.2 La rouille jaune

La rouille jaune est une maladie fongique engendrée par le champignon *Puccinia striiformis* (Livre Blanc Céréales, 2024c). Une des particularités typiques de cette pathologie est son apparition par foyer lors de la montaison, en réponse à des paramètres spécifiques (à savoir un printemps frais, humide et venteux). Les symptômes apparaissent généralement en mars-avril mais peuvent émerger dès février si les conditions y sont déjà propices (tableau 2) (Livre Blanc Céréales, 2024c). Des pustules jaunes-oranges, disposées en stries, se manifestent sur les feuilles touchées. En effet, la maladie résiste l'hiver sous l'apparence de mycélium ou de spores pour ensuite se réactiver via des spores infectieuses au début du printemps. *Puccinia striiformis* tolère très bien le froid durant l'hiver. Une dissémination optimale des spores se produit lorsque la température atteint 10-15°C (ARVALIS, 2022). Toutefois, dès que la température excède les 25°C, la maladie n'évolue plus, provoquant alors simplement des nécroses sur la feuille (Livre Blanc Céréales, 2024c). Par ailleurs, une infection passe par une humidité relative supérieure à 90% (El Jarroudi *et al.*, 2017) alors qu'une humidité trop importante peut contraindre la dispersion aérienne des spores (Livre Blanc Céréales, 2024c ; Bahri, 2008).

Tableau 2 : Paramètres expérimentaux nécessaires aux développements de la rouille jaune (Roelfs et al., 1992).

Stade de développement	Températures (min - max)	Température optimal
Germination	0-23 °C	10-15 °C
Croissance	3-20 °C	12-15 °C
Sporulation	5-20 °C	8-13 °C



Figure 4 : Présence des symptômes de la rouille jaune sur les feuilles du blé d'hiver (Syngenta, 2025).

2.3.3 La rouille brune

La rouille brune, causée par le champignon *Puccinia triticina*, est la rouille la plus répandue dans le monde actuellement (Huerta-Espino *et al.*, 2011). Néanmoins, seul son cycle asexué est observé en Belgique (Bolton *et al.*, 2008). Une contamination de rouille brune est considérée comme dangereuse si le cycle asexué parvient à se dérouler plusieurs fois sur la même saison culturale (jusqu’à 4-5). Or, dans des conditions optimales, un cycle n’a besoin que d’une quinzaine de jours pour se réaliser (tableau 3) (Azzimonti, 2012). Elle s’implante généralement fin du mois de mai. Son introduction est plus facile sur les semis tardifs car ceux-ci sont moins avancés au printemps que les semis hâtifs. La maladie s’y implante donc plus facilement et peut y rester plus longtemps (Seutin *et al.*, 2011). Bien que cette rouille se développe tardivement, sa multiplication peut être extrêmement rapide, d’où l’importance de la traiter préventivement. En effet, le pathogène hiverne sous forme d’urédospores et requiert des températures plus hautes afin de se développer, nécessitant 15-25°C pour la germination de ces urédospores (ARVALIS, 2021). Du fait de sa dissémination par le vent, ses symptômes se répartissent de manière homogène dans le champ, contrairement à la rouille jaune qui apparaît plutôt par foyer. Ils sont caractérisés par des pustules brunes (urédospores), localisées uniquement sur les faces supérieures de la feuille, sans suivre spécifiquement les nervures (figure 5). La feuille inférieure reste donc intact de symptôme (Livre Blanc Céréales, 2024d).

Tableau 3 : Paramètres expérimentaux nécessaires aux développements de la rouille brune (Roelfs et al., 1992).

Stade de développement	Températures (min - max)	Température optimal
Germination	2-30 °C	20 °C
Croissance	2 - 35 °C	25 °C
Sporulation	10-35 °C	25 °C



Figure 5 : Symptôme de la rouille brune sur le froment d'hiver (Livre Blanc Céréales, 2024c).

2.4 Lutte contre les maladies fongiques

2.4.1 Approche IPM

L'Integrated Pest Management (IPM), autrement appelé la gestion intégrée des ravageurs, est une approche systémique qui repose sur la mise en œuvre synergique de différentes stratégies agronomiques, biologiques et chimiques (figure 6). Elle vise à contrôler le développement des agents pathogènes tout en limitant la dépendance aux pesticides. Cette démarche s'appuie sur l'analyse d'une multitude d'interactions entre la plante, l'environnement et les pathogènes, dans le but de prévoir des interventions au champ au moment le plus opportun. Bien que l'utilisation de produits chimiques soit parfois nécessaire pour lutter contre une épidémie, leur usage est envisagé en dernier recours. En effet, l'accent est mis sur les principes d'observation régulière, de prévention et d'adoption de méthodes culturales agro écologiques, permettant à réduire l'impact environnemental et à préserver les habitats naturels (Sorahia *et al.*, 2025).

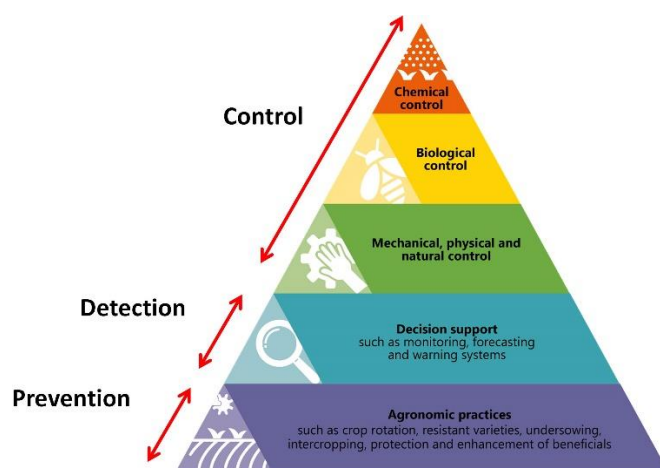


Figure 6: Triangle illustrant le concept d'Integrated Pest Management (Collier, 2023).

2.4.2 Lutte agronomique

De nombreuses stratégies de lutte active existent et comprennent un ensemble de mesures prophylactiques destinées à réduire l'incidence des maladies fongiques dans notre cas. Parmi celles-ci, la date de semis, la rotation culturale et la sélection variétale constituent

d'excellents leviers agronomiques afin de limiter les risques épidémiques (Maulenbay & Rsaliyev, 2024).

2.4.3 Observations - Seuil

Le suivi hebdomadaire des cultures et de ses agents pathogènes, essentiel en IPM, constitue un principe important. En effet, en quantifiant la pression des pathogènes et en mettant en place des seuils d'interventions, les risques d'épidémies peuvent être anticipés. Ces seuils sont définis comme une limite au-dessus de laquelle il devient opportun de recourir à une mesure de lutte en raison d'une densité de pathogènes trop sévères (Sorahia *et al.*, 2025). Grâce à ces seuils, l'application phytosanitaire n'est réalisée qu'en cas de réelle nécessité, évitant ainsi des applications systématiques. Une absence d'intervention au-delà des seuils pourrait toutefois entraîner une perte économique significative (Hansen *et al.*, 1994).

2.4.4 Lutte biologique, mécanique et physique

Une fois les seuils atteints, l'approche de gestion intégrée des cultures met en place des moyens de lutte biologique ou physique. Par exemple, la promotion de produits de biocontrôle, représente une alternative prometteuse aux traitements conventionnels. L'utilisation du biocontrôle doit se penser en interaction avec les pratiques culturales déjà mises en œuvre. Ensemble, ces stratégies de lutte rendent la culture plus résiliente face aux pathogènes, tout en réduisant l'apparition de résistances (Platel, 2025). Cela contribue donc à une gestion plus durable et respectueuse des agroécosystèmes.

2.4.5 Lutte chimique

La stratégie d'utiliser les produits chimiques pour lutter contre les agents pathogènes survient en dernier recours. L'utilisation traditionnelle de fongicides sur le froment par les agriculteurs peut s'effectuer en une ou deux interventions, selon l'intensité de la pression des maladies fongiques. En effet, en cas de variétés sensibles et de forte pression fongique, un double traitement est préférable. Néanmoins, ce double traitement induit un gain final de rendement, seulement dans le cas d'une année à pression maladie modérée voire forte en septoriose. Ce gain de rendement peut atteindre 500 kg/ha jusqu'à 1300 kg/ha avec certaines variétés (Seutin *et al.*, 2011).

2.4.6 Définition de biocontrôle

Le biocontrôle est considéré comme une alternative essentielle aux produits phytosanitaires classiques et constitue l'un des fondements de l'agroécologie (Hardy, 2023). Ce produit est défini comme étant "un ensemble de techniques de protection des plantes qui font appel à des agents et produits utilisant des mécanismes naturels", comportant un effet réduit sur la santé humaine et l'environnement (French Ministry of Agriculture, 2023). En utilisant ces produits d'origine naturelle, l'agriculteur privilégie une régulation équilibrée des populations d'agresseurs, au lieu de chercher à les éradiquer (INNOVAR, 2021). Ceux-ci sont classés en quatre grandes catégories :

- Les macro-organismes (insectes auxiliaires)
- Les micro-organismes (champignons et bactéries antagonistes)
- Les médiateurs chimiques (phéromones)
- Les substances naturelles (extraits de plantes, huiles, soufre, bicarbonate, phosphonates)

Dans le cadre de la lutte contre les maladies des plantes, les solutions les plus efficaces reposent notamment sur l'utilisation de micro-organismes à travers des biofongicides, mais aussi sur des substances naturelles telles que les éliciteurs stricts et les potentialisateurs (INNOVAR, 2021). Ces stratégies seront évaluées dans le cadre de cette expérimentation.

Les biofongicides sont des agents directs de lutte biologique contre les maladies fongiques des plantes et agissent directement sur le champignon (Platel, 2025). Ils se distinguent des fongicides chimiques par le fait qu'ils utilisent des organismes vivants ou des substances naturelles capables d'inhiber ou d'éliminer les agents pathogènes fongiques (Fravel, 2005). Ceux-ci sont classés en deux grandes catégories : les biofongicides microbiens, comprenant des micro-organismes vivants (bactéries, champignons), et les biofongicides non microbiens, basés sur des substances naturelles dérivées de plantes ou de minéraux possédant des propriétés antifongiques (Bourgeois, 2021 ; Universalis, 2025). Par exemple, certaines souches de *Bacillus subtilis* produisent des métabolites secondaires aux propriétés antifongiques telles que la surfactine et la mycosubtiline (Duitman *et al.*, 1999 ; Jacques, 2010). Concernant les champignons, le plus connu est le *Trichoderma harzianum* pour ses effets antagonistes (Kleifeld & Chet, 1992). En effet, de nombreuses preuves affirment que les champignons mycorhiziens arbusculaires sont capables de résister à de nombreuses maladies végétales (Whipps, 2004).

Les stimulateurs de défense des plantes, autrement appelé SDP ont un rôle indirect, visant à stimuler et renforcer les mécanismes de défense naturelle avant l'exposition à l'agent pathogène (Platel, 2025). D'ailleurs, les plantes ne comportent pas de système immunitaire adaptatif, seule une réponse immunitaire innée et leurs signaux moléculaires présents dans les tissus endommagés peuvent aider à combattre le pathogène (Choi & Klessig, 2016). Ces stimulateurs peuvent être différenciés en deux types : les éliciteurs et les potentialisateurs. Ils ont tous deux pour but de renforcer la défense des plantes mais n'agissent pas de la même manière.

Une plante, via ses récepteurs membranaires (Pattern Recognition Receptors, PRRs), peut percevoir un éliciteur tel qu'un PAMP (Pathogen-Associated Molecular Patterns) ou un DAMP (Damage-Associated Molecular Patterns) (Boutrot et Zipfel, 2017). Ces éliciteurs induisent la réponse de résistance associée aux PAMPs, par exemple (PAMP-triggered immunity, PTI). Cette première ligne de défense déclenche alors directement une cascade de signalisation cellulaire, impliquant notamment des MAP kinases (Yu *et al.*, 2017). Ces derniers sont considérés comme des enzymes importantes car ils activent la synthèse de métabolites secondaires, telles que les phytoalexines, ce qui va entraver la croissance des spores fongiques et restreindre la prolifération de l'agent pathogène (Bataille *et al.*, 2018).

En parallèle, les potentialisateurs mettent la plante en état d'alerte prolongée, sans induire de réaction de défense immédiate en l'absence de bioagresseurs, contrairement aux éliciteurs. Cependant, une fois le pathogène présent, ceux-ci permettent une réaction rapide et efficace. On les appelle les plantes « stimulées » ou « primées » (Clément, 2013 ; Jakab *et al.*, 2001). La plante est alors préparée à fournir des réponses plus efficaces à une future infection. Les potentialisateurs activent la signalisation intracellulaire, principalement en favorisant une activation plus rapide et simplifiée des MAP kinases. Celles-ci sont des enzymes essentielles dans la cascade intracellulaire de transmission des signaux (Conrath *et al.*, 2006). Les MAP kinases interviennent dans les deux types de stimulateurs mais de manière différente. D'un côté, elles participent directement à la réponse immunitaire alors que de l'autre côté, elles facilitent le priming. Ce mécanisme de mémorisation du signal peut également être transmis à la

descendance par des mécanismes de mémoire épigénétique (Conrath *et al.*, 2015). Ces régulations épigénétiques modulent l'expression génétique sans altérer la séquence d'ADN elle-même, en créant une forme de mémoire des stress rencontrés par la plante mère, et qui se transmet à la descendance (Gayon, 2016). Enfin, bien que cette stratégie implique un coût métabolique, les bénéfices liés à une réponse rapide lorsqu'il faut se défendre face à l'infection surpassent généralement le coût (figure 7) (Martinez-Medina *et al.*, 2016).

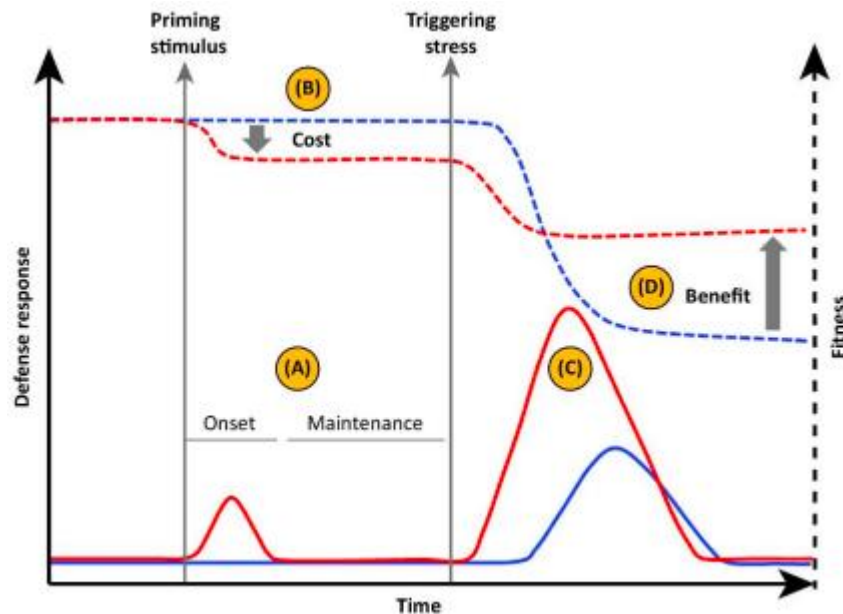


Figure 7 : Schéma illustrant les différentes réactions d'une plante simple (bleu) vis-à-vis d'une plante primée (rouge) (Martinez-Medina et al., 2016).

La caractéristique principale du biocontrôle réside dans son action directe sur les champignons pathogènes, par le biais de modes d'action multiples et non spécifiques. Grâce à ces mécanismes d'action distincts de ceux des pesticides conventionnels, ils peuvent être utilisés en rotation ou en complément des fongicides classiques, limitant ainsi l'émergence de résistances, notamment aux fongicides de synthèse tels que les benzimidazoles ou les dicarboximides (Fravel, 2005).

Néanmoins, l'efficacité des biocontrôles dépend fortement de leur usage préventif, idéalement avant l'apparition des premiers symptômes. En effet, ils doivent agir en amont afin de renforcer la réponse immunitaire de la plante avant l'arrivée de la maladie (Stephan *et al.*, 2005). Leur efficacité repose donc moins sur la dose appliquée que sur le moment d'application, en amont du cycle infectieux (Chambre régionale d'Agriculture Hauts-de-France, 2022). Toutefois, ces produits ne permettent pas de réparer les dommages causés par le pathogène, mais plutôt de ralentir ou stopper le développement de celui-ci dans le meilleur des cas (Bourgeois, 2021).

Leur efficacité est également conditionnée par la sensibilité variétale. Sur des variétés très sensibles ou en cas de forte pression, leur usage seul ne suffit pas à assurer une protection satisfaisante (Thibierge, 2023). Il est donc recommandé d'intervenir lors des stades clés du développement de la plante, moments où la plante est plus sensible à une infection (la germination, la floraison, le remplissage des grains) afin d'optimiser la réponse immunitaire (Fravel, 2005).

2.5 Spécificités des agents de biocontrôle étudiés dans ce travail

2.5.1 Effet biologique

Concernant l'effet biologique de l'expérience, deux substances biologiques sont utilisées : la Serenade® et la LipoMyco®. Ces deux substances sont des lipopeptides produits par des bactéries du genre *Bacillus* spp.

D'une part, la Serenade est produite par des bactéries du genre *Bacillus*, et plus précisément, la souche bactérienne *Bacillus subtilis* QST 713 (Lahlali *et al.*, 2013). Des études ont montré que la substance efficace n'est pas le micro-organisme *Bacillus subtilis* mais plutôt les métabolites produits par ce micro-organisme lui-même tels que les lipopeptides bioactifs (Stephan *et al.*, 2005 ; Falardeau *et al.*, 2013). Cela est typique des produits à base de micro-organismes vivants, qui agissent via la production, in situ, de composés antifongiques. Ces lipopeptides vont lutter contre les champignons par deux mécanismes complémentaires. D'une part, attaquer directement les pathogènes par antibiose. Cela consiste à produire, pour la bactérie, plusieurs lipopeptides bioactifs aux propriétés antifongiques dans le but d'éliminer d'autres micro-organismes (Lahlali *et al.*, 2013). D'autre part, la Serenade peut jouer le rôle d'éléciteurs des défenses naturelles des plantes. Ainsi, les métabolites produits par *Bacillus* stimulent la résistance systémique induite (ISR) en favorisant l'expression des gènes impliqués dans la défense des plantes. Cette activation déclenche des voies hormonales, comme par exemple celles associées à l'acide jasmonique et l'éthylène. Cela renforce la capacité des plantes à se défendre contre les infections fongiques et bactériennes (Lahlali *et al.*, 2013). Le fait de l'appliquer préventivement permet aux métabolites secondaires produits par *Bacillus subtilis* de coloniser la surface des plantes et d'activer les mécanismes de défense avant que les agents pathogènes ne s'établissent (Smartbiocontrol, s.d.).

D'autre part, la LipoMyco est un produit composé de micosubtiline et de surfactine, deux types de lipopeptides produits par la bactérie *Bacillus subtilis*. La micosubtiline est une molécule amphiphile ayant pour caractéristique d'inhiber la croissance des champignons et de perturber les parois cellulaires (Duitman *et al.*, 1999). La surfactine est un lipopeptide cyclique couramment employé en raison de ses propriétés tensioactives, ce qui lui permet de modifier les propriétés de surface des liquides. Ce biosurfactant est bénéfique en combinaison avec un fongicide car cette substance réduit la tension superficielle de la membrane plasmique du végétal afin qu'elle soit plus perméable aux fongicides, améliorant ainsi le traitement appliqué (Julkowska *et al.*, 2005). Cette substance possède un second apport positif pour la plante de par sa capacité à induire l'ISR, la résistance systémique induite des végétaux (Raaijmakers *et al.*, 2010). Ce mécanisme des défenses naturelles chez les plantes permet de produire des métabolites secondaires et des protéines de défense. Ainsi, la plante sait se défendre plus facilement. Des études ont prouvé qu'en présence de surfactine, la réponse immunitaire aux futures infections fongiques est augmentée (Ongena *et al.*, 2007 ; Jourdan *et al.*, 2009). En combinant la micosubtiline et la surfactine, l'effet fongique de la micosubtiline est présent tout en améliorant sa rémanence grâce à l'action du second produit, la surfactine. Ce mélange permet une meilleure couverture et une plus grande efficacité contre les maladies fongiques en froment d'hiver.

En résumé, la Serenade provient directement de la bactérie *Bacillus spp*, produisant alors des lipopeptides qui eux présentent des propriétés antifongiques. Contrairement à la Serenade, qui repose sur une souche bactérienne produisant des métabolites, la LipoMyco est directement une formulation à base de lipopeptides purifiés.

2.5.2 Effet physique

Concernant l'effet physique, deux produits sont utilisés dans cette expérimentation : le Vertipin® (3 L/ha) et le Pygmalion® (2 L/ha). D'une part, le Vertipin, est un produit formulé à base de soufre (700 g/l) et, d'autre part, le Pygmalion est constitué de phosphonates de potassium (755 g/kg). Le soufre est une substance d'origine minérale reconnue comme un agent de biocontrôle biologique (Livre Blanc Céréales, 2018). C'est la matière la plus utilisée dans le domaine des bio contrôles, représentant 80% de la part de marché de ceux-ci. Ces applications de soufre sont souvent intégrées à des stratégies de traitement combiné, notamment avec des fongicides, et sont surtout utilisées pour remplacer le premier traitement fongique conventionnel (Syngenta, 2023a). Ainsi, afin de lutter contre la septoriose de manière efficace, le soufre est combiné aux phosphonates. Concernant le produit Pygmalion, celui-ci est reconnu comme un produit fongique anti-septoriose performant, tout en étant respectueux de l'environnement (De Sangosse, 2021). Cette combinaison de Vertipin et de Pygmalion constitue une solution intéressante de par le fait qu'il associe deux substances, n'étant pas sujettes à une résistance connue et dont les modes d'actions sont complémentaires. En effet, le soufre est une substance qui agit par contact alors que le phosphonate est un composé qui agit comme stimulateur des défenses naturelles, en induisant une résistance systémique acquise (Syngenta. 2023b).

2.6 Implémentation du biocontrôle en lutte fongique au regard des interactions GEM

La réussite d'une stratégie de biocontrôle repose sur une interaction dynamique entre les facteurs qui influencent son phénotype. En effet, celui-ci est influencé par le triptyque G x E x M, autrement dit, le génotype, l'environnement ainsi que les moyens de gestion (Oyserman, *et al.*, 2021 ; Hawkesford & Riche, 2020).

Tout d'abord, le génotype représente les capacités biologiques de la plante, déterminant ainsi sa résistance potentielle aux agents pathogènes. La résistance variétale joue un rôle majeur afin de réduire l'efficacité de ces agents (Legrand *et al.*, 2015). Le froment possède un large panel de variétés. Dans notre cas, le choix d'une variété relativement tolérante aux maladies tout en maintenant un rendement potentiel élevé (voir section 4.3) permet d'avoir une mesure prophylactique positive sur le phénotype.

Ensuite, le rendement englobe tous les facteurs biotiques et abiotiques, incluant par la même occasion le type de sol et le climat (Huang *et al.*, 2000). Ceux-ci ont la capacité d'influencer la croissance de la culture (Mahmood *et al.*, 2022). Dans le cadre de la lutte contre les maladies fongiques, un climat peu pluvieux et peu humide enclenche une année à faible pression maladie et donc, une année avec des rendements élevés. Ces deux résultats sont généralement corrélés.

Enfin, les moyens de gestion comprennent l'ensemble des pratiques culturales telles que la date de semis, la fertilisation ainsi que l'utilisation de biocontrôles. Une conduite adaptée et intégrée de la culture peut renforcer l'effet d'un biocontrôle (Gloria, 2019). Par exemple, une étude de Hawkesford & Riche (2020), a montré que l'utilisation de pratiques culturales adaptées influence les interactions G x E x M et donc le phénotype (Hawkesford & Riche, 2020). Le type de biocontrôle, la méthode et le moment d'application sont des facteurs déterminants à ce niveau (Hyles *et al.*, 2020). Ces éléments conditionnent directement la réponse de la plante et la performance des agents de biocontrôle. De plus, d'autres paramètres tels que le nombre de passages et la dose appliquée fluctuent le rendement final. En effet, deux quintaux supplémentaires sont obtenus lorsqu'on passe d'une dose réduite (-50%) à une dose majorée (+50%) alors qu'on obtient trois quintaux supplémentaires quand on augmente de 2 à 3 passages de biocontrôle (Chambre régionale d'Agriculture Hauts-de-France, 2022). Par ailleurs, une autre étude a mis en avant le fait que combiner une dose de fongicide avec un produit de biocontrôle permettrait d'obtenir des résultats proches de la modalité avec une dose complète de fongicides, ce qui semble être une avancée majeure dans la réduction partielle des fongicides. En revanche, la modalité avec seulement des produits de biocontrôle donne des résultats insuffisants et donc peu concluants (INNOVAR, 2021). En termes d'efficacité, bien que ces produits naturels présentent un potentiel réel, leur performance est souvent inférieure et moins constante que celle des fongicides classiques. Il est donc important d'optimiser leur utilisation pour qu'ils puissent représenter une alternative viable (Chambre régionale d'Agriculture Hauts-de-France, 2022). Enfin, pour que l'emploi de biocontrôle soit justifié, leurs bénéfices agronomiques et environnementaux doivent également se refléter par des retombées économiques favorables pour l'agriculteur (Rajabi Hamedani *et al.*, 2020).

3. Objectifs

L'objectif principal de ce mémoire vise à explorer le potentiel et l'efficacité des produits de biocontrôle appliqués à la culture de froment d'hiver dans le cadre de la lutte contre les maladies fongiques. Ainsi, le moyen mis en œuvre pour cette étude est de suivre la dynamique des maladies fongiques. Trois maladies ont été sélectionnées comme étant les maladies les plus courantes en Belgique : la septoriose, la rouille jaune et la rouille brune.

Plus spécifiquement, ce travail repose sur la comparaison de l'efficacité de différentes modalités, certaines incluant des produits de biocontrôle afin de déterminer l'efficacité de chaque modalité sur la tolérance aux maladies précédemment citées. Chaque semaine, la sévérité des maladies sera mesurée pour chacune d'entre elles afin de permettre une comparaison dans le but de définir quelle est la meilleure alternative aux produits phytosanitaires des plantes. Une attention particulière est portée à l'évaluation des effets biologiques et physiques, appliqués séparément ou en synergie, afin de vérifier si leur combinaison peut offrir une efficacité comparable à celle des traitements chimiques standards. Combiner ces deux effets a pour but de démontrer qu'ils peuvent atteindre de bons rendements et une faible sévérité des maladies, et ce, dans la même proportion que les effets chimiques.

De plus, ce travail vise à prouver qu'un bon choix variétal permettrait de réduire le nombre d'interventions de fongicides, en limitant l'usage d'un seul traitement fongique à la place des deux traitements chimiques traditionnels. Une comparaison entre les zéro, un et deux traitements sera donc réalisée afin de justifier, ou non, leur utilisation.

Finalement, les critères agronomiques seront analysés pour chaque modalité, portant ainsi sur le rendement et ses éléments constitutifs, ainsi que sur l'évolution globale de la croissance de la plante tout au long de son cycle de développement végétatif. Cette approche a pour but de mettre en évidence quelle modalité engendre à la fois un rendement correct et une sévérité faible des maladies.

4. Matériel et méthodes

4.1 Site expérimental

L'étude s'est déroulée lors de la saison culturale 2024-2025, plus précisément au printemps 2025. L'expérimentation a été réalisée en partenariat avec le CePiCOP (Centre Pilote pour les Céréales et les Oligo-Protéagineux), avec INAGRO (le centre de recherche flamand), avec la société française d'expertise en végétal nommée Agrostation ainsi qu'avec l'école lilloise JUNIA ISA. Cette expérience a eu lieu sur une des parcelles d'essais consacrées au froment d'hiver de l'unité de phytotechnie de région tempérée de l'université Agro-Bio Tech à Gembloux. La parcelle est localisée à Lonzée, dans la commune de Gembloux, et ses coordonnées géographiques sont : [50° 32'17.4 N ; 4° 44'47.2 E]. Cet essai appartient à l'agriculteur de l'abbaye d'Argenton située à Lonzée, Monsieur Philippe Van Eyck. Ce dernier est à la tête d'une exploitation de polyculture élevage.

Située dans une région limoneuse, la parcelle étudiée comprend un sol à drainage naturel pauvre à très pauvre. Elle est caractérisée par des sols de type Aha et Ada1 (figure 8).

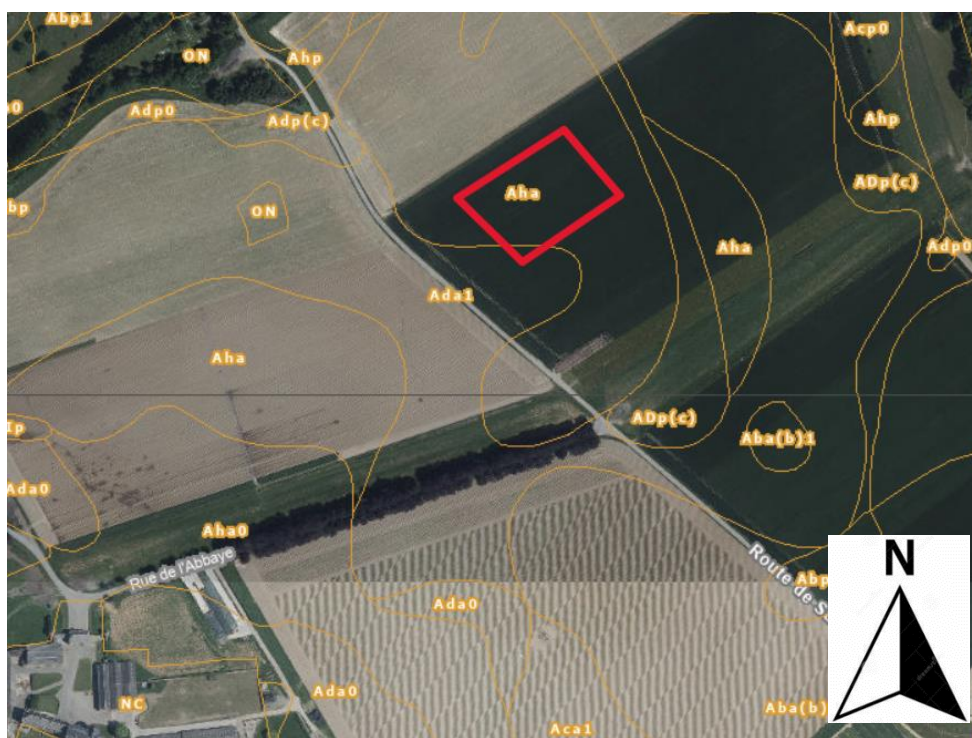


Figure 8 : Carte numérique des sols de Wallonie (WalOnMap, 2025). Aha représente un sol limoneux à drainage naturel assez pauvre alors que Ada1 constitue un sol limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait.

4.2 Données météorologiques

En règle générale, le climat de la Belgique est de type tempéré, engendrant un été relativement frais et humide ainsi qu'un hiver doux et pluvieux. De ce fait, les précipitations annuelles approchent des 840 mm alors que les températures moyennes annuelles sont autour de 11 degrés (IRM, 2025).

La précédente année culturale (2023-2024) a été marquée par des températures exceptionnellement élevées ainsi que par une saison de pluies record avec énormément de précipitations par rapport aux années précédentes. Ces conditions ont amené une saison riche en maladies en raison d'une grande humectation du feuillage.

La saison culturale actuelle (2024-2025), illustrée par la figure 9, a continué sur la lancée des fortes précipitations selon le Livre Blanc des Céréales annuel. L'année est marquée par un automne 2024 plus chaud et humide. En effet, les températures ont été plus hautes que la normale (+0.6°C) et les précipitations de pluies plus abondantes (+65.8 mm). L'hiver, quant à lui, a présenté des températures proches de la normale (2.8°C) tout en demeurant toujours aussi humide. Ces deux périodes furent marquées par une faible durée d'ensoleillement (Livre Blanc Céréales, 2024d). Par contre, le printemps 2025 fut très sec, chaud et peu humide, étant donc beaucoup moins propice aux maladies. Bien que les températures soient proches de la normale, les précipitations furent presque inexistantes durant les mois de mars, d'avril et de mai. De plus, le mois d'avril a fait face à plusieurs jours de chaleur (+1.9°C) (IRM, 2025).

Les informations météorologiques nécessaires proviennent du site PAMESEB et de l'IRM. Celles-ci sont collectées à partir de la station de Gembloux, la station de référence la plus proche de la parcelle expérimentale.

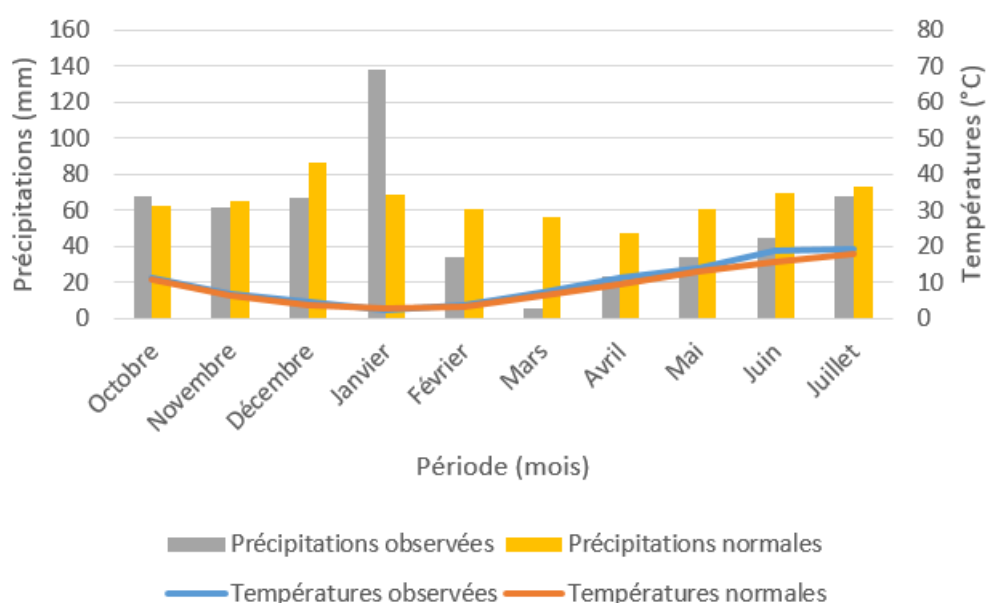


Figure 9 : Diagramme ombrothermique de Gaussen lors de la saison 2024-2025 vis-à-vis des normales de 1991-2020.

4.3 Propriété de la variété utilisée

Dans la lutte contre les maladies, le levier le plus efficace est le choix variétal (Legrand *et al.*, 2015). En effet, même si la variété n'est que très peu sensible aux maladies dans une année normale, cela permet de réduire toute une série de traitements fongiques, d'où l'importance d'un choix variétal rigoureux (Seutin *et al.*, 2011). Lors du semis, le choix de la variété s'est porté sur la KWS Keitum. Cette variété allemande fait partie des variétés rassemblées dans le groupe de surveillance renforcée, ce qui implique une protection renforcée à certains moments de la saison culturale. Tout d'abord, elle est définie à première vue comme ayant de très bons rendements en grain. En effet, ce rendement s'explique par un développement précoce en début de printemps, prolongeant ainsi la période de photosynthèse et son efficacité (Wiersum Plantbreeding, 2017). Selon les résultats du Livre Blanc des Céréales, cette variété présente une bonne résistance à la fusariose de l'épi, à l'oïdium, à la cécidomyie orange ainsi qu'aux rouilles jaunes. En revanche, la variété montre une sensibilité notable à la rouille brune et surtout à la septoriose (Livre Blanc céréales, 2024e). Ci-dessous, le tableau 4 ci-résume la tolérance de la variété KWS Keitum face aux trois maladies fongiques.

Tableau 4 : Synthèse de la résistance de la variété KWS Keitum face aux quatre maladies fongiques principales (Livre Blanc Céréales, 2024e). La cotation des maladies suit un chiffre allant de 1 à 9. Plus le chiffre est proche de 9, plus la variété est considérée comme tolérante.

<u>Sensibilité maladie</u>	<u>Cotations</u>
Septoriose	5,8
Rouille jaune	7,3
Rouille brune	6,1

4.4 Dispositif expérimental

4.4.1 Disposition de l'essai

Le dispositif expérimental est en bloc aléatoire complet à un facteur fixe, à savoir le type de traitement fongique utilisé. Un facteur aléatoire, le facteur bloc, est également pris en considération. Ainsi, les différentes modalités de traitement ont été attribuées de façon aléatoire à l'intérieur de chaque bloc. Cette méthodologie contribue à augmenter les effets observés des différents traitements tout en renforçant la robustesse statistique de l'expérimentation. Ce dispositif comprend 120 parcelles réparties entre deux blocs principaux. En effet, la division du bloc en deux permet d'avoir une partie destinée à l'évaluation des rendements alors qu'une seconde partie est destinée à la mesure de biomasse et à l'observation de maladies. De plus, chacun de ces deux blocs est divisé en cinq sous-blocs correspondant aux cinq répétitions présentes (figure 10). Chaque sous-bloc comprend en plus 12 micro-parcelles équivalentes aux 12 modalités de traitement différentes (tableau 6).

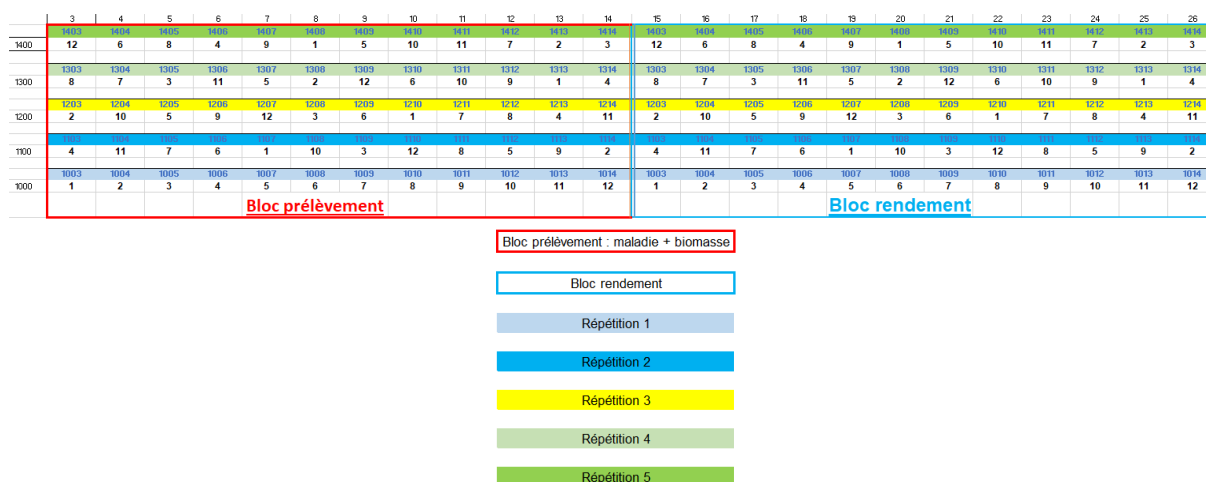


Figure 10 : Schéma de la parcelle expérimentale (création excel).

Les micro-parcelles observées pendant cette expérimentation sont représentées ci-dessous (figure 11).

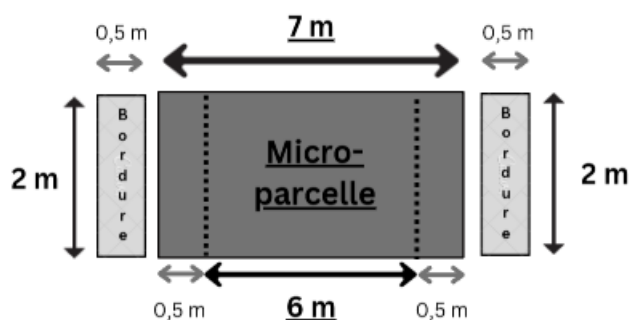


Figure 11 : Schéma d'une micro-parcelle expérimentale incluant les bordures (création excel). Elles mesurent 7 mètres de longueur et 2 mètres de largeur. À leurs extrémités, des bordures de 50 centimètres ont été aménagées pour limiter l'effet de bordure et prévenir toute contamination des parcelles lors de l'application des divers traitements fongiques. De plus, la longueur de 7 mètres comporte à chaque extrémité une zone spécifique de 50 cm appelée zone « morte ». Dans ces deux zones, aucun prélèvement ne sera réalisé. En d'autres mots, la longueur utile de chaque micro-parcelle ne fait plus que 6 mètres.

4.4.2 Itinéraire technique général

Concernant l'itinéraire technique de la parcelle, plusieurs interventions agricoles ont été réalisées pendant la saison culturale ; celles-ci sont détaillées dans le tableau ci-dessous (tableau 5). A souligner que le précédent cultural était des betteraves.

Tableau 5 : Itinéraire phytotechnique de la parcelle étudiée.

Opérations culturales		Précisions	Date	Stade de développement
Travail du sol	Labour + herse rotative		/	/
Semis	Densité = 300 grains/m ²		24-10-24	/
Fumure azotée	Fraction tallage 50 kg N/ha	---> N27 solide	14-03-25	BBCH 22
	Fraction redressement 50 kg N/ha	---> N39 liquide	16-04-25	BBCH 30
	Fraction dernière feuille 50 kg N/ha	---> N27 solide	09-05-25	BBCH 39
Désherbage	Sigma Star (0,2 kg/ha) + Biathlon Duo (70 g/ha) + Végétop (1 L/ha)		10-04-25	BBCH 22
Régulateur de croissance	Cycocel (1 L/ha)		11-04-25	BBCH 30
Fongicide	Voir 4.4.3 itinéraire technique pour la lutte fongique		07-05-25	BBCH 32
			14-05-25	BBCH 39
			02-06-25	BBCH 55
			12-06-25	BBCH 65
Récolte	Moisson		26-07-25	BBCH 89

4.4.3 Itinéraire technique pour la lutte fongique

Comme expliqué précédemment, l'expérimentation comprend 12 modalités de traitement (tableau 6).

Tableau 6 : Représentation des 12 modalités de traitement de l'expérimentation. Le protocole expérimental comprend la modalité « control » représentant une parcelle sans aucun traitement réalisé, deux modalités avec un traitement chimique, trois modalités avec effet biologique, deux modalités avec effet physique ainsi que quatre modalités d'effets croisés, c'est-à-dire mélangeant les effets biologiques avec les effets physiques ou chimiques.

Treatment	Nombre d'applications totales	BBCH Stage											
		32			32+3weeks / 39			55			55+3weeks / 65		
		Chem.	Phys.	Biol.	Chem.	Phys.	Biol.	Chem.	Phys.	Biol.	Chem.	Phys.	Biol.
01. Control	0												
02. Reference agriculteurs (T2) - Z32 : Simveris (1L) + Stavelto (1,5L) / Z55 : Univoq (1,5L)	2	X						X					
03. Reference agriculteurs (T1) - Z39 : Revystar Gold (1,5L) + Stavelto (1,5L)	1				X								
04. Biological effect - Serenade - 4 applications	4			X			X			X			X
05. Biological effect - LipoMyco - 4 applications	4			X			X			X			X
06. Biological effect - Fengycine - 4 applications	4						X			X			X
07. Physical effect - Vertipin + Pygmalion - 1 passage	1		X										
08. Physical effect - Vertipin + Pygmalion - 2 passages	2		X						X				
09. Crossed effect - Biol LipoMyco + Physique	3			X			X		X				
10. Crossed effect - Biol Fengycine + Physique	3						X		X				
11. Crossed effect - Biol LipoMyco + Chimique	3			X			X	X					
12. Crossed effect - Biol Fengycine + Chimique	3						X	X					

Dans les résultats, seules les modalités 1-2-3-4-5-7-8-9-11 sont traitées. En effet, suite à un manquement d'approvisionnement de Fengycine, celle-ci n'a pas pu être pulvérisée au moment prévu sur les parcelles. Les trois modalités concernées ne seront donc pas prises en compte dans la discussion.

Les moments d'application des produits diffèrent selon les modalités. Ainsi, les stades requis sont le Z32, Z39, Z55 ainsi que le Z65 uniquement pour les effets biologiques. En effet, dans ces modalités biologiques, un quatrième traitement en plus de ceux réalisés aux stades Z32-39-55, est réalisé au stade Z65, correspondant à la floraison débutante. Ce traitement vise uniquement à protéger l'épi afin de préserver le rendement et la qualité du grain. Il convient de souligner que tous les effets biologiques sont réalisés en quatre traitements.

Étant donné la configuration des micro-parcelles constituant le champ d'expérimentation (figure 11), l'application des produits s'effectue via un pulvérisateur à dos. Celui-ci est muni d'une rampe de 2,05 mètres, idéal pour les micro-parcelles de deux mètres de largeur. De plus, cette opération nécessite deux techniciens afin de tenir la rampe la plus horizontale possible le long de chaque parcelle. Une attention particulière doit être donnée au vent et à sa vitesse. En effet, si celui-ci dépasse 20 km/h, il est souhaitable d'attendre avant de réaliser la pulvérisation afin d'éviter tout problème de dérive.

Concernant la bouillie, celle-ci est constituée différemment selon les substances utilisées. Néanmoins, pour chacune des bouillies, un volume mort équivalant à 2 micro-parcelles a été ajouté afin d'éviter toute perte de pression lors de la fin de la pulvérisation. Cette bouillie est composée de 200 L/hectare d'eau pour une concentration de substances variables selon celles-ci (tableau 7).

Tableau 7 : Récapitulatif des quantités de substances nécessaires pour la bouillie.

Produit utilisé	Substance active	Concentration
Serenade	Bacillus subtilis	4 L/ha
LipoMyco	Micosubtiline + Surfactine	0,75 g/L
Fengycine	Bacillus subtilis	1 g/L
Pygmalion	Phosphanate de Potassium	2 L/ha
Vertipin	Soufre	3 L/ha
Simveris	Metconazole	1 L/ha
Stavento	Folpet	1,5 L/ha
Revystar Gold	Fluxapyroxad + Mefentrifluconazole	1,5 L/ha
Univoq	Fenpicoxamid + Prothioconazole	1,5 L/ha

Ainsi, dans notre expérimentation, deux modalités fongiques seront réalisées, chacune avec un traitement légèrement différent (tableau 6). Les produits utilisés sont choisis en adéquation avec les périodes d'apparition de la septoriose et des rouilles. L'ensemble des fongicides utilisés ainsi que leurs matières actives sont détaillés en annexe 2.

Concernant les modalités biologiques et physiques de l'expérimentation, les spécificités des différents produits ont été expliquées au point 2.5.

4.5 Mesures et Cotations de maladies

4.5.1 Échantillonnage au champ

Concernant les échantillonnages au champ, ceux-ci vont se dérouler de manière régulière toutes les semaines à partir du stade Z32 jusqu'au stade Z89, dans le but de suivre l'évolution de la maladie au fil de la saison. Les trois maladies fongiques étudiées seront cotées suivant une échelle en pourcentages (voir section 4.5.5). Ensuite, d'un point de vue de la biomasse, les prélèvements seront réalisés lors de cinq stades phénologiques précis : le stade Z30 – Z32 - Z39 - Z65 - Z89. L'indice de surface foliaire, autrement dit le LAI, sera également calculé au stade Z39. Enfin, le facteur rendement en grain sera pris en compte et étudié à la récolte. Toutes ces observations ont été réalisées dans les parcelles du bloc 1 prévues pour les prélèvements. Les mesures concernant le rendement, le PMG et la teneur en protéines du grain ont par contre été réalisées dans les parcelles du second bloc consacrées au rendement. Le tableau 8 résume donc les différentes mesures effectuées durant l'expérimentation.

Lors de ces mesures, l'échelle BBCH de Zadoks *et al.* a servi de référence pour identifier le stade phénologique (annexe 1). L'outil d'aide à la décision « Phénoblé » a également été utilisé afin d'assurer la bonne prédiction des stades.

Tableau 8 : Synthèse des mesures prises.

Variables mesurées	Stades BBCH pour la mesure (Zadok)				
	Z30	Z32	Z39	Z65	Z89
LAI - surface foliaire			x		
Biomasse plante totale	x	x	x	x	x
Biomasse tige		x	x	x	x
Biomasse feuilles		x	x	x	x
Biomasse épis				x	x
N exporté plante totale	x	x	x		
N tige					
N feuille					
N épis				x	x
nbre épis/m2				x	
Rendement grain					x
Poids de 1000 grains					x
Protéines grains					x

4.5.2 Indice de surface foliaire (LAI)

L'indice de surface foliaire représente la quantité de surface foliaire par unité de surface du sol. Cette surface foliaire est influencée par le pixel vert de la plante. Ainsi, plus la feuille est verte, plus elle aura un LAI élevé. Le but premier de cette mesure est de quantifier la capacité photosynthétique de la culture. En effet, une plus grande surface foliaire signifie généralement une plus grande surface pour la capture de la lumière et, par conséquent, une plus grande photosynthèse. Un des facteurs influençant le rendement est notamment le LAI. Le fait de calculer la surface foliaire peut permettre de réaliser des prédictions sur le rendement potentiel de la culture (Bréda, 1999). De plus, la présence de maladies fongiques sur les feuilles peut réduire le LAI et, par conséquent, le rendement. C'est pour ces raisons qu'il est utile de mesurer ce paramètre dans notre expérimentation. Cette mesure se réalisera au stade Z39, celui de la dernière feuille (Zadoks *et al.*, 1974). De plus, elle ne se fera que sur trois modalités : la modalité une (contrôle), la modalité deux (traitement chimique Z32-55) ainsi que la modalité cinq (traitement LipoMyco).

L'échantillonnage de la surface foliaire a été effectué sur une ligne de semis d'une longueur de 50 cm, en évitant idéalement de prendre dans les premières lignes situées au bord de la micro-parcelle (figure 12). Une fois les plantes collectées, elles ont été soigneusement séparées afin de pouvoir distinguer les feuilles des tiges. Par la suite, seules les feuilles sont conservées. En effet, celles-ci ont été disposées afin de remplir l'ensemble de la feuille blanche au format A4 (figure 13). Ces feuilles sont alors passées dans une imprimante spécifique, RICOH IM afin de numériser la surface foliaire (figure 14). Celle-ci a été paramétrée avec une résolution de 300 dpi en image jpeg. Ensuite, le traitement de ces images a été effectué avec le logiciel Octave. L'indice de surface foliaire a alors été déterminé selon l'équation :

$$LAI = \frac{\text{(Somme des pixels gris X Surface d'un pixel)}}{\text{Surface de référence}}$$

Où Surface de référence = surface récoltée sur la feuille
 Surface d'un pixel = pouce² / résolution de l'image
 Un pouce = 2.54 cm
 Résolution de l'image = 300 dpi



Figure 12 : Image du prélèvement d'une ligne de semis sur une longueur de 50 cm pour la mesure du LAI (photo A. Lamarche, 2025).



Figure 13 : Image d'une feuille A4 contenant les feuilles étalées avant de calculer leur LAI (photo A. Lamarche, 2025).

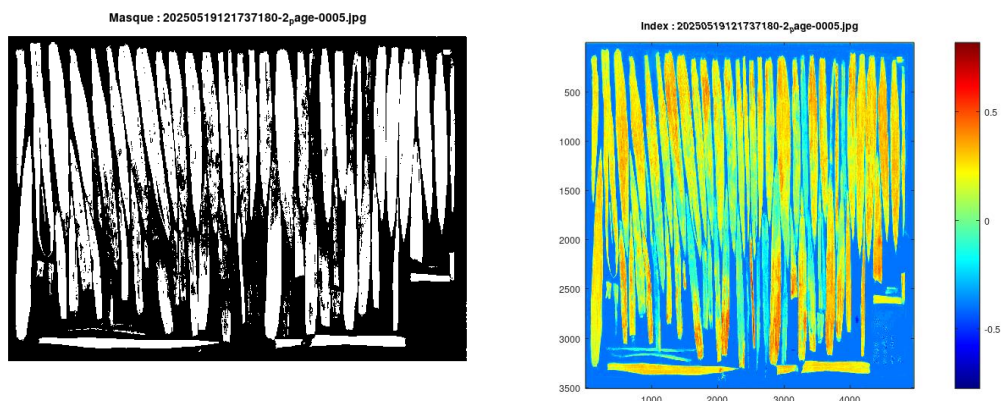


Figure 14 : Visualisation du traitement d'image pour l'estimation d'un indice foliaire (LAI). A) Masque binaire appliqué à l'image d'entrée pour isoler les parties végétatives (blanc) du fond (noir). B) Carte de l'indice foliaire à partir de l'image brute, où les valeurs sont normalisées (-0.5 à +0.5). Les zones rouges correspondent aux densités foliaires les plus élevées alors que les zones bleues correspondent à celles les plus faibles.

4.5.3 Prélèvement de biomasse

Comme mentionné précédemment, les prélèvements de biomasse ont lieu lors de cinq moments phénologiques distincts : lors du redressement, du deuxième nœud, de la dernière feuille, de la floraison et de la maturité. Ainsi, une prise d'échantillon de 50 cm de long sur une hauteur de trois lignes de semis est réalisée manuellement pour chaque micro-parcelle. L'échantillon correspond donc à une surface de 0,219 mètre carré. La biomasse aérienne est ensuite placée dans un sachet micro-perforé numéroté par le chiffre équivalent à la micro-parcelle recueillie. A souligner qu'hormis pour le premier prélèvement, les tiges, feuilles et épis de blé doivent être séparés pour pouvoir calculer leurs biomasses séparément (figure 15). Afin de passer d'une biomasse fraîche à une biomasse sèche, les sachets d'échantillons sont placés dans l'étuve à 65 degrés durant 72 heures. Une fois le séchage effectué, les sachets sont pesés dans le but de calculer la biomasse sèche, afin de transformer le résultat en tonnes par hectare. Avoir une idée du poids sec permettra ainsi de comparer la croissance végétative entre les différents traitements réalisés.



Figure 15 : Images illustrant la prise de biomasse sur le terrain (photo A. Lamarche, 2025)

4.5.4 Evaluation du rendement et de ses composantes

Les rendements parcellaires finaux sont obtenus lors de la moisson. Celle-ci a été réalisée par le CePiCOP dans des conditions optimales, c'est-à-dire une maturité des épis atteints et une humidité inférieure au 15%. Dans le bloc dédié aux mesures de rendements (figure 11), quatre paramètres seront étudiés : le rendement brut, le nombre d'épis/m², le poids de mille grains (PMG) et la teneur en protéines du grain.

La mesure de densité d'épis est réalisée lors du stade 65. Cette prise de mesure a lieu en même temps que la mesure de biomasse prise lors de ce stade phénologique précis. Étant donné l'échantillon pris sur une longueur de 50 cm et d'une largeur de trois lignes de semis, cette mesure est normalisée pour obtenir une valeur par mètre carré. Ensuite, lors de la récolte, le poids de mille grains est obtenu via un compteur à grain. Cet appareil prend 100 grains pour ensuite les peser. Cette opération est réalisée quatre fois pour ensuite normaliser la valeur afin d'avoir le poids de mille grains. Enfin, la teneur en protéines du grain a été obtenue à l'aide d'un appareil infrarouge du département végétal de l'Université de Gembloux Agro Bio-Tech.

4.5.5 Cotations des maladies fongiques

Le suivi des maladies foliaires s'est donc déroulé toutes les semaines à partir du stade BBCH 32 jusqu'au stade BBCH 89 selon l'échelle BBCH de Zadoks *et al.* (1974). Ainsi, au cours de la croissance de la plante, l'intensité de l'infestation de chaque maladie a été évaluée pour chaque feuille. Cette intensité correspond au pourcentage de la surface foliaire présentant des lésions (Savary *et al.*, 2016). Ces échantillonnages consistent à prélever chaque semaine 5

maîtres brins par quadra. Étant donné qu'il y a cinq répétitions par modalité, ce sera un total de vingt-cinq maîtres brins prélevés pour chaque modalité expérimentale. Les plantes sont ensuite décortiquées afin d'isoler chacune des feuilles. Cette méthode permet d'identifier avec précision les feuilles affectées, même lorsque l'ensemble du feuillage n'a pas encore entièrement émergé. Le but étant d'identifier à quelle feuille définitive s'apparente la dernière feuille pointante. Une fois cela réalisé, la cotation de la sévérité des trois maladies fongiques étudiées peut être réalisée, suivant une échelle de cotations allant de 1 à 100.

L'évaluation des rouilles jaunes et brunes se lit via une échelle de sévérité selon Koyshibayev & Muminjanov (2016) (figure 16). Celle-ci fonctionne avec une gradation allant de 0 à 100%, dont le 0 représente une feuille non touchée par la maladie. Autrement dit, un végétal très tolérant à la maladie. Par contre, pour la septoriose, un autre type concernant l'apparence des symptômes est utilisé (figure 17). Toutes les données sont ainsi enregistrées dans un fichier Excel pour évaluer la sévérité des diverses maladies foliaires recensées.

À souligner que les prélèvements ont lieu jusqu'au 11 juin 2025. En effet, à partir de cette date, les premières feuilles étaient mortes alors que l'épis était pratiquement formé en totalité. Les dernières feuilles impactées par la maladie n'ont donc à ce moment-là plus aucun impact.

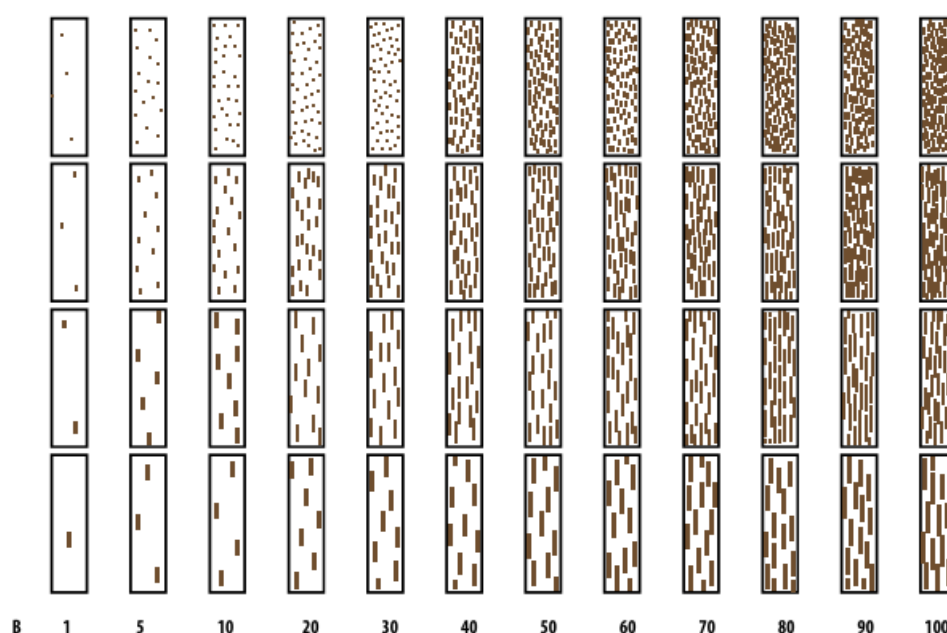


Figure 16 : Taux de dommages des feuilles provoqués par les rouilles (Koyshibayev & Muminjanov, 2016).

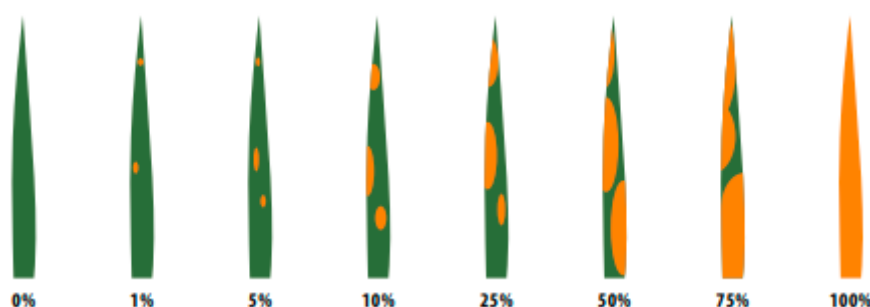


Figure 17 : Grille d'évaluation des pourcentages des feuilles endommagées par la septoriose (Koyshibayev & Muminjanov, 2016).

4.6 Analyse des données

Suite aux données récoltées durant cette expérimentation, plusieurs types d'analyses ont pu être réalisées :

- L'effet des douze modalités de traitements, accompagné d'une comparaison entre les différentes modalités de biocontrôle utilisées.
- La comparaison entre les modalités à zéro, un ou deux passages de traitements fongiques.

Toutes ces données ont été traitées à l'aide du logiciel statistiques Rstudio (version 4.5.0) ainsi qu'avec les packages présents dans le tableau 9 ci-dessous. L'intelligence artificielle ChatGPT (GPT 3-5 ; OpenAI, 2025) a été utilisée pour certaines parties de ce travail, dans le cadre de la reformulation et de la correction des codes.

Tableau 9 : Liste des packages utilisés pour l'analyse statistique.

Packages	Version	Auteurs
dplyr	1.1.4	Wickham <i>et al.</i> , 2023
tidyr	1.3.1	Wickham <i>et al.</i> , 2024
ggcorplot	0.1.4.1	Kassambara, 2023
ggplot2	3.5.2	Wickham <i>et al.</i> , 2025
readxl	1.4.5	Wickham & Bryan, 2025
lme4	1.1-37	Bates <i>et al.</i> , 2025
agricolae	1.3-7	Mendiburu, 2023
DHARMA	0.4.7	Hartig, 2024
emmeans	1.11.2	Lenth, 2025
knitr	1.50	Xie, 2025

4.6.1 Etude statistique de l'effet des traitements sur les sévérités maladies

Comme expliqué précédemment, l'expérience comprend 12 modalités de traitement. Dès lors, la comparaison de celles-ci se fait via les données de sévérité de la plante pour chacune des trois maladies. Ainsi, pour comparer l'effet des modalités de traitement, un modèle mixte linéaire (LMER) a été ajusté à l'aide du package « lme4 », en intégrant les blocs comme effet aléatoire et les différentes modalités comme effet fixe. L'effet bloc est considéré comme négligeable avec une variance inférieure à 0.01, faible avec une variance entre 0.01 et 0.05 alors que l'effet bloc est significatif une fois la variance bloc supérieure à 0.05. Une ANOVA classique peut avoir lieu lorsqu'un effet bloc non significatif est présent.

Ensuite, pour réaliser une analyse de variance, les conditions d'application des modèles doivent être vérifiées. Ainsi, deux tests statistiques ont été réalisés : le test de Shapiro ainsi que le test de Levene. Le premier vérifie la normalité des résidus alors que le deuxième contrôle l'homogénéité des variances. Levene a été préféré à Bartlett pour sa propriété d'être plus robuste aux écarts de la normalité. Dans le cas où les conditions d'applications ne sont pas respectées, une vérification plus approfondie des résidus du modèle est réalisée par la fonction DHARMA (Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level / Mixed) Regression Models) via le package « DHARMA ». Le but principal est d'uniformiser les résidus et d'évaluer la qualité d'ajustement du modèle (qq-plots, tests de dispersions et tests d'outliers). Lorsque les

constats indiquent des écarts trop importants, une transformation en racine carrée (sqrt) de la variable permet d'améliorer la normalité et l'homogénéité des résidus. Cette transformation est la suivante :

$$X' = \sqrt{X}$$

Où X est une variable comprenant un chiffre entre 0 et 1. De base, la variable X est en pourcentage, une division par cent est donc nécessaire avant de réaliser cette transformation. Les deux tests correspondant aux conditions d'application de l'analyse de la variance uni varié ont été exécutés à nouveau.

Dans le but de pouvoir comparer et d'observer des différences entre les moyennes des populations, une analyse de variance (ANOVA) à un seul facteur fixe (la modalité de traitement) a été effectuée pour chaque date d'observation. En présence d'un effet traitement significatif ($p > 0.05$), un test post-hoc est appliqué. Pour la majorité des cas, un test de Student-Newman et Keuls, autrement appelé SNK a été réalisé en utilisant le package « agricolae ». Néanmoins, pour certains cas spécifiques de modèles mixtes où la variable présente un effet bloc notable, le test SNK est remplacé par le test de Tukey via le package « emmeans ». L'objectif de ces tests post-hoc est de mettre en avant des modalités ayant été touchées de manière similaire par la maladie. Les modalités sont ainsi classées selon une lettre : a, b, c ou d. Le niveau de sévérité le plus haut est représenté par la lettre a. Il faut souligner que le package « emmeans » classe par définition les lettres par sévérités croissantes alors que le package « agricolae » classe les lettres par sévérités décroissantes. Il est donc important d'inverser l'un des deux ordres de classements.

A souligner que la dynamique des maladies est représentée en suivant le paramètre « Day of Year » (DOY) afin de situer l'évolution de la maladie au cours de l'année. Ainsi, le jour 1 équivaut au 1er janvier et le jour 365 correspond au 31 décembre.

4.6.2 Etude statistique de l'effet des traitements sur le développement de la plante

Pour effectuer l'étude statistique de l'effet des traitements sur le développement de la plante, une ANOVA à un seul facteur fixe, la modalité de traitement fongique, a été réalisée. Ainsi, de la même manière que ci-dessus (voir 4.6.1), les tests de Shapiro et de Levene ont été vérifiés. Néanmoins, si ceux-ci ne sont pas vérifiés, des transformations en logarithme, en racine carrée ou en arc sin doivent être réalisées afin de remplir les conditions d'applications. Si cela ne permet toujours pas de les vérifier, les extremums dépassant 95% sont retirés. Une fois que les tests de Shapiro et de Levene ont été vérifiés, un test SNK est accompli afin de mettre en avant les différences entre les différents passages de traitements chimiques. En d'autres mots, cela permet de répartir en classe les résultats, avec dans notre cas, la lettre a pour les groupes ayant la valeur la plus faible et la lettre c par exemple, pour les groupes avec la valeur la plus élevée. À souligner qu'un test LMER avec la fonction lmer du package « lme4 », a été réalisé avant l'ANOVA. Le but est de s'assurer qu'il n'y ait pas d'effet bloc dans la parcelle. Si le test amène comme conclusion un effet bloc, le test SNK est remplacé par le test de Tukey via le package « emmeans ».

Dans le but de comparer des paires de moyennes, la valeur q du test SNK est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$q = \frac{(\bar{X}_A - \bar{X}_B)}{S_{AB}}$$

Où :

- \bar{X}_A et \bar{X}_B sont les moyennes des deux groupes que l'on compare

- S_{AB} se calcule quant à lui via $S_{AB} = \sqrt{\frac{MS_E}{n}}$

Ainsi, q permet de décider si la différence est significative ou non.

5. Résultats

5.1 Dynamique des maladies

Avant toute chose, une analyse de variance mixte (de type LMER) a été réalisée afin de voir s'il y a ou non la présence d'un effet bloc suite au modèle expérimental présentant cinq répétitions (annexe 3). Les tests ont permis d'estimer la variance associée aux blocs pour chaque maladie et chaque date d'observation (DOY). De manière générale, les résultats ont présenté une variance bloc inférieure à 0,01, signifiant un très faible effet entre les blocs. Néanmoins, pour la septoriose au DOY 155 ainsi que pour la rouille jaune au DOY 140 et 155, une p-value entre 0,01 et 0,05 est obtenue. En effet, ils ont une variance de respectivement 0.0496 et 0.0189. Ces résultats justifient l'intégration de l'effet bloc dans les modèles statistiques afin d'abaisser le biais de l'estimation des effets de traitements.

Les conditions d'application de l'ANOVA ne sont pas validées. En effet, les tests de Shapiro-Wilk ont montré des écarts à la normalité des résidus pour la majorité des maladies et des dates d'observations. Seules la septoriose au DOY 162 et la rouille jaune au DOY 162 ont une normalité respectée ($p > 0.05$). Concernant le test de Levene, l'homogénéité des variances est respectée uniquement pour certaines variables ($p > 0.05$). Plus précisément la septoriose au DOY 133, 155, 162 ainsi que la rouille brune aux DOY 133, 140 et 147. Dans ce cas où les conditions ne sont pas respectées, une vérification plus approfondie des résidus du modèle est réalisée via la fonction DHARMa (annexe 5).

Afin de respecter les conditions d'application, une transformation en racine carrée (sqrt) a été appliquée afin de stabiliser la variance entre les modalités. Le but est d'améliorer la normalité et l'homogénéité des résidus. Ceux-ci ont donné des résultats pertinents pour la septoriose (DOY 133, 140, 155, 162) et pour la rouille jaune (DOY 147, 155, 162) (annexe 4). Les variables dont la transformation n'a pas amené à des résultats plus concluants correspondent à la rouille brune ainsi qu'aux deux premiers stades de la rouille jaune. Cela correspond aux sévérités les plus faibles. Dans le cadre des cotations maladies, le facteur erreur peut être plus élevé qu'à l'ordinaire puisque les cotations sont réalisées de manière manuelle à grande échelle. De plus, lors de faibles sévérités, une erreur peut avoir beaucoup plus d'effet.

Après transformation, les analyses de variance (ANOVA) ont révélé des effets traitement significatifs ($p < 0.05$) pour la plupart des maladies et dates. Seule la septoriose au DOY 133 ($p = 0.2344$), la rouille jaune au DOY 133 (0.1924) ainsi que la rouille brune au DOY 133, 140, 147 (0.6075, 0.5688 et 0.0697) présentent des p-value non significatives.

Par la suite, les analyses post-hoc ont été réalisées via la méthode SNK. Seules les trois variables présentant un effet bloc ($p > 0.01$), à savoir la septoriose au DOY 155 ainsi que la rouille jaune au DOY 140 et 155 ont subi un test de Tukey.

Ainsi, afin de comparer ces douze modalités, une première illustration présente l'évolution de la sévérité de la maladie au fil des jours de l'année, selon les jours ordonnés (DOY). Par la suite, les conclusions issues des analyses post-hoc sont synthétisées dans un tableau. A titre de rappel, ce tableau contient des lettres permettant d'identifier les groupes homogènes constitués selon les différentes modalités de traitement.

5.1.1 Septoriose

5.1.1.1 Comparaison des 9 modalités

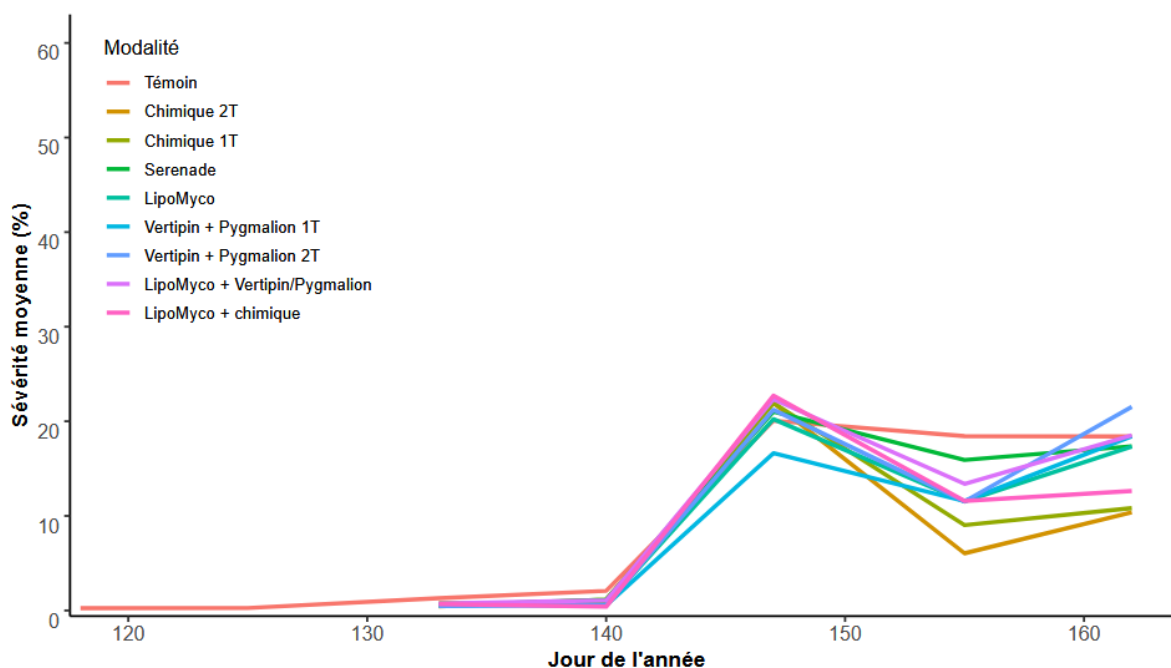


Figure 16 : Variation temporelle de la sévérité moyenne de la septoriose sur le froment d'hiver sous différents régimes de traitements fongiques.

Tableau 10 : Comparaison de la sévérité moyenne de la septoriose selon diverses modalités de traitement. Pour chaque jour de l'année (DOY), le tableau rapporte les groupes statistiquement équivalents tel qu'identifié au départ du test SNK ou Tukey. Le groupe A réunit les variétés les plus affectées, alors que les groupes suivants reflètent une sévérité progressivement inférieure. À noter que lorsqu'une variété est associée à deux lettres, par exemple « ab », cela traduit une adhésion conjointe aux deux groupes, témoignant d'une classification plus nuancée.

Nom_Modalité	DOY_118	DOY_125	DOY_133	DOY_140	DOY_147	DOY_155	DOY_162
Témoin	NA	NA	a	a	ab	a	ab
Chimique 2T	NA	NA	a	ab	ab	d	c
Chimique 1T	NA	NA	a	ab	ab	cd	c
Serenade	NA	NA	a	ab	ab	ab	ab
LipoMyco	NA	NA	a	ab	ab	abc	ab
Vertipin + Pygmalion 1T	NA	NA	a	b	b	bc	ab
Vertipin + Pygmalion 2T	NA	NA	a	b	ab	bc	a
LipoMyco + Vertipin et Pygmalion	NA	NA	a	ab	a	abc	ab
LipoMyco + Chimique	NA	NA	a	b	a	bc	bc

Aux dates les plus précoces (DOY 118 et 125), correspondant à la fin de la montaison, l'analyse statistique n'a pas pu être conduite en raison d'un volume de données exploitables insuffisant. Cette observation est également valable pour les cas d'analyse de sévérité des rouilles jaunes et brunes.

Lors du stade de gonflement de l'épi (DOY 133), les différentes modalités sont peu touchées par la septoriose. En effet, les résultats indiquent l'absence de différences significatives entre les modalités ($p = 0.2344$). Elles sont toutes regroupées dans le même ensemble statistique (a), montrant ainsi un faible et homogène niveau de sévérité à ce stade de développement de la maladie.

Une fois le 20 mai atteint (DOY 140), une différence significative apparaît enfin ($p < 0.01$), impliquant dès lors des différences nettes entre les traitements. Cette différenciation se distingue uniquement pour la modalité « Témoin » vis-à-vis des autres modalités. En effet, elle est la seule à se situer dans le groupe a tandis que les autres appartiennent au groupe ab ou b, suggérant l'apparition d'un effet des traitements.

Le 27 mai (DOY 147), les distinctions commencent à s'affiner ($p < 0.001$). Le groupe a se compose du « Témoin » et de la modalité « LipoMyco + Vertipin/Pygmalion ». Les autres se partagent entre le groupe intermédiaire ab et le groupe b.

L'écart entre les modalités continue de grandir le 04 juin (DOY 155) ($p < 0.001$). Le « Témoin » est la modalité la plus touchée avec la sévérité moyenne la plus élevée, restant ainsi dans le groupe a. Les deux modalités à caractère chimique se révèlent les plus performantes (groupe cd et d). De plus, un groupe intermédiaire se forme (groupe bc et abc), ceux-ci comprennent d'autres modalités telles que les combinaisons.

Enfin, le 11 juin (DOY 162), la dynamique observée précédemment se poursuit ($p < 0.001$). La modalité ayant la sévérité la plus élevée est le « Vertipin + Pygmalion 2T » (groupe a), suivie par le groupe ab incluant notamment le « Témoin » ainsi que les produits de biocontrôle. Une nuance est observée entre la modalité 9 et 11. En effet, celle combinant un traitement de LipoMyco accompagné de chimique atteint une sévérité plus faible (groupe bc) que celle comprenant le traitement de LipoMyco suivi de Vertipin et Pygmalion (groupe ab). Les modalités chimiques montrent, quant à elles, une faible sévérité de la septoriose jusqu'à la fin du cycle de développement (groupe c). Bien que certaines modalités de biocontrôle s'approchent des niveaux d'efficacité des modalités chimiques, ces derniers ont une efficacité plus significative envers cette maladie.

5.1.1.2 Description des modalités par étages foliaires

La figure 17 présente les résultats par étages foliaires selon les sévérités des maladies.

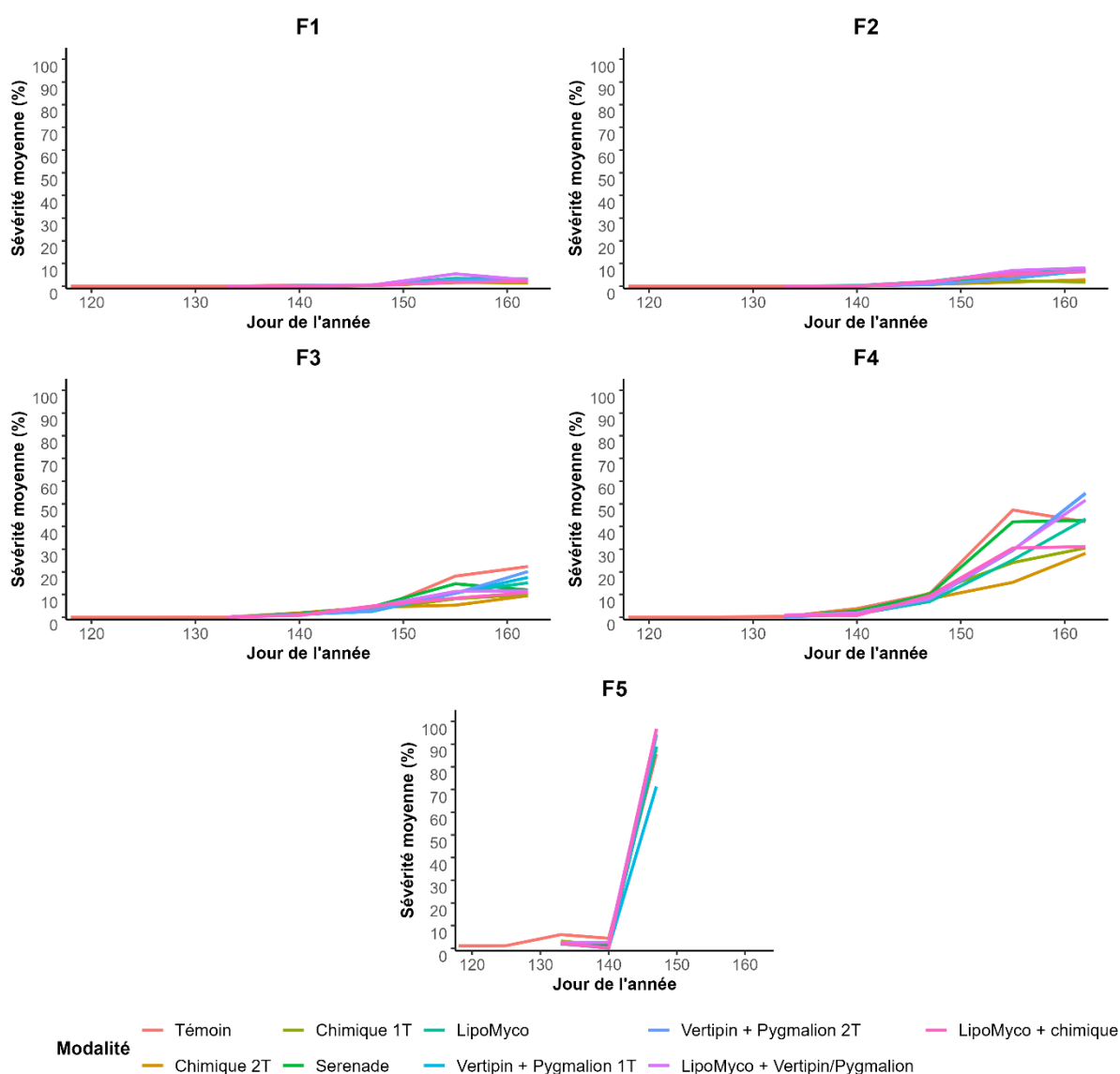


Figure 17 : Répartition de la sévérité moyenne de la septoriose par étages foliaires selon les différentes modalités (l'étage foliaire est précisé en haut). Chaque modalité est identifiée par une couleur spécifique.

Concernant la première feuille (F1), aucune sévérité significative n'est apparue avant le 10 juin (DOY 162). A cette période, l'ensemble des modalités a une sévérité inférieure à 5%, induisant une bonne protection des feuilles. Les valeurs les plus faibles (< 2%) comprennent les modalités chimiques « Chimique 2T » et « LipoMyco + Chimique », confirmant ainsi leur efficacité supérieure. A l'opposé, le « Témoin » montre une sévérité légèrement supérieure à 4%.

Sur la seconde feuille (F2), la sévérité augmente deux semaines plus tôt, vers le 27 mai (DOY 148). A remarquer que la croissance se fait de manière constante. Les modalités « Chimique 2T » et « LipoMyco + Chimique » se distinguent positivement avec des sévérités finales inférieures à 5%, contre près de 10% pour la modalité « Témoin ». Le reste des modalités, comprenant notamment les modalités de biocontrôle atteignent des sévérités intermédiaires.

Ensuite, la sévérité de la troisième feuille (F3) débute le 16 mai (DOY 136) mais comprend une forte augmentation à partir du 2 juin (DOY 154). Par exemple, le témoin passe de 5% à environ 25%. Les modalités de biocontrôle freinent partiellement la propagation à 20% de sévérité alors que les modalités chimiques limitent l'infestation à 15%.

Pour la quatrième feuille (F4), bien que certaines lésions soient visibles dès le 9 mai (DOY 129), le pic principal d'augmentation apparaît après le 23 mai (DOY 143). Le « Témoin » atteint d'ailleurs 40% tandis que les modalités chimiques réduisent la sévérité finale à 25%. Certaines modalités de biocontrôle telles que « Vertipin + Pygmalion » ou « LipoMyco + Vertipin/Pygmalion » observent une sévérité intermédiaire de 30%. L'écart entre les groupes devient notable.

Enfin, la cinquième feuille présente la feuille la plus atteinte par la septoriose et ce dès le 2 mai (DOY 122). La propagation stagne légèrement jusqu'au 15 mai (DOY 136) avant de connaître des sévérités proches de 100% pour le « Témoin » à la fin de la période d'observation. Les observations sur la cinquième feuille n'ont pas eu lieu lors du stade DOY 155 ainsi que DOY 162 de par la sénescence de cette cinquième feuille.

5.1.2 Rouille jaune

5.1.2.1 Comparaison des 9 modalités

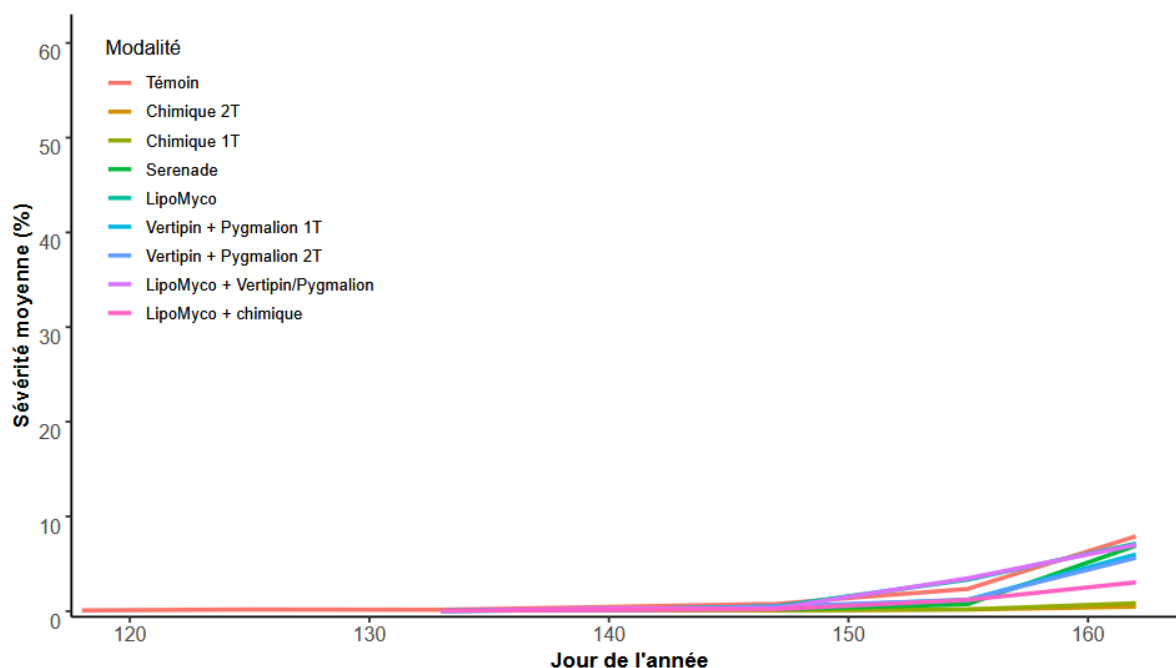


Figure 18 : Variation temporelle de la sévérité moyenne de la rouille jaune sur le froment d'hiver sous différents régimes de traitements fongiques.

Tableau 11 : Comparaison de la sévérité moyenne de la rouille jaune selon diverses modalités de traitement. Pour chaque jour de l'année (DOY), le tableau rapporte les groupes statistiquement équivalents tel qu'identifié au départ du test SNK ou Tukey. Le groupe A réunit les variétés les plus affectées, alors que les groupes suivants reflètent une sévérité progressivement inférieure. À noter que lorsqu'une variété est associée à deux lettres, par exemple « ab », cela traduit une adhésion conjointe aux deux groupes, témoignant d'une classification plus nuancée.

Nom_Modalite	DOY_118	DOY_125	DOY_133	DOY_140	DOY_147	DOY_155	DOY_162
Témoin	NA	NA	a	b	a	abc	a
Chimique 2T	NA	NA	a	b	d	d	d
Chimique 1T	NA	NA	a	b	d	d	d
Serenade	NA	NA	a	a	cd	cd	ab
LipoMyco	NA	NA	a	b	ab	ab	ab
Vertipin + Pygmalion 1T	NA	NA	a	b	abc	cd	ab
Vertipin + Pygmalion 2T	NA	NA	a	b	abc	cd	b
LipoMyco + Vertipin et Pygmalion	NA	NA	a	b	bcd	a	ab
LipoMyco + Chimique	NA	NA	a	b	cd	bcd	c

Comme pour la septoriose, l'analyse n'a révélé aucune différence significative ($p = 0.1924$) entre les modalités lors du 13 mai (DOY 133). Toutes les modalités appartiennent au même groupe statistique (a).

Cependant, une légère évolution est constatée le 20 mai (DOY 140) avec une différence significative élevée ($p < 0.001$). La modalité « Serenade » possède une sévérité moyenne supérieure (3.83) et se distingue des autres modalités, qui appartiennent toutes au groupe b, y compris le « Témoin ».

Le 27 mai (DOY 147), l'effet des traitements reste hautement significatif ($p < 0.001$). Le témoin est le seul à figurer dans le groupe a. Certaines modalités de biocontrôle comme le « LipoMyco » ou comme les associations avec du « Vertipin et Pygmalion » se situent dans les groupes ab et abc. Enfin, seules les modalités « Chimique 1T » et « Chimique 2T » figurent dans le groupe d. Les modalités « LipoMyco + Chimique » ainsi que « Serenade » tendent vers les résultats des produits chimiques puisqu'ils figurent dans le groupe cd.

Le 04 juin (DOY 155), les différences entre les sévérités moyennes s'agrandissent, conservant ainsi une forte significativité des traitements ($p < 0.001$). Les groupes formés sont plus nuancés que lors des autres DOY. En effet, le « Témoin », situé dans le groupe abc, le « LipoMyco » (groupe ab) ainsi que le « LipoMyco + Vertipin/Pygmalion » (groupe a) présentent les modalités les plus impactées par la maladie. Ensuite, le groupe cd comprend la « Serenade », mais également les deux modalités du biocontrôle « Vertipin + Pygmalion ». Dans la même continuité que les résultats précédents, les traitements chimiques 1T et 2T se réunissent dans le groupe d et témoignent de la protection la plus efficace.

Enfin, le 11 juin (DOY 162), la dynamique de sévérité se confirme ($p < 0.001$). Le témoin atteint son taux de sévérité maximal (moyenne = 9.74), occupant seul le groupe a. Les traitements de biocontrôle comprenant le « LipoMyco », la « Serenade » ainsi que le « Vertipin + Pygmalion » se situent dans le groupe ab et b. Pour finir, la sévérité moyenne la moins élevée appartient toujours aux deux modalités chimiques, confirmant leur efficacité redoutable. Seule la modalité « LipoMyco + Chimique » (groupe c) arrive à tendre avec des résultats proches des résultats chimiques.

5.1.2.2 Description des modalités par étages foliaires

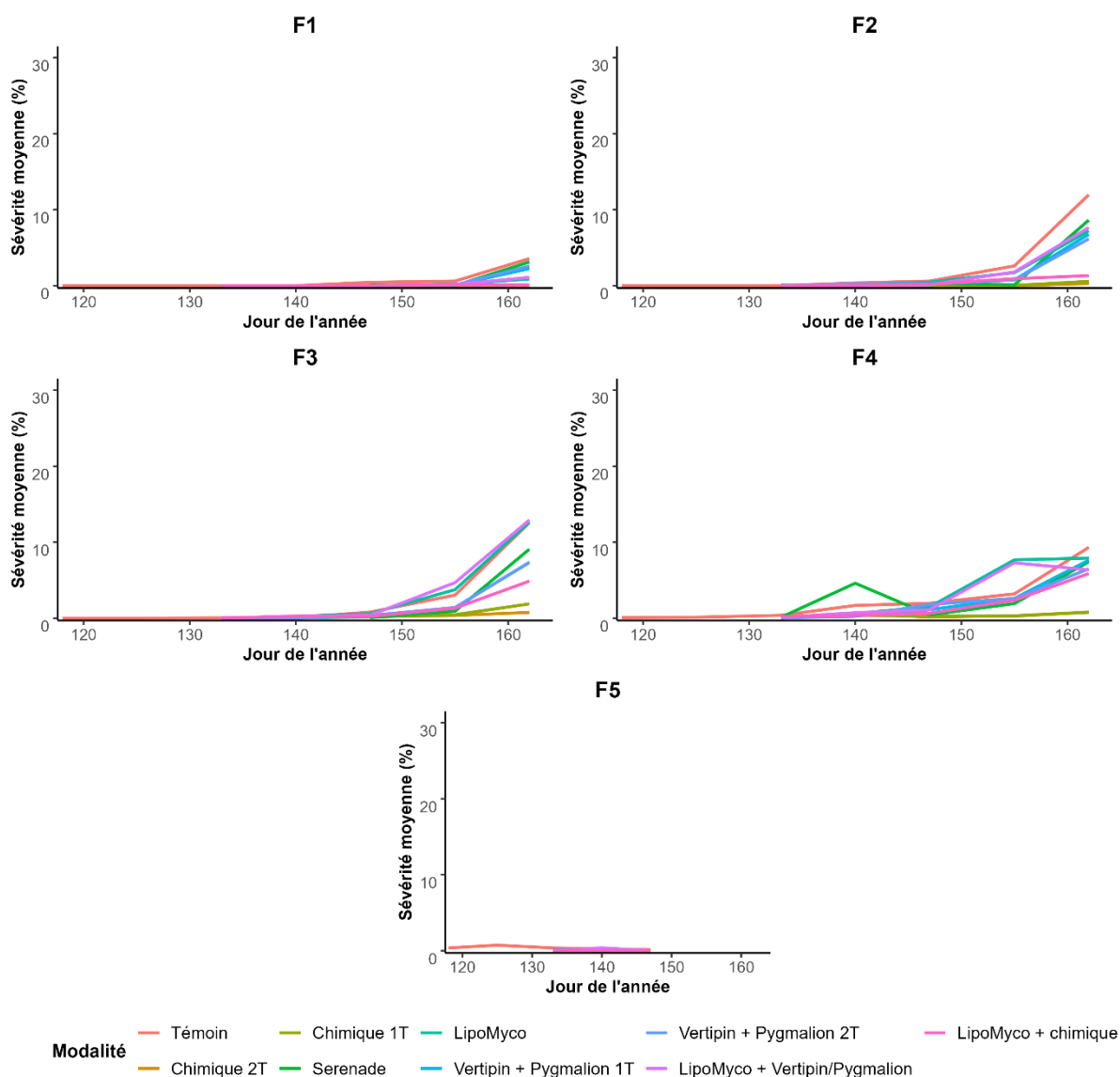


Figure 19 : Répartition de la sévérité moyenne de la rouille jaune par étages foliaires selon les différentes modalités (l'étage foliaire est précisé en haut). Chaque modalité est identifiée par une couleur spécifique.

À propos de la rouille jaune, aucune sévérité n'est observée avant le 10 juin (DOY 162) pour la première et la seconde feuille. Leurs dynamiques sont assez semblables. A cette date, toutes les modalités possèdent des sévérités très faibles ($p < 3-4\%$). La modalité « Chimique 2T » ainsi que la combinaison « LipoMyco + Chimique » présentent des sévérités proches de 0% ($< 1\%$). A l'opposé, le « Témoine » mais également la modalité « Serenade » et « LipoMyco » montrent des valeurs supérieures aux autres, comprises entre 2 et 3%, traduisant une protection plus modérée tout en étant suffisante pour conserver un rendement intact.

Pour la troisième feuille (F3), les premières taches des maladies apparaissent dès le 31 mai (DOY 150) et augmentent légèrement de manière croissante tout le long du mois de juin. En fin de cycle, la sévérité de la rouille jaune atteint un peu plus de 12% pour la modalité

« Vertipin + Pygmalion 1T » et « LipoMyco + Vertipin/Pygmalion ». La modalité « Témoin » ainsi que les autres modalités de biocontrôle suivent ensuite avec près de 10%. La modalité « LipoMyco + Chimique » présente 5% alors que les deux modalités purement chimiques affichent une sévérité d'à peine 1%.

La quatrième feuille (F4) présente des symptômes visibles à partir du 27 mai (DOY 147). Seule la modalité « Serenade » montre un léger pic au DOY 140. Entre le 27 mai et le 04 juin, un pic de sévérité jusqu'à 10% apparaît pour les modalités « Vertipin + Pygmalion 1T » et « LipoMyco + Vertipin/Pygmalion ». Ceux-ci maintiennent les sévérités stables jusqu'à la fin du cycle. Concernant les deux modalités purement chimiques, celles-ci restent stables avec quasiment aucune sévérité (< 1%). Le reste des modalités comprennent des sévérités intermédiaires, aux alentours de 7-8%. A remarquer que la modalité « Témoin » passe de sévérités intermédiaires à un pic final entre le DOY 155 et le DOY 162, atteignant 12%.

Enfin, la cinquième feuille (F5) présente des sévérités globalement faibles sur l'ensemble des modalités. En effet, elles ont toutes une sévérité comprise entre 2 et 3%.

5.1.3 Rouille brune

5.1.3.1 Comparaison des 9 modalités

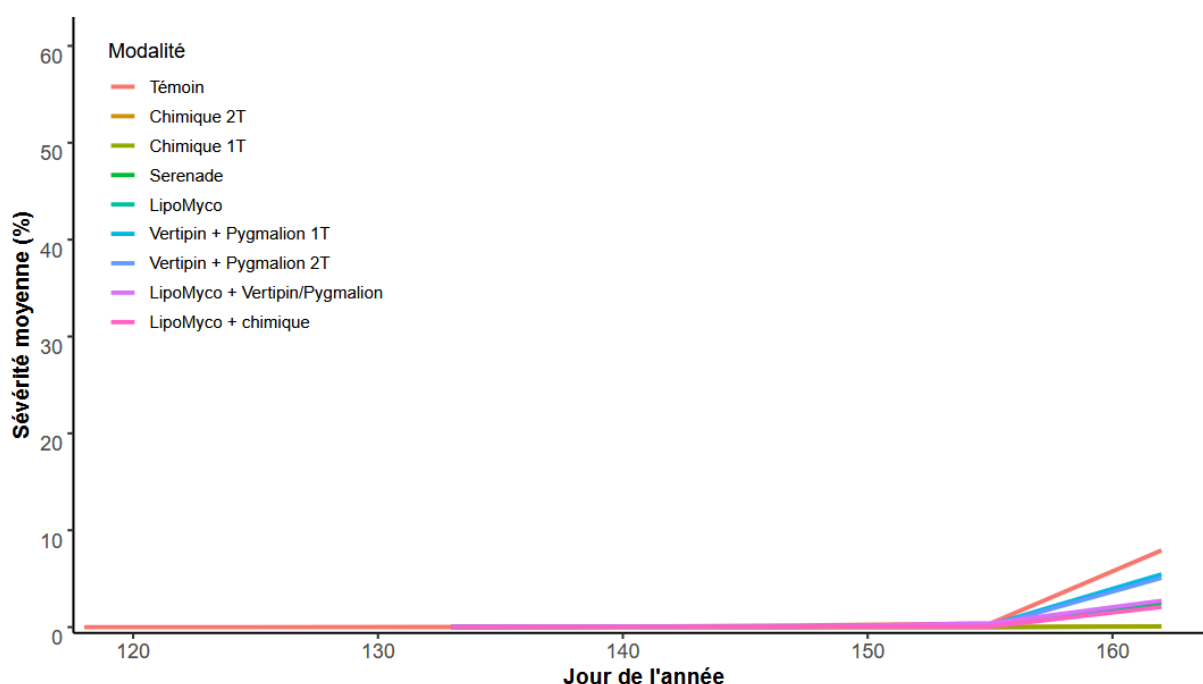


Figure 20 : Variation temporelle de la sévérité moyenne de la rouille brune sur le froment d'hiver sous différents régimes de traitements fongiques.

Tableau 12 : Comparaison de la sévérité moyenne de la rouille brune selon diverses modalités de traitement. Pour chaque jour de l'année (DOY), le tableau rapporte les groupes statistiquement équivalents tel qu'identifié au départ du test SNK ou Tukey. Le groupe A réunit les variétés les plus affectées, alors que les groupes suivants reflètent une sévérité progressivement inférieure. À noter que lorsqu'une variété est associée à deux lettres, par exemple « ab », cela traduit une adhésion conjointe aux deux groupes, témoignant d'une classification plus nuancée.

Nom_Modalite	DOY_118	DOY_125	DOY_133	DOY_140	DOY_147	DOY_155	DOY_162
Témoin	NA	NA	a	a	a	ab	a
Chimique 2T	NA	NA	a	a	b	b	b
Chimique 1T	NA	NA	a	a	b	b	b
Serenade	NA	NA	a	a	b	ab	b
LipoMyco	NA	NA	a	a	b	ab	b
Vertipin + Pygmalion 1T	NA	NA	a	a	b	ab	a
Vertipin + Pygmalion 2T	NA	NA	a	a	b	ab	a
LipoMyco + Vertipin et Pygmalion	NA	NA	a	a	b	a	b
LipoMyco + Chimique	NA	NA	a	a	b	ab	b

Concernant la rouille brune, aucune différence significative n'a été mise en évidence le 13 et le 20 mai (DOY 133 et 140), avec des valeurs p valant 0.6075 et 0.5688 ($p > 0.05$). Ainsi, vu la faible sévérité, toutes les modalités se situent dans le groupe a. Néanmoins, les coefficients de variations sont très élevés (343% et 246%). Cela montre une grande hétérogénéité entre les répétitions, ayant pour conséquence d'atténuer la sensibilité statistique à ces stades.

Les différences entre les traitements sont encore non significatives ($p = 0.0697$) lors du 27 mai (DOY 147). Néanmoins, la variance est proche de la limite de 0.05. Seule la modalité « Témoin » se met en évidence dans le groupe a, ayant la sévérité en rouille brune la plus élevée (0.16).

Au 04 juin (DOY 155), les différences entre modalités s'accroissent légèrement ($p = 0.00899$). Le modèle combiné « LipoMyco et Pygmalion/Vertipin » présente la sévérité la plus élevée (0.40) et se situe seul dans le groupe a, suivie de près par le « Témoin » (0.37) positionné dans le groupe ab. Par contre, les modalités à un et deux traitements chimiques présentent une sévérité quasi nulle, respectivement à 0.0 et 0.01. Ils appartiennent au groupe b.

Enfin, les différences deviennent hautement significatives ($p < 0.001$) lors du 11 juin (DOY 162). La modalité « Témoin » comprenant logiquement la sévérité la plus élevée (8.10), se situe dans le groupe a, aux côtés des associations de biocontrôle « Vertipin et Pygmalion 2T » (5.77) ainsi que « Vertipin et Pygmalion 1T » (5.59). Le groupe a, comprenant les faibles sévérités, se compose quant à lui des trois modalités incluant la « LipoMyco », la « Serenade » ainsi que les modalités « Chimique 2T » et « Chimique 1T ». Ces deux dernières ont une bonne maîtrise de la rouille brune, avec une sévérité de respectivement 0.09 et 0.05.

5.1.3.2 Description des modalités par étages foliaires

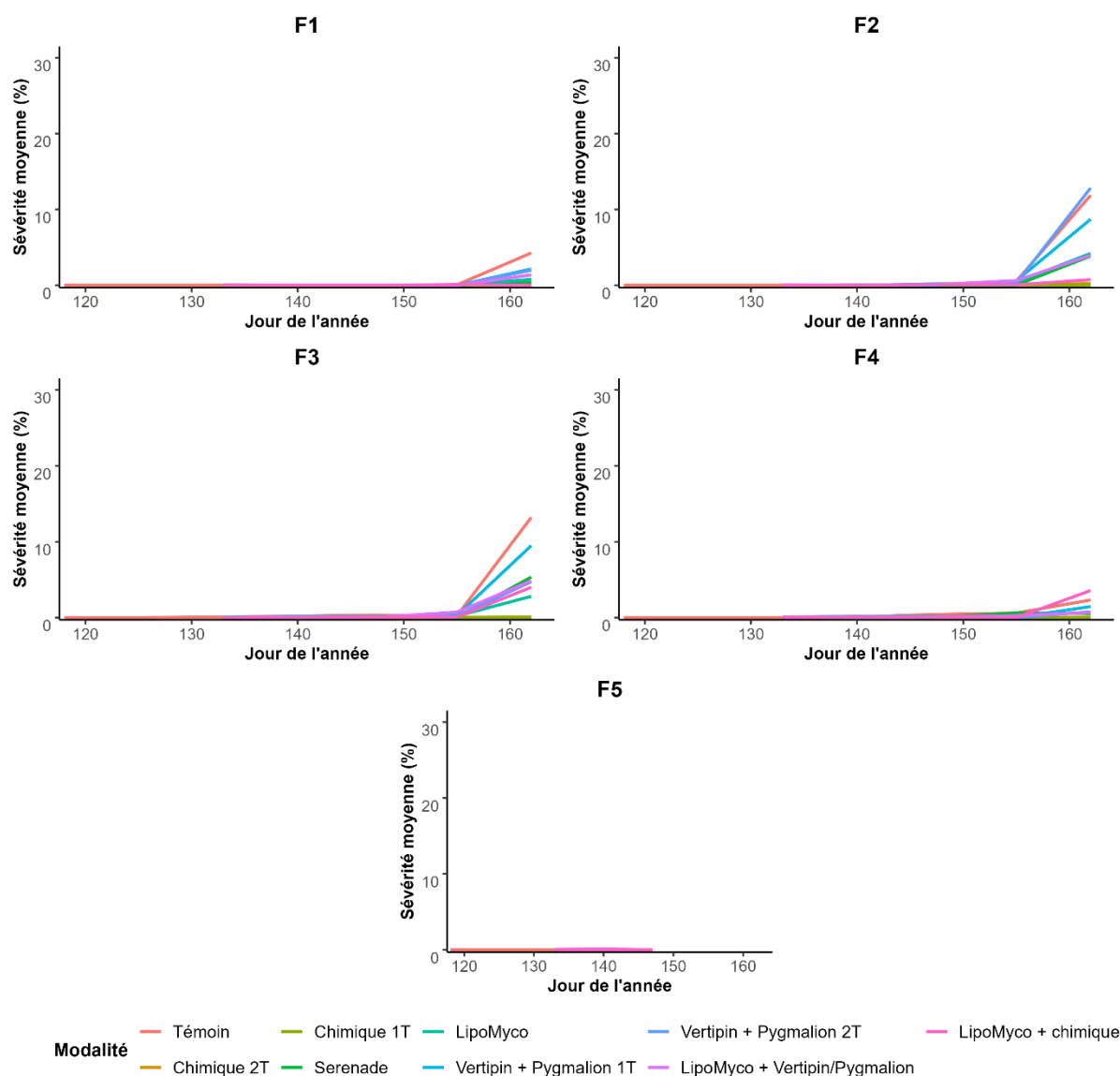


Figure 21 : Répartition de la sévérité moyenne de la rouille brune par étages foliaires selon les différentes modalités (l'étage foliaire est précisé en haut). Chaque modalité est identifiée par une couleur spécifique.

Concernant la rouille brune, celle-ci n'est apparue qu'à partir du stade DOY 155, le 02 juin. Avant cette date, presque aucune sévérité n'est observée. La première feuille (F1) ne présente d'ailleurs aucune sévérité sur cette saison culturale.

Pour la deuxième (F2), la troisième (F3) et la quatrième feuille (F4), le pic ayant lieu le 02 juin (DOY 155) reste assez faible. Globalement, la modalité « LipoMyco + Chimique » ainsi que « Vertipin + Pygmalion » ont des sévérités légèrement supérieures, atteignant 5%, contre 1 à 2% pour les modalités purement chimiques.

Enfin, la cinquième feuille (F5) présente une dynamique de sévérité de la rouille brune très faible, environ 1%, du début à la fin de la période d'observation.

5.2 Impact des traitements fongiques sur le développement de la plante

5.2.1 Evolution du LAI

Pour rappel, le LAI a été mesuré au stade 39 et au stade 65. Les trois modalités choisies pour cette mesure sont tout d'abord le témoin afin d'avoir un chiffre de référence pour évaluer l'impact des autres traitements. Ensuite, la modalité avec deux traitements chimiques a été choisie car c'est la pratique la plus récurrente en agriculture conventionnelle. Enfin, la modalité avec le traitement de biocontrôle LipoMyco peut présenter une bonne alternative chimique. Les autres modalités étant plutôt des variantes intermédiaires n'ont pas été prises en compte pour cette mesure.

5.2.1.1 Stade 39

La figure 22, ci-dessous, présente l'évolution de l'indice foliaire (LAI), récolté lors du stade 39 pour les trois modalités retenues pour cette mesure.

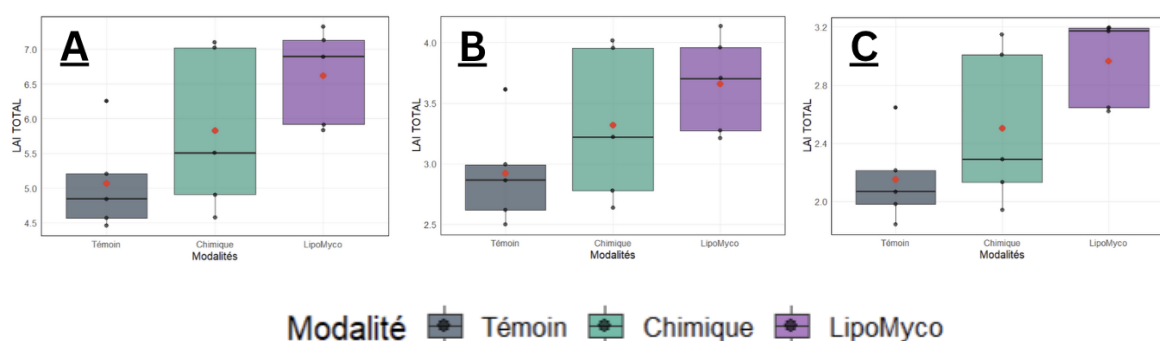


Figure 22A : Boxplots des LAI totaux entre le témoin, la modalité chimique et la modalité LipoMyco. 22B : Boxplots des LAI des feuilles entre le témoin, la modalité chimique et la modalité LipoMyco. 22C : Boxplots des LAI des tiges entre le témoin, la modalité chimique et la modalité LipoMyco. La moyenne, représentée par un rond rouge, et la médiane symbolisée par une ligne noire dans le boxplot, est exprimée pour chaque modalité de traitements.

Les données sont traduites en boxplots dans le but d'offrir une meilleure visibilité des valeurs individuelles. Les résultats montrent une nette différence entre la modalité témoin vis-à-vis des deux autres modalités. En effet, les traitements réalisés montrent leur efficacité de par une perte foliaire due aux maladies réduites. La tendance générale de cette figure montre aussi une médiane plus élevée pour la modalité « LipoMyco » par rapport aux modalités « Témoin » et « Chimique ». Par exemple, la médiane du LAI totale atteint les 7 pour la modalité « LipoMyco » alors qu'elle atteint à peine 5 pour le « Témoin » et 5,5 pour le « Chimique ». De plus, une variabilité plus marquée est observée pour la modalité « Chimique ». Les graphiques présentent des tendances similaires, notamment pour la modalité « Témoin » qui est largement inférieure aux autres. Néanmoins, bien que son effet moyen est similaire au traitement biocontrôle, une plus grande variation de LAI est observée pour la modalité chimique. En d'autres mots, elle présente un écart-type plus important par rapport à la modalité biocontrôle.

L'analyse statistique a permis de constater pour certaines modalités des différences significatives (annexe 6). En effet, les mesures du LAI au stade 39 montrent une variance supérieure à 0.05 (Annexe 6). Ainsi, Tukey a permis de constater des différences significatives entre LipoMyco et Témoin ($p < 0.05$) (Annexe 8 et 9). D'une part, concernant le test de Tukey vis-à-vis des LAI totaux, une différence significative a été observée entre LipoMyco et Témoin ($p = 0.0434$). En effet, les résultats présentent une moyenne de 6.72 pour la modalité 5 (groupe b), suivi de 5.72 pour la modalité 2 (groupe ab) et 5.17 pour la modalité 1 (groupe a). D'autre part, le test de Tukey a également prouvé une différence significative entre ces deux mêmes modalités ($p = 0.0185$) pour le LAI tige. La moyenne la plus élevée est également la modalité 5 (groupe b), avec 3.05, suivi de 2.43 pour la modalité 2 (groupe ab) et enfin, 2.21 pour la modalité 1 (groupe a). Par contre, le box plot illustrant le LAI feuille ne montre aucune différence significative entre les trois modalités ($p = 0.1094$) (Annexe 6).

5.2.1.2 Stade 65

La figure 23 présente également l'évolution de l'indice foliaire (LAI). Néanmoins, les mesures ont été récoltées, cette fois, lors du stade 65 pour les trois modalités.

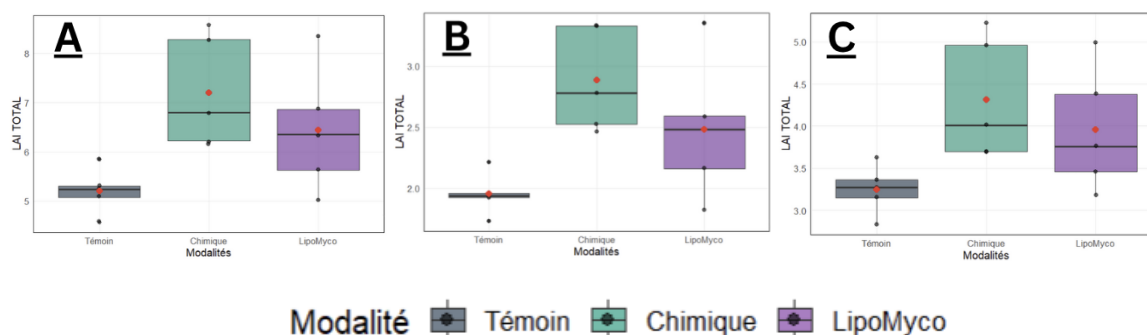


Figure 23A : Boxplots des LAI totaux entre le témoin, la modalité chimique et la modalité LipoMyco. 23B : Boxplots des LAI des feuilles entre le témoin, la modalité chimique et la modalité LipoMyco. 23C : Boxplots des LAI des tiges entre le témoin, la modalité chimique et la modalité LipoMyco. La moyenne, représentée par un rond rouge, et la médiane symbolisée par une ligne noire dans le boxplot, est exprimée pour chaque modalité de traitements.

Les boxplots illustrent chacun des valeurs individuelles. Cette figure met en évidence une médiane et une moyenne légèrement supérieure pour la modalité « Chimique » et, de manière moins prononcée pour la modalité « LipoMyco ».

L'analyse de la variance a montré des différences significatives (Annexe 6). Le test de Tukey a cette fois montré des différences entre la modalité Témoin et le Chimique (Annexe 8 et 10). En effet, une différence significative est signalée entre le Témoin et le chimique sur les LAI totaux ($p = 0.0239$). En effet, le groupe deux, correspondant à la modalité Chimique deux traitements, présente la valeur moyenne la plus élevée (7.20) et se différencie du groupe 1, le Témoin (5.20), significativement plus faible. Le groupe intermédiaire, le LipoMyco, a pour moyenne 6.44. Celui-ci ne diffère pas significativement des deux autres groupes. Une différence similaire ($p = 0.0114$) a également lieu entre Témoin et Chimique dans les LAI feuille. Pour les LAI tige, une tendance similaire a été remarquée. En effet, la valeur la plus élevée concerne la modalité 2 (2.89), suivie par la modalité 5 (2.48) et enfin la modalité 1 avec une moyenne de 1.95. Par contre, le box plot illustrant le LAI tige ne montre aucune différence significative selon l'analyse de la variance ($p = 0.0510$). Toutefois, cette p-valeur étant proche

de la limite 0.05, il a été choisi de réaliser également le test post-hoc. Les valeurs obtenues suivent la même tendance que les deux mesures précédentes du stade 65. En effet, la moyenne la plus élevée est la modalité 2 avec 4.32, suivie de 3.96 pour la modalité 5 et 3.25 pour la modalité 1.

5.2.2 Biomasse

La figure 24 permet d'avoir une première approche des tendances sur les biomasses des différentes parties de la plante.

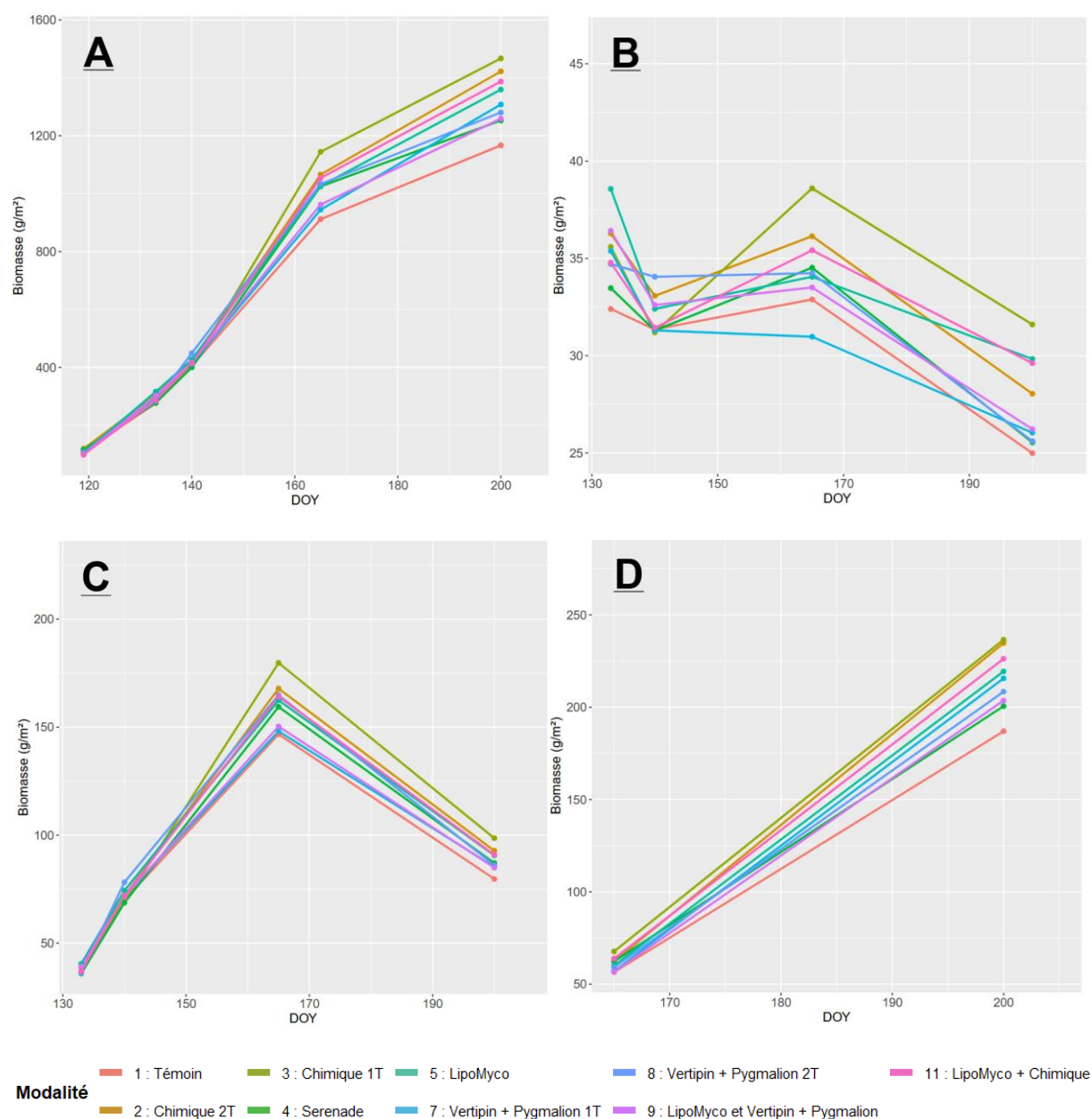


Figure 24 : Dynamique de l'évolution de la biomasse des différents organes de la plante selon le stade BBCH. A) Biomasse totale. B) Biomasse des feuilles. C) Biomasse des tiges. D) Biomasse des épis.

La figure 24A montre une augmentation progressive de la biomasse totale pour toutes les modalités. Les différentes modalités présentent des écarts limités, traduisant une dynamique générale assez similaire. Par contre, la figure 24B présente une biomasse foliaire très peu stable. Les modalités connaissent une pente croissante de la biomasse entre le DOY 140 et le DOY 162, entourée de deux pentes décroissantes. Bien que les différentes modalités ne réagissent pas de la même manière, les écarts entre celles-ci paraissent faibles, puisque l'axe y varie de 26 à 38 g/m². Seule la modalité chimique 1T montre une biomasse plus élevée. La biomasse des tiges (figure 24C) augmente tout au long du développement de la culture, puis décroît une fois atteint le stade Z65 (DOY 162). Enfin, pour la figure 24D, la biomasse des épis augmente logiquement entre le stade 65 et le stade 89. Les différences y sont assez limitées, allant de 180 à 230 g/m².

5.2.2.1 Stade 30

La figure 25 montre la biomasse totale mesurée au stade Z30 selon les différentes modalités de traitement.

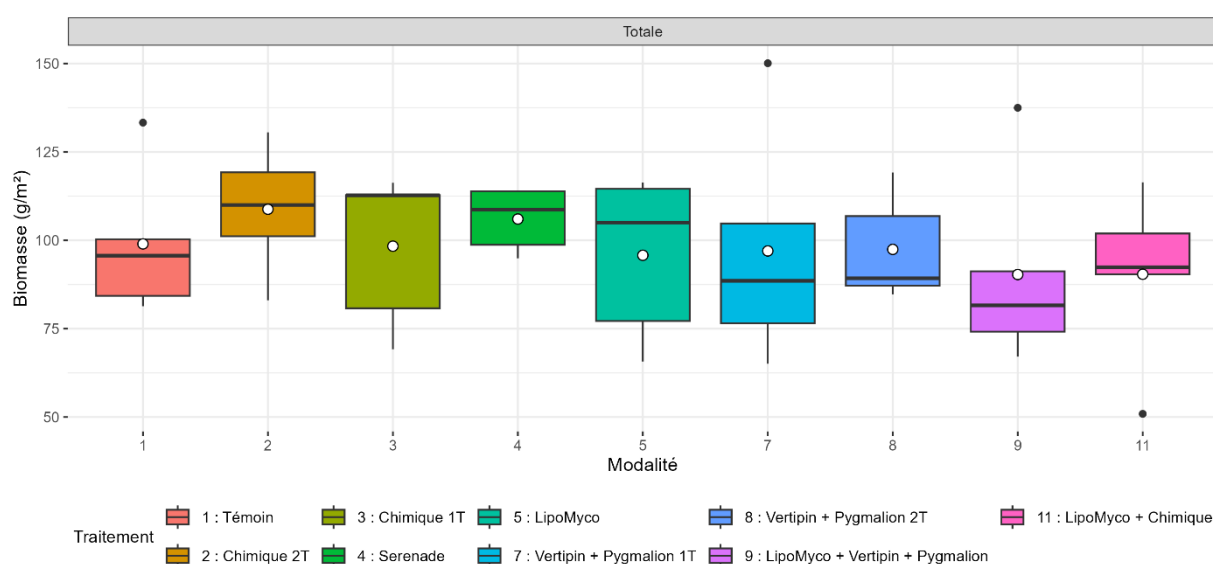


Figure 25: Boxplots illustrant la biomasse au stade Z30 selon les différentes modalités de traitement.

À ce stade précoce, les différences entre modalités sont limitées et non significatives ($p = 0.9247$). À souligner que la ligne horizontale dans le box plot représente la médiane. Les lignes verticales représentent les données hors des 50% groupées dans le box plot. Les points blancs expriment les moyennes alors que les petits points noirs sont les outliers.

5.2.2.2 Stade 32

La figure 26 illustre la répartition de la biomasse au stade Z32.

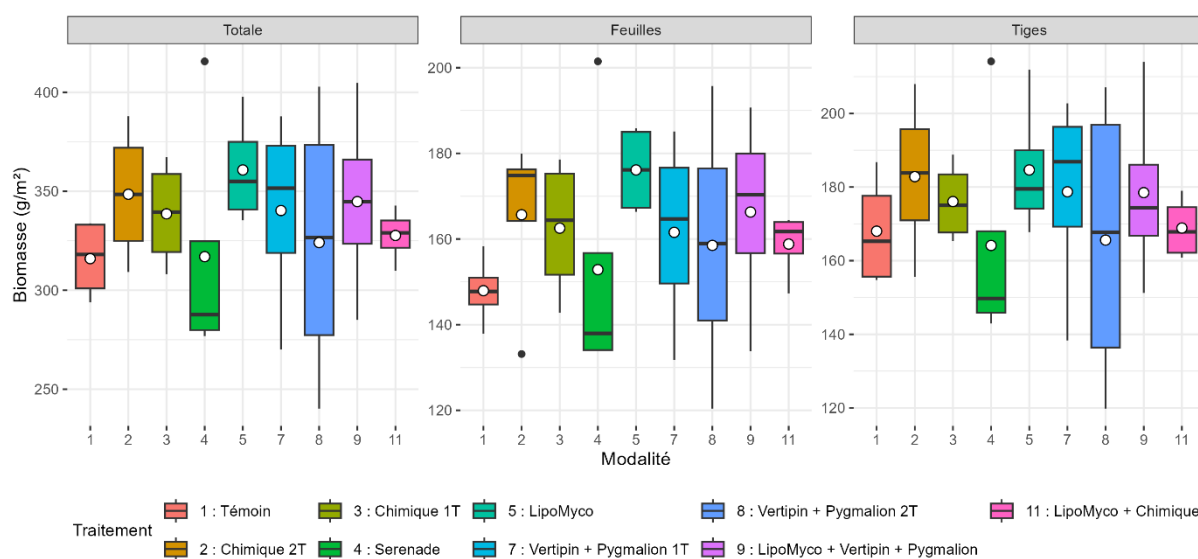


Figure 26 : Boxplots illustrant la biomasse au stade Z32 selon les différentes modalités de traitement.

La biomasse globale semble globalement plus élevée que celle mesurée au stade Z30. Concernant la biomasse foliaire et celle des tiges, les tendances sont assez similaires entre modalités. Les tests statistiques réalisés ne montrent aucune différence significative (Annexe 6).

5.2.2.3 Stade 39

La figure 27 présente l'évolution de la biomasse totale, foliaire et de tige au stade Z39.

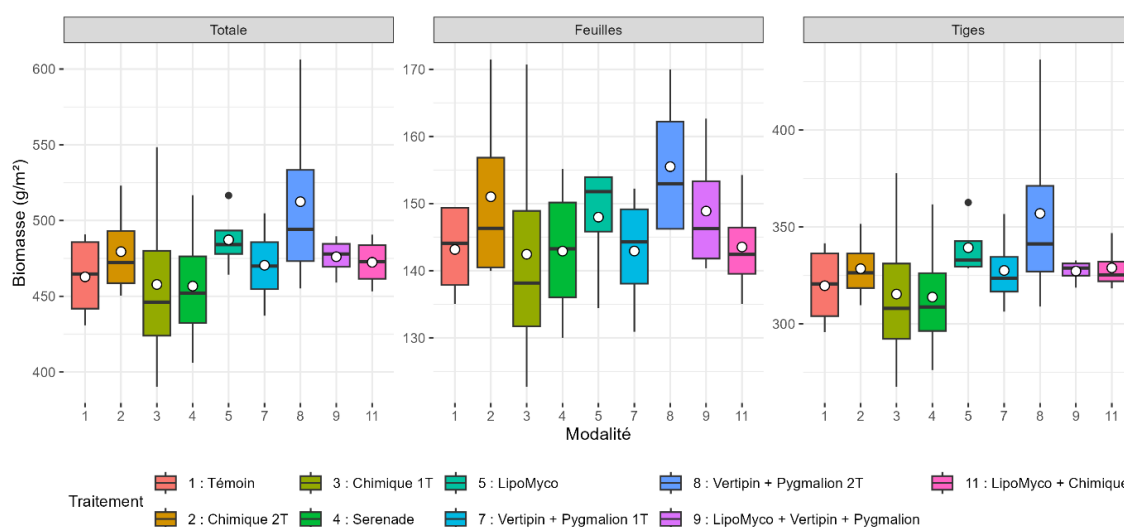


Figure 27 : Boxplots illustrant la biomasse au stade Z39 selon les 9 modalités de traitement.

La biomasse totale atteint des niveaux comparables à ceux du stade précédent. Les modalités 2 (Chimique 2T) et 3 (Chimique 1T) conservent des valeurs médianes élevées. En revanche, certaines modalités de biocontrôle, notamment la 9 (LipoMyco + Vertipin + Pygmalion), affichent des biomasses plus faibles. On note également une dispersion plus importante des données pour certaines modalités, suggérant une variabilité entre répétitions. Afin de réaliser l'analyse de la variance, une transformation logarithmique a été réalisée sur la variable « BIOTIGE » afin de remplir les conditions d'applications. Ensuite, les extrêmes supérieurs à 95% ont alors été supprimés afin que la normalité et l'homogénéité puissent enfin être respectées (Annexe 7). Bien que le test de Shapiro ne soit pas respecté ($p = 0.0325$), l'ANOVA a quand même pu avoir lieu de par la robustesse du test de Levene vis-à-vis de la non-normalité détectée par Shapiro. Enfin, l'analyse de la variance ne comporte aucune différence significative.

5.2.2.4 Stade 65

La figure 28 illustre la biomasse au stade Z65, incluant la biomasse totale, foliaire, de tige et des épis.

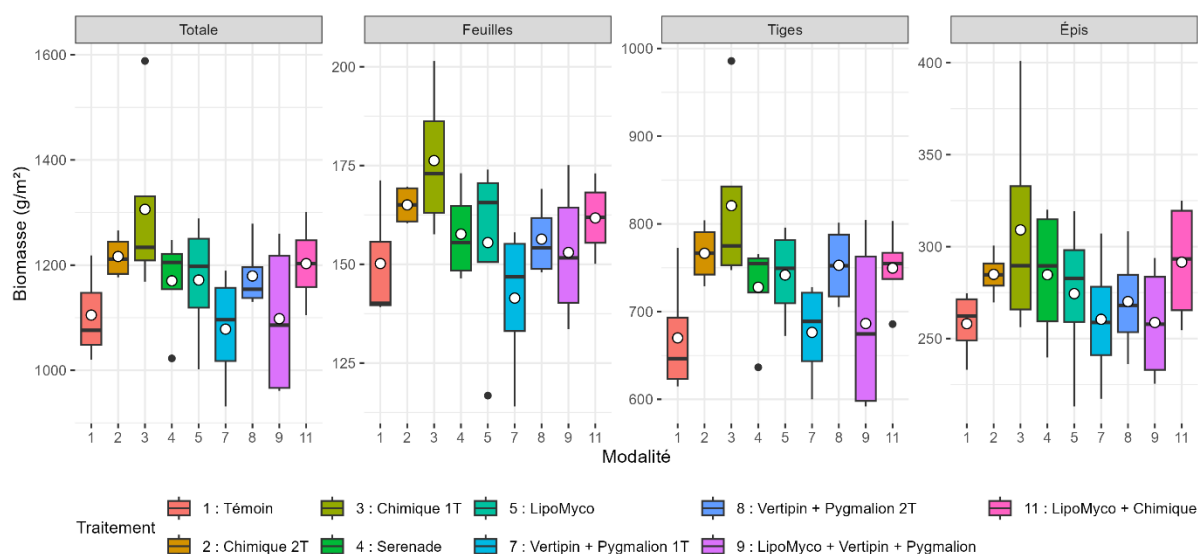


Figure 28 : Boxplots illustrant la biomasse au stade Z69 selon les 9 modalités de traitement.

On y observe une augmentation générale de la biomasse par rapport aux stades précédents. La modalité 3 (Chimique 1T) présente les valeurs les plus élevées pour la biomasse totale et la biomasse épis, suivie par la modalité 2 (Chimique 2T). Les modalités à base de biocontrôle, en particulier la 9 (LipoMyco + Vertipin + Pygmalion), se situent en retrait. Afin de réaliser l'ANOVA, une transformation logarithmique a été réalisée pour la variable « BIOTIGE » et « BIOTOT », sans conclure sur des différences significatives.

5.2.2.5 Stade 89

La figure 29 présente la biomasse au stade Z89, c'est-à-dire juste avant la récolte.

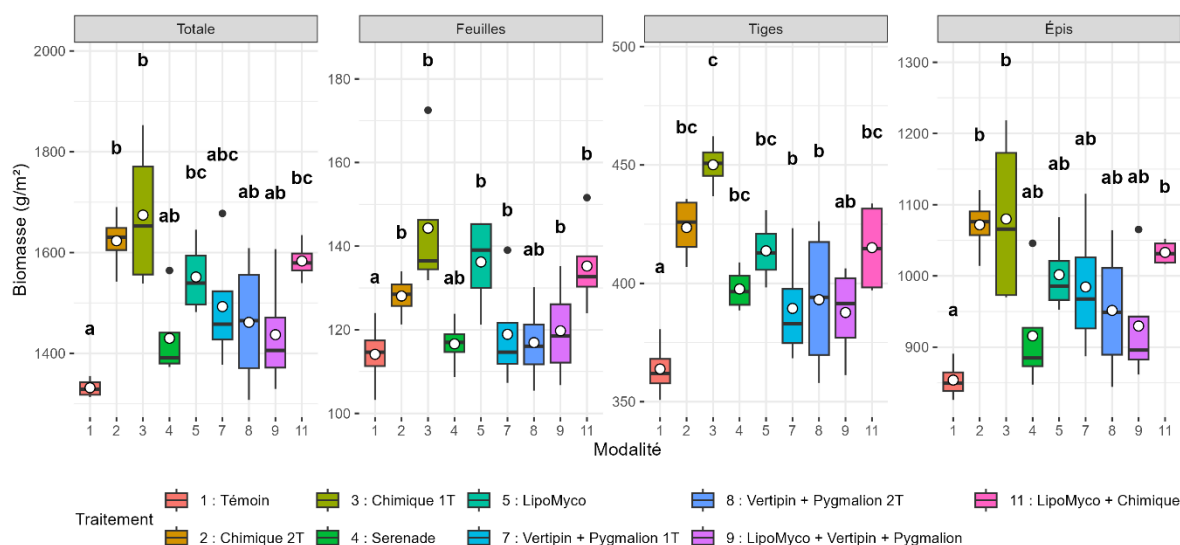


Figure 29 : Boxplots illustrant la biomasse au stade Z89 selon les 9 modalités de traitement.

Les trois modalités avec la biomasse la plus élevée sont les deux modalités chimiques ainsi que la modalité combinant la LipoMyco avec du chimique. À l'opposé, la modalité ayant la biomasse la plus faible concerne la modalité « Témoin ». Lors de l'analyse statistique, les conditions d'applications ont été vérifiées. Seule la variable « BIOTIGE_89 » ne respecte pas les conditions d'applications dans notre analyse. Celle-ci subit une transformation en logarithme afin de respecter le test de normalité ($p = 0.6937$). Toutefois, le test de Levene prouvant l'hétérogénéité des variances n'est pas respecté ($p = 0.0406$). Étant donné la valeur de la p-value proche de l'acceptation (0.05), l'analyse de la variance a malgré tout été réalisée, tout en prenant compte de ces résultats avec modération.

L'analyse de la variance a permis de constater des différences significatives pour chacune des variables au stade 89 (Annexe 6). Tout d'abord, il y a une différence très hautement significative pour la variable « BIOTOT » ($p = 0.0003$) ainsi que pour la variable « BIOTIGE » ($p = 5.2 \times 10^{-5}$). Concernant la variable « BIOFEUIL », elle est hautement significative ($p = 0.0076$). Enfin, la variable « BIOEPIS » présente également une différence hautement significative ($p = 0.0033$). Les différents groupes réalisés via les tests post-hoc se trouvent dans les annexes 11 et 12.

5.2.3 Rendements agronomiques

La figure 30 ci-dessous, présente les rendements agronomiques.

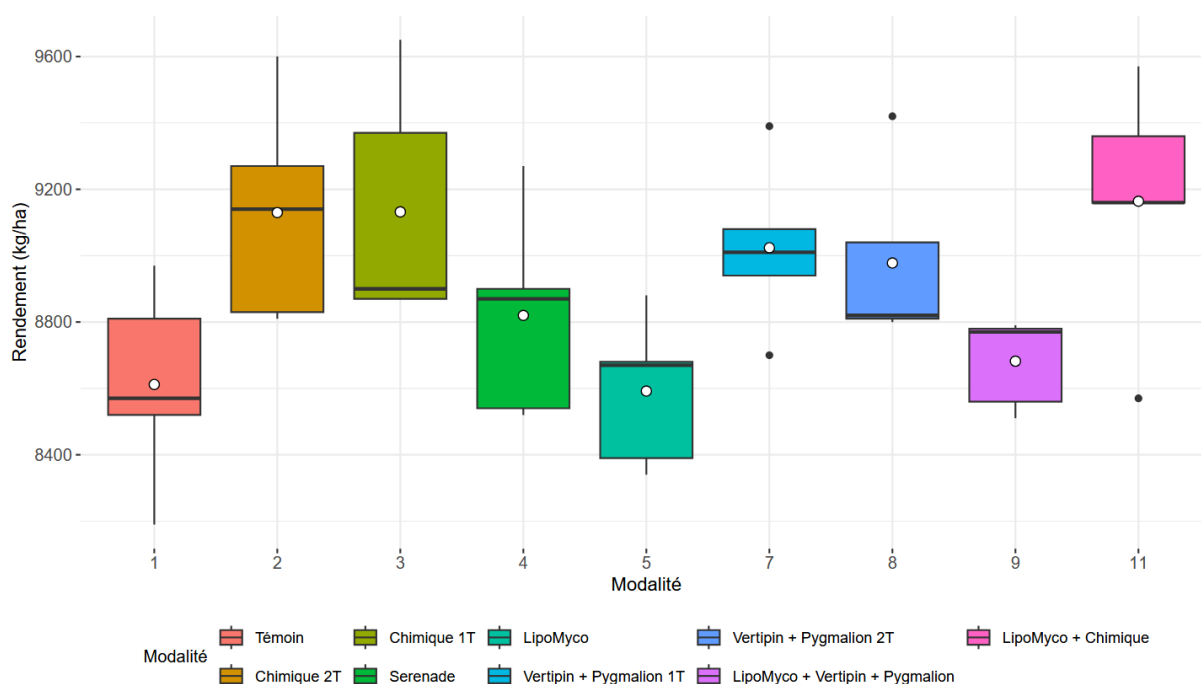


Figure 30 : Boxplots illustrant les rendements des 9 modalités de traitement.

Deux groupes présentent un rendement supérieur, avec une médiane s'approchant des 9 200 kg/ha. Ce sont les modalités « Chimique 2T » ainsi que « LipoMyco + Chimique ». La modalité « Chimique 1T » présente une moyenne similaire aux deux autres mais avec une variabilité des valeurs du box plot beaucoup plus présente. Le rendement inférieur appartient quant à lui, à la modalité « Témoin », avec une médiane de 8 570 kg/ha. Les résultats statistiques ont montré une différence hautement significative entre les moyennes des modalités ($p = 0.0075$). Toutefois, le test de Tukey ne montre aucune variation significative entre les modalités (Annexe 11). Cela est potentiellement dû à la très grande variabilité intra-groupe.

Afin de mieux comprendre et d'expliquer ces rendements observés, il convient d'examiner deux de ses composantes : le nombre d'épis par mètre carré (figure 31) et le poids de mille grains (figure 32).

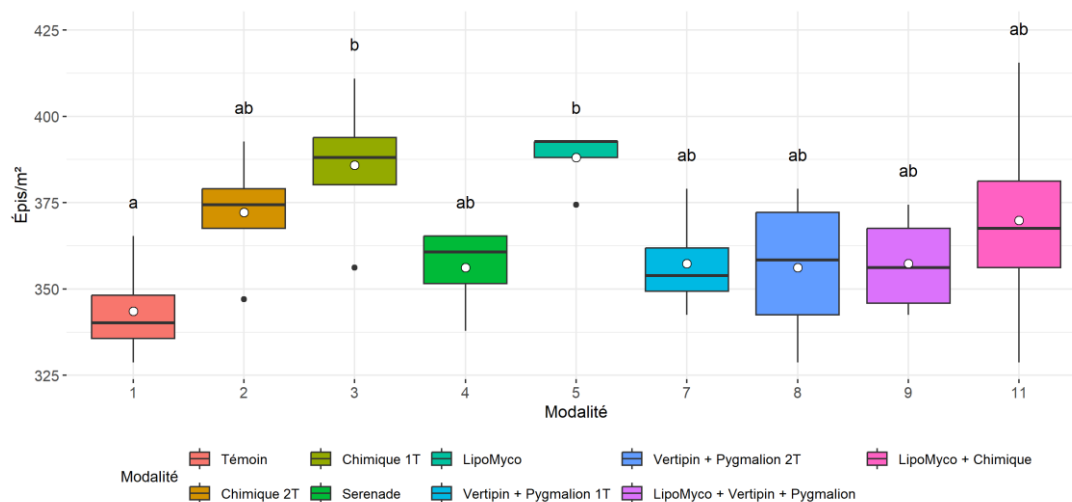


Figure 31 : Boxplots illustrant les épis/m² selon les 9 modalités de traitement.

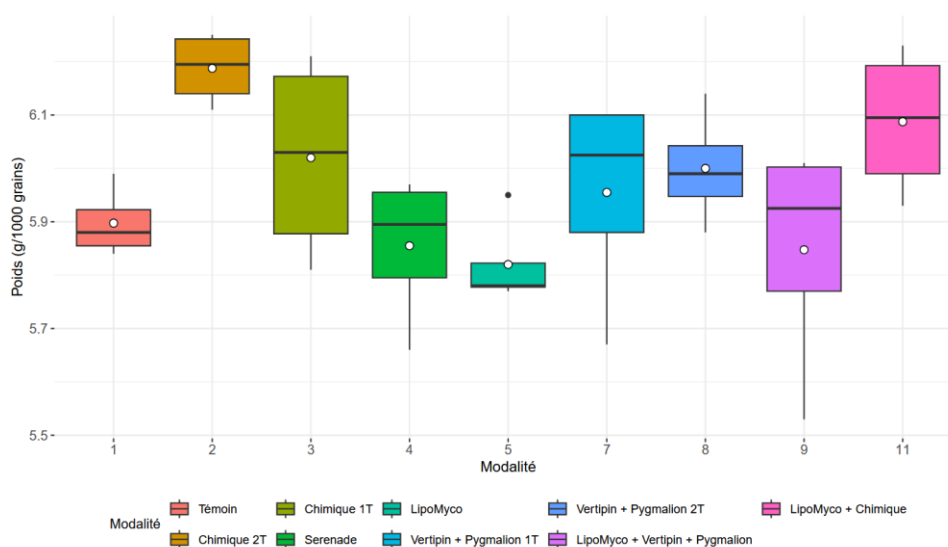


Figure 32 : Boxplots illustrant les poids de 1000 grains selon les 9 modalités de traitement.

Concernant le nombre d'épis/mètres carrés, une différence significative est présente lors de l'analyse statistique. D'ailleurs, une grande constatation observée suite à l'analyse statistique est la présence de la modalité « LipoMyco » dans le groupe b, avec la modalité « Chimique 1T ». Le nombre d'épis par mètre carré pour celle-ci est donc supérieur que dans les autres modalités de biocontrôle. Pour le poids de 1000 grains, aucune différence significative n'a par contre été constatée.

6. Discussion

6.1 Effet des traitements sur les sévérités maladies

La saison culturale 2025 a été caractérisée par des conditions climatiques peu favorables au développement des maladies fongiques. Bien que l'hiver fût très pluvieux, le printemps a été beaucoup plus sec que la normale, avec notamment une pluviométrie divisée par deux (IRM, 2025). Or, comme relaté précédemment, les maladies fongiques, et plus précisément leur progression, nécessitent une humidité relative sur les feuilles, ainsi que de la pluie (El Jarroudi *et al.*, 2017). Cette faible pression engendre donc une réduction des différences entre modalités de traitement, ayant pour conséquence une interprétation des résultats plus limitée.

Néanmoins, il est important de prendre conscience que les conditions météorologiques de cette saison ne constituent pas un cas extrême isolé. En effet, ce scénario mis en avant par Juroszek et von Tiedemann (2013) conforte la tendance générale des dernières années, consistant à faire face à une plus grande variabilité climatique (Juroszek & von Tiedemann, 2013). Les conclusions d'une année ne sont pas celles de la suivante. Les étés secs sont souvent précédés par un printemps assez sec ou, à l'inverse, par un printemps très humide. Dans les deux cas, les températures sont de plus en plus irrégulières.

Cette fluctuation climatique complexifie l'application de stratégies de protection fongique, se dirigeant vers des interventions au cas par cas. Dans notre cas d'une saison sèche au printemps, l'utilisation de produits de biocontrôle paraît figurer parmi l'une des solutions pour les années futures.

6.1.1 Septoriose

Tout d'abord, la saison culturale 2025 n'a pas été propice au développement de la septoriose, suite aux conditions climatiques. En effet, comme dit précédemment (voir 2.3.1), la septoriose se propage d'un étage foliaire à l'autre via les éclaboussures d'eau lors de périodes de pluie (Slimane, 2010). Les mois de mars et d'avril anormalement très secs et chauds, ont freiné tout développement de la septoriose. Cette observation est cohérente avec les résultats de Fones *et al.* (2017), qui ont montré que des phases sèches limitent fortement le développement de *Zymoseptoria tritici*. La présence d'un épisode pluvieux le 05 mai (4 mm) semble avoir favorisé les infections, comme en témoigne le pic lors de la montaison entre le 20 et le 27 mai (DOY 140 et 147) (figure 16). L'hypothèse selon laquelle les spores n'étaient pas dans un environnement propice pour se déposer peut-être réaliste (Duvivier *et al.*, 2016). En effet, les spores pourraient être dans l'air depuis avril, ne s'installant seulement sur les feuilles après les premières pluies (Tapia *et al.*, 2025). Dès lors que la période de latence est réalisée, les spores peuvent enfin s'épandre aux feuilles supérieures. Cette tendance se confirme par la figure 16, où la septoriose apparaît au 13 mai (DOY 133) sur la quatrième et cinquième feuille, puis à partir du 4 juin (DOY 155) sur les 3 dernières feuilles. Ces résultats prouvent donc que les symptômes évoluent, au fur et à mesure, des étages inférieurs aux étages supérieurs. Toutefois, les feuilles F1 et F2 ne sont que très peu impactées (< 10%), comme l'indique El Jarroudi *et al.* (2022). Ce dernier souligne l'importance de l'inoculum initial sur les feuilles inférieures et des conditions climatiques post-montaison sur la sévérité finale des feuilles supérieures. Dans notre

expérimentation, l'absence de pluie en mars-avril, combinée à des températures élevées, a donc freiné le développement de la maladie.

La sénescence des feuilles fait son apparition le 4 juin (DOY 155) sur la cinquième feuille. Cette évolution n'est pas surprenante puisque c'est un phénomène naturel et habituel (Slimane, 2010). Néanmoins, celle-ci peut être amplifiée et accélérée si la feuille est impactée par des maladies. Dans notre cas, on voit une hausse importante de la septoriose entre le 20 et le 27 mai, allant jusqu'à 70 % voire 95 % de sévérité. Elle intervient cette année pour toutes les modalités de traitements en même temps. Sur la figure 16, la sénescence, potentiellement accélérée par la septoriose, entraîne une stagnation de l'évolution de la sévérité de la septoriose, une fois ces dates atteintes. Cela s'explique en partie par le fait que les feuilles considérées comme sénescentes n'interviennent plus dans la moyenne de sévérité, bien que la feuille comporte toujours des symptômes.

Concernant la comparaison des différentes modalités de traitement, lors des périodes de faibles infestations, les conclusions sont identiques pour la totalité des traitements. Néanmoins, une fois que la sévérité de la maladie augmente significativement, les traitements chimiques se démarquent positivement des autres traitements. Pour les produits de biocontrôle, ils ont globalement une tendance similaire entre eux, étant légèrement supérieurs aux sévérités du « Témoin », lors des infestations sévères. Seule la combinaison de la LipoMyco suivi d'un traitement chimique au stade Z55 se démarque, avec des résultats proches des modalités purement chimiques. Un projet d'Arvalis a également mis en avant le fait de combiner une dose réduite de fongicide avec un produit de biocontrôle permettrait d'obtenir des résultats proches de la modalité comprenant une dose complète de fongicides (INNOVAR, 2021 ; Syngenta, 2023a). Dans une saison comme celle-ci, avec l'apparition tardive des maladies, ce choix de traitement devrait pouvoir être retenu dans le futur.

6.1.2 Rouille jaune et Rouille brune

Bien que les conditions climatiques soient sèches, la fin mai ainsi que le mois de juin ont présenté un temps plus propice au développement des rouilles. En effet, le mois de juin fut marqué par de la pluie en moyenne un jour sur trois. Les températures de jour abordaient les 20°C tandis que celles de nuit côtoyaient les 10°C. La présence d'une bonne humidité relative suite à la rosée fut également un élément à prendre en compte pour leur développement (El Jarroudi *et al.*, 2017). Malgré ces conditions, l'utilisation d'une variété très résistante à la rouille jaune comme la KWS Keitum a permis de limiter fortement la sévérité de cette maladie, comme l'ont mis en évidence les travaux de Chen (2005). Ainsi, les premiers symptômes ont été constatés vers le 1 juin (DOY 152). Ce pic apparaît sur les feuilles F3 et F4 à cette date ainsi que le 11 juin (DOY 162) pour la feuille F2. L'apparition des symptômes sur plusieurs feuilles en même temps vient du fait que les rouilles se propagent par le vent alors que la septoriose se transmet avec l'aide des précipitations (Roelfs *et al.*, 1992 ; Livre Blanc des Céréales, 2024d). Cette augmentation de sévérité est due également aux conditions météorologiques. Bien que le mois de mai et juin furent considérés comme secs, le retour des précipitations entre le 25 et le 28 mai (20 mm), mais aussi début juin (31 mm) a permis à la rouille jaune de se développer.

La rouille brune, quant à elle, a rencontré des conditions propices à son développement une semaine après la rouille jaune, puisqu'elle tolère plus facilement la chaleur. En effet, la dynamique de sévérité de la rouille brune (figure 20) montre une augmentation d'infestation après le 7 juin (DOY 158), plus précisément sur les feuilles F2 à F4. Cela est dû notamment à

la vague de chaleur plus élevée (22-24°C) rencontrée fin mai. Les conditions ont ensuite été très chaudes et sèches pour la suite du mois de juin, engendrant des sévérités croissantes. La température moyenne mensuelle fut de 18,6°C, soit 1,9°C de plus que la normale, plaçant le mois de juin 2025 à la deuxième place des mois de juin les plus chauds. Malgré l'arrêt des cotations maladies, l'évolution rapide et exponentielle des rouilles brunes a été constatée jusqu'à la fin du mois de juin.

Les étages foliaires impactés par les rouilles sont similaires. En effet, les feuilles F2 à F4 ont été les plus atteintes par la rouille jaune ainsi que les feuilles F2 et F3 pour la rouille brune. La dernière feuille étalée (F1) n'est que très peu impactée par les maladies, en raison de l'arrivée très tardive des symptômes sur celle-ci. Cette feuille s'étale plus tard que les autres, réduisant ainsi la durée d'exposition aux agents pathogènes.

6.2 Effet des traitements sur le développement de la plante

6.2.1 Éco-physiologie

D'un point de vue éco-physiologique, le produit LipoMyco pourrait être un biocontrôle amenant plus de stabilité foliaire. La figure 21, illustrant les boxplots des LAI totaux au stade Z32, présente une homogénéité plus prononcée des biomasses des tiges et des feuilles. Il faut savoir que le produit LipoMyco, et plus globalement les produits de biocontrôle ont pour caractéristique d'être plus efficaces en préventif. De plus, la réduction de l'écart-type des biomasses observée avec le produit LipoMyco s'expliquerait par sa composition. En effet, ce produit est composé de lipopeptide dont la surfactine, connue à la fois pour son rôle antifongique direct et pour son rôle indirect d'induction de la résistance systémique (ISR) chez la plante (Ongena & Jacques, 2008). On peut donc penser que ce produit diminue le taux de petites tiges et de petites feuilles. La présence d'un nombre d'épis au mètre carré plus élevé pour cette modalité pourrait confirmer cette hypothèse (figure 31). Une quantité plus élevée d'épis, pour les traitements avec du biostimulant, a également été souligné sur des essais en Normandie (Maignan *et al.*, 2021). Toutefois, la tendance s'inverse au stade Z65 (figure 22). Bien que la modalité « Témoin » reste toujours dans des proportions inférieures, la modalité « Chimique » comprend cette fois, des biomasses significativement plus élevées que la modalité « LipoMyco ». Deux raisons peuvent expliquer ce résultat. D'un côté, l'effet stabilisant du LipoMyco est surestimé au stade Z32. Il ne rendrait pas la biomasse plus homogène et n'aurait donc aucune plus-value au chimique. D'un autre côté, la baisse de biomasse au stade Z65 pourrait refléter une plus forte infestation de la maladie, chez les plantes non protégées chimiquement. En effet, à ce stade-là, les feuilles de froment subissent une charge fongique plus prononcée (figure 16,18,20). De plus, une année avec des conditions plus favorables aux développements des maladies auraient potentiellement amené à des résultats positifs supérieurs pour la modalité chimique. Ainsi, les différences d'impact entre stades confirment que l'efficacité de la LipoMyco est préventive, avec une forte dépendance aux conditions sanitaires en début de cycle.

6.2.2 Rendement

Bien que certains bénéfices agronomiques apportés par les produits de biocontrôle, tels que l'augmentation de la biomasse, aient été observés, il convient de souligner que, pour les agriculteurs, le critère déterminant reste le rendement. En effet, ce dernier conditionne directement la rentabilité économique et présente un levier central dans la prise de décision agronomique.

En Belgique, le rendement moyen du froment s'élève à 8 950 kg/ha (Statbel, 2024c). Dans notre essai, les rendements moyens observés varient selon les modalités de 8 590 à 9 140 kg/ha, se situant donc dans la fourchette nationale. Ce rendement correct est dû à plusieurs facteurs agronomiques favorables. D'une part, le semis a été réalisé dans de bonnes conditions automnales. Cela permet ainsi un enracinement profond, permettant à la plante de mieux tolérer la sécheresse du printemps (Odone *et al.*, 2024). D'autre part, les conditions météorologiques de cette année, avec un printemps sec et très ensoleillé, a limité la pression fongique, réduisant alors les pertes de rendement associées. En effet, les années sèches peuvent générer de bons rendements, à condition que les précipitations soient présentes au moment cruciaux. Une étude européenne menée par Mäkinen *et al.* (2018) suggère que pour obtenir de bons rendements malgré un printemps sec, les pluies doivent arriver pendant la floraison, afin de limiter les impacts négatifs sur le remplissage des grains. Les résultats démontrent ainsi que l'ensemble des modalités permet d'atteindre un rendement acceptable au niveau économique, ce qui rend d'autant plus pertinent l'évaluation de stratégies alternatives aux produits chimiques.

Dans un contexte de faible sévérité des maladies, traiter la culture n'induit pas nécessairement une augmentation significative du rendement et par conséquent, du revenu (Wegulo *et al.*, 2011). Les modalités présentant les rendements les plus élevés sont les modalités « Chimique 1T », « Chimique 2T » ainsi que « LipoMyco + Chimique », atteignant un rendement supérieur à la moyenne nationale (jusqu'à 9 140 kg/ha). A contrario, le témoin non traité et la modalité « LipoMyco » affichent des rendements inférieurs, avec des moyennes de 8 600 kg/ha, bien que dans des normes convenables.

L'année culturale 2024-2025 est caractérisée par une faible pression fongique, suite aux conditions météorologiques peu favorables au développement des maladies. Ce contexte n'est pas à négliger. En effet, l'impact des traitements phytosanitaires sur le rendement est diminué, ce qui pourrait expliquer l'absence de différence significative (Friskop *et al.*, 2018). Cette situation met en lumière une réflexion actuelle sur les pratiques agricoles. Est-il nécessaire, en cas d'année pauvre en maladies, d'appliquer deux traitements chimiques ?

Tout d'abord, les résultats obtenus démontrent que le second passage de pesticides n'amène aucun avantage. En effet, d'un point de vue des maladies, des biomasses ainsi que du rendement, aucun profit n'a été remarqué. Au contraire, la modalité à traitement chimique unique atteint un rendement assez similaire, voire légèrement supérieur au double traitement. Bien que la médiane soit inférieure, la moyenne reste semblable. Ces observations rejoignent les conclusions d'études (Breunig *et al.*, 2022 ; Seutin *et al.*, 2011), montrant qu'un second traitement n'apporte aucun gain en cas de faible pression fongique. De plus, l'utilisation réduite de ces produits chimiques pourrait diminuer le développement de résistances. A long terme, cela pourrait permettre de maintenir l'efficacité d'un produit chimique lorsque celui-ci est nécessaire (Lazaro *et al.*, 2021).

Ensuite, les résultats suggèrent que le recours à des solutions de biocontrôle seules ou combinées, atteignent des valeurs proches de la moyenne nationale. Ils constituent donc une

alternative efficace aux fongicides traditionnels. Cette stratégie permettrait à la fois de restreindre l'utilisation de produits phytosanitaires de synthèse tout en réduisant leurs impacts environnementaux. Cette démarche s'inscrit pleinement dans les principes de protection intégrée (IPM), préconisant une gestion raisonnée des maladies basées sur l'observation. A ce titre, Soubeyrand *et al.* (2024) confirme d'ailleurs l'importance d'ajuster les applications fongiques à partir des observations de terrains et de leurs seuils d'interventions (Soubeyrand *et al.*, 2024). En effet, l'application systématique des traitements chimiques en l'absence de risque avéré n'engendre pas spécialement de bénéfice agronomique (Friskop *et al.*, 2018 ; Wegulo *et al.*, 2011).

De manière plus détaillée, les performances de la Serenade et de la combinaison Pygmalion-Vertipin sont acceptables. Une étude de Thibierge (2023) montre d'ailleurs des résultats similaires pour le mélange de soufre-phosphonate vis-à-vis du chimique quand ils sont utilisés en premier traitement. Par contre, le produit LipoMyco seul amène à des résultats inférieurs dans notre essai, atténuant les résultats physiologiques satisfaisants obtenus au stade Z39 de la culture. La seule modalité comprenant la LipoMyco et montrant des résultats positifs est la combinaison de la LipoMyco avec l'ajout de produits chimiques une fois le stade Z55 atteint. Ces résultats positifs s'expliquent par le fait que la LipoMyco a été appliqué lorsque la sévérité des maladies était faible. Les sévérités ont commencé à augmenter aux alentours du stade Z55, correspondant au moment où le produit chimique a remplacé la LipoMyco. On voit par la même occasion sur les résultats que les trois dernières feuilles ne sont que très peu impactées par les maladies avant le stade Z55. Un traitement de LipoMyco peut ainsi suffire jusqu'à ce stade-là avant de passer à une application chimique, dans le but de protéger le potentiel de photosynthèse en phase de remplissage de l'épis. Ce constat est d'ailleurs soutenu par plusieurs études montrant que le rendement est principalement influencé selon les symptômes présents sur les trois dernières feuilles (Moreau & Maraite, 1999 ; Slimane, 2010). Cette stratégie phytosanitaire, alliant un biocontrôle en début de cycle et recours chimique raisonné en fin de cycle, mérite donc d'être mise en place dans les années à venir, et ce, d'autant plus dans les années peu propices aux maladies.

7. Conclusion et perspectives

En conclusion, ce mémoire a eu pour but d'analyser l'efficacité des produits de biocontrôle sur les maladies fongiques du froment d'hiver. Les résultats obtenus prouvent que le développement des maladies dépend fortement des conditions propices à leur apparition. Sans celles-ci, l'impact sur le rendement final reste limité. En pratique, la variété utilisée est définie comme étant fortement résistante à la rouille jaune, présentant donc des développements limités dans l'essai, malgré les conditions plus propices. La rouille brune s'est, quant à elle, développée tardivement dans la saison, une fois l'épi déjà formé. Enfin, le développement de la septoriose est resté modéré durant cette année culturale, bien que cette variété y soit sensible. Cela est dû principalement aux quantités inexistantes de pluies tombées en avril-mai sur cette saison culturale. Les précipitations tombées lors de la seconde partie du mois de mai ont certes augmenté la sévérité de la septoriose, mais trop tardivement sur les trois dernières feuilles pour pouvoir causer des pertes de rendements.

Ensuite, l'évaluation des traitements a montré qu'une double application fongicide n'est pas nécessaire dans un contexte de faible pression épidémique. Un seul traitement suffit, et ce, pour les trois maladies étudiées.

Dans le cadre de ce contexte de faible pression épidémique, certains produits de biocontrôle présentent ainsi des résultats concluants. Lors de sévérités plus élevées, la modalité la plus propice à être utilisée à l'avenir est la combinaison de LipoMyco en début de culture, suivi d'un traitement chimique une fois le stade Z55. Ces résultats montrent l'importance de mettre en œuvre les principes de lutte intégrée, en y intégrant une surveillance rigoureuse des stades phénologiques et des conditions climatiques afin de déterminer le moment le plus opportun pour intervenir. De plus, bien que la modalité « Témoin » soit, à chaque fois, la moins concluante, elle atteint des rendements finaux plus que raisonnable.

Ces conclusions obtenues renforcent l'intérêt de poursuivre les recherches sur les stratégies de protection alternatives. Dans les années à venir, l'intégration du biocontrôle dans les itinéraires techniques constituera un levier déterminant pour accompagner la transition agro-écologique de l'agriculture. Cette évolution a pour but de respecter les objectifs européens en matière de réduction des intrants phytosanitaires, tout en montrant une image positive de l'agriculture, dans un contexte où les consommateurs et les politiques se montrent de plus en plus attentifs aux enjeux environnementaux et sociétaux.

Toutefois, cette recherche présente quelques limites méthodologiques. En effet, les résultats obtenus ont été influencés par des conditions météorologiques peu favorables au développement des maladies, étant donné les faibles niveaux de sévérité enregistrés au début du printemps. Afin de renforcer la pertinence et la robustesse des résultats obtenus, il serait pertinent de reproduire cette expérimentation à l'avenir, dans des conditions climatiques contrastées. Par exemple, réaliser cet essai sur plusieurs années ainsi que sur d'autres variétés permettrait d'atténuer l'effet de la variabilité du climat sur les résultats finaux. De plus, si ces conditions peu favorables devaient à nouveau se présenter, un système de brumisation tout le long du projet pourrait être mis en place afin de rendre les conditions plus propices à la maladie.

8. Bibliographie

- Abd El-Daim, I.A., Bejai, S. & Meijer, J. (2019). *Bacillus velezensis* 5113 induit des remaniements métaboliques et moléculaires lors de la tolérance au stress abiotique chez le blé. *Sci Rep*, 9(1), 16282. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52567-x>
- Alori, E.T., Dare, M.O., & Babalola, O.O. (2017). *Microbial Inoculants for Soil Quality and Plant Health*. In E. Lichtfouse (Ed.), *Sustainable Agriculture Reviews*, 22, 281–307. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48006-0_9
- ARVALIS. (2022). *Yellow Rust: An Explosive Disease*. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/la-rouille-jaune-une-maladie-caractere-explosif> (Consulté le 25/02/2025)
- ARVALIS. (2021). *Controlling Brown Rust at the Onset of Attack*. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/controler-la-rouille-brune-en-debut-dattaque> (Consulté le 17/02/2025)
- ARVALIS. (2017). *Blé tendre - Guide de culture*. <https://www.arvalis.fr/editions/ble-tendre-guide-de-culture> (Consulté le 17/02/2025)
- Azzimonti, G. (2012). Diversification de la résistance quantitative à la rouille brune du blé, à partir de la caractérisation des composantes de la résistance. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/341999106_Diversification_de_la_resistance_quantitative_a_la_rouille_brune_du_ble_a_partir_de_la_caracterisation_des_composantes_de_la_resistance (Consulté le 08/04/2025)
- Bahri, Y. (2008). Adaptation et structuration spatiale des populations méditerranéennes de rouille jaune du blé (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*). [Thèse de doctorat, Université Montpellier II, France]. https://www.academia.edu/1084213/Adaptation_et_structuration_spatiale_des_populations_m%C3%A9diterran%C3%A9ennes_de_rouille_jaune_du_bl%C3%A9_Puccinia_striiformis_f_sp_tritici_
- BASF. (2025). Froment - BASF Agricultural Solutions Belgium. *BASF*. <https://www.agro.basf.be/fr/Cultures/C%C3%A9r%C3%A9ales/Froment/>, (Consulté le 25/02/2025).
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B. & Walker, S. (2025). lme4 : Linear Mixed-Effects Models using ‘Eigen’ and S4. R package version 1.1-37. <https://cran.r-project.org/web/packages/lme4/index.html>
- Biostimulants Agriculture. (2024). Quelle est la différence entre biostimulants et fertilisants ? *Biostimulants Agriculture*. <https://biostimulants-agriculture.com/quelle-est-la-difference-entre-biostimulants-et-fertilisants/> (Consulté le 28/02/2025)
- Bodson, B. & Falisse, A. (1996). Écophysiologie de la production végétale : l'exemple du blé. *PROBIO*, 19(1–2), 85–102. <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/72319/1/1996-Ecophysiologie.pdf>
- Bolton, M.D., Kolmer, J.A. & Garvin, D.F. (2008). Wheat leaf rust caused by *Puccinia triticina*. *Molecular Plant Pathology*, 9(5), 563–575. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2008.00487.x>

- Boutrot, F., & Zipfel, C. (2017). Function, discovery, and exploitation of plant pattern recognition receptors for broad-spectrum disease resistance. *Annual Review of Phytopathology*, 55, 257–286. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080614-120106>
- Bourgeois, C. (2021). Comprendre les biofongicides microbiens et les utiliser de façon optimale | Plant Care Knowledge Center. <https://kcenter.lallemandplantcare.com/fr/france/protegez-vos-plantes/comprendre-les-biofongicides/> (Consulté le 25/02/2025)
- Bréda, N. (1999). L'Indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel. *Revue forestière française*, 51(2), 135–150. <https://doi.org/10.4267/2042/5426>
- Breunig, M., Nagelkirk, M., Byrne, A. M., Wilbur, J. F., Steinke, K., & Chilvers, M. I. (2022). *Meta-analysis of yield response to applications of fungicides made at different crop growth stages in Michigan winter wheat*. *Plant Health Progress*, 23(3), 300–307. <https://doi.org/10.1094/PHP-09-21-0118-RS>
- Chambre régionale d'Agriculture Hauts-de-France. (2022). BLE TENDRE D'HIVER : Fongicides et Biocontrôles. *OPERA Connaissances*. https://opera-connaissances.chambres-agriculture.fr/doc_num.php?explnum_id=184481 (Consulté le 03/04/2025)
- Cherin, P., Voronska, E., Fraoucene, N. & de Jaeger, C. (2012). Toxicité aiguë des pesticides chez l'homme. *Médecine & Longévité*, 4(2), 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.mlong.2012.05.003>
- Chen, X. M. (2005). *Epidemiology and control of stripe rust [Puccinia striiformis f. sp. tritici] on wheat*. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 27(3), 314–337. <https://doi.org/10.1080/07060660509507230>
- Choi, H.W. & Klessig, D.F. (2016). DAMPs, MAMPs, and NAMPs in plant innate immunity. *BMC Plant Biology*, 16(1), 232. <https://doi.org/10.1186/s12870-016-0921-2>
- Clément, J. (2013). Plant Defense Stimulators: An Integral Part of Integrated Biological Control. *Vegenov*. <https://blog.vegenov.com/2013/05/stimulateurs-defenses-plantes-partie-integrante-lutte-biologique-integree/> (Consulté le 25/02/2025)
- Collier, R. (2023). Pest insect management in vegetable crops grown outdoors in northern Europe – approaches at the bottom of the IPM pyramid. *Frontiers in Horticulture*, 2. <https://doi.org/10.3389/fhort.2023.1159375>
- Commission European. (2019). *Directive 2009/128/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for Community action to achieve the sustainable use of pesticides*. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2009/128/2019-07-26/eng> (Consulté le 25/02/2025)
- Conrath, U., Beckers, G.J.M., Langenbach, C.J.G. & Jaskiewicz, M.R. (2015). Priming for Enhanced Defense. *Annual Review of Phytopathology*, 53, 97–119. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080614-120132>

- Conrath, U., Beckers, G.J.M., Flors, V., García-Agustín, P., Jakab, G., Mauch, F., Newman, M.-A., Pieterse, C.M.J., Poinssot, B., Pozo, M.J., Pugin, A., Schaffrath, U., Ton, J., Wendehenne, D., Zimmerli, L. & Mauch-Mani, B. (2006). Priming: Getting Ready for Battle. *MPMI*, 19(10), 1062–1071. <https://doi.org/10.1094/MPMI-19-1062>
- Daamen, R.A. & Stol, W. (1992). Survey of cereal diseases and pests in the Netherlands. 5. Occurrence of *Septoria* spp. in winter wheat. *Netherlands Journal of Plant Pathology*. 98(6), 369–376. <https://doi.org/10.1007/BF01974464>
- Denolf, S. (2022). *Étude de l'effet du choix variétal, de l'usage de mélanges variétaux et de la protection fongicide sur la dynamique des principales maladies fongiques et sur les rendements interannuels du blé d'hiver* [Mémoire de master, Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège]. MatheO. <http://hdl.handle.net/2268.2/16140>
- De Sangosse. (2023). *Biocontrol Fungicide Pygmalion for Wheat*. <https://www.desangosse.fr/produit/fongicide-biocontrole-pygmalion-bles/> (Consulté le 16/06/2025)
- Duitman, E.H., Hamoen, L.W., Rembold, M., Venema, G., Seitz, H., Saenger, W., Bernhard, F., Reinhardt, R., Schmidt, M., Ullrich, C., Stein, T., Leenders, F. & Vater, J. (1999). *The mycosubtilin synthetase of Bacillus subtilis ATCC6633: A multifunctional hybrid between a peptide synthetase, an amino transferase, and a fatty acid synthase*. *Proc Natl Acad Sci U S A* 96(23), 13294–13299. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.23.13294>
- Dumont, B., Basso, B., Bodson, B., Destain, J.P. & Destain, M.F. (2016). Évaluation et modélisation de l'impact économique et environnemental de la gestion de l'azote dans la culture du blé en Belgique. *Environ. Model. Softw.* 79, 184–196. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.015>
- Duvivier, M., Dedeurwaerder, G., Bataille, C. De Proft, M. & Legrève, A. (2016). Real-time PCR quantification and spatio-temporal distribution of airborne inoculum of *Puccinia tritricina* in Belgium. *Eur J Plant Pathol*, 145, 405–420. <https://doi.org/10.1007/s10658-015-0854-x>
- El Jarroudi, M., Kouadio, L., Bock, C.H., Junk, J., Pasquali, M., Maraite, H. & Delfosse, P. (2017). A threshold-based weather model for predicting stripe rust infection in winter wheat. *Plant Dis.* 101(5), 693–703. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-16-1766-RE>
- El Jarroudi, M., Kouadio, L., Junk, J., Maraite, H., Tychon, B. & Delfosse, P. (2022). *Assessing the Interplay between Weather and Septoria Leaf Blotch Severity on Lower Leaves on the Disease Risk on Upper Leaves in Winter Wheat*. *Journal of Fungi*, 8(11), 1119. <https://doi.org/10.3390/jof8111119>
- Falardeau, J., Wise, C., Novitsky, L. & Avis, T.J. (2013). Ecological and Mechanistic Insights Into the Direct and Indirect Antimicrobial Properties of *Bacillus subtilis* Lipopeptides on Plant Pathogens. *J Chem Ecol*, 39(7), 869–878. <https://doi.org/10.1007/s10886-013-0319-7>
- FAO. (2025a). Bulletin de la FAO sur l'offre et la demande de céréales. *Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture*. <https://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/fr>, (Consulté le 03/03/2025)

- FAO. (2025b). Changement climatique et ressources génétiques pour l'alimentation et l'agriculture. *Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture*. <https://www.fao.org/cgrfa/topics/climate-change/fr> (Consulté le 27/02/2025)
- FAO. (2024). Perspectives de l'alimentation. *Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture*. <https://openknowledge.fao.org/items/231358fc-72ca-4f2c-8c33-bd52f476cf8b> (Consulté le 25/02/2025)
- Finocchiaro, T. (2022). *Quelle agriculture pour demain ?*. Mémoire de Master 1, Université de Toulouse, France. <https://hal.inrae.fr/hal-04649676v1/document>
- Fones, H.N., Eyles, C.J., Kay, W., Cowper, J. & Gurr, S.J. (2017). A role for random, humidity-dependent epiphytic growth prior to invasion of wheat by *Zymoseptoria tritici*. *Fungal Genet Biol*, 106, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2017.07.002>
- Fravel, D.R. (2005). Commercialization and Implementation of Biocontrol. *Annual Review of Phytopathology*, 43(1), 337–359. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.43.032904.092924>
- French Ministry of Agriculture. (2023). *Frequently Asked Questions: Everything You Need to Know About Biocontrol*. <https://agriculture.gouv.fr/foire-aux-questions-tout-savoir-sur-le-biocontrôle> (Consulté le 28/02/2025)
- Friskop, A., Yellareddygar, S., Gudmestad, N. C., Fuller, K. B. & Burrows, M. (2018). *Low benefits from fungicide use on hard red wheat in low-disease environments*. *Plant Health Progress*, 19(4), 288–294. <https://doi.org/10.1094/PHP-06-18-0028-RS>
- Gayon, J. (2016). From Mendel to epigenetics: History of genetics. *Comptes Rendus. Biologies*, 339(7–8), 225–230. <https://doi.org/10.1094/PHP-06-18-0028-RS>
- GIEC. (2014). Changements climatiques 2014 : rapport de synthèse. *GIEC*, 151. <https://climat.be/changements-climatiques/changements-observees/rapports-du-giec/2014-rapport-de-synthese>
- Girousse, C., Roche, J., Guerin, C., Le Gouis, J., Balzegue, S., Mouzeyar, S., & Bouzidi, M.F. (2018). Coexpression network and phenotypic analysis identify metabolic pathways associated with the effect of warming on grain yield components in wheat. *PLoS ONE*, 13(6), e0199434. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199434>
- Gloria, C. (2019). Grandes cultures : le biocontrôle à l'épreuve du terrain contre les maladies et ravageurs | Réussir Grandes Cultures. <https://www.reussir.fr/grandes-cultures/le-biocontrôle-lepreuve-du-terrain> (Consulté le 03/03/2025).
- Gyawali, A., Bhandari, R., Budhathoki, P. & Bhattarai, S. (2022). A review on effect of weeds in wheat (*Triticum aestivum* L.) and their management practices. *Food and Agri Economics Review*, 2(2), 34–40. <https://doi.org/10.26480/faer.02.2022.34.40>
- Hansen, J.G., Secher, B.J.N., Jørgensen, L.N. & Welling, B. (1994). Thresholds for control of *Septoria* spp. in winter wheat based on precipitation and growth stage. *Plant Pathology*, 43, 183–189. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1994.tb00569.x>
- Hardy, B. (2023). MicroSoilSystem: Reduction of chemical inputs through the application of microbial consortia with biostimulant and biocontrol properties adapted to soil functioning

- in organic, conventional, and conservation agriculture. Centre wallon de Recherches agronomiques. <https://www.cra.wallonie.be/fr/microsoilsystem> (Consulté le 25/02/2025).
- Hartig, F. (2024). DHARMa : Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level/Mixed) Regression Models. R package version 0.4.7. <https://cran.r-project.org/web/packages/DHARMa/index.html>
- Hawkesford, M.J. & Riche, A.B. (2020). Impacts of G x E x M on Nitrogen Use Efficiency in Wheat and Future Prospects. *Front. Plant Sci*, 11, 1157. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01157>
- Huang, H.C., Bremer, E., Hynes, R.K. & Erickson, R.S. (2000). Foliar Application of Fungal Biocontrol Agents for the Control of White Mold of Dry Bean Caused by *Sclerotinia sclerotiorum*. *Biological Control*, 18(3), 270–276. <https://doi.org/10.1006/bcon.2000.0829>.
- Huerta-Espino, J., Singh, R.P., Germán, S., McCallum, B.D., Park, R.F., Chen, W.Q., Bhardwaj, S.C. & Goyeau, H. (2011). Global status of wheat leaf rust caused by *Puccinia triticina*. *Euphytica*, 179(1), 143–160. <https://doi.org/10.1007/s10681-011-0361-x>
- Humintech. (2025). Biostimulants : Beyond Fertilizers and Pesticides. *Humintech Blog*. <https://www.humintech.com/agriculture/blog/biostimulants-beyond-fertilizers-and-pesticides> (Consulté le 25/02/02)
- Hyles, J., Bloomfield, M.T., Hunt, J.R., Trethowan, R.M., & Trevaskis, B. (2020). *Phenology and related traits for wheat adaptation*. *Heredity*, 125(6), 417–430. <https://doi.org/10.1038/s41437-020-0320-1>
- Igrejas, G. & Branlard, G. (2020). The Importance of Wheat. In: G. Igrejas, T. Ikeda et C. Guzmán, éditeurs, *Wheat Quality For Improving Processing And Human Health*. Springer, 1–7. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34163-3_1
- INNOVAR. (2021). Agroécologie. <https://agroecologie-rhin.eu/innov-ar/protection-integree/controle-des-maladies-du-ble-par-des-produits-alternatifs/> (Consulté le 10/04/2025)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- IRM. (2025). KMI - Contexte général. <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/mois-apres-mois/contexte-general> (Consulté le 31/03/2025)
- Jacques, P. (2010). Surfactin and Other Lipopeptides from *Bacillus* spp. in Soberón-Chávez, G. (ed.), *Biosurfactants: From Genes to Applications*, Springer-Verlag, Berlin, 20, 57–91. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14490-5_3
- Jakab, G., Cottier, V., Toquin, V., Rigoli, G., Zimmerli, L., Métraux, J.-P. & Mauch-Mani, B. (2001). β -Aminobutyric Acid-induced Resistance in Plants. *European Journal of Plant Pathology*, 107(1), 29–37. <https://doi.org/10.1023/A:1008730721037>
- Jourdan, E., Henry, G., Duby, F., Dommes, J., Barthélemy, J.P., Thonart, P. & Ongena, M. (2009). Insights into the defense-related events occurring in plant cells following

- perception of surfactin-type lipopeptide from *Bacillus subtilis*. *Mol Plant Microbe Interact*, 22(4), 456–468. <https://doi.org/10.1094/MPMI-22-4-0456>
- Julkowska, D., Obuchowski, M., Holland, I.B., & Séror, S.J. (2005). Comparative analysis of the development of swarming communities of *Bacillus subtilis* 168 and a natural wild type: critical effects of surfactin and the composition of the medium. *Journal of Bacteriology*, 187(1), 65–76. <https://doi.org/10.1128/jb.187.1.65-76.2005>
- Juroszek P. & von Tiedemann A. (2013). Climate change and potential future risks through wheat diseases: a review. *Eur J Plant Pathol*, 136, 21–33. <https://doi.org/10.1007/s10658-012-0144-9>
- Kassambara, A. (2023). ggcorrplot: Visualization of a Correlation Matrix using 'ggplot2'. R package version 0.1.4.1. <https://cran.r-project.org/web/packages/ggcorrplot/index.html>
- Kleifeld, O. & Chet, I. (1992). *Trichoderma harzianum*—interaction with plants and effect on growth response. *Plant Soil*, 144(2), 267–272. <https://doi.org/10.1007/BF00012884>
- Koyshibayev, M., & Muminjanov, H. (2016). *Guidelines for Monitoring Diseases, Pests and Weeds in Cereal Crops*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.researchgate.net/publication/301662176_EnteGuidelines_for_Monitoring_Diseases_Pests_and_Weeds_in_Cereal_Crops (Consulté le 03/03/2025)
- Lahlali, R., Peng, G., Gossen, B.D., McGregor, L., Yu, F.Q., Hynes, R.K., Hwang, S.F., McDonald, M.R. & Boyetchko, S.M. (2013). Evidence that the Biofungicide Serenade (*Bacillus subtilis*) Suppresses Clubroot on Canola via Antibiosis and Induced Host Resistance. *Phytopathology*®, 103(3), 245–254. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-06-12-0123-R>
- Lázaro, E., Makowski, D., & Vicent, A. (2021). Decision support systems halve fungicide use compared to calendar-based strategies without increasing disease risk. *Communications Earth & Environment*, 2, 224. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00291-8>
- Legrand, J., Jacquemin, G., & Abras, M. (2015). *Prevention is Better Than Cure : Varietal Resistance, A Lever to Be Used*. In *Proceedings of the First Day of Research in Organic Farming*, 1, 1–8. <https://orgprints.org/id/eprint/46090/>
- Lenoir, A., Slafer, G.A., Siah, A. & Dumont, B. (2023). Plasticity of wheat yield components in response to N fertilization. *European Journal of Agronomy*, 146, 126933. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126933>
- Lenth, R.V. (2025) emmeans : Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R package version 1.11.2. <https://cran.r-project.org/web/packages/emmeans/index.html>
- Liu, W., Sun, Q., Wang, K., Du, Q. & Li, W.-X. (2017). Nitrogen Limitation Adaptation (NLA) is involved in source-to-sink remobilization of nitrate by mediating the degradation of NRT1.7 in *Arabidopsis*. *New Phytologist*, 214(2), 734–744. <https://doi.org/10.1111/nph.14396>
- Livre Blanc Céréales : Lutte intégrée contre les maladies. (2018). <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/220909/1/5.%20Lutte%20contre%20les%20maladies.pdf> (Consulté le 17/04/2025)

- Livre Blanc Céréales : lutte contre les maladies en froment. (2024a). <https://livre-blanc-cereales.be/thematiques/maladies/lutte-contre-les-maladies-en-froment/> (Consulté le 24/06/2025)
- Livre Blanc Céréales : septoriose du froment. (2024b). <https://livre-blanc-cereales.be/thematiques/maladies/froment/septoriose/> (Consulté le 24/06/2025)
- Livre Blanc Céréales : rouille jaune du froment. (2024c). <https://livre-blanc-cereales.be/thematiques/maladies/froment/rouille-jaune/> (Consulté le 24/06/2025)
- Livre Blanc Céréales : aperçu climatologique. (2024d). <https://livre-blanc-cereales.be/wp-content/uploads/2024/03/1.-Climatologie.pdf> (Consulté le 17/03/2025)
- Livre Blanc Céréales : fiches variétés froment d'hiver. (2024e). <https://livre-blanc-cereales.be/thematiques/varietes/fiches-varietes-froment/> (Consulté le 10/03/2025)
- Mahmood, T., Ahmed, T. & Trethowan, R. (2022). Genotype \times Environment \times Management (GEM) Reciprocity and Crop Productivity”, *Frontiers in Agronomy*, 2, 800365. <https://doi.org/10.3389/fagro.2022.800365>
- Maignan, V., Coquerel, R., Géliot, P., & Avice, J.-C. (2021). VNT4, a Derived Formulation of Glutacetine Biostimulant, Improved Yield and N-Related Traits of Bread Wheat When Mixed with Urea-Ammonium-Nitrate Solution. *Agronomy*, 11(5), 1013. <https://doi.org/10.3390/agronomy11051013>
- Mäkinen, H., Kaseva, J., Trnka, M., Balek, J., Kersebaum, K. C., Nendel, C., Gobin, A., Olesen, J. E., Bindi, M., Ferrise, R., Moriondo, M., Rodríguez, A., Ruiz-Ramos, M., Takác, J., Bezák, P., Ventrella, D., Ruget, F., & Kahiluoto, H. (2018). Sensitivity of European wheat to extreme weather. *Field Crops Research*, 222, 209–217. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.11.008>
- Martinez-Medina, A., Flors, V., Heil, M., Mauch-Mani, B., Pieterse, C.M.J., Pozo, M.J., Ton, J., Dam, N. van Dam & Conrath, U. (2016). Recognizing Plant Defense Priming. *Trends in Plant Science*, 21(10), 818–822. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.07.009>
- Maulenbay, A. & Rsaliyev, A. (2024). Fungal Disease Tolerance with a Focus on Wheat: A Review. *J Fungi (Basel)*, 10(7), 482. <https://doi.org/10.3390/jof10070482>
- Mendiburu, F. (2023). agricolae : Statistical Procedures for Agricultural Research. R package version 1.3-7. <https://cran.r-project.org/web/packages/agricolae/index.html>
- Morais, D. (2015). The determinants of the early epidemic phases of wheat septoria (Zymoseptoria tritici): quantity, efficacy, and origin of the primary inoculum. <https://hal.science/tel-01142864>
- Moreau, J.-M., & Maraite, H. (1999). *Integration of Knowledge on Wheat Phenology and Septoria tritici Epidemiology into a Disease Risk Simulation Model Validated in Belgium. Aspects of Applied Biology*, 55, 1–6. https://www.researchgate.net/publication/284026604_Integration_of_knowledge_on_wheat_phenology_and_Septoria_tritici_epidemiology_into_a_disease_risk_simulation_model_validated_in_Belgium (Consulté le 05/03/2025)

- Odone, A., Popovic, O. & Thorup-Kristensen, K. (2024). Deep roots: implications for nitrogen uptake and drought tolerance among winter wheat cultivars. *Plant Soil*, 500, 13–32. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06255-5>
- Ongena, M., Jourdan, E., Adam, A., Paquot, M., Brans, A., Joris, B., Arpigny, J.-L. & Thonart, P. (2007). Surfactin and fengycin lipopeptides of *Bacillus subtilis* as elicitors of induced systemic resistance in plants. *Environmental Microbiology*, 9(4), 1084–1090. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2006.01202.x>
- Ongena, M., & Jacques, P. (2008). *Bacillus lipopeptides : versatile weapons for plant disease biocontrol*. Trends in Microbiology, 16(3), 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2007.12.009>
- Oyserman, B.O., Cordovez, V, Flores, SS, Leite, M.F.A., Nijveen, H., Medema, M.H. & Raaijmakers, J.M. (2021). Extracting the GEMs: Genotype, Environment, and Microbiome interactions shaping host phenotypes, *Frontiers in Microbiology*, 11, 574053. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.574053> (consulté le 28 mai 2025).
- Phytoweb. (2015). *Phytoweb – Portail belge des produits phytopharmaceutiques et adjuvants*. Service public fédéral Santé publique, Sécurité de la chaîne alimentaire et Environnement. <https://fytoweb.be/fr/produits-phytopharmaceutiques> (Consulté le 26/05/2025)
- Platel, R. (2025). Criblage, efficacité et modes d’action de composés de biocontrôle microbiens sur le pathosystème blé-Zymoseptoria tritici. [Thèse de doctorat, Université de Lille]. HAL. <https://theses.hal.science/tel-04860578v1/document>
- Popp, J., Pető, K. & Nagy, J. (2013). Pesticide productivity and food security. A review. *Agron. Sustain. Dev*, 33(1), 243–255. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0105-x>
- Raaijmakers, J.M., De Bruijn, I., Nybroe, O. & Ongena, M. (2010). Natural functions of lipopeptides from *Bacillus* and *Pseudomonas* : more than surfactants and antibiotics. *FEMS Microbiology Reviews*, 34(6), 1037–1062. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2010.00221.x>
- Rajabi Hamedani, S., Rouphael, Y., Colla, G., Colantoni, A. & Cardarelli, M. (2020). Biostimulants as a Tool for Improving Environmental Sustainability of Greenhouse Vegetable Crops. *Sustainability*, 12(12), 5101. <https://doi.org/10.3390/su12125101>
- Réseau Action Climat. (2018). Stockage du carbone dans les sols et réchauffement climatique. Réseau Action Climat. <https://reseauactionclimat.org/stockage-carbone-sol-rechauffement-climatique/> (Consulté le 10/04/2025)
- Roelfs, A.P., Singh, R.P. & Saari, E.E. (1992). Rust Diseases of Wheat: Concepts and methods of disease management.
- R Core Team. (2025). *R: A language and environment for statistical computing* (version 4.5.0) [Logiciel]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Savary, S., Jouanin, C., Félix, I., Gourdain, E., Piraux, F., Brun, F. & Willocquet, L. (2016). Assessing plant health in a network of experiments on hardy winter wheat varieties in France: patterns of disease-climate associations. *Eur J Plant Pathol*, 146(4), 741–755. <https://doi.org/10.1007/s10658-016-0954-2>.

- Semenov, M.A. & Shewry, P.R. (2011). Modelling predicts that heat stress, not drought, will increase vulnerability of wheat in Europe. *Scientific Reports*, 1, 66. <https://doi.org/10.1038/srep00066>
- Services public de Wallonie. (s.d.). *WalOnMap* (Consulté le 22/04/2025)
- Seutin B., Vancutsem F., Jacquemin G., Couvreur L. & Moreau J.-M. (2011). Réduire la pression des maladies : impact pratique des « leviers agronomiques ». In : Bodson B., De Proft M. & Watillon B. (Eds), *Livre Blanc Céréales – Février 2011*, 8–19. Gembloux, Belgique : Gembloux Agro-Bio Tech. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/87726>
- Shewry, P.R. (2009). Wheat. *Journal of Experimental Botany*, 60(6), 1537–1553. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp058>
- Slimane, R.B. (2010). Effets de la septoriose foliaire sur la sénescence et les flux d'azote pendant le remplissage des grains chez le blé tendre. Thèse de doctorat, AgroParisTech. <https://pastel.hal.science/pastel-00560282>
- Smartbiocontrol. (s.d.). Serenade MAX NL-1. *Smartbiocontrol.eu*, 4. http://www.smartbiocontrol.eu/wp-content/uploads/2021/04/07_SerenadeMAX_NL-1.pdf (Consulté le 03/06/2025)
- Sorahia, D., Raj, A., Sahoo, B.K. & Samal, I. (2025). Adoption of Integrated Pest Management (IPM) for Sustainable Intensification in Wheat. In: Eltayeb E.A. ed. *Wheat Health and Productivity: Current Status and Sustainable Strategies*. IntechOpen, London, 1–22. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1212612>
- Soubeyrand, S., Estoup, A., Cruaud, A., Malembic-Maher, S., Meynard, C., Ravigné, V., Barbier, M., Barrès, B., Berthier, K., Boitard, S., Dallot, S., Gaba, S., Grosdidier, M., Hannachi, M., Jacques, M.-A., Leclerc, M., Lucas, P., Martinetti, D., Mougél, C., Robert, C., Roques, A., Thébaud, G., & Morris, C. E. (2024). *Building integrated plant health surveillance: a proactive research agenda for anticipating and mitigating disease and pest emergence*. *CABI Agriculture and Bioscience*, 5(1), 72. <https://doi.org/10.1186/s43170-024-00273-8>
- SPW. (2024). Froment d'hiver : produits, charges et marge brute. Etat de l'Agriculture Wallonne. https://etat-agriculture.wallonie.be/contents/indicatorsheets/EAW-C_III_b_2.html (Consulté le 25/02/2025)
- Statbel. (2024a). Agriculture en 2024 : moins de cultures d'hiver en raison des fortes pluies. <https://statbel.fgov.be/fr/nouvelles/agriculture-en-2024-moins-de-cultures-dhiver-en-raison-des-fortes-pluies> (Consulté le 05/04/2025)
- Statbel. (2024b). Diminution de 30 % de la production du froment d'hiver en 2024 et triplement de la production du froment de printemps. *Statbel*. <https://statbel.fgov.be/fr/nouvelles/diminution-de-30-de-la-production-du-froment-dhiver-en-2024-et-triplement-de-la> (Consulté le 05/04/2025)
- Statbel. (2024c). Froment d'hiver : produits, charges et marge brute. *Statbel*. https://etat-agriculture.wallonie.be/contents/indicatorsheets/EAW-C_III_b_2.html (consulté le 31/07/2025)

- Stephan, D., Schmitt, A., Carvalho, S.M., Seddon, B. & Koch, E. (2005). Evaluation of biocontrol preparations and plant extracts for the control of *Phytophthora infestans* on potato leaves. *Eur J Plant Pathol*, 112(3), 235–246. <https://doi.org/10.1007/s10658-005-2083-1>
- Syngenta. (2025). *Les principales maladies du froment*. <https://www.syngenta.be/fr/votre-culture/culture-arable/froment/maladies> (Consulté le 25/02/2025)
- Syngenta. (2023a). *AQUICINE® Duo : Biocontrôle fongicide contre la septoriose du blé*. <https://www.syngenta.fr/biocontrole/cereales/article/aquicine-duo-biocontrole-fongicide-contre-septoriose-bles> (Consulté le 11/04/2025)
- Syngenta. (2023b). *La protection fongicide des céréales gagnée par les biocontrôles*. <https://www.syngenta.fr/biocontrole/cereales/article/progression-marche-protection-fongicide-cereales> (Consulté le 11/04/2025)
- Syngenta. (2016). Tout savoir sur les BBCH pour les céréales. Syngenta France. <https://www.syngenta.fr/agriculture-durable/reglementation/dossier-bbch/article/echelle-bbch-cereales%2C> (Consulté le 03/03/2025)
- Tapia, L., Castillo-Navales, D., Riquelme, N., Valencia, A.L., Larach, A., Cautín, R. & Besoain, X. (2025) Rainfall and High Humidity Influence the Seasonal Dynamics of Spores of *Glomerellaceae* and *Botryosphaeriaceae* Genera in Avocado Orchards and Their Fruit Rot Association. *Agronomy*. 15(6), 1453. <https://doi.org/10.3390/agronomy15061453>
- Taulemesse, F. (2015). Analyse écophysiological et génétique de l'absorption d'azote post-floraison chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) en relation avec la concentration en protéines des grains. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, France. <https://theses.hal.science/tel-01229768/>
- Thibierge, J. (2023). Protection des blés : le biocontrôle, l'alternative du T1. Perspectives Agricoles. <https://www.perspectives-agricoles.com/conduite-de-cultures/protection-des-bles-le-biocontrole-lalternative-du-t1> (Consulté le 28/02/2025).
- Universalis E. (2025). LUTTE BIOLOGIQUE : Les biopesticides. Encyclopædia Universalis. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/lutte-biologique/3-les-biopesticides/> (Consulté le 25/02/2025)
- United Nations. (s.d.). *Climate change*. <https://www.un.org/fr/global-issues/climate-change> (Consulté le 03/04/2025)
- United Nations. (2017). *World population projected to reach 9.8 billion in 2050 and 11.2 billion in 2100*. Department of Economic and Social Affairs, United Nations. <https://www.un.org/en/desa/world-population-projected-reach-98-billion-2050-and-112-billion-2100> (Consulté le 02/03/2025)
- Verly, M. (2019). Caractérisation de l'effet de stimulateurs de défense des plantes (SDP) en fonction du stade de développement et de l'apport en azote sur la résistance du blé tendre (*Triticum aestivum*) aux maladies foliaires. Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne. <https://theses.hal.science/tel-04518596v1/document>

- Verreet, J.A., Klink, H. & Hoffmann, G.M. (2000). Regional Monitoring for Disease Prediction and Optimization of Plant Protection Measures: The IPM Wheat Model. *Plant Disease*, 84(8), 816–826. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2000.84.8.816>
- WalOnMap. (2025). *WalOnMap*. <https://geoportail.wallonie.be/walonmap> (Consulté le 24/04/2025)
- Wegulo, S. N., Zwingman, M. V., Breathnach, J. A., & Baenziger, P. S. (2011). Economic returns from fungicide application to control foliar fungal diseases in winter wheat. *Crop Protection*, 30(6), 685–692. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.02.002>
- Wesseler, J. (2022). The EU's farm-to-fork strategy: An assessment from the perspective of agricultural economics. *Applied Economic Perspectives and Policy* 44(4), 1826–1843. <https://doi.org/10.1002/aep.13239>
- Whipps, J.M. (2004). *Prospects and limitations for mycorrhizas in biocontrol of root pathogens*. Canadian Journal of Botany, 82(8), 1198–1227. <https://doi.org/10.1139/b04-082>
- Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K. & Vaughan, D. (2023). Dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version 1.1.4. <https://cran.r-project.org/web/packages/dplyr/index.html>
- Wickham, H., Vaughan, D. & Girlich, M. (2024). Tidyr: Tidy Messy Data. R package version 1.3.1. <https://cran.r-project.org/web/packages/tidyr/index.html>
- Wickham, H., Chang, W., Henry, L., Pedersen, L.T., Takahashi, K., Wilke, C., Woo, K., Yutani, H., Dunnington, D. & Van den Brand, T. (2025). Ggplot2: Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics. R package version 3.5.2. <https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/index.html>
- Wickham, H. & Bryan, J. (2025). Readxl: Read Excel Files. R package version 1.4.5. <https://cran.r-project.org/web/packages/readxl/index.html>
- Wiersum Plantbreeding. (2017). *KWS Keitum: High-Yielding German Feed Wheat*. <https://wiersum-plantbreeding.nl/kws-keitum/> (Consulté le 18/02/2025)
- Xie, Y. (2025). knitr : A General-Purpose Package for Dynamic Report Generation in R. R package version 1.50. <https://cran.r-project.org/web/packages/knitr/index.html>
- Yu, X., Feng, B., He, P. & Shan, L. (2017). From Chaos to Harmony: Responses and Signaling upon Microbial Pattern Recognition. *Annual Review of Phytopathology*, 55, 109–137. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080516-035649>
- Zadoks, J.C., Chang, T.T. & Konzak, C.F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals weeds. *Research*, 14, 415-421.

(116 réf.)

9. Annexes

Annexe 1 : Echelle BBCH (Syngenta, 2016)

Cette échelle résulte du code mis au point pour les céréales par le phytopathologiste Jan C. Zadoks en 1974. Ce code contient une échelle des différents stades phénologiques pour toutes les espèces.

Stade principal 0		Germination
0	Semence sèche	
1	Début de l'imbibition de la graine	
3	Imbibition de la graine	
5	La radicule sort de la graine	
6	Élongation de la radicule	
7	Le coléoptile sort de la graine	
9	Levée : le coléoptile perce la surface du sol	
Stade principal 1		Développement des feuilles
10	La première feuille sort du coléoptile	
11	Première feuille étalée	
12	2 feuilles étalées	
13	3 feuilles étalées	
14	Et ainsi de suite	
19	9 ou davantage de feuilles étalées	
Stade principal 2		Tallage
20	Aucune talle visible	
21	Début tallage : la première talle est visible	
22	Deuxième talle visible	
23	Troisième talle visible	
24	Et ainsi de suite	
29	Fin tallage	
Stade principal 3		Elongation de la tige principal
30	Début montaison : inflorescence au plus à 1 cm au-dessus du plateau de tallage	
31	Le premier nœud est au plus à 1 cm au-dessus du plateau de tallage	
32	Le deuxième nœud est au plus à 2 cm au-dessus du premier nœud	
33	Le troisième nœud est au plus à 2 cm au-dessus du deuxième nœud	
34	Et ainsi de suite	
37	La dernière feuille est juste visible, elle est encore enroulée sur elle-même	
39	Le limbe de la dernière feuille est entièrement étalé, la ligule est visible	
Stade principal 4		Gonflement de l'épi
41	Début gonflement : elongation de la gaine foliaire de la dernière feuille	
43	La gaine foliaire de la dernière feuille est visiblement gonflée	
45	Gonflement maximal de la gaine foliaire de la dernière feuille	
46	La gaine foliaire de la dernière feuille s'ouvre	
49	Les premières arrêtes (barbes) sont visibles	
Stade principal 5		Épiaison
51	Début de l'épiaison : l'extrémité de l'inflorescence est sortie de la gaine	
52	20 % de l'inflorescence est sortie	
53	30 % de l'inflorescence est sortie	
54	Et ainsi de suite	
59	Fin de l'épiaison, l'inflorescence est complètement sortie de la gaine	
Stade principal 6		Floraison
61	Début floraison, les premières anthères sont visibles	
65	Pleine floraison, 50 % des anthères sont sorties	
69	Fin floraison, tous les épillets ont fleuri	
Stade principal 7		Développement des graines
71	Stade aqueux : les premières graines ont atteint la moitié de leur taille finale	
73	Début du stade laiteux	
75	Stade mi laiteux : les graines ont atteint leur taille finale mais sont toujours vertes	
77	Fin du stade laiteux	
Stade principal 8		Maturation des graines
83	Début du stade pâteux	
85	Stade pâteux mou : contenu de la graine tendre mais sec	
87	Stade pâteux dur : contenu de la graine dur	
89	Maturation complète : le caryopse est dur	
Stade principal 9		Sénescence
92	Sur-maturité : le caryopse est très dur	
93	Des graines se détachent	

Annexe 2 : Différents fongicides utilisés ainsi que leurs matières actives

Pour la modalité deux traitement, une première application a lieu au stade deux nœuds (Z32) afin de freiner le développement de la maladie. Ce stade Z32 est un stade clé puisque c'est le moment de formation des premières feuilles supérieures, essentiel pour la photosynthèse. Le produit utilisé pour ce premier stade est du Simveris à une dose de 1 L/ha accompagné de Stavento à une dose de 1,5 L/ha. Simvêris appartient à la famille des triazoles, avec pour matière active le Metconazole. Celui-ci a des caractéristiques préventives et curatives, en protégeant la plante contre la majorité des maladies. Ce produit est accompagné de Stavento, dont la matière active est le Folpet. Cette molécule présente un caractère multisite, permettant ainsi de réduire le risque de développement de résistance (Phytoweb, 2015).

Le deuxième traitement a lieu plus tard, au stade Z55. Ce stade est caractérisé par l'épiaison (Zadoks *et al.*, 1974). Ce stade-ci est primordial pour protéger la dernière feuille et la formation de l'épis. Seul le produit Univoq est utilisé pour cette application. Ce produit est composé de deux substance active : le Fenpicoxamid et le Prothioconazole. Le premier fait partie de la nouvelle famille des picolinamides et agit sur un nouveau site d'action. Le second est quant à lui un triazole classique afin de renforcer l'efficacité contre les maladies. Son mode d'action est préventif et curatif. Un mixte de deux substances actives permet une nouvelle fois d'éviter les résistances (Phytoweb, 2015).

Concernant la modalité où seul un traitement fongique est nécessaire, l'application est réalisée au traitement Z39, ce qui correspond au stade de la dernière feuille étalée. Cela permet d'être appliqué entre les deux stades importants expliqués ci-dessus (Livre Blanc Céréales, 2017). Ce traitement est composé du Revystar Gold accompagné du Stavento. Le Revystar Gold a pour matière active le Fluxapyroxad et le Mefentrifluconazole ; celles-ci ont un mode d'action préventif et curatif, tout en offrant une rémanence prolongée. Ensuite, le Stavento est, comme cité ci-dessus, utilisé pour son caractère multisite, réduisant ainsi le développement de résistances (Phytoweb, 2015).

Annexe 3 : Analyse de l'effet bloc (LMER) par maladie et par DOY

Maladie	DOY	Variance_bloc	Effet_bloc
septoriose	133	0.0069	Non
septoriose	140	0.0000	Non
septoriose	147	0.0000	Non
septoriose	155	0.0496	Oui
septoriose	162	0.0000	Non
rouille jaune	133	0.0004	Non
rouille jaune	140	0.0115	Oui
rouille jaune	147	0.0028	Non
rouille jaune	155	0.0189	Oui
rouille jaune	162	0.0000	Non
rouille brune	133	0.0002	Non
rouille brune	140	0.0002	Non
rouille brune	147	0.0000	Non
rouille brune	155	0.0000	Non
rouille brune	162	0.0000	Non

Annexe 4 : Test Shapiro + Levene + ANOVA (après transformation)

Maladie	DOY	Pval_Shapiro	Normalite_OK	Pval_Levene	Homogeneite_OK	Pval_ANOVA	ANOVA_OK
septoriose	133	0.0000	Non	0.1252	Oui	0.2344	Non
septoriose	140	0.0012	Non	0.0050	Non	0.0026	Oui
septoriose	147	0.0000	Non	0.0012	Non	0.0060	Oui
septoriose	155	0.0349	Non	0.7552	Oui	0.0000	Oui
septoriose	162	0.4066	Oui	0.7342	Oui	0.0000	Oui
rouille jaune	133	0.0000	Non	0.1924	Oui	0.1924	Non
rouille jaune	140	0.0000	Non	0.0000	Non	0.0000	Oui
rouille jaune	147	0.0004	Non	0.1652	Oui	0.0000	Oui
rouille jaune	155	0.0001	Non	0.0000	Non	0.0000	Oui
rouille jaune	162	0.0966	Oui	0.0428	Non	0.0000	Oui
rouille brune	133	0.0000	Non	0.6075	Oui	0.6075	Non
rouille brune	140	0.0000	Non	0.5688	Oui	0.5688	Non
rouille brune	147	0.0000	Non	0.0697	Oui	0.0697	Non
rouille brune	155	0.0000	Non	0.0001	Non	0.0003	Oui
rouille brune	162	0.0000	Non	0.0000	Non	0.0000	Oui

Annexe 5 : Résultats de la fonction DHARMa pour les variables maladies

Les graphiques issus du package « DHARMa » ont pour objectif d'évaluer la qualité des résidus d'un modèle statistique. En d'autres mots, ils reprennent les tests de normalité et d'égalité des variances.

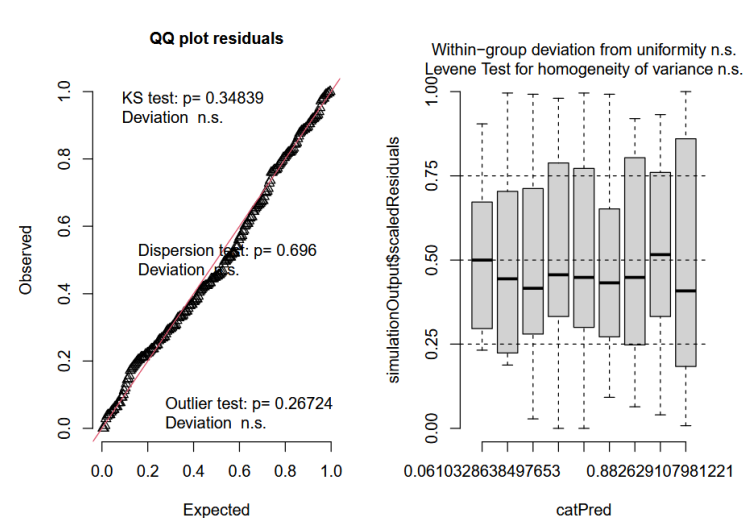
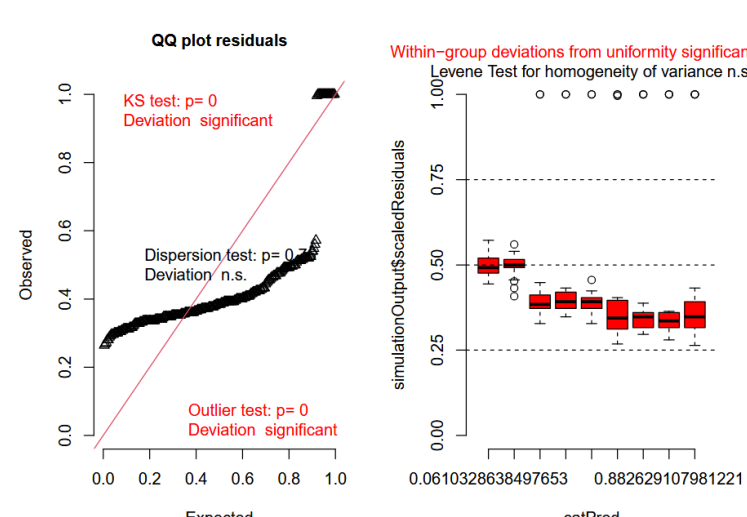
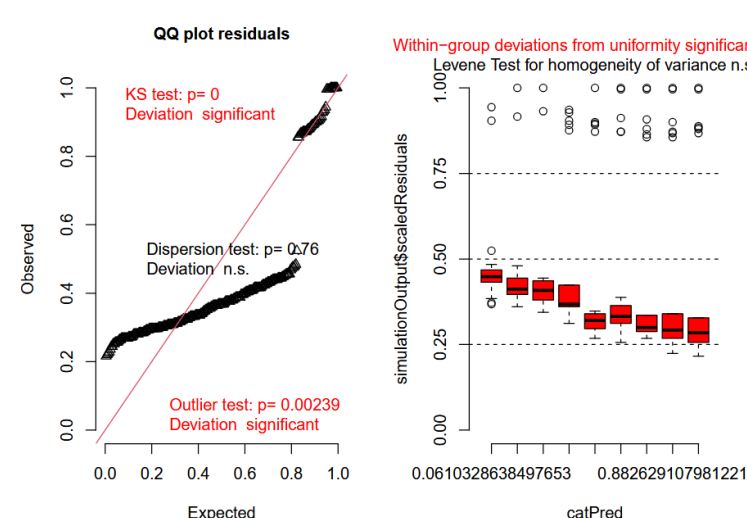
D'une part, le QQ plot des résidus simulés (à gauche) permet de vérifier si les résidus suivent une distribution théorique uniforme. Ainsi, plus les points noirs observés sont proches de la diagonale, plus cela signifie que les résidus suivent une distribution proche de la normale. Le test de Kolmogorov-Smimov (KS test) confirme cette hypothèse, avec un p-valeur $> 0,05$, indiquant alors qu'aucune déviation significative n'est détectée. De plus, les tests de dispersion et d'outliers sont réalisés, confirmant le bon ajustement global.

D'autre part, le graphique de droite présente la distribution des résidus standardisés DHARMa par rapport à une variable catégorielle prédictive. Le but de ce graphe est d'évaluer visuellement l'homogénéité des résidus. Si les bâtonnets sont centrés proches de 0 et présentant une variabilité similaire, alors la variance est considérée comme homogène entre les groupes. Le test de Levene confirme l'absence de différence significative entre les groupes ($p > 0.05$).

<u>Variable</u>	<u>Transformation</u>	<u>Test DHARMA</u>
Septoriose_13 3	Sqrt	<p>DHARMA residual</p> <p>QQ plot residuals</p> <p>KS test: $p = 0.1019$ Deviation n.s.</p> <p>Dispersion test: $p = 0.72$ Deviation n.s.</p> <p>Outlier test: $p = 0.26724$ Deviation n.s.</p> <p>Within-group deviation from uniformity n.s. Levene Test for homogeneity of variance n.s.</p>
Septoriose_14 0	Sqrt	<p>DHARMA residual</p> <p>QQ plot residuals</p> <p>KS test: $p = 0.49098$ Deviation n.s.</p> <p>Dispersion test: $p = 0.696$ Deviation n.s.</p> <p>Outlier test: $p = 0.43253$ Deviation n.s.</p> <p>Within-group deviation from uniformity n.s. Levene Test for homogeneity of variance n.s.</p>
Septoriose_14 7	Sqrt	<p>DHARMA residual</p> <p>QQ plot residuals</p> <p>KS test: $p = 0$ Deviation significant</p> <p>Dispersion test: $p = 0.76$ Deviation n.s.</p> <p>Outlier test: $p = 0.10678$ Deviation n.s.</p> <p>Within-group deviations from uniformity significant Levene Test for homogeneity of variance significant</p>

<p>Septoriose_15</p> <p>5</p>	<p>Sqrt</p>	<p>DHARMA residual</p> <p>QQ plot residuals</p> <p>KS test: $p = 0.80732$ Deviation n.s.</p> <p>Dispersion test: $p = 0.696$ Deviation n.s.</p> <p>Outlier test: $p = 0.43253$ Deviation n.s.</p> <p>Within-group deviation from uniformity n.s. Levene Test for homogeneity of variance n.s.</p> <p>simulationOutput\$scaledResiduals</p> <p>catPred</p>
<p>Septoriose_16</p> <p>2</p>	<p>Sqrt</p>	<p>DHARMA residual</p> <p>QQ plot residuals</p> <p>KS test: $p = 0.90511$ Deviation n.s.</p> <p>Dispersion test: $p = 0.76$ Deviation n.s.</p> <p>Outlier test: $p = 0.70127$ Deviation n.s.</p> <p>Within-group deviation from uniformity n.s. Levene Test for homogeneity of variance n.s.</p> <p>simulationOutput\$scaledResiduals</p> <p>catPred</p>
<p>Rouille jaune_133</p>	<p>/</p>	<p>DHARMA residual</p> <p>QQ plot residuals</p> <p>KS test: $p = 0$ Deviation significant</p> <p>Dispersion test: $p = 0.76$ Deviation n.s.</p> <p>Outlier test: $p = 0.03526$ Deviation significant</p> <p>Within-group deviations from uniformity significant Levene Test for homogeneity of variance n.s.</p> <p>simulationOutput\$scaledResiduals</p> <p>catPred</p>

<p>Rouille jaune_140</p>	<p>/</p>	<p>DHARMA residual</p> <p>QQ plot residuals</p> <p>KS test: $p = 0$ Deviation significant</p> <p>Dispersion test: $p = 0.728$ Deviation n.s.</p> <p>Outlier test: $p = 0.03414$ Deviation significant</p> <p>Within-group deviations from uniformity significant Levene Test for homogeneity of variance significant</p> <p>simulationOutput\$scaledResiduals</p> <p>catPred</p>
<p>Rouille jaune_147</p>	<p>Sqrt</p>	<p>DHARMA residual</p> <p>QQ plot residuals</p> <p>KS test: $p = 0.18836$ Deviation n.s.</p> <p>Dispersion test: $p = 0.728$ Deviation n.s.</p> <p>Outlier test: $p = 1$ Deviation n.s.</p> <p>Within-group deviation from uniformity n.s. Levene Test for homogeneity of variance n.s.</p> <p>simulationOutput\$scaledResiduals</p> <p>catPred</p>
<p>Rouille jaune_155</p>	<p>Sqrt</p>	<p>DHARMA residual</p> <p>QQ plot residuals</p> <p>KS test: $p = 0.22329$ Deviation n.s.</p> <p>Dispersion test: $p = 0.696$ Deviation n.s.</p> <p>Outlier test: $p = 0.10678$ Deviation n.s.</p> <p>Within-group deviation from uniformity n.s. Levene Test for homogeneity of variance significant</p> <p>simulationOutput\$scaledResiduals</p> <p>catPred</p>

<p>Rouille jaune_162</p>	<p>Sqrt</p>	<p>DHARMA residual</p> <p>QQ plot residuals</p> <p>KS test: $p = 0.34839$ Deviation n.s.</p> <p>Dispersion test: $p = 0.696$ Deviation n.s.</p> <p>Outlier test: $p = 0.26724$ Deviation n.s.</p> <p>Within-group deviation from uniformity n.s. Levene Test for homogeneity of variance n.s.</p>  <p>simulationOutput\$scaledResiduals</p> <p>catPred</p>
<p>Rouille brune_133</p>	<p>/</p>	<p>DHARMA residual</p> <p>QQ plot residuals</p> <p>KS test: $p = 0$ Deviation significant</p> <p>Dispersion test: $p = 0.76$ Deviation n.s.</p> <p>Outlier test: $p = 0$ Deviation significant</p> <p>Within-group deviations from uniformity significant Levene Test for homogeneity of variance n.s.</p>  <p>simulationOutput\$scaledResiduals</p> <p>catPred</p>
<p>Rouille brune_140</p>	<p>/</p>	<p>DHARMA residual</p> <p>QQ plot residuals</p> <p>KS test: $p = 0$ Deviation significant</p> <p>Dispersion test: $p = 0.76$ Deviation n.s.</p> <p>Outlier test: $p = 0.00239$ Deviation significant</p> <p>Within-group deviations from uniformity significant Levene Test for homogeneity of variance n.s.</p>  <p>simulationOutput\$scaledResiduals</p> <p>catPred</p>

Rouille brune_147	/	<p>DHARMA residual</p> <p>QQ plot residuals</p> <p>KS test: $p = 0$ Deviation significant</p> <p>Dispersion test: $p = 0.76$ Deviation n.s.</p> <p>Outlier test: $p = 0.03526$ Deviation significant</p> <p>Within-group deviations from uniformity significant Levene Test for homogeneity of variance significant</p> <p>simulationOutput\$scaledResiduals</p> <p>catPred</p>
Rouille brune_155	/	<p>DHARMA residual</p> <p>QQ plot residuals</p> <p>KS test: $p = 0$ Deviation significant</p> <p>Dispersion test: $p = 0.76$ Deviation n.s.</p> <p>Outlier test: $p = 0.03526$ Deviation significant</p> <p>Within-group deviations from uniformity significant Levene Test for homogeneity of variance significant</p> <p>simulationOutput\$scaledResiduals</p> <p>catPred</p>
Rouille brune_162	/	<p>DHARMA residual</p> <p>QQ plot residuals</p> <p>KS test: $p = 0$ Deviation significant</p> <p>Dispersion test: $p = 0.76$ Deviation n.s.</p> <p>Outlier test: $p = 0.03526$ Deviation significant</p> <p>Within-group deviations from uniformity significant Levene Test for homogeneity of variance significant</p> <p>simulationOutput\$scaledResiduals</p> <p>catPred</p>

Annexe 6 : Tableau regroupant l'ensemble des données de l'analyse statistique concernant les mesures de biomasse et de LAI

Stade	Type	Variance_bloc	Effet_bloc	Shapiro_p	Levene_p	ANOVA_effect	ANOVA_pval	Transformation
32	BIOFEUIL	24.9260	Oui	0.5614	0.6383	Non significatif	0.7721	Aucune
39	BIOFEUIL	5.0144	Oui	0.4293	0.8199	Non significatif	0.7516	Aucune
65	BIOFEUIL	0.0000	Non	0.4811	0.7963	Non significatif	0.2662	Aucune
89	BIOFEUIL	69.2184	Oui	0.0829	0.9477	Significatif	0.0001	Aucune
32	BIOTIGE	0.0000	Non	0.9070	0.3821	Non significatif	0.9258	Aucune
65	BIOTIGE	262.3953	Oui	0.3974	0.4494	Non significatif	0.0874	log(x+1)
89	BIOTIGE	90.9589	Oui	0.7738	0.0406	Non testé	NA	Aucune
65	BIOEPIS	432.5655	Oui	0.7183	0.4049	Non significatif	0.3504	Aucune
89	BIOEPIS	934.3709	Oui	0.0475	0.1594	Significatif	0.0033	Aucune
30	BIOTOT	14.4216	Oui	0.6728	0.9339	Non significatif	0.9176	Aucune
32	BIOTOT	26.2013	Oui	0.9505	0.3713	Non significatif	0.8713	Aucune
39	BIOTOT	1.5914	Oui	0.0991	0.4031	Non significatif	0.6612	Aucune
65	BIOTOT	882.5750	Oui	0.6587	0.5704	Non significatif	0.2123	log(x+1)
89	BIOTOT	2480.8200	Oui	0.1592	0.1824	Significatif	0.0003	Aucune
39	LAI_TOT	0.0000	Non	0.3096	0.4257	Non significatif	0.0535	Aucune
65	LAI_TOT	0.0000	Non	0.8440	0.2637	Significatif	0.0289	Aucune
39	LAI_TIGE	0.0000	Non	0.3939	0.4883	Significatif	0.0233	Aucune
65	LAI_TIGE	0.0000	Non	0.4498	0.3240	Non significatif	0.0510	Aucune
39	LAI_FEUI	0.0000	Non	0.2414	0.4210	Non significatif	0.1094	Aucune
65	LAI_FEUI	0.0000	Non	0.8530	0.2254	Significatif	0.0146	Aucune
89	RDMT	30.0097	Oui	0.4369	0.9688	Significatif	0.0075	Aucune
65	EPIS/M_65	157.5837	Oui	0.8983	0.7134	Significatif	0.0064	Aucune
89	POIDS_G_89	0.0536	Oui	0.0579	0.4703	Non significatif	0.0545	Aucune

Annexe 7 : Données moyennes – médianes pour « BIOTIGE_39 »

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.	NA's
58.61	68.59	71.64	71.96	73.89	95.56	9

Annexe 8 : Test de Tukey pour les LAI

Test post-hoc de Tukey :
 Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

```
Fit: aov(formula = LAI_TOT_39 ~ Modalité, data = data_filtered)

$Modalité
          diff      lwr      upr    p adj
Chimique-Témoin  0.7554175 -0.75313805 2.263973 0.4033114
LipoMyco-Témoin  1.5535619  0.04500635 3.062117 0.0434536
LipoMyco-Chimique 0.7981444 -0.71041111 2.306700 0.3660640
```

Test post-hoc de Tukey :
 Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

```
Fit: aov(formula = LAI_TOT_69 ~ Modalité, data = data_filtered)

$Modalité
          diff      lwr      upr    p adj
Chimique-Témoin  1.9959653  0.2674274 3.7245033 0.0239944
LipoMyco-Témoin  1.2330834 -0.4954545 2.9616214 0.1801095
LipoMyco-Chimique -0.7628819 -2.4914199 0.9656561 0.4880051
```

Test post-hoc de Tukey :
 Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

```
Fit: aov(formula = LAI_TIGE_39 ~ Modalité, data = data_filtered)

$Modalité
          diff      lwr      upr    p adj
Chimique-Témoin  0.3534553 -0.3205033 1.027414 0.3720051
LipoMyco-Témoin  0.8147019  0.1407433 1.488660 0.0185158
LipoMyco-Chimique 0.4612466 -0.2127120 1.135205 0.2029437
```

Test post-hoc de Tukey :
 Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

```
Fit: aov(formula = LAI_FEUI_69 ~ Modalité, data = data_filtered)

$Modalité
          diff      lwr      upr    p adj
Chimique-Témoin  0.9304606  0.2196771 1.6412441 0.0114523
LipoMyco-Témoin  0.5273009 -0.1834826 1.2380845 0.1597932
LipoMyco-Chimique -0.4031597 -1.1139432 0.3076238 0.3194875
```

**Annexe 9 : Tableau résumant le résultat du test Tukey pour les mesure
LAI_39**

Variable	Modalité	Moyenne	SE	df	lower.CL	upper.CL	Groupe
LAI_TIGE_39	1	2.210615	0.2168215	6.816924	1.695109	2.726120	a
LAI_TIGE_39	2	2.426298	0.2220747	6.802392	1.898066	2.954530	ab
LAI_TIGE_39	5	3.040978	0.2220747	6.802392	2.512747	3.569210	b
LAI_TOT_39	1	5.169987	0.4777903	7.027693	4.041095	6.298880	a
LAI_TOT_39	2	5.716985	0.4895443	6.961222	4.558088	6.875882	ab
LAI_TOT_39	5	6.724555	0.4895443	6.961222	5.565658	7.883451	b

**Annexe 10 : Tableau résumant le résultat du test SNK pour les mesures
LAI_65**

Variable	Modalité	Moyenne	Groupe
LAI_TOT_65	1	5.204634	a
LAI_TOT_65	5	6.437718	ab
LAI_TOT_65	2	7.200600	b
LAI_FEUI_65	1	1.954726	a
LAI_FEUI_65	5	2.482027	ab
LAI_FEUI_65	2	2.885186	b
LAI_TIGE_65	1	3.249909	a
LAI_TIGE_65	5	3.955691	ab
LAI_TIGE_65	2	4.315413	b

Annexe 11 : Tableaux résumant les résultats du test post-hoc Tukey

11.1. RDMT_89				11.2. BIOTOT_89			
Modalité	Nom	Moyenne	Groupe	Modalité	Nom	Moyenne	Groupe
5	LipoMyco	859.2	a	1	Témoin	13.32	a
1	Témoin	861.2	a	4	Serenade	14.30	ab
9	LipoMyco + Vertipin + Pygmalion	868.2	a	9	LipoMyco + Vertipin + Pygmalion	14.37	ab
4	Serenade	882.0	a	8	Vertipin + Pygmalion 2T	14.62	ab
8	Vertipin + Pygmalion 2T	897.8	a	7	Vertipin + Pygmalion 1T	14.93	abc
7	Vertipin + Pygmalion 1T	902.4	a	5	LipoMyco	15.52	bc
2	Chimique 2T	913.0	a	11	LipoMyco + Chimique	15.83	bc
3	Chimique 1T	913.2	a	2	Chimique 2T	16.23	bc
11	LipoMyco + Chimique	916.4	a	3	Chimique 1T	16.74	c

11.3. BIOEPIS_89				11.4. EPISM_65			
Modalité	Nom	Moyenne	Groupe	Modalité	Nom	Moyenne	Groupe
1	Témoin	8.54	a	1	Témoin	1576.180	a
4	Serenade	9.16	ab	8	Vertipin + Pygmalion 2T	1633.782	ab
9	LipoMyco + Vertipin + Pygmalion	9.30	ab	4	Serenade	1633.782	ab
8	Vertipin + Pygmalion 2T	9.52	ab	7	Vertipin + Pygmalion 1T	1639.018	ab
7	Vertipin + Pygmalion 1T	9.84	ab	9	LipoMyco + Vertipin + Pygmalion	1639.018	ab
5	LipoMyco	10.02	ab	11	LipoMyco + Chimique	1696.619	ab
11	LipoMyco + Chimique	10.33	b	2	Chimique 2T	1707.092	ab
2	Chimique 2T	10.72	b	3	Chimique 1T	1769.930	b
3	Chimique 1T	10.80	b	5	LipoMyco	1780.403	b

Annexe 12 : Tableaux résumant les résultats du test post-hoc SNK

12.1. BIOFEUIL_89				12.2. BIOTIGE_89			
Variable	Modalité	Moyenne	Groupe	Variable	Modalité	Moyenne	Groupe
BIOFEUIL_89	1	1.141210	a	BIOTIGE_89	1	3.638356	a
BIOFEUIL_89	4	1.166210	ab	BIOTIGE_89	9	3.876712	ab
BIOFEUIL_89	8	1.169292	ab	BIOTIGE_89	7	3.894064	b
BIOFEUIL_89	7	1.189041	b	BIOTIGE_89	8	3.931050	b
BIOFEUIL_89	9	1.197489	b	BIOTIGE_89	4	3.976142	bc
BIOFEUIL_89	2	1.280594	b	BIOTIGE_89	5	4.137443	bc
BIOFEUIL_89	11	1.352283	b	BIOTIGE_89	11	4.150685	bc
BIOFEUIL_89	5	1.362100	b	BIOTIGE_89	2	4.235731	bc
BIOFEUIL_89	3	1.443037	b	BIOTIGE_89	3	4.500685	c