

Etude 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

Auteur : Denolf, Sophie

Promoteur(s) : Dumont, Benjamin

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

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

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/16140>

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'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**

SOPHIE DENOLF

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

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021-2022

PROMOTEUR : 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 académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

**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**

SOPHIE DENOLF

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

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021-2022

PROMOTEUR : BENJAMIN DUMONT

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon promoteur, Benjamin Dumont, pour son suivi durant la réalisation de ce travail de fin d'études et particulièrement pour son aide dans l'analyse des données.

Je remercie également Benjamin Van Der Verren de m'avoir encadrée tout au long de ce travail. Un grand merci pour ses nombreux conseils lors des prélèvements des données ainsi que pour ses multiples relectures.

Je souhaite aussi remercier l'équipe de l'Unité de Phytotechnie Tempérée et du Centre Pilote Céréales et Oléo-Protéagineux (CePiCOP) pour leur accueil et pour m'avoir permis de mener à bien ce travail.

Un grand merci aux Tfistes et doctorants partageant le bureau de l'Openspace pour leur soutien et leur bonne humeur lors de l'élaboration de ce travail. Je remercie particulièrement Alix et Aurélie pour les encouragements mutuels et les bons moments partagés.

Merci également à tous ceux que j'ai pu croiser pendant ces cinq années lors des cours et lors des activités gembloutoises.

Je remercie finalement ma famille de m'avoir permis de réaliser ces études.

Résumé

Le blé est une céréale largement cultivée à travers le monde. En Belgique, le blé est principalement attaqué par trois maladies fongiques : la septoriose (*Zymoseptoria tritici*), la rouille jaune (*Puccinia striiformis*) et la rouille brune (*Puccinia triticina*). Les fongicides représentent une proportion importante des produits phytosanitaires pour la culture. L'usage de mélanges de variétés permet de réduire la pression fongique et de limiter ainsi l'usage de fongicides. Ce travail consiste en un suivi des maladies, une analyse de l'influence des protections fongiques ainsi qu'une analyse interannuelle des rendements agronomiques et économiques de variétés cultivées en pure et en mélange.

L'année 2022 a été propice au développement de la rouille jaune mais défavorable à la rouille brune et à la septoriose. L'étude de la dynamique des trois maladies a permis de déterminer leur mode de propagation sur les étages foliaires des plantes pour chaque variété ainsi que leur propagation dans un mélange variétal.

L'analyse de l'influence de la protection fongicide sur le développement des maladies a permis d'identifier qu'une protection totale n'est généralement pas nécessaire pour une protection optimale des plantes. Concernant les rouilles, les résistances variétales permettent une protection totale ou optimale tandis que pour la septoriose, aucune variété n'est totalement résistante.

Les rendements varient annuellement en fonction des conditions climatiques et des pressions fongiques. Par contre, les variétés se comportent presque similairement chaque année. Les rendements agronomiques sont dans la majorité des cas équivalents avec une protection fongicide partielle ou totale. Les fongicides ayant un coût d'usage et d'application, une protection fongicide partielle permet dans la majorité des cas d'être plus économique et plus écologique.

L'usage de mélanges variétaux est pertinent principalement lorsque les conditions culturales sont défavorables. Sans protection fongique, les gains de rendements liés à l'usage d'un mélange variétal est de 3,36%. Le gain de rendement est corrélé négativement avec l'application de fongicides.

Mots-clés : blé, mélange variétal, *Zymoseptoria tritici*, *Puccinia striiformis*, *Puccinia triticina*, dynamique, fongicide, rendement

Abstract

Wheat is a widely grown cereal throughout the world. In Belgium, wheat is mainly attacked by three fungal diseases: septoria (*Zymoseptoria tritici*), yellow rust (*Puccinia striiformis*) and brown rust (*Puccinia triticina*). Fungicides represent a significant proportion of the crop protection products. The use of cultivar mixtures reduces fungal pressure and thus limits the use of fungicides. This work consists of disease monitoring, an analysis of the influence of fungal protection, and an interannual analysis of the agronomic and economic cultivar yields grown in pure and in mixtures.

The year 2022 was favourable for the development of yellow rust but unfavourable for brown rust and septoria. The study of the dynamics of the three diseases made it possible to determine their mode of propagation on the leaf stages of the plants for each cultivar as well as their propagation in a cultivar mixture.

The analysis of the influence of fungal protection on the development of the diseases made it possible to identify that total protection is generally not necessary for optimal plant protection. For rusts, varietal resistances allow total or optimal protection, while for septoria, no cultivar is totally resistant.

Yields vary annually depending on climatic conditions and fungal pressure. However, the cultivars behave almost similarly each year. Agronomic yields are in most cases equivalent with partial or total fungal protection. As fungicides have a cost of use and application, partial fungal protection is in most cases more economical and ecological.

The use of cultivar mixtures is relevant mainly when crop conditions are unfavourable. Without fungal protection, the yield gain from the use of a cultivar mixture is 3.36%. The yield gain is negatively correlated with the application of fungicides.

Keywords: wheat, cultivar mixture, *Zymoseptoria tritici*, *Puccinia striiformis*, *Puccinia triticina*, dynamic, fungicide, yield

Table des matières

1.	Introduction.....	1
2.	Synthèse bibliographique.....	2
2.1.	Le froment d'hiver.....	2
2.2.	Les principales maladies du feuillage du froment d'hiver.....	2
2.2.1.	La septoriose.....	2
2.2.2.	La rouille jaune.....	4
2.2.3.	La rouille brune.....	6
2.3.	La lutte fongique.....	8
2.3.1.	Les leviers agronomiques.....	8
2.3.2.	La lutte chimique.....	9
2.4.	Les mélanges variétaux.....	10
2.4.1.	L'intérêt des mélanges.....	10
2.4.2.	Les mécanismes.....	11
2.4.3.	Les conditions d'application.....	12
2.4.4.	Le choix des profils variétaux.....	14
2.4.5.	Les inconvénients des mélanges.....	15
3.	Objectifs.....	16
4.	Matériels et méthodes.....	17
4.1.	Analyse intra-annuelle.....	17
4.1.1.	Site expérimental.....	17
4.1.2.	Itinéraire phytotechnique.....	17
4.1.3.	Conditions climatiques et données météorologiques.....	18
4.1.4.	Facteurs étudiés.....	19
4.1.5.	Dispositif expérimental.....	20
4.1.6.	Observations des maladies.....	21
4.2.	Analyse interannuelle.....	24
4.2.1.	Rendement sur plusieurs années.....	24
4.3.	Analyse des données.....	27
4.3.1.	Analyse intra-annuelle.....	27
4.3.2.	Analyse interannuelle.....	28
5.	Résultat.....	29
5.1.	Analyse intra-annuelle.....	29
5.1.1.	Dynamique des maladies fongiques.....	29
5.1.2.	Influence des traitements.....	38

5.2.	Analyse interannuelle.....	42
5.2.1.	Rendements agronomiques	42
5.2.2.	Rendements économiques.....	46
5.2.3.	Gain de rendements.....	49
6.	Discussion.....	50
6.1.	Analyse intra-annuelle	50
6.1.1.	Dynamique des maladies fongiques.....	50
6.1.2.	Influence des traitements	52
6.2.	Analyse interannuelle.....	54
6.2.1.	Rendements agronomiques	54
6.2.2.	Rendements économiques.....	55
6.2.3.	Gain de rendements de l'usage du mélange variétal	55
7.	Conclusion et perspectives.....	56
8.	Bibliographie.....	58
9.	Annexes.....	63
	Annexe 1 : Détail des fongicide et leur mode d'action.....	63
	Annexe 2 : Plan de l'essai	63
	Annexe 3 : Echelle BBCH des céréales (Livre Blanc Céréales, 2017).....	64
	Annexe 4 : Boxplot de la sévérité moyenne lié à la septoriose au DOY 136	66
	Annexe 5 : Boxplot de la sévérité moyenne lié à la septoriose au DOY 150	66
	Annexe 6 : Boxplot de la sévérité moyenne lié à la septoriose au DOY 178	66
	Annexe 7 : Boxplot de la sévérité moyenne lié à la rouille jaune au DOY 136.....	67
	Annexe 8 : Boxplot de la sévérité moyenne lié à la rouille jaune au DOY 150.....	67
	Annexe 9 : Boxplot de la sévérité moyenne lié à la rouille jaune au DOY 178.....	67
	Annexe 10 : Boxplot de la sévérité moyenne lié à la rouille brune au DOY 150.....	68
	Annexe 11 : Boxplot de la sévérité moyenne lié à la rouille brune au DOY 164.....	68
	Annexe 12 : Boxplot des rendements agronomiques des variétés du mélange Q en 2019	68
	Annexe 13 : Boxplot des rendements agronomiques des variétés du mélange Q en 2020	69
	Annexe 14 : Boxplot des rendements agronomiques des variétés du mélange Q en 2021	69
	Annexe 15 : Boxplot des rendements agronomiques des variétés du mélange Q en 2022	69
	Annexe 16 : Boxplots des rendements économiques des variétés des mélanges en 2019	70
	Annexe 17 : Boxplots des rendements économiques des variétés des mélanges en 2020	71
	Annexe 18 : Boxplots des rendements économiques des variétés des mélanges en 2021	72
	Annexe 19 : Boxplots des rendements économiques des variétés des mélanges en 2022	73

Tables des figures

Figure 1 : Cycle de la septoriose causé par <i>Zymoseptoria tritici</i>	3
Figure 2 : Symptômes de la septoriose	4
Figure 3 : Cycle de la rouille jaune causé par <i>Puccinia striiformis</i>	5
Figure 4 : Symptômes de la rouille jaune	6
Figure 5 : Cycle de la rouille brune causé par <i>Puccinia triticina</i>	7
Figure 6 : Symptômes de la rouille brune.....	8
Figure 7 : Mécanismes réduisant la pression des maladies fongiques dans les mélanges variétaux	12
Figure 8 : Démarche de la conception d'un mélange.....	14
Figure 9 : Photographie aérienne de la parcelle de Lonzée sur laquelle la plateforme expérimentale a été mise en place.....	17
Figure 10 : Diagramme ombrothermique de la saison culturale 2021-2022.....	19
Figure 11 : Ligne du temps avec la période d'observation des principales maladies en froment d'hiver. Le positionnement des traitement fongicides et des observations réalisés durant la saison culturale sont également repris au bas de cette figure	22
Figure 12 : Schéma parcellaire.....	22
Figure 13 : Maître brin décortiqué.....	23
Figure 14 : Echelle de cotation pour la septoriose	24
Figure 15 : Echelle de cotation pour les rouilles.....	24
Figure 16 : Evolution de la sévérité moyenne de la septoriose en fonction des jours de l'année 2022 sur le mélange et les 6 variétés, en l'absence de traitement fongicide (OF).....	29
Figure 17 : Evolution de la sévérité moyenne de la septoriose sur les 6 variétés et le mélange, en absence de traitement fongicide (OF), sur chaque étage foliaire.....	31
Figure 18 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille jaune en fonction des jours de l'année 2022 sur le mélange et les 6 variétés, en l'absence de traitement fongicide (OF).....	32
Figure 19 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille jaune sur les 6 variétés et le mélange, en absence de traitement fongique (OF), sur chaque étage foliaire.....	34
Figure 20 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille brune en fonction des jours de l'année 2022 sur le mélange et les 6 variétés, en l'absence de traitement fongicide (OF).....	35
Figure 21 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille brune sur les 6 variétés et le mélange, en absence de traitement fongicide (OF), sur chaque étage foliaire.....	37
Figure 22 : Boxplot de la sévérité moyenne lié à la septoriose au DOY 164 pour les différentes modalités étudiées.	39
Figure 23 : Boxplot de la sévérité moyenne lié à la rouille jaune au DOY 164, pour les différentes modalités étudiées.....	40
Figure 24 : Boxplot de la sévérité moyenne lié à la rouille brune au DOY 178, pour les différentes modalités étudiées.....	41
Figure 25 : Boxplot des rendements agronomiques des variétés composant le mélange qualité en 2018.	42
Figure 26 : Boxplot des rendements agronomiques des variétés composant le mélange production en 2019	43
Figure 27 : Boxplot des rendements agronomiques des variétés composant le mélange production en 2020	43
Figure 28 : Boxplot des rendements agronomiques des variétés composant le mélange production en 2021	44

Figure 29 : Boxplot des rendements agronomiques des variétés composant le mélange production en 2022.	45
Figure 30 : Boxplot des rendements économiques des variétés composant le mélange qualité pour un froment d'une valeur de 150 €/T en 2018.....	46
Figure 31 : Boxplot des rendements économiques des variétés composant le mélange qualité pour un froment d'une valeur de 200 €/T en 2018.....	46
Figure 32 : Boxplot des rendements économiques des variétés composant le mélange production pour un froment d'une valeur de 150 €/T en 2020.....	47
Figure 33 : Boxplot des rendements économiques des variétés composant le mélange production pour un froment d'une valeur de 150 €/T en 2021.....	48
Figure 34 : Boxplot des rendements économiques des variétés composant le mélange production pour un froment d'une valeur de 150 €/T en 2022.....	48

Tables des tableaux

Tableau 1 : Itinéraire phytotechnique de l'essai	18
Tableau 2 : Comportement des variétés qui composent le mélange Production face aux maladies du feuillage..	20
Tableau 3 : Comportement des variétés qui composent le mélange Qualité face aux maladies du feuillage.	20
Tableau 4 : Objets repris dans l'essai sur les mélanges variétaux menés à Lonzée en 2021-2022.....	21
Tableau 5 : Liste des variétés composant les mélanges production (P) et qualité (Q) ces 5 dernières années (2018 à 2022)	25
Tableau 6 : Comportement face aux maladies du feuillage des différentes variétés testées dans l'essai sur les mélanges variétaux entre 2018 et 2022.	26
Tableau 7 : Comparaison de la sévérité moyenne de la septoriose sur le mélange et sur les 6 variétés en l'absence de protection fongicide durant la saison culturale.	29
Tableau 8 : Comparaison de la sévérité moyenne de la rouille jaune sur le mélange et sur les 6 variétés en l'absence de protection fongicide (OF), durant la saison culturale.....	32
Tableau 9 : Comparaison de la sévérité moyenne de la rouille brune sur le mélange et sur les 6 variétés en l'absence de protection fongicide (OF) durant la saison culturale.....	36
Tableau 10 : Comparaison de la sévérité moyenne liée à la septoriose pour chaque variété en fonction de la protection fongicide au DOY 164	38
Tableau 11 : Comparaison de la sévérité moyenne liée à la rouille jaune pour chaque variété en fonction de la protection fongicide au DOY 164	40
Tableau 12 : Gain de rendements agronomiques et économiques de l'usage du mélange variétal.....	49

1. Introduction

Les impacts environnementaux de l'expansion et de l'intensification de l'agriculture sont de plus en plus problématiques. Ces impacts doivent être réduits tout en répondant à la demande alimentaire mondiale grandissante (Tilman et al., 2011). Pour répondre à ces enjeux, des alternatives à l'agriculture conventionnelle sont mises en place telle que l'intensification écologique. Cette pratique vise à produire autant voire plus en minimisant l'incidence sur l'environnement notamment en intégrant une biodiversité plus importante dans l'agroécosystème (Bommarco et al., 2013). Une diversité fonctionnelle dans un système permet un meilleur usage et une utilisation plus complète des ressources disponibles entre les individus (Cabotte et al., 2011).

Le blé est une céréale largement cultivée à travers le monde. En Belgique, le blé est principalement attaqué par trois maladies fongiques : la septoriose (*Zymoseptoria tritici*), la rouille jaune (*Puccinia striiformis*) et la rouille brune (*Puccinia triticina*). Lorsque la culture n'est pas protégée par l'usage de fongicides, les pertes de rendements causées par la septoriose, la rouille jaune et la rouille brune peuvent aller jusqu'à respectivement 50, 30 et 70 % (Livre Blanc Céréales, 2017). Si la protection des cultures est nécessaire afin de répondre à la demande alimentaire, il est primordial de réduire l'usage des fongicides qui représentent une proportion importante des produits phytosanitaires utilisés pour la culture.

L'usage de mélanges de variétés permet d'augmenter la diversité phénotypique au sein d'une parcelle. Cette pratique consiste à cultiver simultanément plusieurs variétés de la même espèce sur une parcelle (Reiss et Drinkwater, 2018). Cette diversité permet de réduire la pression fongique et ainsi limiter l'usage de fongicide. De plus, les mélanges permettent de prolonger la durée des sources de résistances variétales dans le temps par l'introduction d'hétérogénéité. En raison de cette diversité, les souches de pathogènes sont moins susceptibles de muter pour s'adapter aux résistances variétales (Orellana-Torrejon et al., 2022). Le renouvellement constant de variétés résistantes peut donc être ralenti (Barot et al., 2017).

Ce travail consiste à identifier l'effet de l'usage de mélanges variétaux sur les pressions des trois principales maladies fongiques du froment. La sévérité causée par chaque maladie sur des plantes non protégées va être comparée à celle provoquée sur des plantes ayant reçus une protection fongicide partielle ou totale. Finalement, une analyse des rendements agronomiques et économiques va être effectuée.

2. Synthèse bibliographique

2.1. Le froment d'hiver

Le blé tendre d'hiver communément appelé froment d'hiver en Belgique est la 2^{ème} céréale la plus cultivée dans le monde après le maïs (McCormick, 2020). Sa capacité à s'adapter aux conditions environnementales grâce à son large génome lui permet d'être cultivé sous toutes les latitudes (McCormick, 2020; Tock et al., 2021). En outre, le grain est facilement stockable (McCormick, 2020).

En 2021, la production mondiale de blé a été estimée à 776,91 millions de tonnes ce qui correspond à une baisse de 2% par rapport à l'année précédente (FEGRA, 2021). La Chine, l'Inde, la Russie, les Etats-Unis, le Canada et la France sont les pays dont la production en blé est la plus élevée dans le monde (Atlas Big, 2021). En 2021, la consommation a augmenté de 1% par rapport à l'année précédente pour atteindre 786,67 millions de tonnes (FEGRA, 2021).

En 2020, la superficie agricole belge occupée par du froment d'hiver s'élevait à 177 255 hectares. La culture représente 36 % de la surface agricole cultivée. La production belge a atteint 1 615 320 tonnes. Le rendement moyen s'élevait donc à 9,11 T/ha (Statbel, 2020).

Le froment cultivé en Région wallonne est majoritairement utilisé pour l'alimentation animale, pour l'amidonnerie et pour l'industrie des biocarburants. La part destinée à l'alimentation humaine représente moins de 10% (Filagri, 2016).

2.2. Les principales maladies du feuillage du froment d'hiver

2.2.1. La septoriose

a. Classification

La septoriose est une maladie foliaire provoquée par deux champignons : *Stagonospora nodorum* et *Zymoseptoria tritici*. En Belgique, l'espèce dominante est *Zymoseptoria tritici* mais *Stagonospora nodorum* se retrouve de manière sporadique dans les parcelles (Livre Blanc Céréales, 2017). La forme sexuée de *Zymoseptoria tritici* est *Mycosphaerella graminicola* et la forme asexuée est *Septoria tritici* (Bayer-Agri, 2018). Les deux champignons appartiennent à l'embranchement des ascomycètes. Ces champignons passent par une phase biotrophe du début du cycle jusqu'à la fin de la phase de latence ainsi que par une phase nécrotrophe lors de la sporulation (Slimane, 2010).

b. Cycle

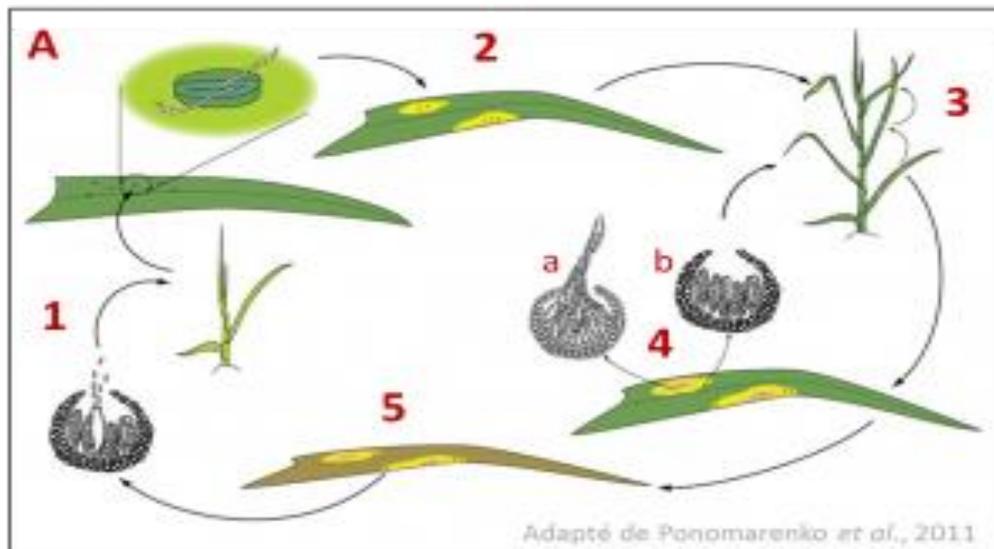


Figure 1 : Cycle de la septoriose causé par *Zymoseptoria tritici* (Livre Blanc Céréales, 2017)

Le cycle de *Zymoseptoria tritici* est illustré sur la Figure 1. Le champignon survit à l'hiver sous forme de mycélium, de pycnide ou de périthèce sur les résidus de cultures et sur les repousses (Figure 1 (5)) (Livre Blanc Céréales, 2017). Les graminées adventices peuvent être des hôtes de la septoriose mais les souches provenant de ces dernières ne sont pas adaptées pour s'attaquer et être agressives aux froments (Eyal, 1999).

Le champignon réalise une reproduction sexuée tout au long de la saison culturale. Les périthèces forment des spores sexuées, les ascospores. L'infection primaire a lieu à l'automne et est principalement causée par les spores sexuées provenant de débris végétaux (Figure 1 (1)). Lorsque les conditions sont humides, les ascospores sont libérées des périthèces. Elles se retrouvent dans l'air et sont alors transportées par le vent. (Livre Blanc Céréales, 2017). Elles ont comme rôle principal de débiter et de perpétuer l'épidémie (Eyal, 1999). Pendant l'hiver, l'épidémie est ralentie par les conditions climatiques trop fraîches défavorables aux champignons. Au printemps, l'augmentation des températures réactive l'épidémie. Des pycnides se développent sur les lésions (Figure 1 (2)). Elles produisent des spores asexuées, les pycnidiospores. Les pycnidiospores présentes sur les résidus de froment cultivé antérieurement ou sur les repousses de froment peuvent également être une source d'inoculum primaire. Ces dernières sont transportées par la pluie ou par la rosée (Livre Blanc Céréales, 2017). Par effet « splashing » (Figure 1 (3)), elles peuvent contaminer les étages foliaires supérieurs et les plantes voisines (Bayer-Agri, 2018). La dispersion a lieu sur un rayon de maximum 1 mètre (Livre Blanc Céréales, 2017). En cas d'absence de précipitations, une propagation de la maladie peut avoir lieu lorsque les feuilles 3 et 4 sont en contact avec les feuilles inférieures lors de leur émergence. (BASF, 2019).

L'infection des spores sexuées et asexuées a lieu par les stomates de la plante. (Livre Blanc Céréales, 2017). Contrairement à *Zymoseptoria tritici*, *Stagonospora nodorum* pénètre dans la plante par la cuticule (Karjalainen et Louatmaa, 1986).

Au cours de la saison, la reproduction sexuée permet le transport horizontal de l'épidémie (Figure 1 (4b)) tandis que la reproduction asexuée permet le transport vertical ascendant (Figure 1 (4a)). Les pycnidiospores infectent les feuilles en condition humide avec des températures supérieures à 3 °C. (Livre Blanc Céréales, 2017). Le temps nécessaire pour réaliser le cycle dure généralement 17 à 21

jours. L'optimum de température est de 20°C. L'humidité relative devient optimale à partir de 85 % (Ghaffary et al. , 2018).

c. Symptômes

Les symptômes sont répartis de manière homogène sur la parcelle avec quelques foyers possibles. Les taches présentes sur les feuilles peuvent être de couleur blanche et de forme allongée ou de couleur brune avec une forme ovale à rectangulaire bordée généralement d'un halo jaune (Figure 2) (Livre Blanc Céréales, 2017; Arvalis, 2013). Les taches sont dans un premier temps de couleur jaune dûe à la chlorose et virent au brun en nécrose (Bayer-Agri, 2018). Elles sont visibles sur les deux faces du limbe et peuvent virer au gris clair (Livre Blanc Céréales, 2017). Les pycnides sont visibles à l'œil nu et forment des points noirs dans les taches nécrosées (Figure 2) (Arvalis, 2013). Les lésions peuvent devenir de larges zones nécrotiques brunâtres (BASF, 2019).



Figure 2 : Symptômes de la septoriose (photo personnelle)

L'épi ne présente pas de symptômes pour *Zymoseptoria tritici* par contre une coloration brune-violacée peut être observée sur la partie supérieure des glumes pour *Stagonospora nodorum* (Arvalis, 2013).

d. Nuisibilité

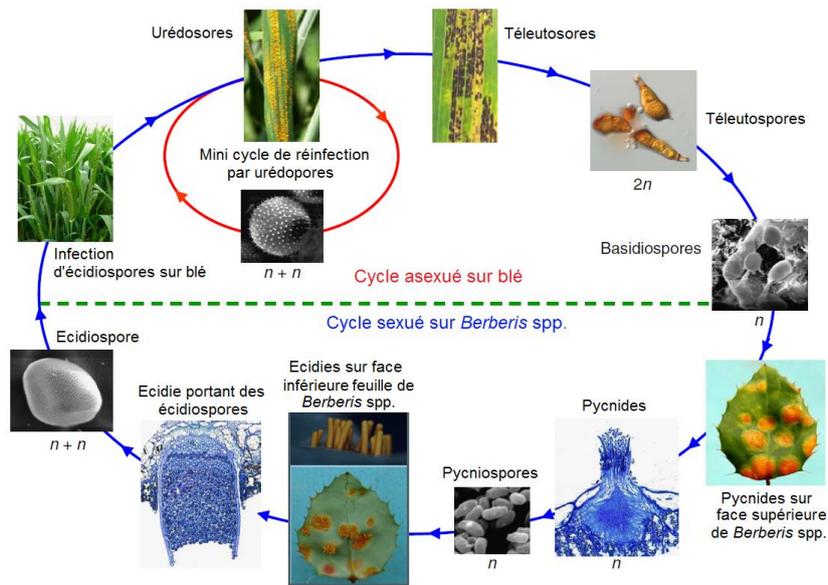
La nuisibilité moyenne est de 15% et peut aller jusqu'à 50 % lors d'une pression sévère (Eyal et al., 1987, Arvalis, 2013). La période où les contaminations sont les plus nuisibles se situe entre le stade 2 nœuds (BBCH 32) jusqu'au stade floraison (BBCH 65) (Bayer-Agri, 2018).

2.2.2. La rouille jaune

a. Classification

La rouille jaune est une maladie provoquée par le champignon *Puccinia striiformis*. Sur le froment, la rouille jaune est causée par la sous-espèce *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* Erikss. Il s'agit d'un champignon basidiomycète biotrophe (Livre Blanc Céréales, 2017).

b. Cycle



Source : W. Zheng et al. 2013. High genome heterozygosity and endemic genetic recombination in the wheat stripe rust fungus. *Nature communications*. DOI: 10.1038/ncomms3673

Figure 3 : Cycle de la rouille jaune causé par *Puccinia striiformis* (Source : Livre Blanc Céréales, 2017)

Le champignon passe l'hiver sur les repousses de céréales ou sur les jeunes plantes semées en automne sous forme d'urédospores. Ces dernières peuvent survivre à des températures allant jusqu'à -4°C (Livre Blanc Céréales, 2017). Le pathogène peut aussi passer l'hiver sous forme de mycélium en dormance. Il peut survivre à des températures allant jusqu'à -10°C . (Rapilly, 1979 ; Livre Blanc Céréales, 2017; BASF, 2019). Les graminées adventices infectées peuvent être des hôtes de la rouille (Syngenta France, 2020).

À la fin de l'hiver, les urédies sont visibles sur les feuilles basses des jeunes céréales. Par voie asexuée, les urédies vont produire des urédospores aussi longtemps que les conditions climatiques sont favorables (Figure 3 (Cycle asexué)) (Livre Blanc Céréales, 2017). L'optimum des températures est compris entre 10 et 15°C et une humidité relative de 100% est nécessaire pour que les spores germent. Au-dessus de 20°C , le champignon est inhibé à l'exception de certaines souches tolérantes (BASF, 2019). Six à huit jours après l'infection d'une feuille par une spore, des chloroses apparaissent. Les nouvelles pustules apparaissent quant à elles 12 à 14 jours après l'infection lorsque les conditions sont optimales (Chen, 2005 ; Livre Blanc Céréales, 2017). Ces pustules évoluent en des pustules de couleur noirâtre, les téléospores, qui contiennent les télisporos (Figure 3 (Cycle sexué)). L'apparition de ces téléospores marque le début de la phase sexuée du cycle de reproduction de la rouille jaune. Les téléospores évoluent en basidiospores. En Europe, le cycle sexué n'est jamais bouclé en raison de l'absence de synchronisation en l'hôte alternatif, *Berberis* spp. et celle de l'hôte primaire à savoir une céréale ou une graminée sauvage (Livre Blanc Céréales, 2017; Rodriguez-Algaba et al., 2021).

c. Symptômes

Les symptômes peuvent être visibles sur les feuilles et les épis. L'épidémie commence en automne sur des plantes individuelles. Pendant l'hiver, les symptômes apparaissent lentement (BASF, 2019). Les premières pustules apparaissent sur les feuilles du bas de quelques plantes. Les premières contaminations sont visibles au début du printemps sous forme de foyer dans les variétés sensibles (Arvalis, 2013).

Les pustules jaunes orangées de 0,5 mm de diamètre sont alignées sur les feuilles supérieures entre les nervures et forment des stries (Figure 4). Lorsque les pustules sont encore en incubation, des chloroses apparaissent dans le sens des nervures. À un stade avancé, les pustules deviennent noirâtres (Arvalis, 2013).



Figure 4 : Symptômes de la rouille jaune (photo personnelle)

Des symptômes peuvent être visibles sur l'épi. Des spores sont observables sur le grain et la face inférieure des glumelles. Une décoloration de l'épillet peut être visible (Arvalis, 2013).

d. Nuisibilité

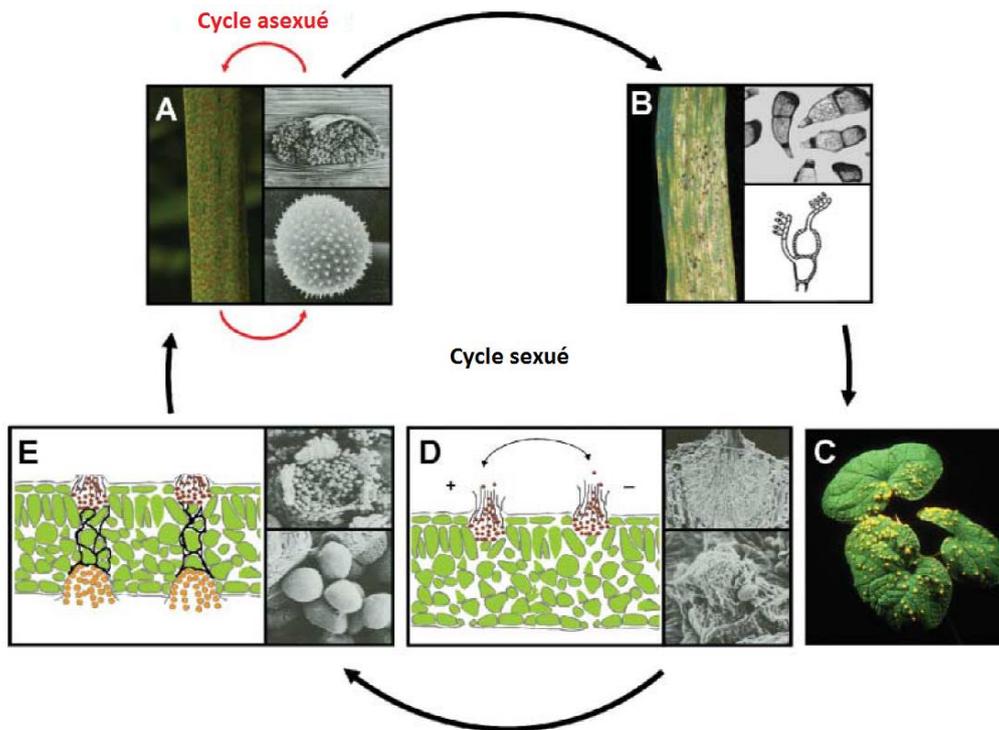
La rouille jaune est la maladie la plus nuisible en froment d'hiver (Arvalis, 2013). La nuisibilité peut atteindre 70%. Les conséquences sont fortement dommageables mais sa fréquence est plus faible que pour les autres maladies foliaires. (BASF, 2019). Les attaques précoces détectées tardivement provoquent le plus de dégâts. Le champignon fait son apparition à partir du stade redressement (BBCH30) (Arvalis, 2013). Un ensoleillement et des températures supérieures à 25°C limitent la nuisibilité car les spores sont sensibles aux rayons ultra-violets et aux températures élevées (Bayer-Agri, 2018).

2.2.3. La rouille brune

a. Classification

La maladie est causée par le champignon *Puccinia triticina* Eriks anciennement connu sous le nom de *P. recondita* f. sp. *tritici* (Huerta-Espino et al., 2011). Ce champignon est observé dans toutes les régions du monde (Bolton et al., 2008; Huerta-Espino et al., 2011). Il s'agit de la rouille la plus répandue parmi les rouilles capables d'infecter le froment. Le champignon fait partie de l'embranchement des basidiomycètes et est totalement biotrophe. (Livre Blanc Céréales, 2017).

b. Cycle



Source: M.D. Bolton, J.A. Kolmer and D.F. Garvin. 2008. Wheat leaf rust caused by *Puccinia triticina*. *Molecular Plant Pathology*, 9, (5), 563-575.

Figure 5 : Cycle de la rouille brune causé par *Puccinia triticina* (Source : Livre Blanc Céréales, 2017)

Le champignon passe l'hiver sur les repousses de céréales et sur certaines graminées. Cette source sert d'inoculum primaire pour infecter les jeunes plantes dès leur levée en automne. Les spores sont transportées sur de longues distances par le vent. Les urédospores sont ainsi présentes tôt dans la saison mais la phase épidémiologique ne s'enclenche que lorsque les conditions deviennent optimales. Des conditions humides et des températures comprises entre 10 et 25°C sont nécessaires pour une infection de la plante. Ensuite, une période de latence de 8 à 12 jours est nécessaire lorsque les conditions sont favorables avec des températures comprises entre 15 et 20°C (Livre Blanc Céréales, 2017). La germination nécessite une humidité relative de 100% pendant 4 à 8h à 20°C (Zhang et Dickinson, 2001; Zhang et al., 2003). Les urédospores contenues dans les urédies vont être transportées par le vent ou la pluie pour infecter d'autres feuilles ou d'autres plantes (Figure 5 (Cycle asexué)) (Livre Blanc Céréales, 2017). Les urédies évoluent en des téliées contenant les téliosporos (Figure 5 (Cycle sexué)). Elles vont rapidement germer et produire des basidiosporos. Ces dernières vont pouvoir infecter un hôte alternatif, *Thalictrum* ou *Isopyrum* spp. En Belgique, ces plantes sont utilisées comme plantes ornementales. Le cycle sexué ne contribue donc pas dans nos régions au développement de la maladie et ne permet pas de créer une source de variations génétiques (Livre Blanc Céréales, 2017).

c. Symptômes

Les symptômes apparaissent généralement sur les feuilles supérieures à partir du stade dernière feuille étalée (BBCH 39) jusqu'au développement du grain (BBCH 75) (Livre Blanc Céréales, 2017). La répartition des symptômes est homogène sur la parcelle car la dissémination a lieu par le vent. Les pustules sont de couleur brune à brune orangée et elles sont dispersées essentiellement sur la face

supérieure de la feuille (Figure 6) (Arvalis, 2013). Elles ont un diamètre compris entre 0,5 et 1mm (BASF, 2019). Des halos chlorotiques peuvent apparaître autour des pustules (Syngenta France, 2020).



Figure 6 : Symptômes de la rouille brune (photo personnelle)

L'épi en cas de forte attaque peut être touché par la maladie (Arvalis, 2013).

d. Nuisibilité

Les dégâts sont importants en cas de fortes infestations à l'approche de l'épiaison (Syngenta France, 2020). La rouille brune peut causer jusqu'à 30% de perte de rendement (Huerta-Espino, 2011; Livre Blanc Céréales, 2017).

2.3. La lutte fongique

2.3.1. Les leviers agronomiques

La résistance variétale est le premier levier agronomique contre les maladies fongiques (Arvalis, 2013). Elle est particulièrement efficace contre les rouilles (Sharma-Poudyal et al., 2013). Par contre, aucune variété n'est totalement résistante à la septoriose en raison de son cycle sexué qui a lieu durant toute l'année (Pope De Vallavieille et al., 2016; Livre Blanc Céréales, 2017).

La date de semis influence la pression fongique. Les semis tardifs sont moins touchés par la maladie en raison d'une diminution de l'exposition du champignon pendant l'hiver (Daamen et stol, 1992 ; Fones et Gurr, 2015 ; Arvalis, 2013).

Le travail du sol avec l'enfouissement ou le broyage des résidus de cultures permet de réduire les pressions. Les destructions des repousses pendant la période estivale vont permettre de réduire le développement des rouilles qui pourraient servir d'inoculum primaire lors de la saison culturale suivante (Arvalis, 2013). De plus, à l'automne, les graminées adventices sont des hôtes non négligeables de la maladie. Il est donc important de réaliser un bon travail du sol pour réduire le nombre d'adventices

(Bayer-Agri, 2019). La septoriose n'est pas une maladie à caractère parcellaire pour laquelle l'inoculum primaire pourrait être considéré comme limitant (Arvalis, 2013). Par contre, un précédent blé permet l'implantation plus rapide de la septoriose. Les pycnidiospores présentes sur les résidus et les repousses seront une source d'inoculum primaire en plus des ascospores présentes dans l'air. Les rotations des cultures réduisent donc le potentiel d'inoculum primaire aussi bien pour les rouilles que pour la septoriose (Livre Blanc Céréales, 2017).

Une fertilisation azotée favorise l'apparition de maladies fongiques en produisant un couvert végétal plus dense, au sein duquel la surface d'attaque est plus élevée et le microclimat plus humide (Syngenta France, 2020; Arvalis, 2013). De plus, le développement des rouilles est favorisé par des tissus de plantes riches en azote agissant comme substrat pour la croissance des agents pathogènes (Neumann et al., 2004 ; Devadas et al., 2014).

Le mélange variétal est également un levier agronomique. La diversité intraspécifique augmente la diversité génétique au sein de la culture permettant de réduire la pression fongique (Reiss et Drinkwater, 2018). Ce levier agronomique est développé au point 2.4.

2.3.2. La lutte chimique

La lutte chimique est nécessaire pour un contrôle adéquat des maladies. L'application conventionnelle de fongicides en froment se fait en un ou deux passages en fonction de la pression fongique. L'ensemble des maladies fongiques sont traitées lors du même passage avec des fongicides contenant une ou plusieurs matières actives.

Lors de pression élevée au début de la saison, il est généralement recommandé de réaliser un premier traitement au stade 2 nœuds (BBCH 32) afin de limiter la progression. Un second traitement doit ensuite être effectué 3 à 4 semaines plus tard au moment de l'épiaison (BBCH 55) pour protéger la dernière feuille et l'épi (Livre Blanc Céréales, 2017). Lors d'une pression faible au début du printemps, une seule application de fongicide peut être envisagée. Cette application est généralement réalisée au stade dernière feuille étalée (BBCH 39), et peut parfois être repoussée jusqu'à l'épiaison (BBCH 55) (Livre Blanc Céréales, 2017).

Limiter le nombre d'interventions avec des produits phytosanitaires et diversifier les modes d'actions et les substances actives permettent de ralentir la pression de sélection et de limiter l'émergence de souches résistantes (Arvalis, 2013). Pour une protection fongicide en 2 passages, il est conseillé de ne pas appliquer les mêmes substances actives ni les mêmes modes d'action lors des 2 applications (Livre Blanc Céréales, 2017).

Le cycle de la septoriose lui permet de rapidement développer des résistances à un grand nombre de fongicides disponibles sur le marché. (Livre Blanc Céréales, 2017). Actuellement, la plupart des souches sont résistantes aux strobilurines et à quelques triazoles (Pope De Vallavieille et al., 2016). Seules les SDHI et certaines triazoles sont encore réellement efficaces pour lutter contre la septoriose (Livre Blanc Céréales, 2017). Les performances de ces matières actives peuvent également être améliorées grâce à l'ajout de certains produits multisites comme les phtalimides ou le soufre (Corteva, 2022).

Incapables d'accomplir la phase sexuée de leur cycle de reproduction, les rouilles ne développent généralement pas de résistances aux fongicides. La lutte chimique contre la rouille jaune se fait principalement avec des produits à base de triazoles. Les strobilurines sont également efficaces pour lutter contre ces agents pathogènes. Lors d'un traitement en deux passages, il est recommandé d'utiliser les produits à base de SDHI lors de la deuxième application afin de bénéficier d'une protection optimale contre la septoriose. Les produits utilisés pour la rouille jaune sont généralement aussi performants contre la rouille brune (Arvalis, s.d ; Livre Blanc Céréales, 2017). Les fongicides sont efficaces pour gérer l'épidémie des rouilles lorsque la pleine dose est utilisée (Kang et al., 2019).

2.4. Les mélanges variétaux

2.4.1. L'intérêt des mélanges

Le recours à des mélanges est principalement utilisé dans le but de limiter les dommages causés par les maladies fongiques (Reiss et Drinkwater, 2018). Il freine plus particulièrement les maladies à dispersion éolienne comme les rouilles et l'oïdium. Pour la septoriose qui est une maladie qui se disperse à courte distance par la pluie, les mélanges sont aussi efficaces pour ralentir l'épidémie lorsqu'elle est modérée. Par contre, lors d'infestation sévère, les variétés dites résistantes seront plus touchées par la maladie qu'en culture pure (Pope De Vallavieille et al., 2016). De plus, l'usage de mélanges permet un gain de rendement durable au fil des années (Reiss et Drinkwater, 2018). Le gain de rendement d'un mélange par rapport aux variétés mises individuellement en culture se situe généralement entre 2 et 5%. Ce gain peut varier fortement et peut même être négatif (Montazeaud, 2022).

Les intérêts majeurs pour les agriculteurs d'avoir recours à des mélanges variétaux est de réduire les doses de fongicides appliquées sur les parcelles et de stabiliser les rendements interannuels (Kiær et al., 2009; Borg et al., 2015).

Les mélanges permettent aussi de réduire la pression d'autres bioagresseurs tels que les insectes (Grettenberger, 2015; Duan et al., 2022). Certains mélanges permettent à la culture d'être plus compétitive contre les adventices. L'usage accru de l'espace et des ressources disponibles laissent moins de place aux adventices pour se développer (Newton et al., 2009). Les risques de verse sont réduits lors de l'usage de mélanges par rapport à la culture d'une variété en pure. Les mélanges avec plus de quatre variétés ont une résistance à la verse plus élevée que les mélanges avec peu de variétés (Kong et al., 2022).

Les mélanges permettent une plus grande flexibilité en termes d'organisation de travail (Barot et al., 2017). L'agriculteur peut retarder son passage avec des fongicides pour le faire dans les conditions les plus optimales possibles (Enjalbert et al., 2019).

2.4.2. Les mécanismes

Les mécanismes qui réduisent la pression des pathogènes sont les suivants (Figure 7) :

a. Dilution de l'inoculum

Les plantes sensibles sont plus éloignées les unes des autres car elles sont mélangées à des plantes qui sont résistantes. La probabilité que les spores arrivent sur une plante sensible est réduite. La vitesse de propagation est ralentie et réduite (Borg et al., 2018).

b. Effet barrière

Les plantes résistantes interceptent une partie de l'inoculum. Elles font office de barrière physique et freinent la propagation des agents pathogènes (Borg et al., 2018).

c. Résistance induite

Dans les mélanges, la diversité génétique est plus élevée. Cela induit la présence de populations de pathogènes plus diversifiées. Des spores virulentes coexistent avec des spores non virulentes. Ces dernières vont stimuler les plantes qui vont activer des mécanismes de défense. Elles seront plus aptes à faire face à de potentielles contaminations de spores virulentes (Borg et al., 2018).

d. Sélection perturbatrice

Dans les parcelles emblavées avec une seule variété, les souches de pathogènes les mieux adaptées pour attaquer la variété sont sélectionnées. Une souche en variété pure est plus apte à contourner le gène de résistance de la variété, ce qui la rend plus virulente et plus adaptée à la variété. En mélange, la présence de plusieurs variétés augmente la diversité génotypique. Cela a pour effet d'augmenter le temps nécessaire aux souches de pathogènes pour s'adapter aux variétés présentes (Borg et al., 2018).

La résistance variétale est considérée comme une des seules méthodes de lutte économiquement viable contre les pathogènes. Mélanger les variétés permet d'augmenter la durabilité des résistances. Un gène de résistance dans un mélange est moins exposé que dans une culture monovariétale (Mundt, 2002).

e. Compensation

Les variétés sensibles vont avoir un développement plus faible lors d'infestations par les souches pathogènes. Les variétés résistantes auront plus de place pour se développer et vont en partie compenser les pertes occasionnées par les variétés sensibles (Borg et al., 2018).

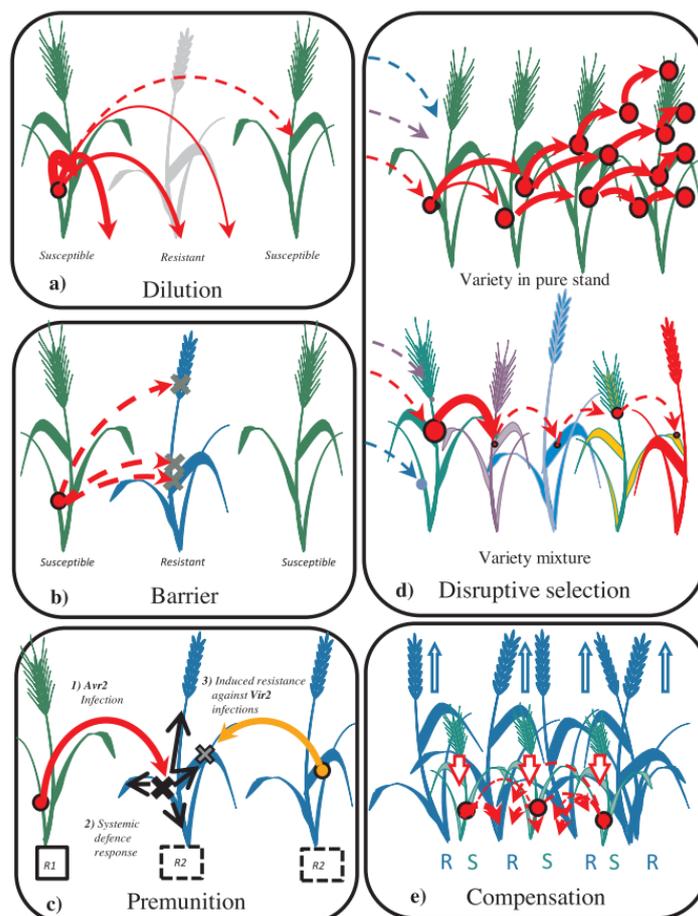


Figure 7 : Mécanismes réduisant la pression des maladies fongiques dans les mélanges variétaux (Borg et al., 2018)

De plus, les plantes communiquent entre elles. Elles interagissent par des échanges chimiques via des composés organiques volatils. Elles échangent également à travers les microorganismes aériens et souterrains (Bancal, 2021). La communication entre les plantes peut modifier l'expression de gènes de défense aussi bien avant qu'après une infestation par des pathogènes. L'interaction entre les plantes agit en parallèle et indépendamment des mécanismes cités précédemment dans la réduction des maladies (Pélissier et al., 2021).

2.4.3. Les conditions d'application

a. Types de pathogènes

Les mélanges ont un effet sur les pathogènes polycycliques (Mundt, 2002; Orellana-Torrejon et al., 2022). La réduction de la maladie grâce au recours de mélanges est d'autant plus marquée que le nombre de générations de reproduction du pathogène est élevé. La quantité d'inoculum présente initialement et la vitesse de l'épidémie influencent considérablement l'efficacité du mélange en termes de réduction de l'infestation du pathogène (Mundt, 2002).

b. Type d'infection

L'efficacité du mélange diminue lorsqu'un taux d'auto-infection est élevé, c'est-à-dire que le pathogène qui infecte la plante s'est développé sur la plante elle-même. L'expansion des lésions contribue à l'auto-infection et contribue au développement de l'épidémie (Mundt, 2002).

c. Type de parcelle

L'efficacité des mélanges est plus importante dans de larges parcelles que dans les parcelles expérimentales à petites échelles. Dans la majorité des essais, une modalité non traitée est présente. La quantité d'inoculum produite est plus élevée dans ces parcelles. Des interférences inter-parcelles peuvent avoir lieu et les parcelles traitées pourraient se retrouver en présence de plus d'inoculum que dans des situations parcellaires normales (Mundt, 2002).

d. Milieu où les mélanges ont de l'intérêt

L'efficacité des mélanges est d'autant plus marquée lorsque les conditions culturales sont défavorables (Cheng et al., 2005). Une grande diversité variétale améliore le contrôle des maladies et la productivité en cas d'inputs réduits et favorise l'utilisation et le partage des ressources (Reiss et Drinkwater, 2018 ; Montazeaud, 2022). L'efficacité du mélange est difficile à prédire, elle est influencée par une multitude d'interactions et de facteurs incontrôlables (Kiær et al., 2009). Certains facteurs sont cités ci-dessous.

- Eau

L'humidité du sol est utilisée plus efficacement et plus particulièrement si les caractéristiques physiologiques des variétés sont complémentaires dans le prélèvement de l'eau. De plus, les mélanges permettent d'atténuer les maladies racinaires et les ravageurs qui nuisent à la croissance racinaire et au prélèvement de l'eau plus profondément dans le profil du sol (Adu-Gyamfi et al., 2015).

- Nutriment

Il existe une corrélation négative entre la teneur en matière organique dans le sol et les gains de rendements atteints grâce à l'usage de mélange. Les mélanges permettent une meilleure adaptation au milieu lorsque la teneur en matière organique est trop faible. Ces avantages sont réduits lorsque les ressources ne sont pas limitées. L'exploration racinaire variée des variétés rend le mélange plus apte à utiliser de manière adéquate les ressources disponibles (Reiss et Drinkwater, 2018).

De plus, lorsqu'il n'y a pas d'application d'engrais sur la parcelle, le gain relatif à l'usage d'un mélange est plus élevé par rapport à des parcelles avec apport d'engrais (Reiss et Drinkwater, 2018). Et lors de l'application d'engrais, les mélanges de variétés permettent une meilleure exploitation des nutriments et réduisent les impacts environnementaux comme l'éventuelle lixiviation des nitrates (Barot et al., 2017).

- PH du sol

Les mélanges sont plus efficaces en conditions acides que dans les conditions basiques (Reiss et Drinkwater, 2018). Cela peut s'expliquer par la concentration en macronutriments (N,P,K,S,Ca) moins disponibles en conditions basiques. Par contre, en conditions acides des micronutriments comme le manganèse et l'aluminium peuvent devenir trop disponibles et être toxiques. Avec plusieurs variétés,

les conditions potentiellement toxiques peuvent être atténuées. Les complexes racinaires hétérogènes des variétés composant le mélange permettent la production d'une plus grande diversité d'exsudats racinaires qui vont favoriser la décomposition microbienne dont les produits forment des complexes avec l'aluminium (Brady and Weil, 2014).

2.4.4. Le choix des profils variétaux

Le choix des profils variétaux se fait selon 3 étapes (Figure 8)

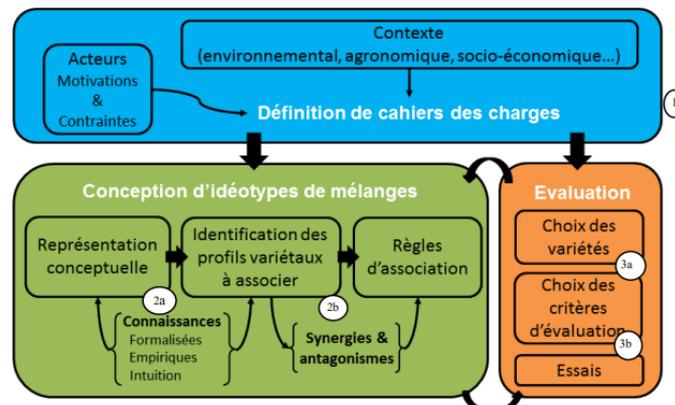


Figure 8 : Démarche de la conception d'un mélange (Borg et al., 2015)

La première étape pour concevoir un mélange consiste à lister les objectifs auxquels doivent répondre le mélange. Il faut qu'il permette une bonne adaptation au milieu et qu'il confère une qualité requise pour l'utilisation souhaitée (Borg et al., 2015).

Ensuite, les variétés qui vont être mises dans le mélange vont être sélectionnées en fonction des objectifs auxquels il doit répondre (Borg et al., 2015). Choisir les variétés qui composent le mélange reste un défi (Barot et al., 2017). Les différentes variétés de froment possèdent une large variabilité de traits fonctionnels. Il est complexe d'associer des variétés possédant des traits fonctionnels compatibles et favorables. Certaines combinaisons peuvent ne pas montrer d'effets de mélanges bénéfiques (Montazeaud., 2020).

Les mélanges basés à la fois sur les résistances aux maladies et les caractéristiques physiques sont significativement meilleurs que les mélanges basés sur seulement un de ces critères (Reiss et Drinkwater, 2018).

Il faut que les variétés aient des résistances qui correspondent aux pathogènes cibles présents dans l'environnement (Mundt, 2002).

Selon l'étude de Blanc et al. (2021), la capacité de tallage et la dimension des feuilles ont un impact important sur l'efficacité du mélange. Elles ont un impact sur l'indice de surface foliaire (LAI). Il est judicieux de mettre dans le mélange des variétés qui sont différentes en termes de dimensions foliaires et en capacité de tallage.

De plus, des rendements supérieurs sont obtenus avec des mélanges de variétés de hauteurs différentes par rapport à ceux avec des hauteurs similaires. Cela permet un brassage d'air plus important rendant les tissus végétaux moins humides et donc moins favorables au développement des pathogènes (Borg et al., 2015).

Des précocités variées permettent de réduire les risques lors de conditions climatiques non favorables. Toutes les variétés n'auront pas leur stade sensible au même moment (Borg et al., 2015). Par contre, lors de la récolte, toutes les variétés ne seront probablement pas toutes à la même maturité. Les variétés pas assez mûres vont entraîner un taux d'humidité des grains plus important et rendre plus difficile le stockage (De Lucia et Assennato., 1992).

Dernièrement, il est nécessaire de tester les mélanges pour observer si ceux-ci apportent des résultats positifs (Borg et al., 2015). Les mélanges sont généralement basés sur des combinaisons de caractéristiques phénotypiques qui sont favorables (Barot et al., 2017). Cela ne permet pas toujours d'avoir des résultats robustes car les traits qui sont impliqués ne sont pas connus. Montazeaud et al. (2022) ont démontré que la richesse allélique peut apporter des pertes de rendements qui sont supérieures au gain que peut apporter la diversité génotypique. Dans cette étude, la variation allélique n'a pas été identifiée à un trait phénotypique. Par contre, la diminution directe des rendements dans des mélanges bi-alléliques est causée par une infection plus sévère par la septoriose.

2.4.5. Les inconvénients des mélanges

Dans certaines conditions, l'introduction des variétés qui sont sous-optimales dans un mélange peut avoir un effet négatif sur le rendement car les effets bénéfiques escomptés sur la pression des maladies ne sont pas nécessairement obtenus. De plus, les auxiliaires peuvent être favorisés par les mélanges mais dans certains cas, les pathogènes et ravageurs pourraient être également avantagés par les mélanges. De la concurrence entre les variétés du mélange pourrait avoir lieu et être défavorable (Barot et al., 2017). Une variété qui rencontre des conditions défavorables dans un mélange peut dégrader l'ensemble de la qualité du lot de céréales (Enjalbert et al., 2019).

Les mélanges sont peu acceptés en industrie car ils sont sources d'hétérogénéité. La norme est d'avoir des lots purs avec une seule variété (Reiss et Drinkwater, 2018). Les mélanges de variétés sont tout de même à l'heure actuelle reconnus et proposés par certaines coopératives (Enjalbert et al., 2019).

3. Objectifs

Ce travail de fin d'études a pour objectif d'identifier l'effet de l'usage de mélanges variétaux sur les pressions des trois principales maladies fongiques du froment. La dynamique de ces maladies va être étudiée pour six variétés cultivées en pure ainsi que ces six mêmes variétés cultivées en mélange sans protection fongique. Cette approche permet de suivre le développement des champignons hebdomadairement au niveau parcellaire ainsi qu'au niveau de la plante.

De plus, deux modalités avec une protection fongicide partielle et complète vont être analysées et comparées à la modalité sans traitement. Deux semaines après chaque traitement, les maladies dans les différentes variétés et mélanges de variétés vont être mesurées en vue de déterminer l'efficacité des traitements et de justifier ou non leur usage pour la lutte fongique.

Finalement, une analyse des rendements agronomiques et économiques va être effectuée sur plusieurs années. Pour chaque année, les rendements de chaque variété cultivée en pure et en mélange selon trois modalités de protections fongiques vont être comparés entre eux. Cette approche va permettre de déterminer la pertinence ou non de recourir aux fongicides afin d'augmenter le rendement. Le gain de rendements grâce à l'usage de mélanges de variétés va être déterminé. Les différents traitements fongicides ayant un coût, le rendement économique pour chaque variété et mélange de variétés va être analysé. L'objectif de cette démarche est d'identifier les gains ou les pertes occasionnés par les protections fongiques. Le gain économique engendré par le recours de mélanges variétaux sera également spécifié.

4. Matériels et méthodes

4.1. Analyse intra-annuelle

4.1.1. Site expérimental

L'essai sur les mélanges variétaux est situé à Lonzée, sur une plateforme expérimentale cogérée par le CePiCOP et l'Unité de Phytotechnie Tempérée de la faculté de Gembloux Agro-Bio Tech. Cette plateforme a été mise en place sur une parcelle située en Région limoneuse. Son sol est limoneux et présente un drainage naturel favorable (Aba(b)1) (WalOnMap, 2021). Les coordonnées géographiques de la parcelle sont [50°32'49"N, 4°43'56"E].



Figure 9 : Photographie aérienne de la parcelle de Lonzée sur laquelle la plateforme expérimentale a été mise en place. Le rectangle orange reprend la position exacte de l'essai sur les mélanges variétaux en froment d'hiver (Google Earth, 2021).

4.1.2. Itinéraire phytotechnique

L'itinéraire phytotechnique de l'essai est décrit dans le tableau 1. Il reprend les différentes interventions culturales effectuées sur les parcelles qui composent l'essai. De manière générale, cet itinéraire correspond à une conduite classique pour un froment cultivé dans cette région en agriculture conventionnelle.

Tableau 1 : Itinéraire phytotechnique de l'essai

	Action réalisée	Date	Stade de développement
Précédent culturel : Pomme de terre			
Préparation du sol et semis	Labour	27-10-21	/
	Houe rotative	28-10-21	/
	Semis	28-10-21	/
Désherbage	Sortie d'hiver avec du Sigma Star (0,33kg/ha)+ Biathlon Duo (70 g/ha)+Végétop (11/ha)	24-03-22	Plein tallage (BBCH 22-28)
	Rattrapage avec de l'Axial (1,2 l/ha)	19-04-22	Redressement (BBCH 30)
Régulateur	Application de CCC (1 l/ha)	14-04-22	Redressement (BBCH 30)
Fumure azotée	Fraction tallage (60 kg N/ha)	14-03-22	Plein tallage (BBCH 22-28)
	Fraction redressement (60 kg N/ha)	22-04-22	Redressement (BBCH 30)
	Fraction dernière feuille (60 kg N/ha)	17-05-22	Dernière feuille (BBCH 39)
Fongicide	<i>Modalité avec protection fongicide complète (2F)</i>		
	T1 au 2 ^{ème} nœud avec du Simvéris (1 l/ha) + Stavento (1,5 l/ha)	04-05-22	2 ^{ème} nœud (BBCH 32)
	T2 à l'épiaison avec du Vélogy Era (1 l/ha)	30-05-22	Epiaison (BBCH 55)
	<i>Modalité avec protection fongicide partielle (1F)</i>		
	T1 à la dernière feuille avec du Revystar Gold (1,5 l/ha) + Stavento (1,5 l/ha)	14-05-22	Dernière feuille (BBCH 39)
Récolte	Moisson	24-07-22	Maturation complète des grains (BBCH 89)

4.1.3. Conditions climatiques et données météorologiques

Le climat en Belgique est tempéré. Les températures moyennes y sont de 10,2°C et les précipitations annuelles de l'ordre de 800 mm (IRM, 2022).

Les données météorologiques de la saison culturale sont illustrées sur le diagramme ombrothermique suivant (Figure 10). Ces données proviennent de la station de Gembloux-Ernage qui est la station la plus proche du champ expérimental (MeteoBelgique, 2022).

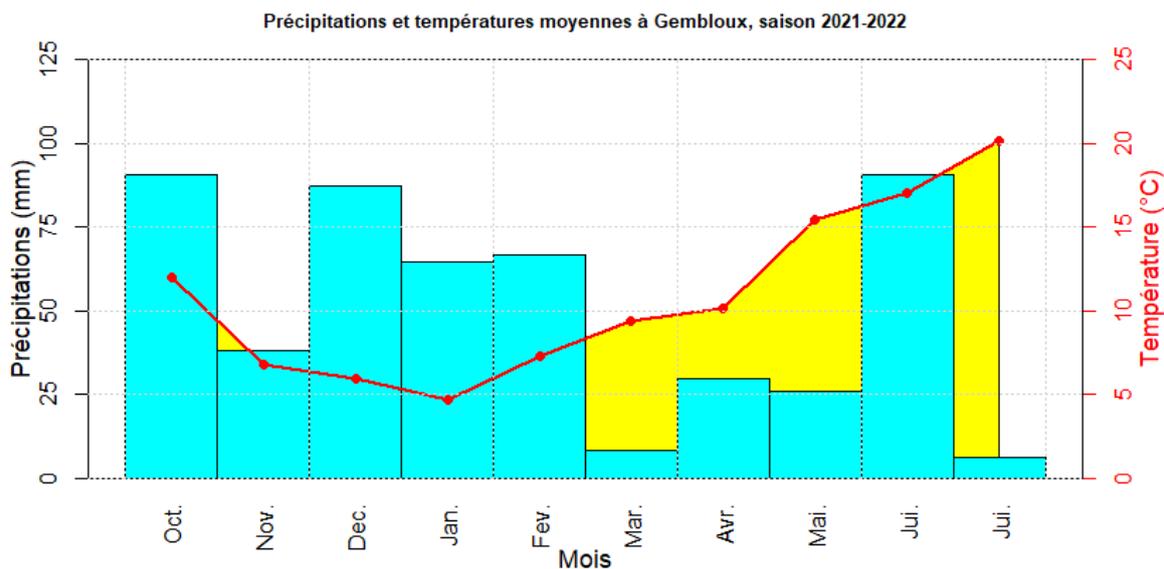


Figure 10 : Diagramme ombrothermique de la saison culturale 2021-2022

4.1.4. Facteurs étudiés

a. Le choix variétal

Le premier objectif de l'expérimentation est de suivre la dynamique des maladies fongiques dans des variétés cultivées en pure et en mélange.

Le premier facteur étudié est le choix variétal. Deux mélanges contenant chacun six variétés, ainsi que ces douze variétés en culture monovariétale ont été mis en place dans l'essai. Ces variétés ont été choisies parmi les variétés conseillées dans le Livre Blanc Céréales de septembre 2021 (Livre Blanc Céréales, 2021). Elles ont été sélectionnées en fonction de leur sensibilité ou leur résistance aux différentes maladies fongiques. Le premier mélange est un mélange Production (P) dont l'objectif est de produire un haut rendement en grain. Ce mélange est composé de **Avignon**, **Chevignon**, **Johnson**, **KWS Dorset**, **KWS Talent** et **Porthus** dont les sensibilités aux maladies fongiques et leurs données technologiques sont reprises dans le tableau 2. Les cotes attribuées pour chaque maladie vont de 1 pour une sensibilité variétale totale jusqu'à 9 pour une résistance totale. Ces variétés sont destinées à un usage fourrager pour certaines et à une panification belge commune pour les autres (Livre Blanc Céréales, 2021). Le second est un mélange Qualité (Q) dont l'objectif est de fournir un grain riche en protéines. **Anapolis**, **Chevignon**, **LG Keramik**, **Mentor**, **Positiv** et **RGT Reform** composent ce mélange. Leurs sensibilités aux maladies fongiques et leurs données technologiques sont reprises dans le tableau 3. Les variétés composant le mélange appartiennent aux catégories d'aptitude à la panification commune ou supérieure belge.

Tableau 2 : Comportement des variétés qui composent le mélange Production face aux maladies du feuillage. Ce tableau reprend également les paramètres de qualité pour ces 6 variétés.

Maladie / Paramètre de qualité	Rouille brune	Septoriose	Rouille Jaune	Teneur en protéine (%)	Zeleny (ml)	Hagberg (secondes)
Variété						
Avignon	6,1	5,8	8,9	11,8	36	304
Chevignon	6,9	6,5	8,8	11,6	33	310
Johnson	6,6	6,4	8,8	11,4	29	258
KWS Dorset	6,9	5,9	7,1	11,2	26	315
KWS Talent	7,3	6,3	6,9	11,4	34	306
Porthus	5,7	6,2	8,5	11,7	30	291

Tableau 3 : Comportement des variétés qui composent le mélange Qualité face aux maladies du feuillage. Ce tableau reprend également les paramètres de qualité pour ces 6 variétés.

Maladie / Paramètre de qualité	Rouille brune	Septoriose	Rouille jaune	Teneur en protéine	Zeleny (ml)	Hagberg (secondes)
Variété						
Anapolis	4,9	5,3	8,9	12,2	36	238
Chevignon	6,9	6,5	8,8	11,6	33	310
LG Keramik	7,8	6,9	8,8	11,9	45	253
Mentor	6,4	6,0	8,5	11,6	42	314
Positiv	8,1	6,1	9,0	11,2	28	338
RGT Reform	7,7	6,0	7,2	11,9	44	355

b. La protection fongicide

Le second objectif de l'expérimentation est d'observer l'effet des traitements fongicides sur la pression fongique dans les variétés et dans les mélanges.

Le second facteur étudié est le traitement fongique avec trois modalités : pas de protection fongicide (0F), une protection fongicide partielle (1F) et une protection fongicide complète (2F). Pour la modalité avec protection fongicide complète (2F), le premier traitement a été réalisé au stade 2^{ème} nœud (BBCH 32). Le deuxième traitement a été effectué à l'épiaison (BBCH 55). Le détail des fongicides ainsi que leur mode d'action sont repris en annexe 1.

4.1.5. Dispositif expérimental

L'essai suit un design expérimental en blocs aléatoires complets à deux facteurs fixes : le choix variétal et la protection fongicide. Chaque modalité est répétée dans quatre blocs. Chaque variété ou mélange de variétés est implanté avec les trois modalités de protection fongicide dans l'essai. Au total, ce dernier comporte donc 42 objets (Tableau 4). Le plan de l'essai figure dans l'annexe 2.

Tableau 4 : Objets repris dans l'essai sur les mélanges variétaux menés à Lonzée en 2021-2022

Protection fongicide Variété	Pas de protection fongicide (0F)	Protection fongicide partielle (1F)	Protection fongicide complète (2F)
KWS Dorset	1	2	3
KWS Talent	4	5	6
Porthus	7	8	9
Avignon	10	11	12
Mentor	13	14	15
RGT Reform	16	17	18
Anapolis	19	20	21
Johnson	22	23	24
LG Keramik	25	26	27
Positiv	28	29	30
Chevignon 1	31	32	33
Chevignon 2	34	35	36
Mélange production	37	38	39
Mélange qualité	40	41	42

4.1.6. Observations des maladies

a. Prélèvements

Les prélèvements des maîtres brins pour le suivi de la dynamique des maladies fongiques ont été réalisés toutes les semaines. Le suivi de la pression fongique se fait dans les bordures des parcelles non traitées. La liste des DOY (Day Of Year) où les cotations ont été réalisées est illustrée sur la ligne du temps correspondant à la modalité non traitée (0F) dans la figure 12.

Les prélèvements des maîtres brins pour l'étude de l'influence des traitements ont été réalisés deux semaines plus ou moins après chaque application de fongicides dans les bordures des parcelles traitées. Une cotation a également été réalisée 4 semaines après le dernier traitement. Les cotations ont donc été réalisées pour l'ensemble des modalités de traitements le 16 mai (DOY 136), le 30 mai (DOY 150), le 13 juin (DOY 164) et le 27 juin (DOY 178) (Figure 11) à l'exception du DOY 136 où la modalité de traitement 1F n'a pas été cotée.

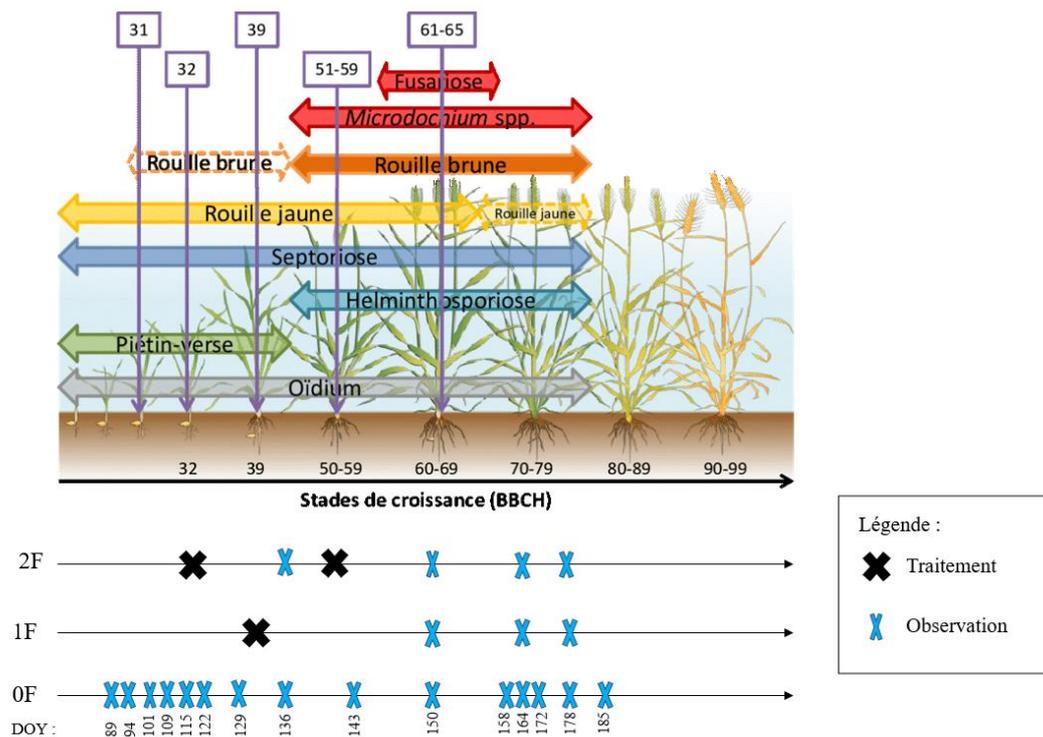


Figure 11 : Ligne du temps avec la période d'observation des principales maladies en froment d'hiver. Le positionnement des traitements fongicides et des observations réalisés durant la saison culturale sont également repris au bas de cette figure (Duvivier et al., 2018).

Dans chaque bloc, 5 maîtres brins ont été prélevés par parcelle dans les bordures pour ne pas impacter son centre servant à la mesure du rendement (Figure 12). Deux plantes sont prélevées dans une bordure et trois plantes dans l'autre bordure de la parcelle. L'essai comportant 4 blocs, 20 maîtres brins ont été cotés pour chaque variété chaque semaine. Pour le mélange, en vue d'avoir un échantillon plus représentatif de la réalité, 10 plantes ont été prélevées par bloc. 40 maîtres brins ont donc été cotés pour le mélange.

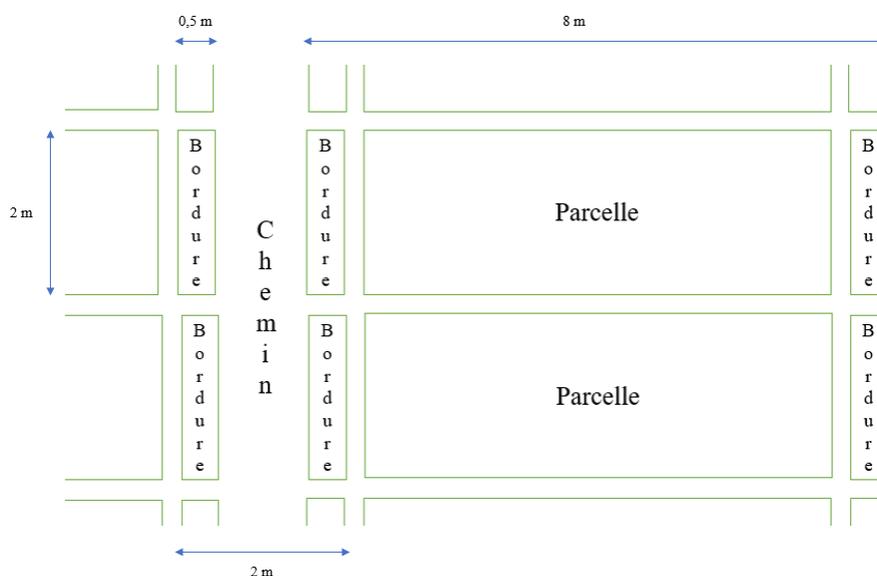


Figure 12 : Schéma parcellaire

b. Détermination du stade

Les stades ont été déterminés selon l'échelle BBCH des céréales (Annexe 3). Les observations ont commencé lorsque certaines variétés ont atteint le stade de redressement (BBCH 30). Elles se sont poursuivies jusqu'au stade de début de maturation des graines (BBCH 83). Avant le stade de redressement, ce sont majoritairement les feuilles basales vouées à disparaître qui sont touchées par les maladies fongiques. Ces feuilles n'ont pas d'impact sur les rendements. Pour chaque maître brin, le stade est déterminé.

c. Cotation des feuilles

La première étape consiste à décortiquer des maîtres brins pour déterminer à quelle feuille définitive correspond la dernière feuille pointante (Figure 13). Avant le stade dernière feuille pointante (BBCH 37), la dernière feuille visible ne correspond pas à la dernière feuille définitive. Il est nécessaire de déterminer le nombre de feuilles qui sont encore dans la gaine afin d'identifier à quelles feuilles définitives correspondent les feuilles déployées.



Figure 13 : Maître brin décortiqué (photo personnelle)

Chaque feuille du maître brin reçoit une cote indépendante pour les trois maladies observées à savoir la septoriose, la rouille jaune et la rouille brune. Elles sont cotées de la dernière feuille pointante à la feuille sénescente. Les cotations ont été réalisées à l'aide de l'échelle de cotation de Koyshtbayev et Muminjanov (2016). Une cote de 0 à 100% est attribuée en fonction de la gravité de la maladie. Pour la septoriose, l'ensemble de la superficie de la tache brunâtre y compris la zone dépourvue de pycnides est cotée selon la figure 14. Pour les rouilles, la superficie occupée par les pustules de rouilles est cotée selon la figure 15 et avec l'échelle B. Les cotes sont attribuées à l'œil nu et lorsque nécessaire avec l'usage d'un binoculaire.

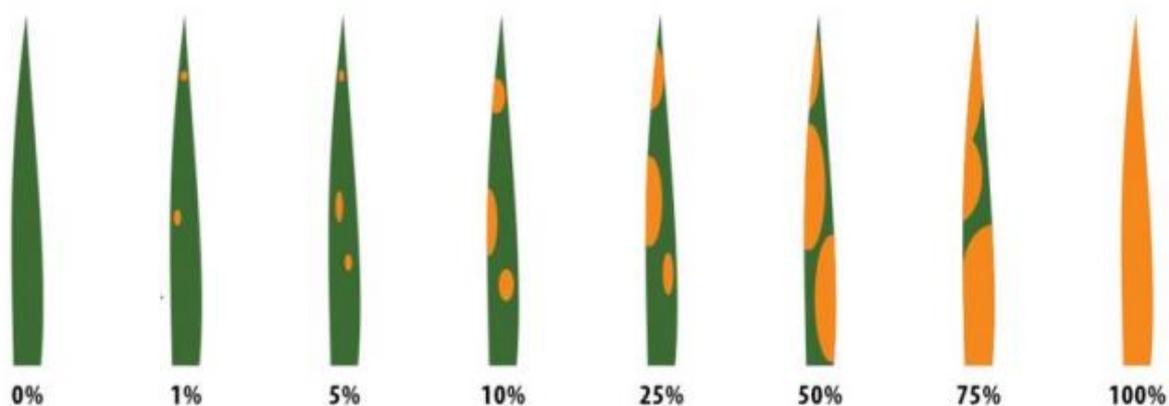


Figure 14 : Echelle de cotation pour la septoriose (Koyshibayev et Muminjanov, 2016)

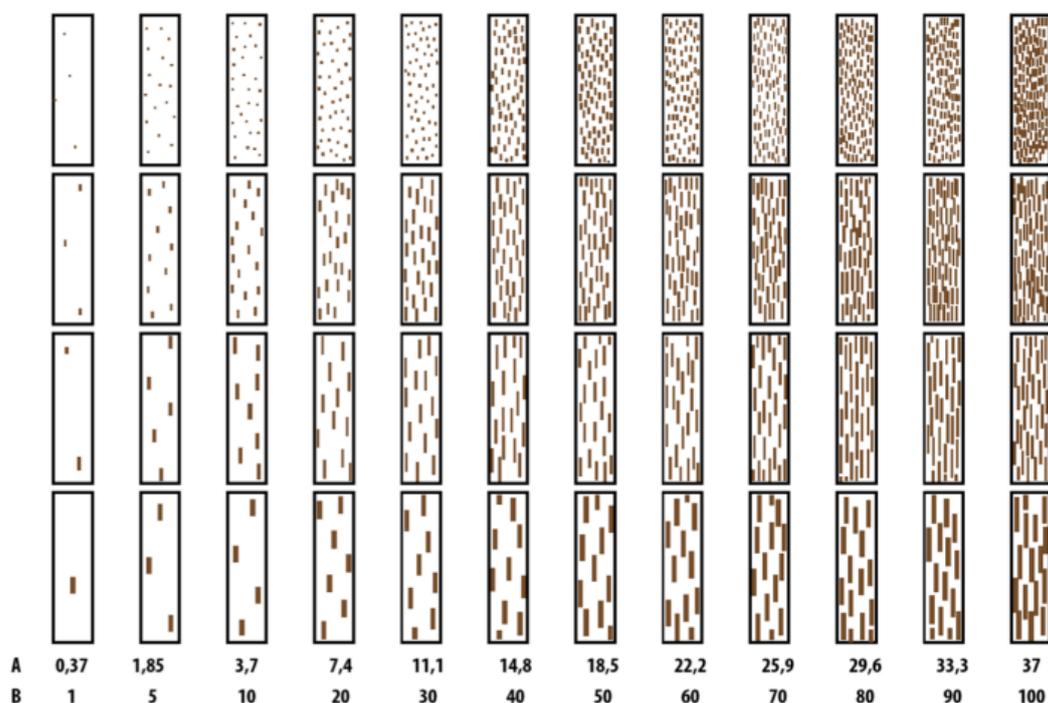


Figure 15 : Echelle de cotation pour les rouilles (Koyshibayev et Muminjanov, 2016)

L'ensemble des données sont encodées dans un fichier Excel afin de déterminer la sévérité des différentes maladies foliaires observées.

4.2. Analyse interannuelle

4.2.1. Rendement sur plusieurs années

Les rendements de cette année sont analysés ainsi que les rendements des essais des quatre années précédentes. L'analyse a donc été faite pour chaque année de 2018 à 2022. Chaque année, un mélange production (P) et un mélange qualité (Q) et les variétés associées ont été mis en essai à l'exception de l'année 2018 où seul un mélange qualité a été mis en place. Pour respecter des logiques culturales de

rotations, l'essai n'a pas pris place chaque année sur la même parcelle. Par contre, l'essai a lieu chaque année à Lonzée dans des parcelles avec des profils similaires de type limoneux. L'itinéraire phytotechnique mis en place chaque année est similaire à celui suivi en 2022 (cfr 4.1.2.).

L'évolution des recherches variétales étant constante, les mélanges ont évolué et ne sont pas toujours composés des mêmes variétés chaque année. La composition des mélanges production et qualité en fonction de l'année est reprise dans le tableau 5.

Tableau 5 : Liste des variétés composant les mélanges production (P) et qualité (Q) ces 5 dernières années (2018 à 2022)

Année	2018	2019	2020	2021	2022
Variété					
Alcides		Q			
Albert	Q				
Ambroise		Q			
Anapolis	Q		Q	Q	Q
Andromède CS			P		
Avignon				P	P
Bergamo		P			
Chevignon		P	Q/P	Q/P	Q/P
Edgar	Q				
Gleam		P			
Johnson		P	P	P	P
KWS Dorset		P	P	P	P
KWS Smart		Q/P			
KWS Talent		Q	P	P	P
LG Keramik				Q	Q
Mentor	Q	Q	Q	Q	Q
Porthus			P	P	P
Positiv				Q	Q
Reflexion	Q				
RGT Reform	Q		Q	Q	Q
Safari		Q			
Sophie CS			Q		
Triumph			Q		

La composition variétale du mélange production et du mélange qualité a été choisie chaque année pour répondre respectivement à l'objectif spécifique de chaque mélange. Les profils de sensibilité aux maladies sont relativement similaires chaque année dans chaque mélange. La sensibilité de chaque variété a été reprise dans le tableau 6.

Tableau 6 : Comportement face aux maladies du feuillage des différentes variétés testées dans l'essai sur les mélanges variétaux entre 2018 et 2022. Cote=1 variété très sensible, cote=9 variété résistante

Maladie	Rouille Brune	Septoriose	Rouille Jaune
Variété			
Alcides	7,6	7,0	8,8
Albert	6,2	7,1	8,7
Ambroise	8,4	6,6	6,8
Anapolis	4,9	5,3	8,9
Andromède CS	6,4	6,3	9,0
Avignon	6,1	5,8	8,9
Bergamo	6,5	5,4	8,0
Chevignon	6,9	6,5	8,8
Edgar	6,7	6,7	8,9
Gleam	5,8	5,6	7,7
Johnson	6,6	6,4	8,8
KWS Dorset	6,9	5,9	7,1
KWS Smart	8,0	6,1	6,9
KWS Talent	7,3	6,3	6,9
LG Keramik	7,8	6,9	8,8
Mentor	6,4	6,0	8,5
Porthus	5,7	6,2	8,5
Positiv	8,1	6,1	9,0
Reflexion	8,3	6,3	4,7
RGT Reform	7,7	6,0	7,2
Safari	8,6	6,5	7,9
Sophie CS	6,5	5,8	8,9
Triumph	8,0	5,8	8,9

Les rendements agronomiques en kg/ha obtenus ont été encodés dans un fichier Excel afin d'identifier les différences de rendement selon les différentes modalités. De plus, ces rendements agronomiques ont été convertis en rendement économique afin de déterminer les modalités les plus rentables. Les rendements agronomiques ont été convertis en rendement économique selon la formule suivante (Wiik et Rosenqvist, 2009 ; Wegulo et al., 2011) :

$$RE = R_i P - (F_C + A_C)$$

R signifie le rendement agronomique, i la variété, P le prix du froment d'hiver en €/kg, F_C le coût du fongicide en €/ha et A_C le coût d'application du fongicide en €/ha.

Les rendements économiques ont été calculés pour des froments valant 150 et 200 €/T. Pour la modalité 0F, $(F_C + A_C) = 0€$, pour la modalité 1F, $(F_C + A_C) = 105€$ et pour la modalité 2F $(F_C + A_C) = 170€$ (Mahieu, 2020).

4.3. Analyse des données

4.3.1. Analyse intra-annuelle

a. Suivi des maladies

La sévérité moyenne attribuée à une variété pour chaque maladie est basée sur la moyenne des cotes attribuées à chaque étage foliaire pour chaque plante de cette variété. Une ANOVA à un facteur fixe, la variété, est réalisée sur la sévérité moyenne. Les conditions d'application sont contrôlées avec le test de Shapiro pour vérifier la normalité de la population et le test de Bartlett pour tester l'homogénéité des variances. La normalité de la population n'étant pas vérifiée, une transformation angulaire des variables a été nécessaire. Cette transformation a été choisie car les variables sont exprimées en pourcent. La formule utilisée pour cette transformation est la suivante :

$$X' = 2 \operatorname{Arcsin} \sqrt{X}$$

X est la sévérité moyenne exprimée en valeur comprise entre 0 et 1 (Jerbi, 2016). Chaque pourcentage a donc été divisé par cent. Le test de Shapiro et le test de Bartlett ont à nouveau été réalisés.

Pour chaque ANOVA, un test de Student Newman et Keuls (SNK) a été effectué afin d'identifier les groupes de variétés réagissant de la même manière à la pression des maladies. Les variétés partageant une lettre commune ne présentent pas de différences statistiquement significatives. La lettre « a » correspond au groupe dont la sévérité moyenne est la plus élevée.

Afin de suivre la dynamique de chaque maladie, un graphique de l'évolution des sévérités moyennes pour chaque variété a été réalisé en fonction du « Day of year » (DOY) signifiant le jour de l'année. Le jour 1 correspond au 1^{er} janvier. De plus, afin de suivre l'évolution sur chaque étage foliaire, des graphiques de la sévérité moyenne pour chaque feuille et pour chaque variété en fonction du DOY ont été effectués.

b. Influence des protections fongiques

Afin d'étudier l'influence des traitements de fongicides pour chaque variété, les sévérités moyennes pour chaque traitement ont été calculées pour 4 jours donnés (DOY 136, 150, 164 et 178). Une ANOVA à deux facteurs fixes, la variété et le traitement, a été effectuée sur les sévérités moyennes. Les conditions d'application ont été testées avec le test de Shapiro et le test de Bartlett. La normalité de la population n'a pas été vérifiée. Les variables ont également été transformées angulairement (Jerbi, 2016).

En raison de la forte interaction entre les deux facteurs fixes, des SNK ont été réalisés sur les traitements pour chaque variété prise individuellement. De plus, pour pouvoir comparer les variétés entre elles, des ANOVA à un facteur fixe, l'objet, ont été réalisées sur les sévérités moyennes transformées angulairement ainsi que des tests SNK pour identifier les groupes touchés similairement par la pression des maladies.

Pour permettre une meilleure visualisation, des boxplots des sévérités moyennes des objets ont été réalisés pour chaque maladie et chaque DOY. Les résultats des tests SNK respectifs ont été ajoutés à chaque boxplot.

4.3.2. Analyse interannuelle

Des ANOVA à deux facteurs fixes, la variété et le traitement, ont été effectuées sur le rendement agronomique pour chaque année et pour chaque mélange. Au préalable, les conditions d'applications ont été vérifiées avec le test de Shapiro et le test de Bartlett.

En raison de la forte interaction entre les deux facteurs fixes, des ANOVA à un facteur fixe, l'objet, ont été réalisées sur le rendement agronomique pour chaque année et pour chaque mélange. Des SNK ont été effectués afin d'identifier les groupes ayant des rendements similaires. La lettre « a » correspond au groupe ayant les rendements les plus élevés.

Pour permettre une meilleure visualisation, des boxplots des rendements agronomiques des objets ont été réalisés pour chaque année et chaque mélange. Les résultats des tests SNK respectifs ont été ajoutés à chaque boxplot.

De plus, le gain de rendement (GR) lié au mélange a été étudiée. Le gain de rendement a été calculé pour chaque année et chaque mélange selon la formule suivant (Kiaer et al., 2009 ; Reiss et Drinkwater, 2018) :

$$GR = \frac{R_{Mélange} - \sum_i^k p_i R_i}{\sum_i^k p_i R_i}$$

R signifie le rendement agronomique, k le nombre de variétés que compose le mélange (=6), i la variété et p la proportion de la variété dans le mélange.

Tout comme décrit ci-dessus pour les rendements agronomiques, les mêmes étapes ont été réalisées pour les rendements économiques pour des froments d'hiver valant 150€/T et 200€/T.

5. Résultat

5.1. Analyse intra-annuelle

5.1.1. Dynamique des maladies fongiques

L'évolution de la sévérité de chaque maladie sur les six variétés cultivées en pure et en mélange va être représentée avec un graphique et complétée par les résultats des tests SNK pour chaque DOY. Une comparaison par étage foliaire va être faite.

a. Septoriose

- Comparaison générale

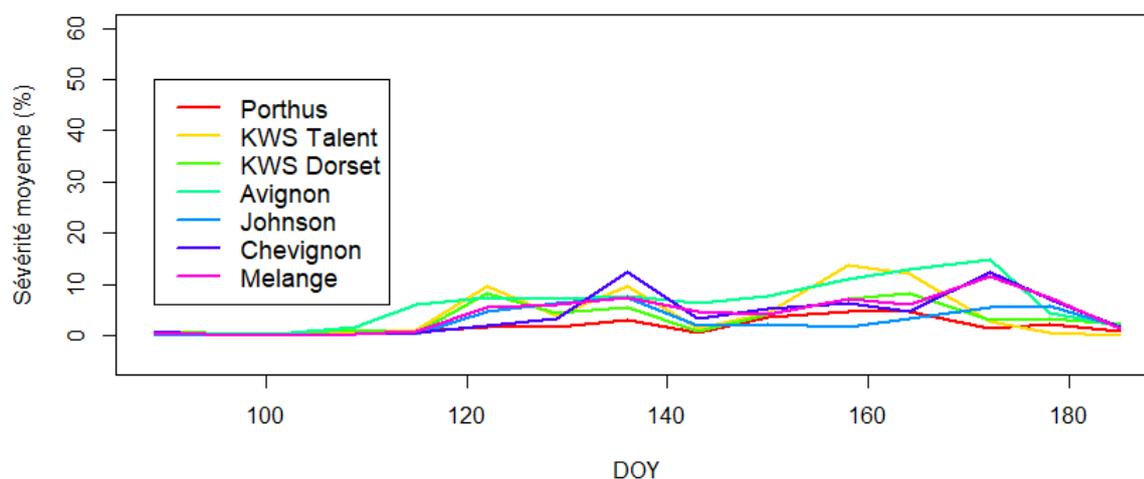


Figure 16 : Evolution de la sévérité moyenne de la septoriose en fonction des jours de l'année 2022 sur le mélange et les 6 variétés, en l'absence de traitement fongicide (0F)

Tableau 7 : Comparaison de la sévérité moyenne de la septoriose sur le mélange et sur les 6 variétés en l'absence de protection fongicide durant la saison culturale. Les modalités présentant au moins une lettre commune ne sont pas significativement différentes (test de Student-Newman-Keuls). La lettre « a » correspond au niveau de sévérité le plus élevé.

DOY	89	94	101	109	115	122	129	136	143	150	158	164	172	178	185
Variété															
Porthus	ab	b	a	b	b	b	c	c	d	b	c	bc	c	b	b
KWS Talent	b	b	ab	b	b	a	b	ab	bcd	ab	a	a	bc	c	c
KWS Dorset	ab	a	a	a	b	a	ab	b	cd	ab	bc	ab	bc	ab	a
Avignon	ab	b	ab	a	a	a	a	ab	a	a	ab	a	a	ab	a
Johnson	ab	b	b	b	b	ab	ab	b	bcd	b	d	c	bc	a	a
Chevignon	a	b	b	b	b	b	b	ab	bc	ab	c	bc	a	a	a
Mélange	ab	b	ab	b	b	ab	ab	b	ab	ab	c	bc	a	a	a

De la fin du tallage au début du redressement (DOY 89 à 101), toutes les variétés et le mélange de variétés sont très faiblement touchés par la septoriose. Durant cette période, la sévérité moyenne reste inférieure à 1% sur l'ensemble des modalités observées.

Le 19 avril (DOY 109), Avignon et KWS Dorset sont les variétés les plus impactées par la septoriose, avec une sévérité moyenne supérieure à 1%. Ces deux variétés sont significativement différentes des autres variétés qui affichent une sévérité moyenne inférieure à 1%.

Le 25 avril (DOY 115), Avignon se démarque négativement avec une sévérité moyenne qui dépasse les 5% tandis que la septoriose reste constante sur les autres variétés.

Début mai (DOY 122), KWS Talent, KWS Dorset et Avignon ont une sévérité moyenne se rapprochant des 10%. Johnson et le mélange variétal sont touchés à hauteur de 5% tandis que Chevignon et Porthus sont moins impactés, avec une sévérité moyenne inférieure à 2%.

Le 9 mai (DOY 129), seul Porthus se démarque par rapport aux autres variétés en présentant une sévérité moyenne inférieure à 2%.

Le 16 mai (DOY 136), Chevignon est la variété la plus touchée avec une sévérité de 12% tandis que Porthus reste plus faiblement touché avec une sévérité moyenne de 3%.

Le 23 mai (DOY 143), Avignon dépasse les 5% tandis que KWS Dorset et Porthus redescendent en dessous du pourcent.

Le 30 mai (DOY 150), Avignon reste la variété la plus touchée. Le 7 juin (DOY 158), elle est rejointe par KWS Talent. Ces deux variétés plus fortement impactées par la septoriose appartiennent au même groupe statistique. Le 13 juin (DOY 164), la tendance est similaire à celle observée au cours de la semaine précédente.

Le 21 juin (DOY 172), Avignon, Chevignon et le mélange sont les modalités plus touchées avec une sévérité moyenne équivalente à 15 % pour Avignon et supérieure à 10% pour Chevignon et le mélange.

Le 27 juin (DOY 178) et le 4 juillet (DOY 185), KWS Talent est la variété la moins touchée avec une sévérité moyenne inférieure à 1%, elle est suivie par Porthus.

• Comparaison par étages foliaires

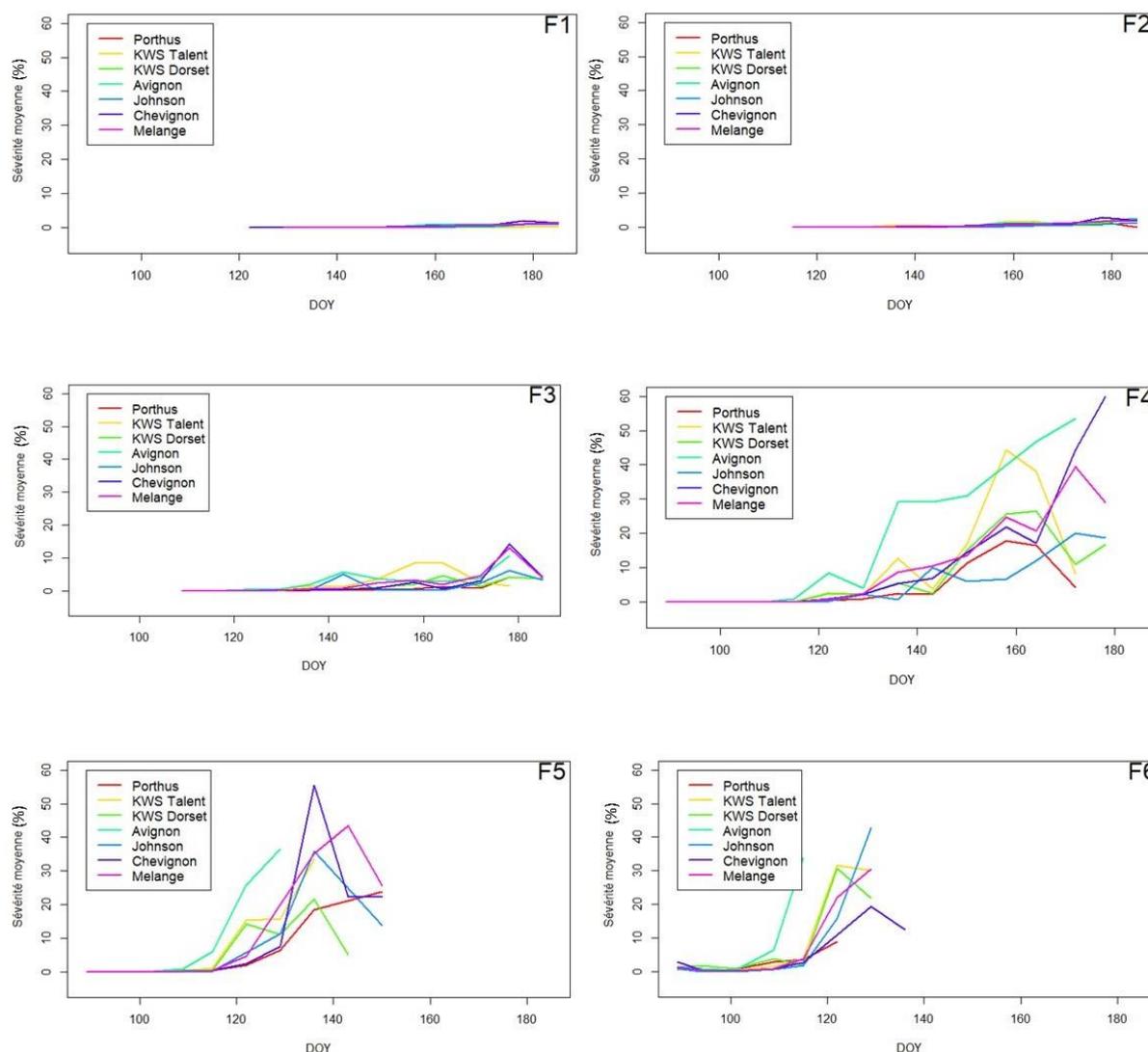


Figure 17 : Evolution de la sévérité moyenne de la septoriose sur les 6 variétés et le mélange, en absence de traitement fongicide (OF), sur chaque étage foliaire. L'inscription en haut à droite des graphiques correspond à l'étage foliaire

De la septoriose est observée dès le 25 avril (DOY 115) sur toutes les modalités au niveau de la sixième feuille (F6). Des symptômes de la maladie sont également visibles sur la cinquième feuille (F5) de la variété Avignon. Il faut attendre le 2 mai (DOY 122) pour que la totalité des variétés étudiées présentent des lésions provoquées par la septoriose sur leur cinquième feuille (F5). Pour ces deux feuilles, Avignon est la variété la plus touchée et Porthus le moins. Le mélange suit relativement la moyenne des variétés qui le composent.

Pour la variété Avignon, la septoriose parvient à atteindre la quatrième feuille (F4) dès le 2 mai (DOY 122). Pour les autres variétés et le mélange, cet étage foliaire est touché par la maladie seulement à partir du 16 mai (DOY 136). Pour la F4, Avignon reste la variété la plus touchée durant l'ensemble de la saison, sauf le 7 juin (DOY 158) où KWS Talent la dépasse. À l'inverse, Porthus et Johnson sont les variétés qui sont le moins impactées par la septoriose. Le mélange suit la moyenne des variétés qui le

composent. Par contre, le 27 juin (DOY 178), le mélange devient plus touché que les autres variétés à l'exception d'Avignon et Chevignon qui sont plus fortement touchés par la maladie.

La troisième feuille (F3) n'est pas ou pratiquement pas touchée avant le 23 mai (DOY 143). Jusqu'au 27 juin (DOY 178), la sévérité observée au niveau de cet étage foliaire ne dépasse pas les 10% chez la plupart des variétés étudiées. À cette date, Avignon, Chevignon et le mélange sont les seules modalités qui présentent une sévérité moyenne sur la troisième feuille supérieure à 10%.

La première (F1) et la deuxième feuille (F2) n'ont pas ou pratiquement pas été touchées par la septoriose pour l'ensemble des variétés et mélange de variétés.

b. Rouille jaune

- Comparaison générale

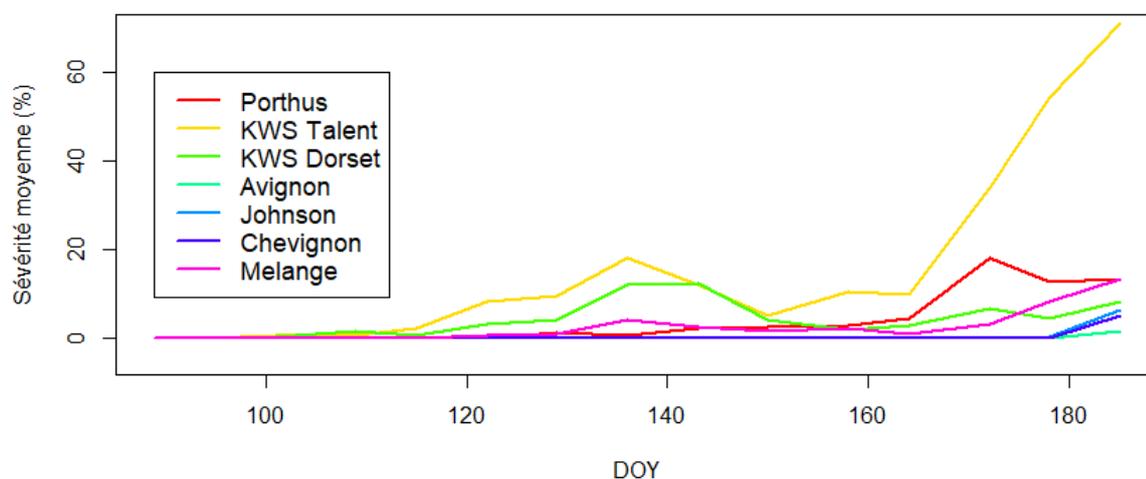


Figure 18 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille jaune en fonction des jours de l'année 2022 sur le mélange et les 6 variétés, en l'absence de traitement fongicide (0F)

Tableau 8 : Comparaison de la sévérité moyenne de la rouille jaune sur le mélange et sur les 6 variétés en l'absence de protection fongicide (0F), durant la saison culturale. Les modalités présentant au moins une lettre commune ne sont pas significativement différentes (test de Student-Newman-Keuls). La lettre « a » correspond au niveau de sévérité le plus élevé.

DOY	89	94	101	109	115	122	129	136	143	150	158	164	172	178	185
Variété															
Porthus	NULL	a	b	b	c	c	c	d	b	b	b	b	b	b	b
KWS Talent	NULL	a	a	b	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
KWS Dorset	NULL	a	a	a	b	b	b	b	a	a	b	b	c	b	b
Avignon	NULL	a	b	b	c	c	d	d	c	c	c	c	e	c	c
Johnson	NULL	a	b	b	c	c	d	d	c	c	c	c	e	c	b
Chevignon	NULL	a	b	b	c	c	d	d	c	c	c	c	e	c	b
Mélange	NULL	a	b	b	c	c	c	c	b	b	b	c	d	b	b

La rouille jaune a fait son apparition sur les variétés sensibles le 4 avril (DOY 94) mais aucune différence significative n'a été rencontrée entre les différentes variétés et le mélange de variétés.

À partir du 11 avril (DOY 101), KWS Talent et KWS Dorset sont infectés par la rouille jaune à hauteur de moins de 1% tandis que la rouille jaune est absente sur les autres variétés. Le 19 avril (DOY 109), KWS Dorset avec une sévérité moyenne de 2 % est significativement plus touché que les autres variétés.

Les deux semaines suivantes (DOY 115 et 122), KWS Talent est la variété la plus touchée avec une sévérité moyenne passant à 2% le 25 avril (DOY 115) pour monter jusqu'à une sévérité de 8% le 2 mai (DOY 122). Suivi de KWS Dorset qui passe d'une sévérité moyenne de 1 % au DOY 115 à une sévérité de 4% au DOY 122. Les autres variétés et mélange de variétés appartiennent à un même groupe statistiquement moins touché.

Le 9 mai (DOY 129), KWS Talent suivi de KWS Dorset sont toujours les variétés les plus touchées. Porthus et le mélange avec une sévérité moyenne dépassant les 1% sont plus sévèrement touchés que Johnson, Avignon et Chevignon.

Le 16 mai (DOY 136), KWS Talent monte à une sévérité moyenne de 18%, KWS Dorset à 12 %, le mélange à 4% et Porthus à 1%. Johnson, Avignon et Chevignon sont significativement moins touchés par la rouille jaune. Les deux semaines suivantes, KWS Talent et KWS Dorset forment un groupe statistiquement plus touché que Porthus et le mélange qui sont statistiquement plus touchés que Johnson, Avignon et Chevignon.

Le 7 juin (DOY 158), KWS Dorset passe dans le groupe de Porthus et du mélange. Tandis que la suivante, le 13 juin (DOY 164), le mélange rejoint le groupe statistiquement moins touché avec Johnson, Avignon et Chevignon.

Le 21 juin (DOY 172), la pression augmente. KWS Talent est touché à hauteur de 34 %, Porthus 18%, KWS Dorset 7% et le mélange 3%. Johnson, Avignon et Chevignon restent très peu touchés.

Le 27 juin (DOY 178), KWS talent monte à 54% devant le groupe statistiquement différent composé de Porthus avec 13%, le mélange avec 8% et de KWS Dorset avec 5%. Le groupe le plus faiblement touché reste le même.

Le 4 juillet (DOY 185), KWS Talent reste la variété la plus sévèrement touchée avec une moyenne de 71%. Johnson et Chevignon rejoignent le groupe intermédiaire. Seul Avignon appartient au groupe le moins touché avec une moyenne de 2%.

● Comparaison des étages foliaires

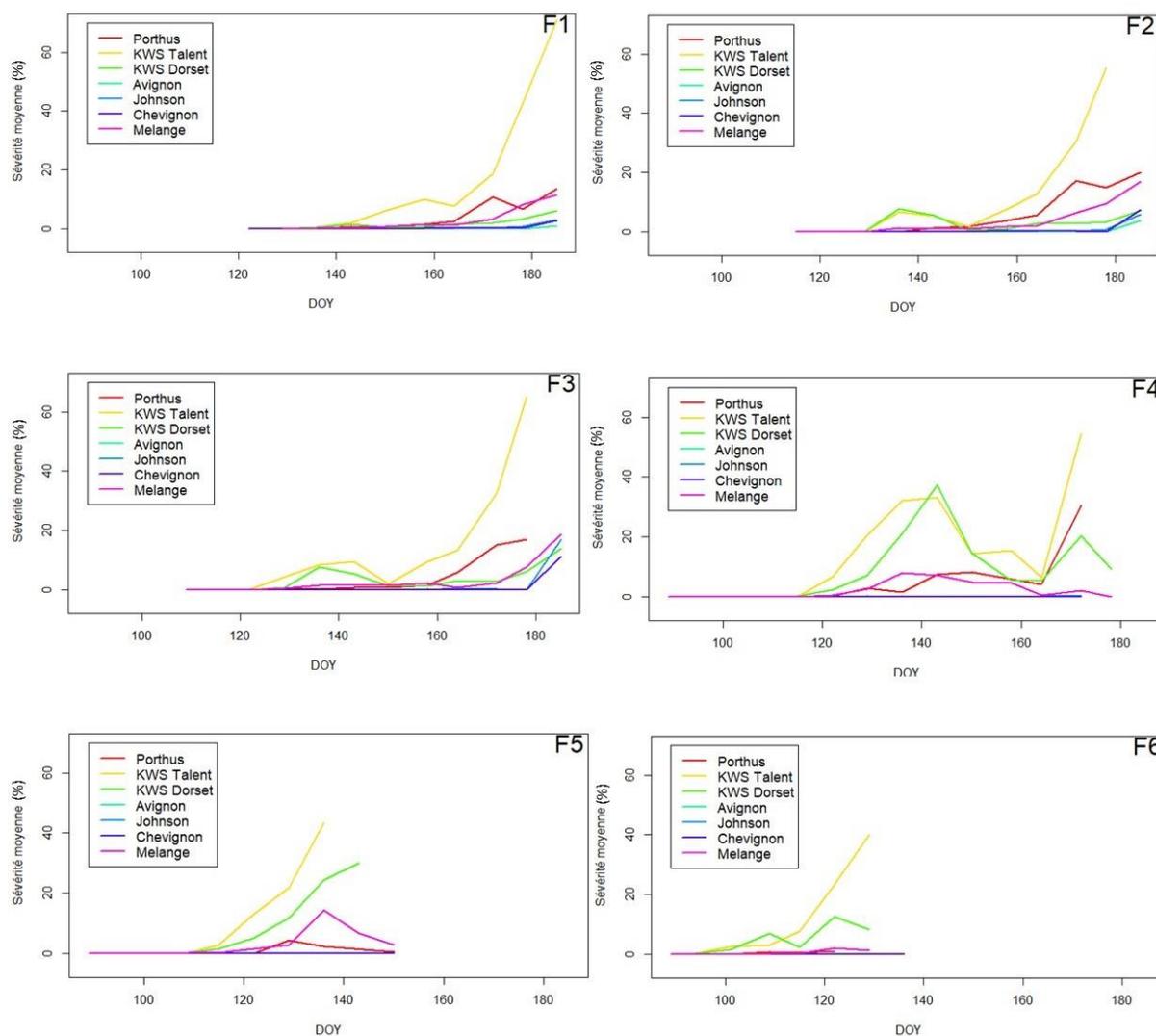


Figure 19 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille jaune sur les 6 variétés et le mélange, en absence de traitement fongique (0F), sur chaque étage foliaire. L'inscription en haut à droite des graphiques correspond à l'étage foliaire.

Les cinquièmes (F5) et sixièmes feuilles (F6) des variétés les plus sensibles ont été attaquées par la rouille jaune. KWS talent suivi par KWS Dorset ont été les plus touchés. Porthus et le mélange ont également été touchés mais dans une moindre mesure.

La quatrième feuille (F4) de ces trois variétés et de certaines plantes du mélange a aussi été touchée. Les symptômes de la rouille ont été observés à partir du 2 mai (DOY 122) sur KWS Talent et KWS Dorset et à partir de 9 mai (DOY 129) sur Porthus et le mélange. KWS Talent et KWS Dorset ont augmenté progressivement jusqu'à atteindre un pic le 23 mai (DOY 143) avec près de 40% de sévérité moyenne pour ensuite redescendre jusqu'au 13 juin (DOY 164). Porthus et le mélange sont restés sous une sévérité moyenne de 10 % jusqu'au 13 juin. Le 21 juin (DOY 172), un pic de rouille a été observé pour KWS Talent avec 46%, Porthus 28% et KWS Dorset 20% tandis que le mélange est à 3%.

La troisième feuille (F3) présente des symptômes pour certaines variétés à partir du 9 mai (DOY 129). KWS Dorset a un pic de rouille jaune le 16 mai (DOY 136) à hauteur de 8% et KWS Talent le 23 mai

(DOY 143) à hauteur de 10%. Les autres variétés restent en dessous des 3% jusqu'au 7 juin (DOY 158). La pression augmente pour KWS Talent à partir du DOY 150 pour atteindre une sévérité de 63 % au DOY 178. Pour Porthus, la sévérité augmente à partir du DOY 158 pour atteindre 17% au DOY 178. La sévérité sur KWS Dorset et le mélange augmente à partir du DOY 172 pour atteindre 13 et 18% respectivement au DOY 185. Johnson et Chevignon sont aussi atteints au DOY 185 à hauteur de 17 et 11% respectivement.

La deuxième feuille (F2) suit relativement la même tendance que la troisième feuille à l'exception que les symptômes de la rouille jaune n'apparaissent pas avant le 16 mai (DOY 136).

La première feuille (F1) est touchée à partir du 23 mai (DOY 143) pour KWS Talent et ne cesse d'augmenter pour atteindre 65% le 4 juillet (DOY 185). Porthus, le mélange et KWS Dorset sont touchés à partir du DOY 164 et la sévérité augmente pour atteindre 11, 10 et 4% au DOY 185. Les autres variétés restent en dessous de la barre des 3%.

c. Rouille brune

- Comparaison générale

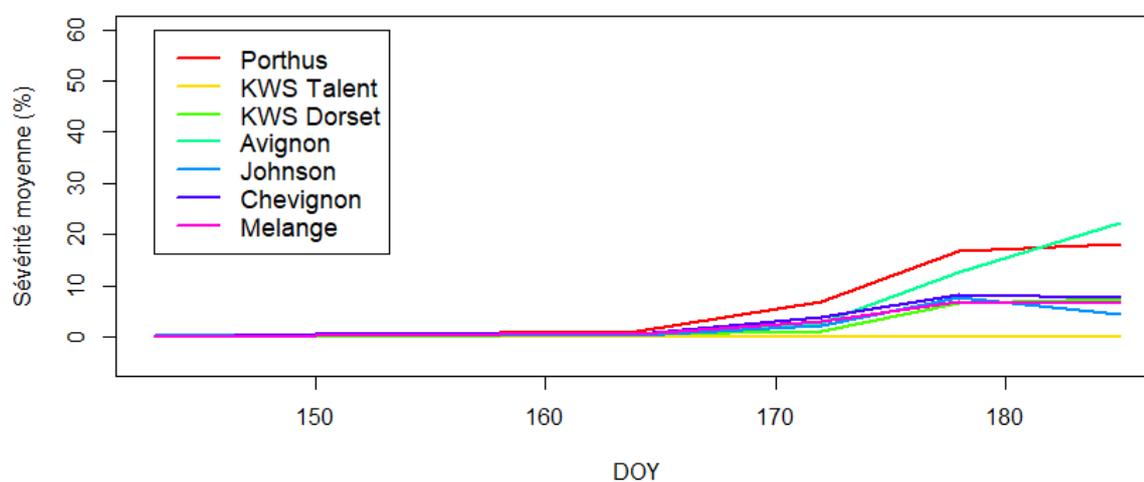


Figure 20 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille brune en fonction des jours de l'année 2022 sur le mélange et les 6 variétés, en l'absence de traitement fongicide (0F)

Tableau 9 : Comparaison de la sévérité moyenne de la rouille brune sur le mélange et sur les 6 variétés en l'absence de protection fongicide (OF) durant la saison culturale. Les modalités présentant au moins une lettre commune ne sont pas significativement différentes (test de Student-Newman-Keuls). La lettre « a » correspond au niveau de sévérité le plus élevé.

DOY	89	94	101	109	115	122	129	136	143	150	158	164	172	178	185
Variété															
Porthus	NULL	a	ab	a	a	a	a	b							
KWS Talent	NULL	a	d	c	b	d	c	d							
KWS Dorset	NULL	a	d	bc	a	c	bc	bc							
Avignon	NULL	a	abc	b	a	bc	a	a							
Johnson	NULL	a	cd	b	a	bc	b	c							
Chevignon	NULL	a	a	b	a	ab	b	bc							
Mélange	NULL	a	bcd	b	a	bc	b	bc							

La rouille brune a fait son apparition dans l'essai le 23 mai (DOY 143). L'ensemble des variétés ne se distinguent pas statistiquement. Jusqu'au 13 juin (DOY 164), toutes les variétés sont touchées à moins de 1% sauf la variété Porthus qui affiche une sévérité moyenne équivalente à 1,2%.

Le 21 juin (DOY 172), la pression augmente. Porthus a une sévérité moyenne de 6,8%, Chevignon 3,7%, le mélange, Avignon et Johnson affiche une sévérité de 2-3%, KWS Dorset 1% tandis que KWS Talent une sévérité de 0,1%.

Le 27 juin (DOY 178), Porthus voit sa sévérité moyenne augmenter à 16,7 % et Avignon à 12,8%. Chevignon, Johnson, le mélange et KWS Dorset ont une sévérité moyenne de respectivement 8,3 ; 7,7 ; 6,9 et 6,5 %. KWS Talent n'est pas touché par la maladie.

Le 4 juillet (DOY 185), Avignon dépasse Porthus avec une moyenne de 22,2 contre 18,25%. Chevignon, KWS Dorset, le mélange et Johnson ont des sévérités moyennes de respectivement 7,7 ; 7,3 ; 6,5 et 4,5 %. KWS Talent n'est pas touché par la maladie.

- Comparaison par étage foliaire

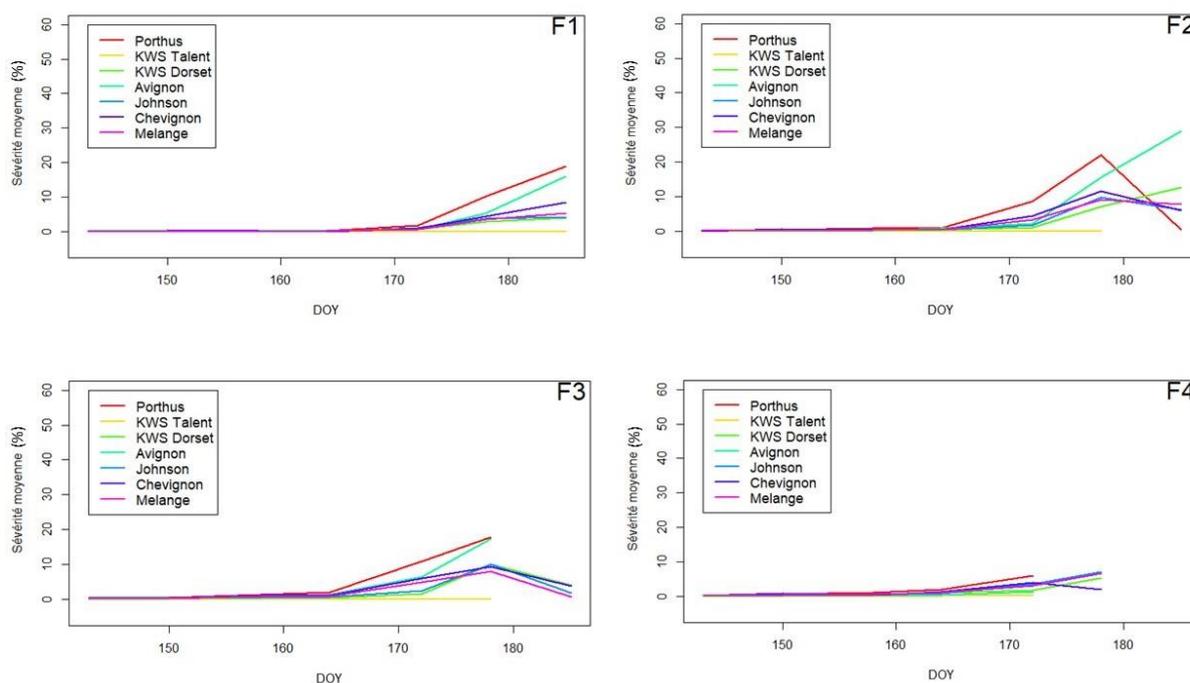


Figure 21 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille brune sur les 6 variétés et le mélange, en absence de traitement fongicide (0F), sur chaque étage foliaire. L'inscription en haut à droite des graphiques correspond à l'étage foliaire.

Les cinquième (F5) et sixièmes feuilles (F6) ne sont pas touchées par la rouille brune.

La sévérité sur la quatrième feuille (F4) ne dépasse pas les 5 % pour l'ensemble des variétés.

La troisième feuille (F3) est touchée à partir du 13 juin (DOY 164) pour atteindre une sévérité de près de 15 % pour Porthus et Avignon et près de 10% pour Johnson, KWS Dorset, Chevignon et le mélange le 27 juin (DOY 178).

La deuxième feuille (F2) suit la même tendance que la troisième sauf pour Porthus et Avignon qui atteignent une sévérité de plus de 20% fin juin.

La première feuille (F1) est touchée par la rouille brune à partir du 21 juin (DOY 172) et atteint plus de 15% pour Porthus et Avignon et moins de 10% pour Chevignon, le mélange, Johnson et KWS Dorset. KWS Talent n'est pas touché par la rouille brune.

5.1.2. Influence des traitements

Une comparaison des sévérités moyennes de chaque variété en fonction des traitements a été réalisée pour quatre jours de l'année. Dans cette section, un seul jour de l'année est décrit de manière détaillée, et ce pour chaque maladie. Les trois autres jours sont décrits brièvement et leur illustration figure dans les annexes.

a. Septoriose

Deux semaines après le premier traitement pour la modalité 2F (DOY 136), la sévérité moyenne liée à la septoriose est plus élevée dans la modalité 2F que dans la modalité 0F pour Chevignon, Johnson, KWS Talent et le mélange. Pour les autres variétés les deux modalités ne se distinguent pas. Les objets sont comparés entre eux et illustrés dans l'annexe 4.

Deux semaines après le traitement unique de la modalité 1F (DOY 150), seul pour Avignon, la modalité 2F se démarque en étant significativement plus faible que les modalités 0 et 1F. Pour les autres variétés et mélange de variétés, les 3 modalités ne sont pas statistiquement différentes. Les objets sont comparés entre eux et illustrés dans l'annexe 5.

Tableau 10 : Comparaison de la sévérité moyenne liée à la septoriose pour chaque variété en fonction de la protection fongicide au DOY 164. Les modalités présentant au moins une lettre commune ne sont pas significativement différentes (test de Student-Newman-Keuls). La lettre « a » correspond au niveau de sévérité le plus élevé.

Variété	Avignon	Chevignon	Johnson	KWS Dorset	KWS Talent	Mélange	Porthus
Protection fongicide							
0F	a	a	a	a	a	b	a
1F	b	a	a	b	b	a	a
2F	b	a	a	b	c	b	a

Le 13 juin (DOY 164), deux semaines après le dernier traitement pour la modalité 2F (Tableau 10), aucune différence significative n'apparaît entre les parcelles traitées et celles non traitées pour Chevignon, Johnson et Porthus. Pour Avignon et KWS Dorset, les modalités 2F et 1F sont moins touchées que la modalité 0F. Pour KWS Talent, la modalité 0F est plus atteinte que la modalité 1F qui est elle-même plus atteinte que la modalité 2F. Pour le mélange de variétés, la modalité 1F est plus touchée que les modalités 0F et 2F.

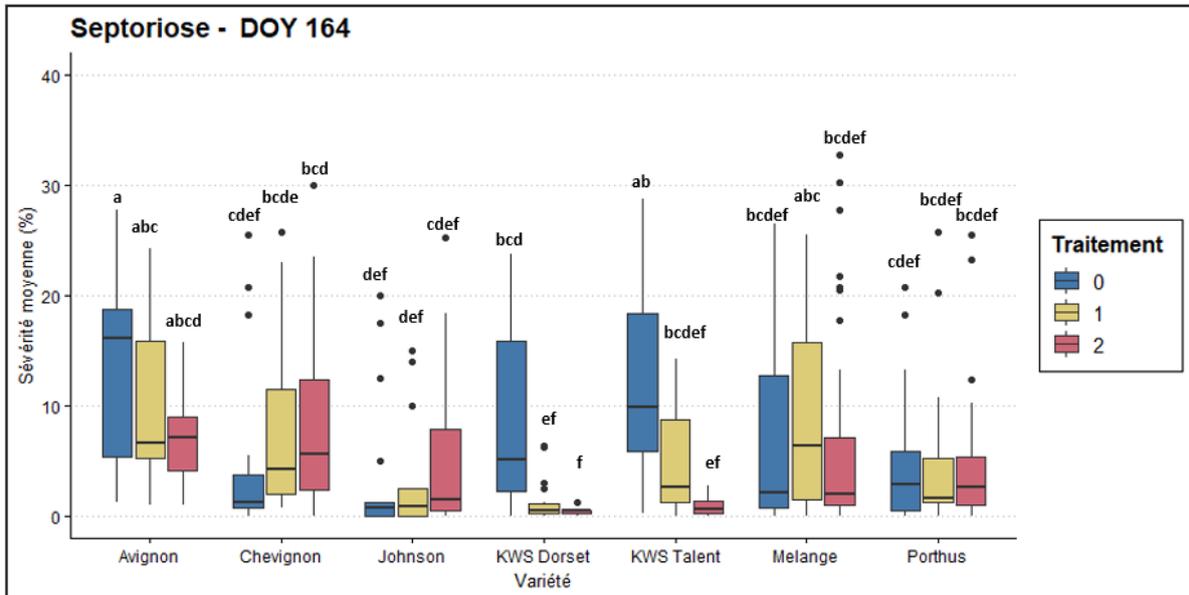


Figure 22 : Boxplot de la sévérité moyenne lié à la septoriose au DOY 164 pour les différentes modalités étudiées. Les modalités présentant au moins une lettre commune ne sont pas significativement différentes (test de Student-Newman-Keuls). La lettre « a » correspond au niveau de sévérité le plus élevé. La barre centrale dans les boxplots correspond à la médiane.

En raison de la forte interaction entre le choix variétal et le traitement, l'ensemble des objets sont comparés entre eux (Figure 22). La plupart des objets se retrouvent dans plusieurs groupes statistiques rendant peu pertinente une analyse complète des résultats. Les objets les plus touchés sont Avignon avec une sévérité moyenne de 13% pour la modalité 0F, de 10% pour la modalité 1F, KWS Talent non traité avec 12% et le mélange pour la modalité 1F avec 10%. Les objets les moins touchés sont le mélange pour la modalité 0F et 2F avec une sévérité moyenne de 6%, Johnson pour la modalité 2F ainsi que KWS Talent pour la modalité 1F, Chevignon pour la modalité 1F et Porthus pour les modalités 0F et 1F avec 5%, Johnson pour les modalités 0F et 1F avec 3% et KWS Dorset pour les modalités 1 et 2F et KWS Talent pour la modalité 2F avec 1%.

Un mois après le deuxième traitement de la modalité 2F (DOY 178), pour KWS Dorset, la modalité 2F est la plus atteinte et la modalité 1F la moins atteinte. La modalité 0F appartient au même groupe statistique à la fois de la modalité 2F et de la modalité 1F. Pour KWS Talent, la modalité 2F est la plus atteinte et la modalité 0F la moins atteinte. La modalité 1F appartient au même groupe statistique à la fois de la modalité 2F et de la modalité 0F. Pour Porthus, seule la modalité 1F est plus touchée que les modalités 0F et 2F. Les objets sont comparés entre eux et illustrés dans l'annexe 6.

b. Rouille jaune

Au DOY 136, KWS Talent, KWS Dorset et le mélange de variétés sont moins sévèrement touchés dans les parcelles traitées (2F) que dans celles non traitées. Pour les autres variétés, les deux modalités ne sont pas significativement différentes l'une de l'autre. Les objets sont comparés entre eux et illustrés dans l'annexe 7.

Au DOY 150, aucune variété ne présente des différences significatives entre ces modalités de traitements. Les objets sont comparés entre eux et illustrés dans l'annexe 8.

Tableau 11 : Comparaison de la sévérité moyenne liée à la rouille jaune pour chaque variété en fonction de la protection fongicide au DOY 164. Les modalités présentant au moins une lettre commune ne sont pas significativement différentes (test de Student-Newman-Keuls). La lettre « a » correspond au niveau de sévérité le plus élevé.

Variété	Avignon	Chevignon	Johnson	KWS Dorset	KWS Talent	Mélange	Porthus
Protection fongicide							
0F	a	a	a	b	a	a	a
1F	a	a	a	a	a	a	b
2F	a	a	a	ab	b	a	b

Au DOY 164, pour Avignon, Chevignon, Johnson et le mélange de variétés, les trois modalités de traitements ne présentent pas des sévérités moyennes différentes. En revanche, KWS Dorset est plus sévèrement touché pour sa modalité 1F et moins touché pour la modalité 0F. La modalité 2F appartient au même groupe statistique à la fois de la modalité 0F et de la modalité 1F. Pour KWS Talent, la modalité 2F est moins atteinte que les deux autres. Tandis que pour Porthus, c'est la modalité 0F qui est plus atteinte que les deux autres.

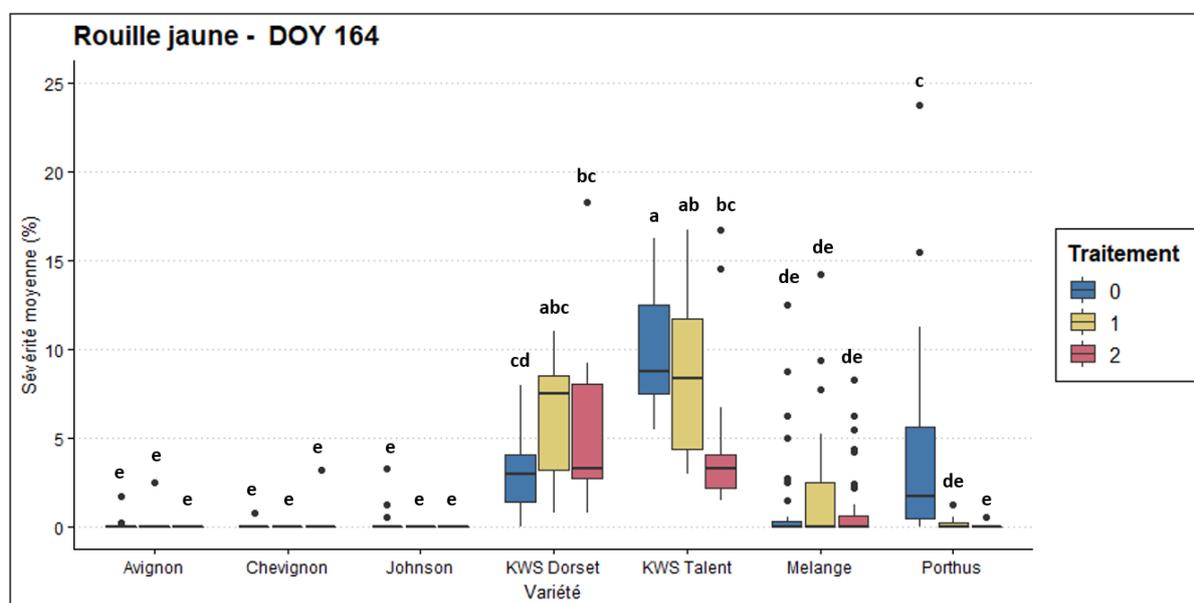


Figure 23 : Boxplot de la sévérité moyenne lié à la rouille jaune au DOY 164, pour les différentes modalités étudiées. Les modalités présentant au moins une lettre commune ne sont pas significativement différentes (test de Student-Newman-Keuls). La lettre « a » correspond au niveau de sévérité le plus élevé. La barre centrale dans les boxplots correspond à la médiane.

Lorsque l'ensemble des objets sont comparés entre eux (Figure 23), Avignon, Chevignon et Johnson pour leur 3 modalités ainsi que Porthus pour les modalités 1F et 2F sont les plus faiblement atteints avec moins de 1%. Le mélange pour ses trois modalités appartient au même groupe statistiquement moins touché pour ses 3 modalités avec une sévérité moyenne de 1%. Ensuite, le groupe moyennement touché est composé de KWS Dorset avec une sévérité de 3% pour la modalité 2F et de 5% pour la modalité 0F ainsi que de KWS talent pour la modalité 2F et de Porthus pour la modalité 0F avec 4%.

Le groupe le plus touché est composé de KWS Dorset pour la modalité 1F avec 6% et de KWS Talent pour les modalités 1F et 0F avec une sévérité moyenne de 9 et 10%.

Au DOY 178, pour KWS Dorset la modalité 2F est moins touchée que les deux autres modalités. Pour KWS Talent, la modalité 0F est plus atteinte que la modalité 1F qui est plus atteinte que la modalité 2F. Pour Porthus et le mélange, la modalité 0F est plus touchée que les deux autres modalités. Les objets sont comparés entre eux et illustrés dans l'annexe 9.

c. Rouille brune

En ce qui concerne la rouille brune, au DOY 136, elle n'était pas encore présente. Au DOY 150 et 164, aucune différence significative n'est présente entre les différents objets. La sévérité moyenne est nulle ou quasi nulle (<1%) pour l'ensemble des variétés et mélange de variétés et pour toutes les modalités de traitements. Les boxplots pour ces deux dates sont illustrés dans les annexes 10 et 11.

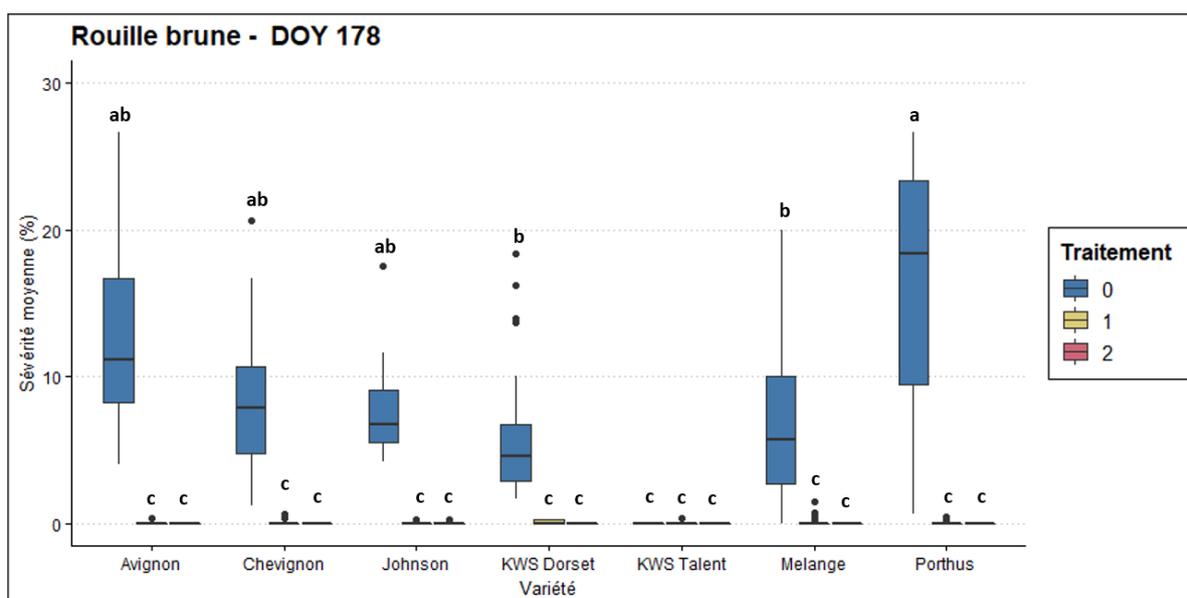


Figure 24 : Boxplot de la sévérité moyenne lié à la rouille brune au DOY 178, pour les différentes modalités étudiées. Les modalités présentant au moins une lettre commune ne sont pas significativement différentes (test de Student-Newman-Keuls). La lettre « a » correspond au niveau de sévérité le plus élevé. La barre centrale dans les boxplots correspond à la médiane.

Au DOY 178, les parcelles non traitées sont plus touchées que celles traitées qui sont atteintes à moins de 0,1% (Figure 24). Pour la modalité 0F, Porthus a une sévérité moyenne de 17%, Avignon de 13 %, Chevignon de 8%, Johnson de 8%, le mélange de 7% et KWS Dorset de 6%. Seul KWS Talent n'est pas touché pour la modalité 0F.

5.2. Analyse interannuelle

5.2.1. Rendements agronomiques

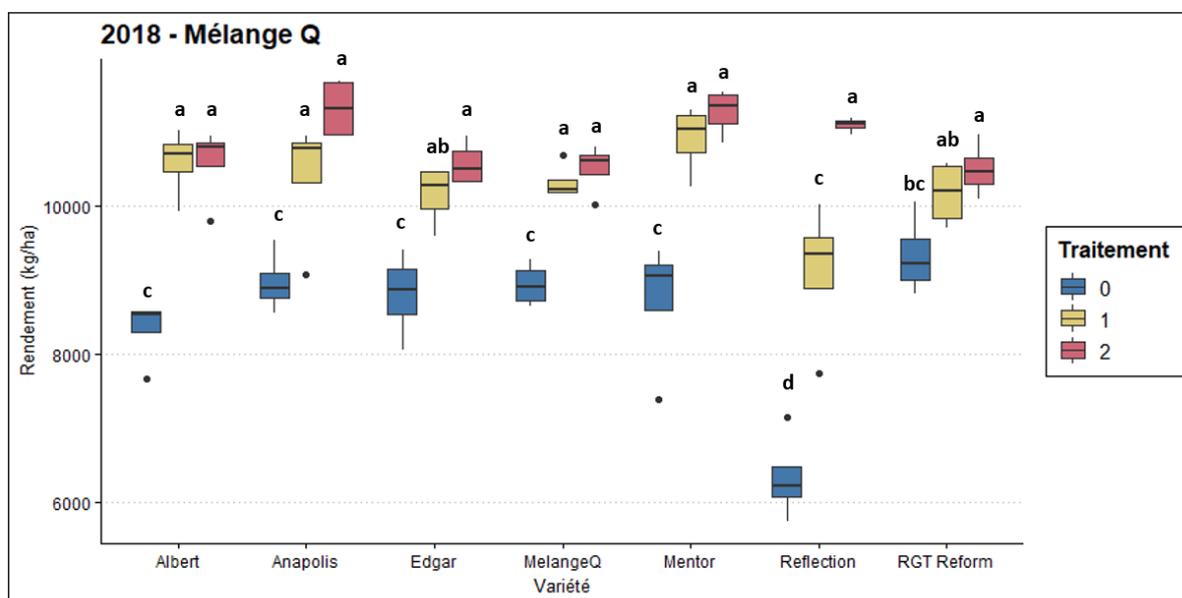


Figure 25 : Boxplot des rendements agronomiques des variétés composant le mélange qualité en 2018. Les modalités présentant au moins une lettre commune ne sont pas significativement différentes (test de Student-Newman-Keuls). La lettre « a » correspond au niveau de rendement le plus élevé. La barre centrale dans les boxplots correspond à la médiane.

En 2018 (Figure 25), les rendements des modalités 0F ont systématiquement été plus faibles que ceux des deux autres modalités de traitements. Les rendements des modalités 1F et 2F ne se distinguent pas à l'exception de la variété Réflexion pour laquelle les rendements sont significativement plus élevés pour la modalité 2F. Les rendements moyens vont de 8 300 kg/ha avec Albert sans protection jusqu'à 11 300 kg/ha avec Anapolis avec une protection fongicide totale. Seul pour Réflexion non traité, les rendements obtenus ont été inférieurs avec 6 300 kg/ha.

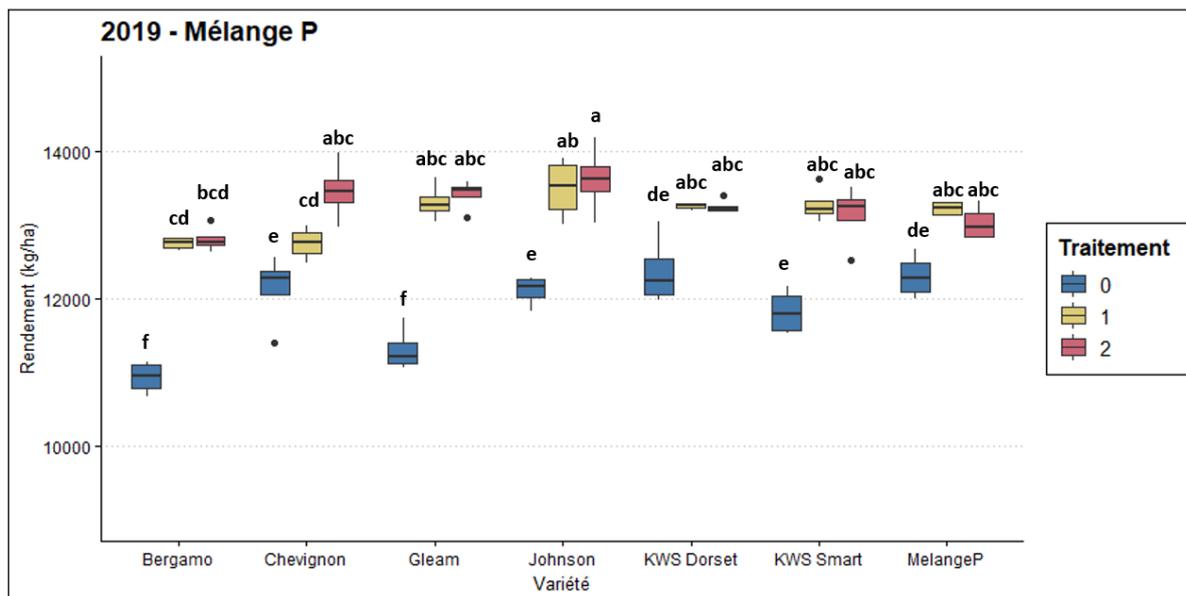


Figure 26 : Boxplot des rendements agronomiques des variétés composant le mélange production en 2019. Les modalités présentant au moins une lettre commune ne sont pas significativement différentes (test de Student-Newman-Keuls). La lettre « a » correspond au niveau de rendement le plus élevé. La barre centrale dans les boxplots correspond à la médiane.

Tout comme pour 2018, les rendements obtenus en 2019 sont systématiquement plus faibles pour la modalité 0F que pour les modalités 1F et 2F qui ne se distinguent pas significativement. Les rendements des variétés du mélange qualité vont de 11 600 avec KWS Talent non traité à 13 700 kg/ha avec les deux modalités de KWS Talent traité (Annexe 12). Seul Ambroise non traité a des rendements inférieurs de 10 200 kg/ha. De même, les rendements des variétés du mélange production vont de 11 000 avec Bergamo non traité jusqu'à 13 700 kg/ha avec Johnson traité (Figure 26).

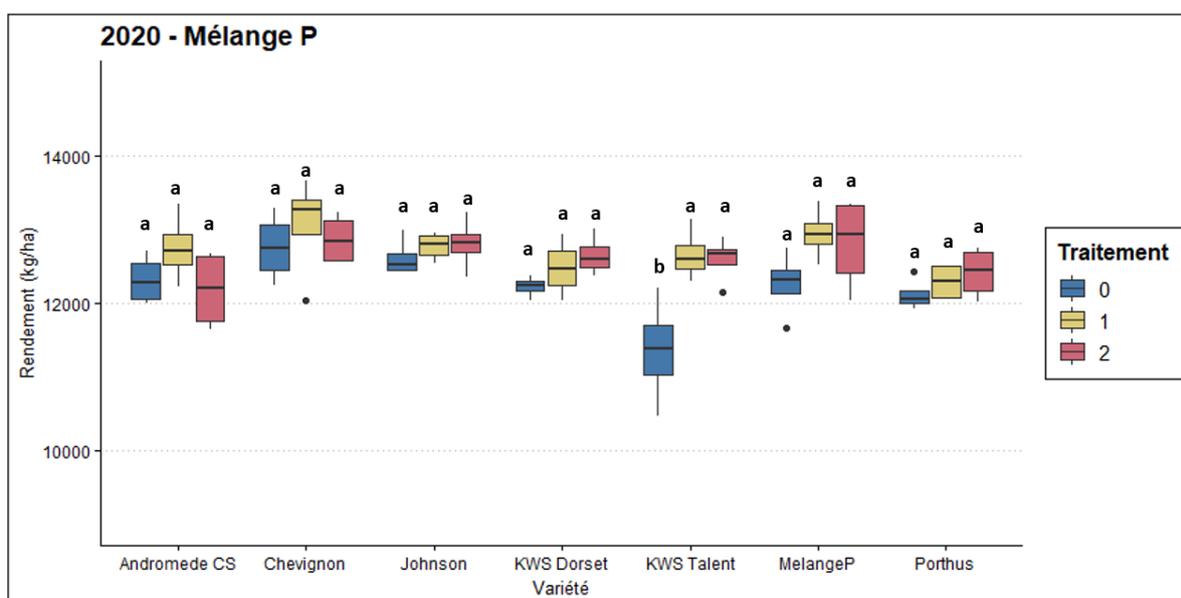


Figure 27 : Boxplot des rendements agronomiques des variétés composant le mélange production en 2020. Les modalités présentant au moins une lettre commune ne sont pas significativement différentes (test de Student-Newman-Keuls). La lettre « a » correspond au niveau de rendement le plus élevé. La barre centrale dans les boxplots correspond à la médiane.

En 2020, pour la majorité des variétés ou mélanges, les 3 modalités de traitements ne se distinguent pas significativement. Les rendements des variétés du mélange qualité vont de 11 400 kg/ha avec Sophie CS non traité à 13 400 kg/ha pour Chevignon traité (Annexe 13) . Pour les variétés du mélange production les rendements vont de 12 100 kg/ha pour Porthus non traité à 13 000 kg/ha avec Chevignon traité (Figure 27). Seul KWS Talent non traité a des rendements plus faibles de 11 300 kg/ha.

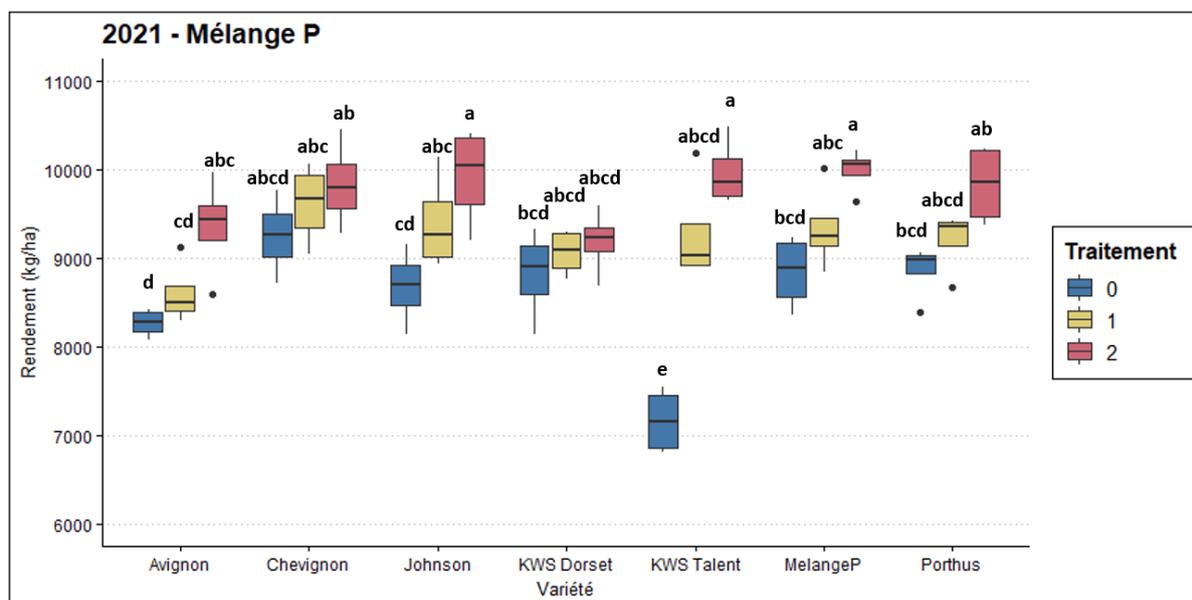


Figure 28 : Boxplot des rendements agronomiques des variétés composant le mélange production en 2021. Les modalités présentant au moins une lettre commune ne sont pas significativement différentes (test de Student-Newman-Keuls). La lettre « a » correspond au niveau de rendement le plus élevé. La barre centrale dans les boxplots correspond à la médiane.

En 2021, pour chaque variété ou mélange, la modalité 0F possède des rendements plus faibles que la modalité 1F. Les rendements de la modalité 2F sont plus élevés. Pour le mélange qualité, les rendements vont de 8 400 kg /ha avec Annapolis non traité à 10 400 kg/ha avec Chevignon traité deux fois (Annexe 14). Mentor possède des rendements plus faibles avec 7 800 kg/ha. Les rendements des variétés du mélange production vont de 8 300 kg/ha avec Avignon non traité à 10 000 kg/ha avec le mélange avec la modalité 2F (Figure 28). Seul KWS Talent non traité a des rendements inférieurs de 7 200 kg/ha.

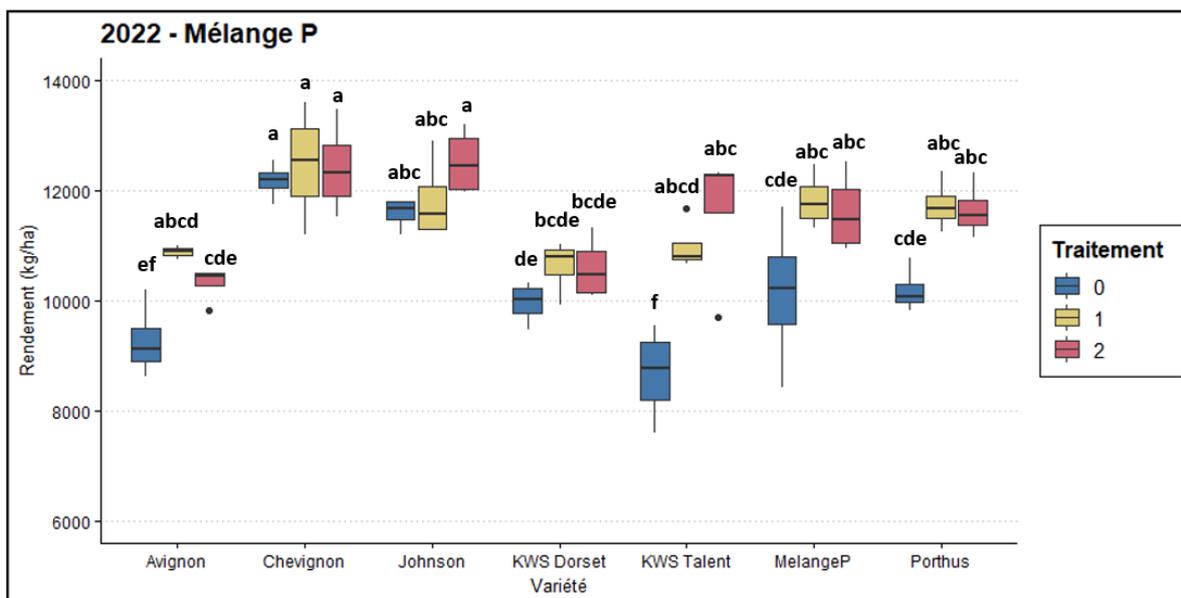


Figure 29 : Boxplot des rendements agronomiques des variétés composant le mélange production en 2022. Les modalités présentant au moins une lettre commune ne sont pas significativement différentes (test de Student-Newman-Keuls). La lettre « a » correspond au niveau de rendement le plus élevé. La barre centrale dans les boxplots correspond à la médiane.

En 2022, pour le mélange production (Figure 29), les 3 modalités de traitement n'engendrent pas de différences significatives de rendements pour Chevignon, Johnson et KWS Dorset. Pour Avignon, KWS Talent, Porthus et le mélange, les rendements sont plus élevés en cas de 1 ou 2 traitements. Par contre, ces derniers ne se distinguent pas significativement. Les rendements vont de 8 700 kg/ha avec KWS Talent non traité à 12 500 kg/ha avec Johnson traité deux fois. Pour le mélange variété (Annexe 15), les rendements vont de 9 400 à 12 700 kg/ha.

5.2.2. Rendements économiques

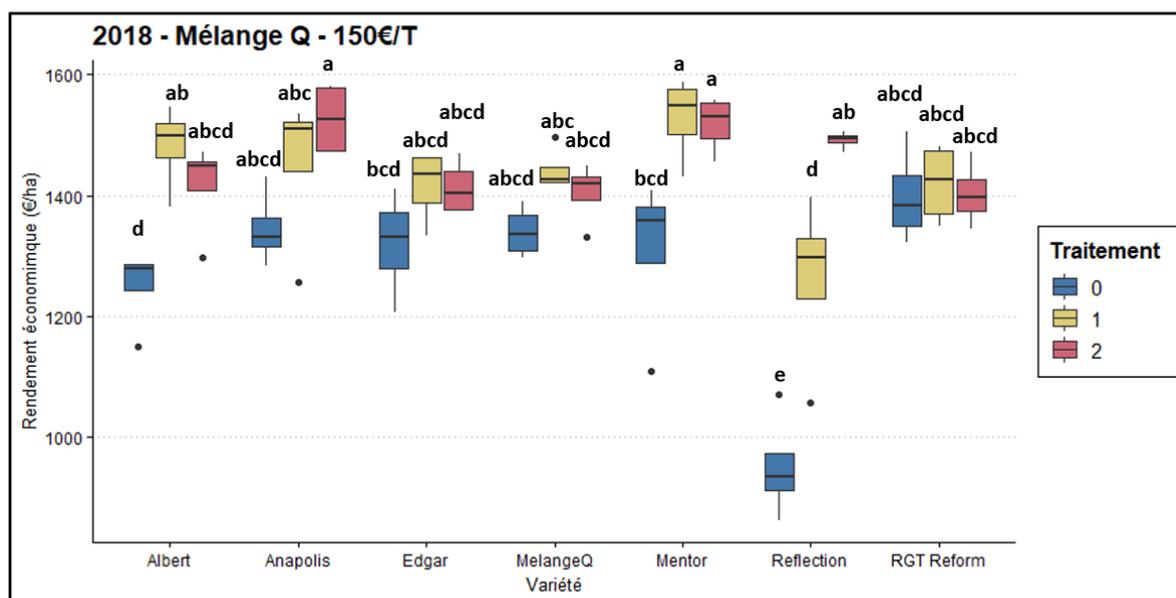


Figure 30 : Boxplot des rendements économiques des variétés composant le mélange qualité pour un froment d'une valeur de 150 €/T en 2018. Les modalités présentant au moins une lettre commune ne sont pas significativement différentes (test de Student-Newman-Keuls). La lettre « a » correspond au niveau de rendement le plus élevé. La barre centrale dans les boxplots correspond à la médiane.

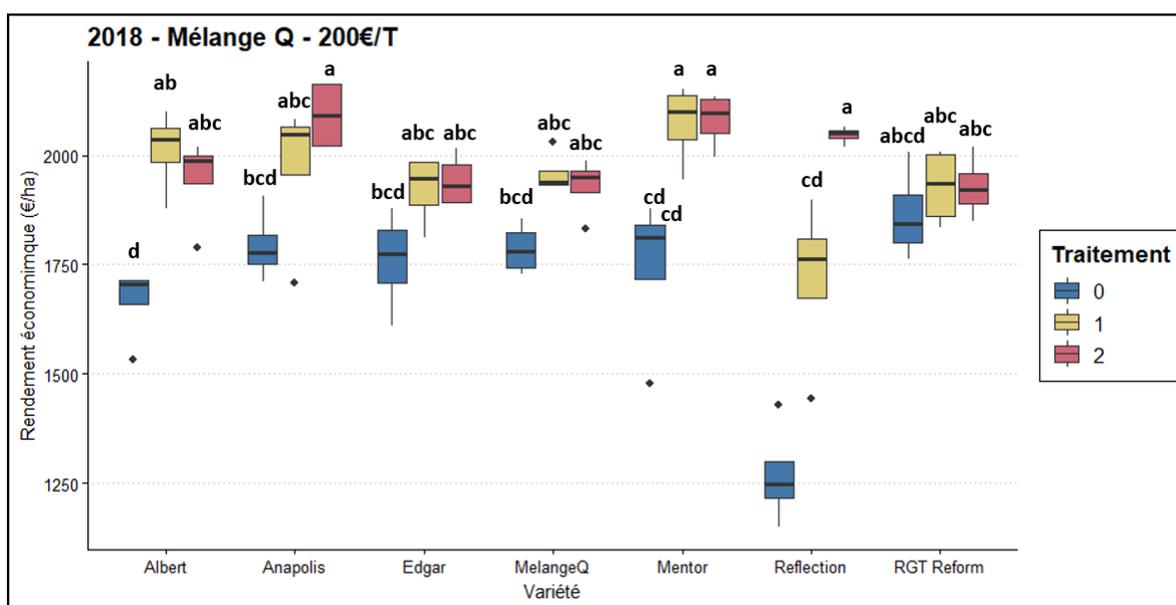


Figure 31 : Boxplot des rendements économiques des variétés composant le mélange qualité pour un froment d'une valeur de 200 €/T en 2018. Les modalités présentant au moins une lettre commune ne sont pas significativement différentes (test de Student-Newman-Keuls). La lettre « a » correspond au niveau de rendement le plus élevé. La barre centrale dans les boxplots correspond à la médiane.

En 2018, pour l'ensemble des variétés, les modalités 1F ou 2F sont les plus rentables aussi bien pour un froment vendu à 150 (Figure 30) que 200 €/T (Figure 31) à l'exception de RGT Reform pour qui les

3 modalités se confondent. Pour le mélange avec un froment valant 150€/T, les 3 modalités ne se distinguent pas.

En 2019, pour certaines variétés, les 3 modalités ne se distinguent pas tandis que pour d'autres, la modalité non traitée, les rendements économiques sont plus faibles (Annexe 16).

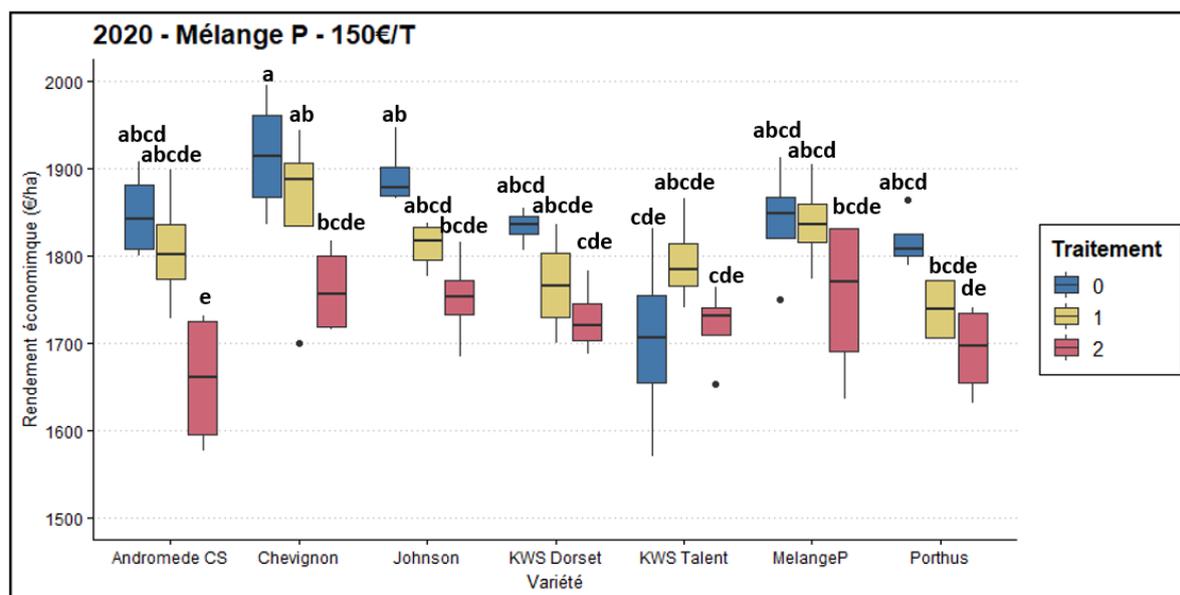


Figure 32 : Boxplot des rendements économiques des variétés composant le mélange production pour un froment d'une valeur de 150 €/T en 2020. Les modalités présentant au moins une lettre commune ne sont pas significativement différentes (test de Student-Newman-Keuls). La lettre « a » correspond au niveau de rendement le plus élevé. La barre centrale dans les boxplots correspond à la médiane.

En 2020, la modalité la moins rentable est la 2F (Figure 32 et Annexe 17). La modalité 0F possède généralement la rentabilité économique la plus élevée. Seul KWS Talent non traité est moins rentable que les deux autres modalités (Figure 32).

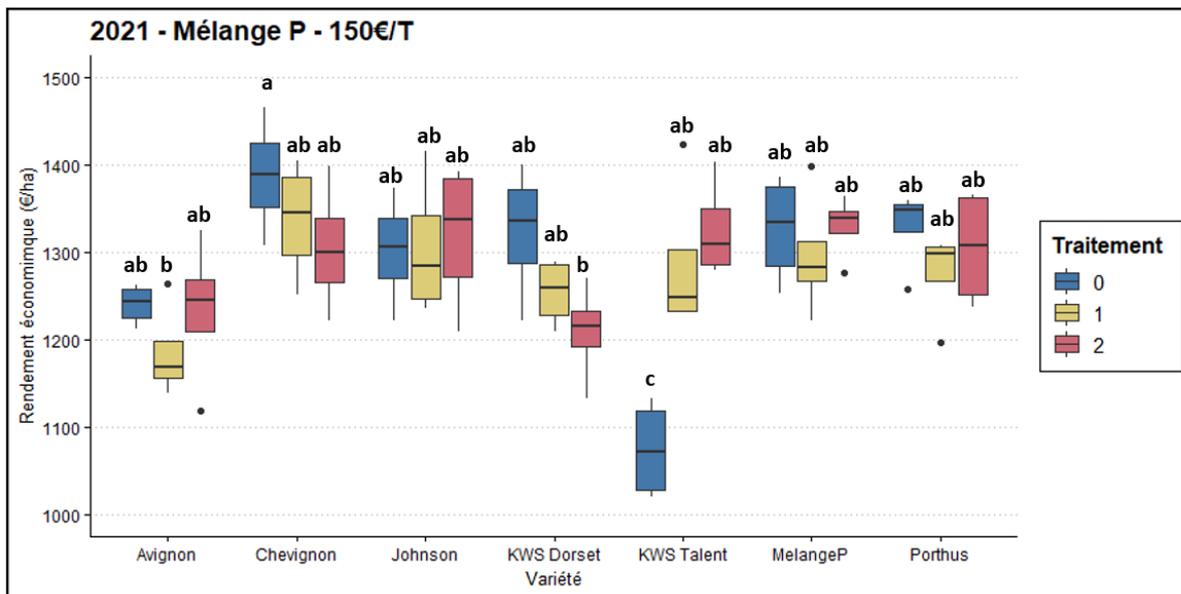


Figure 33 : Boxplot des rendements économiques des variétés composant le mélange production pour un froment d'une valeur de 150 €/T en 2021. Les modalités présentant au moins une lettre commune ne sont pas significativement différentes (test de Student-Newman-Keuls). La lettre « a » correspond au niveau de rendement le plus élevé. La barre centrale dans les boxplots correspond à la médiane.

L'année 2021 est marquée par une différence peu significative entre les modalités de traitement pour la plupart des variétés (Figure 33 et Annexe 18). Seul KWS Talent non traité est significativement plus rentable avec une protection fongique (Figure 33).

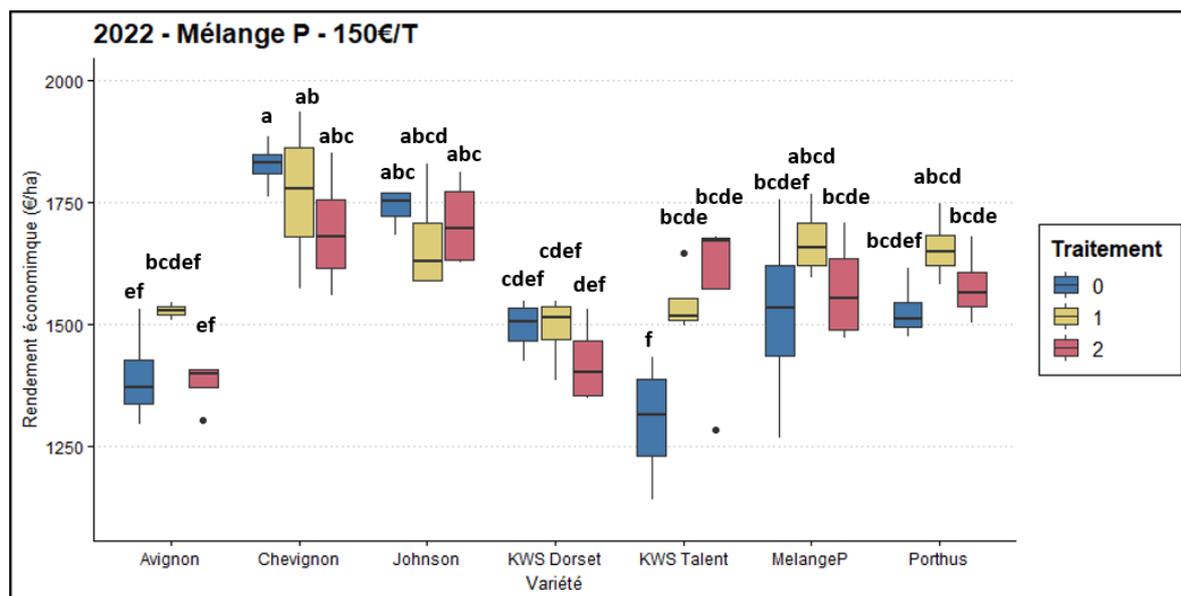


Figure 34 : Boxplot des rendements économiques des variétés composant le mélange production pour un froment d'une valeur de 150 €/T en 2022. Les modalités présentant au moins une lettre commune ne sont pas significativement différentes (test de Student-Newman-Keuls). La lettre « a » correspond au niveau de rendement le plus élevé. La barre centrale dans les boxplots correspond à la médiane.

En 2022, seul pour KWS Talent, la modalité non traitée est celle la moins rentable (Figure 34). Pour les autres variétés, les trois modalités ne se distinguent pas significativement (Figure 34 et Annexe 19).

5.2.3. Gain de rendements

Tableau 12 : Gain de rendements agronomiques et économiques de l'usage du mélange variétal. Les modalités présentant au moins une lettre commune ne sont pas significativement différentes (test de Student-Newman-Keuls). La lettre « a » correspond au niveau de gain de rendement le plus élevé.

	Protection Fongicide	Gain agronomique (%)			Gain économique : 150€/T (%)			Gain économique : 200€/T (%)		
		0F	1F	2F	0F	1F	2F	0F	1F	2F
Année										
Mélange Production (P)	2018	6,23 a	1,08 b	-3,52 b	6,23 a	1,16 b	-3,93 c	6,23 a	1,14 b	-3,82 c
	2019	4,53 a	0,64 b	-1,91 b	4,53 a	0,67 b	-2,08 b	4,53 a	0,66 b	-2,04 b
	2020	0,28 a	2,21 a	1,77 a	0,28 a	2,34 a	1,94 a	0,28 a	2,31 a	1,89 a
	2021	3,90 a	3,21 a	1,64 a	3,90 a	3,64 a	1,78 a	3,90 a	3,52 a	1,74 a
	2022	-1,78 a	3,54 a	1,09 a	-1,78 a	3,78 a	1,04 a	-1,78 a	3,72 a	1 a
Mélange Qualité (Q)	2018	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2019	5,79 a	-1,89 b	-0,65 b	5,79 a	-2 b	-0,71 b	5,79 a	-1,97 b	-0,7 b
	2020	-0,42 a	1,78 a	0,09 a	-0,42 a	1,89 a	0,1 a	-0,42 a	1,86 a	0,1 a
	2021	6,61 a	3,77 ab	-1,55 b	6,61 a	4,07 ab	-1,75 b	6,61 a	4 ab	-1,69 b
	2022	5,12 a	-8,22 b	-4,38 b	5,12 a	-8,74 b	-4,84 b	5,12 a	-8,61 b	-4,72 b

Les gains de rendements agronomiques et économiques liés à l'usage de mélange (Tableau 12) sont plus élevés pour les modalités non traitées que celles traitées à l'exception de l'année 2020 et du mélange production de l'année 2022. Les gains de rendements agronomiques moyens de toutes les années confondues liés à l'usage de mélange en modalité non traitée est de 3,36 %. Pour la modalité 1F, il est de 0,68% et pour la 2F il est de -0,82%. Pour les 3 modalités confondues le gain de rendement est de 1,07%.

6. Discussion

6.1. Analyse intra-annuelle

6.1.1. Dynamique des maladies fongiques

Cette année a été défavorable au développement de la septoriose en raison des conditions climatiques relativement sèches observées à partir de début avril (Figure 10). Les froments atteignent début - milieu avril le stade redressement (BBCH 30). Comme décrit précédemment dans le cycle de la septoriose, le champignon contamine les étages foliaires supérieurs des plantes par effet « splashing » lors de pluies. Des précipitations importantes (>10mm) qui sont favorables à la propagation, selon Fones et Gun (2015), ont été enregistrées le 8 avril ainsi que le 6 et 9 juin à Lonzée (Meteoblue, 2022). Suite à ces précipitations, des pics de septoriose sont observés après le temps de latence et de développement de la maladie. Ces pics sont observables sur la figure 16, le 2 mai (DOY 122) et le 21 juin (DOY 172). À l'exception de ces précipitations, les conditions n'ont pas été favorables, ce qui explique la faible sévérité moyenne de cette maladie pour l'ensemble des modalités durant la saison culturale. À l'inverse, cette année a été propice au développement de la rouille jaune dans les variétés sensibles. Les températures ont été favorables au développement de cette maladie. Malgré les conditions climatiques relativement sèches, l'humidité relative nécessaire au développement de ce pathogène a été rencontrée notamment grâce à la rosée. La rouille brune quant à elle a fait son apparition tardivement pendant la saison. Elle peut normalement être observée dès le stade dernière feuille déployée (BBCH 39). Dans les variétés étudiées, les premiers symptômes sont apparus au stade début floraison (BBCH 61). Cette apparition tardive n'a pas permis au champignon de toucher sévèrement les feuilles des froments. La sévérité moyenne n'a pas dépassé les 20%.

Les symptômes de la septoriose sont déjà présents sur les feuilles basales et sur la sixième feuille au stade redressement (BBCH 30). Ensuite, la septoriose a progressivement contaminé les étages foliaires supérieurs. Très rapidement, la maladie s'est également développée sur la cinquième feuille. La pluie d'avril a permis le développement de ce pathogène sur la quatrième feuille. La septoriose a évolué tout au long de la saison sur cette dernière. La troisième feuille a rencontré un pic de sévérité mais ne dépassant pas les 10% au DOY 178 à la suite des précipitations de début juin pour l'ensemble des variétés à l'exception de KWS Talent qui était déjà massivement attaqué par la rouille jaune. Cette année, en raison des faibles précipitations, la septoriose n'a pas atteint de manière significative les deux premières feuilles. Le pathogène n'a donc touché les trois premières feuilles qu'à faible mesure. L'absence de développement de maladies sur les trois premières feuilles ainsi que sur l'épi permet d'obtenir un remplissage des grains optimal (Duvivier et al., 2018). La septoriose n'a donc que faiblement impacté le remplissage des grains pour l'ensemble des variétés et pour le mélange de variétés. Contrairement à la septoriose, les rouilles sont transportées par le vent. Les symptômes des rouilles peuvent apparaître simultanément sur plusieurs étages foliaires. Sur les trois premières feuilles, la même tendance apparaît pour la sévérité aussi bien liée à la rouille jaune qu'à la rouille brune. Le vent transporte les spores qui contaminent tous les étages foliaires. En raison de la physiologie de la plante, les feuilles se développent et se déploient hors de la gaine les unes après les autres. L'attaque des champignons ne se fait qu'une fois la feuille sortie de la gaine et en contact avec l'air ambiant. Cela explique que les premières feuilles (F1, F2, F3) sont contaminées plus tardivement que les dernières feuilles. Par contre, une fois l'ensemble des feuilles déployées, la même tendance se marque sur toutes les feuilles.

De manière générale, les chutes de sévérité sont dues à la sénescence des dernières feuilles. Lorsqu'une feuille est sénescente, cette dernière n'est plus cotée et sa sévérité n'est plus prise en compte dans le calcul de la sévérité moyenne. Ces chutes sont principalement visibles pour la septoriose qui concentre la maladie sur les dernières feuilles. La chute le 9 mai (DOY 129) correspond à la sénescence de la F6 et celle le 23 mai (DOY 143) correspond à la sénescence de la F5. Pour les rouilles, la sénescence des feuilles ne provoque pas une réduction de la sévérité moyenne car la maladie touche l'ensemble des étages foliaires. La rouille brune n'a pas touché les F5 et F6 car ces feuilles avaient déjà péri lors de son apparition.

De plus, la sénescence des feuilles ne se déroule pas au même moment pour toutes les variétés. La sénescence des feuilles est un processus naturel. Toutes les feuilles sont vouées à périr. Par contre, les maladies fongiques accélèrent ce processus. Avignon, variété sensible à la septoriose connaît un dépérissement de ses feuilles plus précoce que les autres variétés étudiées. Tandis que Cheignon, pour sa part, conserve sa F4 plus longtemps que les autres. En outre, au sein d'une variété, certaines plantes sont plus touchées que d'autres. Sur la figure 17, la sévérité moyenne pour chaque feuille au dernier DOY disponible est généralement plus faible que la semaine précédente car la moyenne n'est calculée qu'à partir des plantes plus saines où cette feuille était encore présente.

Le mélange est composé de deux variétés sensibles à la septoriose à savoir Avignon et KWS Dorset (Tableau 2). Dans les variétés cultivées en pure, les résultats confirment bien qu'Avignon est la variété la plus sensible. Cependant, KWS Dorset n'a pas été plus impacté que les autres variétés. Porthus se démarque en étant la variété la moins infectée. Cheignon vers la fin se retrouve dans le groupe le plus touché par la maladie malgré sa résistance. Cela s'explique par le fait que Cheignon a une sénescence plus lente de ses feuilles. Vers la fin, pour un même DOY, une feuille de plus est cotée pour Cheignon que pour les autres variétés. Cela entraîne une sévérité moyenne plus élevée pour cette variété car la maladie se concentre sur les dernières feuilles. Toutes les variétés ont été touchées par la septoriose. Cela confirme qu'aucune variété n'est totalement résistante à la septoriose en raison du cycle sexué de la maladie. Contrairement à la septoriose, un effet variétal est marqué pour la rouille jaune. Le mélange était composé de deux variétés sensibles KWS Talent et KWS Dorset (Tableau 2). KWS Talent s'est bien montré la variété la plus sensible avec une forte sévérité de la rouille jaune sur l'ensemble des feuilles. KWS Dorset a été particulièrement sensible du début de développement de la maladie, le 25 avril (DOY 115) jusqu'au 23 mai (DOY 143) où la variété a atteint le stade fin épiaison (BBCH 59). Par contre, après cette période, KWS Dorset est moins touché par la maladie, principalement sur ses trois premières feuilles. La variété semble pouvoir résister à la contamination tardive. Porthus, une variété résistante, a prouvé sa résistance jusqu'au 13 juin (DOY 164). Après cette date, cette variété a craqué pour atteindre une sévérité moyenne de près de 20% sur les 4 premières feuilles. La rouille jaune a donc un impact sur le remplissage des grains pour les variétés sensibles. Pour la rouille brune, Porthus et Avignon sont les variétés les plus sensibles (Tableau 2). Le suivi de la sévérité liée à la rouille brune a confirmé leur sensibilité. KWS Talent s'est montré plus résistante que ce qu'attendu. Cette variété était déjà fortement touchée par la rouille jaune ne permettant plus à la rouille brune de se développer.

Un des objectifs d'un mélange de variétés est de réduire la pression fongique. En ce qui concerne la pression liée à la septoriose, le mélange de variétés appartient au groupe central. C'est-à-dire que la sévérité moyenne dans le mélange correspond plus ou moins à la moyenne des 6 variétés cultivées en pure qui le composent. Le mélange de variétés n'apporte donc pas une réduction de la septoriose. Cette tendance est valable pour l'ensemble des étages foliaires. Les mécanismes cités précédemment ne semblent pas concluants contre la septoriose. À propos de la sévérité moyenne liée à la pression de la rouille jaune, le mélange de variétés est moyennement à faiblement attaqué en comparaison des variétés

cultivées en pure. Le mélange de variétés à travers les mécanismes de réduction de maladies développées précédemment permet de réduire la pression de la rouille jaune. Le même constat devrait être réalisé pour la rouille brune. La sévérité de la rouille brune sur le mélange est légèrement plus faible que la moyenne des 6 variétés qui le compose même si la différence n'est pas significative. Ce pathogène ayant fait son apparition tardivement, les mécanismes de réduction de la pression des maladies du mélange n'a pas eu le temps de se mettre en place pour la rouille brune. Le suivi des maladies confirme donc que le mélange est surtout efficace pour réduire la pression des champignons à dispersion éolienne comparé à la dispersion par effet splashing lors de précipitations.

6.1.2. Influence des traitements

a. Septoriose

Deux semaines après le premier traitement pour la modalité 2F, la protection fongicide a été efficace pour Chevignon, Johnson, KWS Talent et le mélange. Pour Avignon, Porthus et KWS Dorset, il n'a pas permis une réduction significative de la septoriose. Le traitement a donc été globalement efficace pour réduire la septoriose. En revanche, il n'élimine pas les symptômes de la maladie mais permet de réduire sa propagation. Même les parcelles traitées présentent des symptômes de la septoriose mais à moindre mesure.

Deux semaines après le traitement unique pour la modalité 1F, ce dernier ne semble pas diminuer la pression de la septoriose. Les conditions défavorables à la septoriose ralentissent voire stoppent l'épidémie. La pression étant faible, les parcelles non traitées ne connaissent pas une évolution de la septoriose. Que ce soit dans les parcelles traitées ou non, la septoriose n'évolue pas rendant un traitement non justifié. De même, les parcelles étant traitées avec la modalité 2F ne sont pas significativement moins impactées que celles non traitées pour les mêmes raisons. Seul pour Avignon, variété sensible à la septoriose, la pression est plus faible pour la modalité 2F que pour les deux autres.

Deux semaines après le deuxième traitement pour la modalité 2F, la septoriose ne rencontre toujours pas des conditions favorables à son développement. Chevignon, Johnson et Porthus sont des variétés résistantes à la septoriose, même pour les parcelles non traitées la sévérité moyenne reste en dessous de 5%. Les 3 modalités de traitement ne se distinguent pas. Par contre, sur la figure 16, il est observable que pour ces variétés, certaines modalités traitées, ont une médiane supérieure à celles non traitées. Cela est explicable par le fait que pour les modalités 0F, seules les 4 premières feuilles sont cotées parce que les F5 et F6 ont disparu ou sont sénescents. Pour les modalités 1F et 2F, en raison du traitement, le développement des maladies est réduit et la sénescence des feuilles est retardée. Pour ces deux modalités, certaines plantes sont cotées jusqu'à la F5. Cela fait augmenter la sévérité moyenne pour ces modalités car la maladie se concentre sur les dernières feuilles. Pour Avignon et KWS Dorset, les variétés les plus sensibles, les parcelles non traitées sont plus impactées que les modalités 1F ou 2F. Cette différence est due à la contamination de la septoriose plus importante sur la F4. Les sévérités moyennes des modalités 1F et 2F sont similaires. Le traitement en dose unique est tout aussi efficace que les traitements en deux applications. Pour KWS talent, le traitement en deux applications est plus efficace que le traitement en dose unique. Pour le mélange de variétés lorsqu'il est non traité, sa sévérité moyenne appartient au même groupe statistique que les variétés peu sensibles ou les variétés traitées. L'usage de mélanges semble donc pouvoir permettre la réduction de fongicides tout en conservant une sévérité moyenne faible. La variabilité des mesures pour le mélange de variétés est élevée. Chaque

variété au sein du mélange ne répond pas de la même manière à la pression qui est exercée sur la parcelle.

Un mois après le deuxième traitement de la modalité 2F, la sévérité moyenne pour toutes les modalités est toujours faible, en dessous de 10%. La différence de sévérité est plutôt liée au nombre de feuilles cotées pour chaque variété. Chevignon semble plus impacté qu'Avignon car Chevignon est coté sur ses quatre premières feuilles et Avignon sur ses trois premières feuilles. Le mélange est une moyenne des autres variétés.

De manière générale, en raison de la faible pression liée à la septoriose, les traitements fongicides n'étaient pas justifiés car inutile pour réduire la pression très faible. Le mélange n'apporte pas de plus-value au niveau de la réduction de la sévérité de la septoriose.

b. Rouille Jaune

Deux semaines après le premier traitement pour la modalité 2F, le traitement a permis de réduire la pression de rouille jaune pour KWS Dorset, KWS Talent et pour le mélange de variétés. La rouille jaune était déjà présente avant le traitement. Même avec le traitement, des symptômes sont visibles pour ces deux variétés et pour le mélange de variétés.

Deux semaines après le traitement unique pour la modalité 1F, pour chaque variété, les parcelles non traitées ne sont pas plus touchées que les parcelles traitées. Les conditions climatiques ont été moins favorables au développement de la rouille jaune. Même sans traitement, la pression liée à la rouille jaune diminue. En revanche, les symptômes ne sont pas localisés au même étage foliaire pour les différentes modalités. Pour la modalité 2F, les symptômes sont plutôt localisés sur les dernières feuilles et sur la F1 qui n'a pas été protégée avec le traitement.

Deux semaines après le dernier traitement pour la modalité 2F, les variétés résistantes, Avignon, Chevignon et Johnson ne sont pas touchées. Seule une minorité de plantes possèdent un léger symptôme sur certaines feuilles. Porthus, une variété ayant aussi obtenu une cote de résistance est quand même touchée plus significativement pour la majorité des plantes dans les parcelles non traitées. Le traitement est efficace pour réduire la pression que ce soit en un ou deux traitements. Les deux variétés sensibles KWS Dorset et KWS Talent sont touchées par la rouille jaune quel que soit le traitement. KWS Dorset non traité est moins touché que les parcelles traitées. Il y a un effet local pour la rouille jaune. L'expérimentation en petites parcelles ne représente pas la réalité en grandes parcelles. La rouille jaune se développe en tache dans une parcelle. L'hypothèse que les parcelles de KWS Dorset non traitées étaient localisées dans des zones de la plateforme expérimentale moins touchées par la rouille jaune peut être émise. Par contre, il est observable que pour KWS Talent et KWS Dorset, les parcelles traitées deux fois sont moins touchées que les parcelles traitées une fois. Le traitement unique de la modalité 1F a été réalisé deux semaines après le premier traitement de la modalité 2F. La pression de rouille jaune étant présente ces deux semaines a donc provoqué des symptômes plus importants sur la modalité 1F. Le mélange sous ses 3 modalités appartient au groupe de fin. Un mélange de variétés est donc efficace pour réduire la pression des maladies sur les variétés sensibles qui le composent. Le traitement est inutile pour gérer la pression de la rouille jaune.

Un mois après le deuxième traitement de la modalité 2F, le traitement était nécessaire pour réduire les symptômes sur KWS Talent. Deux traitements se sont montrés plus efficaces que le traitement unique.

Le traitement qui a été réalisé au stade 39 s'est fortement dissipé à la floraison. Un second traitement est justifié en cas de forte pression (Duvivier et al., 2018). KWS Dorset s'est montré encore peu sensible sur ses parcelles non traitées.

De manière générale, l'usage de mélanges est efficace contre la pression engendrée sur les variétés sensibles à la rouille qui est une maladie polycyclique dispersée par le vent.

c. Rouille brune

La pression liée à la rouille brune a commencé à augmenter fin juin (DOY 172). Les traitements ne se sont montrés utiles que tardivement. Le mélange, agissant sur des champignons polycycliques, n'a pas eu le temps de montrer son effet.

6.2. Analyse interannuelle

6.2.1. Rendements agronomiques

Les rendements du froment d'hiver varient annuellement en fonction des conditions météorologiques et des pressions des maladies fongiques associées. En 2018 et en 2021, les rendements agronomiques étaient moins élevés qu'en 2019, 2020 et 2022. Les années sèches semblent apporter des rendements plus élevés. Cela peut en partie s'expliquer par des pressions plus faibles des maladies en condition sèche.

Les traitements n'ont pas le même impact chaque année sur le rendement. Par exemple, pour les années 2019 et 2020, les rendements des modalités traitées en un ou deux passages ont été similaires. Par contre, pour les variétés non traitées en 2019, les rendements étaient moins élevés. En 2020, les parcelles non traitées ont donné des rendements similaires à celles traitées. En 2018, 2019, 2021 et 2022, une protection fongicide était justifiée car les rendements sont significativement plus élevés que pour les parcelles non traitées. Par contre, une protection partielle en un passage a apporté des rendements similaires à une protection totale à l'exception de 2021 où 2 traitements ont engendré des rendements plus élevés. Une protection partielle au vu des résultats des cinq dernières années est généralement suffisante pour atteindre des rendements optimaux.

Au niveau des variétés, il existe des similitudes entre les différentes années. Chevignon est une variété productive même lorsqu'elle n'est pas traitée. Cette variété est relativement résistante aux différentes maladies et dans le groupe de tête des variétés productives. Sans protection fongicide, KWS Talent, variété très sensible aux rouilles, a systématiquement des rendements plus faibles que les autres variétés. Lorsque cette variété est traitée, ses rendements sont comparables aux autres variétés traitées.

En 2021 et 2022, les mêmes variétés ont été mises en essai. Les rendements ont été plus élevés en 2022 mais la variabilité entre les différentes modalités variétales est également plus élevée. Les mêmes tendances se retrouvent dans les rendements obtenus en fonction des trois modalités.

6.2.2. Rendements économiques

Des rendements agronomiques élevés ne signifient pas nécessairement des rendements économiques optimaux. Pour qu'un traitement soit efficient, il faut que le gain de rendements lié à son usage soit équivalent ou supérieur à ses coûts engendrés. Les rendements agronomiques sont généralement légèrement plus élevés pour la modalité 2F que pour la modalité 1F. Par contre, pour les rendements économiques la modalité 1F est dans certains cas plus rentable que la modalité 2F.

Plus le froment est cher, plus la modalité de traitements 2F peut être justifiée car une différence de rendements moins élevée doit être obtenue pour rembourser les coûts supplémentaires engendrés par un deuxième passage.

L'année 2020 a été marquée par des rendements relativement similaires pour les 3 modalités de traitements pour la majorité des variétés. Les parcelles non traitées sont plus rentables que celles traitées. Le traitement était inutile car son usage n'a pas permis d'augmenter les rendements agronomiques tout en entraînant un coût non rentabilisé.

Les doses optimales de fongicides à appliquer fluctuent chaque année fortement en fonction de l'intensité des maladies (Wijk et Rosenqvist, 2009). Il est difficile de prévoir à l'avance la protection fongicide qui va permettre d'atteindre la rentabilité la plus élevée. De manière générale, sur ces cinq dernières années, une protection fongicide partielle était suffisante pour obtenir des rendements économiques élevés. Cette pratique permet également de réduire les effets néfastes de l'utilisation des fongicides sur l'environnement et sur la santé humaine. De plus, l'efficacité des fongicides actuellement disponibles sur le marché garantit la rentabilité d'un traitement unique (Wijk et Rosenqvist, 2009).

6.2.3. Gain de rendements de l'usage du mélange variétal

Le mélange est d'autant plus avantageux quand les conditions culturales sont désavantageuses. Sans protection fongique, le gain de rendement lié à l'usage des variétés en mélange est de 3,36%. Ce résultat est en accord avec les propos de Montazeaud et al. (2022) selon lesquels les gains de rendements se situent entre 2 et 5%. Les gains sont généralement positifs avec une protection fongicide partielle tandis qu'avec une protection totale, les avantages du mélange s'annulent et deviennent même négatifs dans certains cas. Tout comme dans l'étude de Kristoffersen (2022), le gain de rendement est corrélé négativement avec l'application de fongicides.

En 2020, des gains de rendements faibles ont été observés pour les mélanges et même négatifs pour les modalités non traitées. Les traitements n'ont pas influencé les rendements car les conditions ont été naturellement favorables au froment. De même, l'usage du mélange n'a apporté aucune plus-value car les conditions étaient déjà optimales.

En 2021, les conditions ont été défavorables et une protection partielle ne suffisait pas à atteindre des rendements équivalents à une protection totale. Les mélanges ont apporté une plus-value de rendements de plus de 3% sous la modalité 1F.

En 2021 et 2022, les mélanges étaient composés des mêmes variétés. Les gains de rendement n'ont pas été semblables. Ce qui prouve que les gains de rendement fluctuent donc en fonction des années.

Selon Pope De Vallavieille et al. (2016), la composition des mélanges à $\frac{1}{4}$ sensible et $\frac{3}{4}$ résistant est l'optimum. Dans cette étude, les mélanges étaient composés à plus ou moins $\frac{1}{3}$ sensible et $\frac{2}{3}$ résistant pour le mélange production et à plus ou moins $\frac{1}{4}$ sensible et $\frac{3}{4}$ résistant pour le mélange qualité. Le mélange qualité a permis d'obtenir des gains de rendements légèrement supérieurs au mélange production pour la modalité non traitée à l'exception de l'année 2020. Les deux compositions ont tout de même permis d'obtenir des résultats favorables dans la majorité des cas.

Lorsque les gains agronomiques et économiques (Tableau 12) sont comparés, les gains de rendements économiques sont légèrement plus élevés que les gains agronomiques lorsque ces derniers sont positifs et plus faibles lorsqu'ils sont négatifs.

7. Conclusion et perspectives

Les conditions météorologiques ont cette année été peu favorables au développement des maladies fongiques. La rouille jaune s'est développée et a causé des dégâts sur les variétés sensibles. La rouille brune a quant à elle fait son apparition tardivement dans la saison. Elle n'a pas provoqué de dégâts majeurs car le stade sensible, à savoir l'épiaison (BBCH 55), était déjà passé. La septoriose, en raison d'absence de précipitations contaminantes, n'a pas provoqué de dégâts importants. Elle ne s'est pas développée sur les étages foliaires supérieurs des plantes.

Le suivi de la dynamique des trois maladies par étages foliaires sur chaque variété a permis d'identifier leur mode de propagation. La septoriose remonte les étages foliaires lors de précipitations contaminantes. Elle se concentre principalement sur les étages foliaires inférieurs. Les rouilles sont quant à elles dispersées par le vent. L'ensemble des étages foliaires sont en contact avec les spores. Les trois dernières feuilles, jouant un rôle majeur dans le remplissage des grains, sont plus accessibles par la maladie.

La protection fongicide complète en deux passages ne se justifie pas pour l'ensemble des variétés. Cette année, le traitement en deux passages ne se justifiait que pour les variétés sensibles à la rouille jaune. La septoriose ne s'étant pas développée sur les trois derniers étages foliaires, les traitements n'étaient pas nécessaires pour lutter contre ce champignon. Pour la rouille brune, une protection fongicide partielle en un passage a permis de lutter efficacement contre le pathogène.

La résistance variétale est le premier levier agronomique contre les maladies fongiques. Les variétés résistantes à la rouille n'ont pas eu de symptômes ou pas de manière significative sur leur feuillage même sans protection fongique. Des traitements contre la rouille sont donc inutiles pour les variétés résistantes. En Belgique, les rouilles ne bouclent pas leur cycle sexué en raison de l'absence de disponibilité de leur hôte secondaire, indispensable pour boucler leur cycle. Par contre, aucune variété n'est totalement résistante à la septoriose en raison de son cycle sexué qui se produit toute l'année.

Les mélanges variétaux sont principalement efficaces pour diminuer la pression des maladies fongiques polycycliques dispersées par le vent. Cette année, le mélange production a permis de réduire la pression liée à la rouille jaune. En raison de l'apparition tardive de la rouille brune, le mélange n'a pas eu le temps de montrer ses effets. Le mélange n'a pas permis de réduire la sévérité liée à la septoriose.

Les rendements varient annuellement en fonction des conditions climatiques et des pressions fongiques. Par contre, les variétés se comportent presque similairement chaque année. Les rendements agronomiques sont dans la majorité des cas équivalents avec une protection fongicide partielle ou totale. Les fongicides ayant un coût d'usage et d'application, une protection fongicide partielle permet dans la majorité des cas d'être plus économique et plus écologique.

L'usage de mélanges variétaux est pertinent principalement lorsque les conditions culturales sont défavorables. Sans protection fongique, les gains de rendements liés à l'usage d'un mélange variétal sont de 3,36%. Le gain de rendement est corrélé négativement avec l'application de fongicides.

Les essais de mélanges variétaux ont été mis en place dans des sols favorables. Il serait pertinent d'étudier l'effet des mélanges dans d'autres régions où le sol est moins favorable au développement du blé d'hiver.

De plus, l'efficacité des mélanges est plus importante dans de larges parcelles plutôt que dans les parcelles expérimentales à petites échelles. Des interférences inter-parcellaires peuvent avoir lieu et les parcelles traitées pourraient se retrouver en présence de plus d'inoculum que dans des situations parcellaires normales. Un suivi dans de larges parcelles permettrait de mesurer l'efficacité des mélanges dans des conditions culturales réelles.

8. Bibliographie

Adu-Gyamfi, P., Mahmood, T. and Trethowan, R. (2015) ‘Can wheat varietal mixtures buffer the impacts of water deficit?’, *Crop and Pasture Science*, 66(8), pp. 757–769. Available at: <https://doi.org/10.1071/CP14177>.

Arvalis (2013) *Rouille brune - Maladie sur Blé tendre, blé dur, triticale, ARVALIS 2013, Les Fiches Accidents - ARVALIS-infos.fr*. Available at: <http://www.fiches.arvalis-infos.fr> (Accessed: 21 March 2022).

Arvalis (2013) *Rouille jaune - Maladie sur Blé tendre, blé dur, triticale, ARVALIS 2013, Les Fiches Accidents - ARVALIS-infos.fr*. Available at: <http://www.fiches.arvalis-infos.fr> (Accessed: 17 March 2022).

Arvalis (2013) *Septoriose - Maladie sur Blé tendre, blé dur, triticale, ARVALIS 2013, Les Fiches Accidents - ARVALIS-infos.fr*. Available at: <http://www.fiches.arvalis-infos.fr> (Accessed: 15 March 2022).

AtlasBig (2021) *Principaux pays producteurs de blé au monde, AtlasBig*. Available at: <https://www.atlasbig.com/fr-ch/pays-par-production-de-ble> (Accessed: 22 February 2022).

Bancal, M.-O. (2021) ‘Plant–plant communication in variety mixtures plays on disease susceptibility and immunity’, *Journal of Experimental Botany*, 72(18), pp. 6084–6086. Available at: <https://doi.org/10.1093/jxb/erab377>.

Barot, S. *et al.* (2017) ‘Designing mixtures of varieties for multifunctional agriculture with the help of ecology. A review’, *Agronomy for Sustainable Development*, 37(2), p. 13. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0418-x>.

BASF (2019a) *Rouille brune du blé - Maladies du blé*. Available at: https://www.agro.basf.fr/fr/cultures/ble/maladies_du_ble/rouille_brune_du_ble/ (Accessed: 21 March 2022).

BASF (2019b) *Rouille jaune du blé – Maladies du blé*. Available at: https://www.agro.basf.fr/fr/cultures/ble/maladies_du_ble/rouille_jaune_du_ble/ (Accessed: 18 March 2022).

BASF (2019c) *Septoriose du blé, tache foliaire - Maladies du blé*. Available at: https://www.agro.basf.fr/fr/cultures/ble/maladies_du_ble/septoriose_du_ble_tache_foliaire/ (Accessed: 15 March 2022).

Bayer-Agri (2018a) *Rouille brune du blé: Bayer-Agri*. Available at: https://www.bayer-agri.fr/cultures/rouille-brune-du-ble_1159/ (Accessed: 21 March 2022).

Bayer-Agri (2018b) *Septoriose: vigilance tout au long du cycle du blé: Bayer-Agri*. Available at: https://www.bayer-agri.fr/cultures/septoriose-vigilance-tout-au-long-du-cycle-du-ble_1295/ (Accessed: 15 March 2022).

Blanc, E. *et al.* (2021) ‘Functional-Structural Plant Modeling Highlights How Diversity in Leaf Dimensions and Tillering Capability Could Promote the Efficiency of Wheat Cultivar Mixtures’, *Frontiers in Plant Science*, 12, p. 734056. Available at: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.734056>.

Bolton, M.D., Kolmer, J.A. and Garvin, D.F. (2008) ‘Wheat leaf rust caused by *Puccinia triticina*’, *Molecular Plant Pathology*, 9(5), pp. 563–575. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1364->

3703.2008.00487.x.

Bommarco, R., Kleijn, D. and Potts, S.G. (2013) 'Ecological intensification: harnessing ecosystem services for food security', *Trends in Ecology & Evolution*, 28(4), pp. 230–238. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2012.10.012>.

Borg, J. *et al.* (2018) 'Unfolding the potential of wheat cultivar mixtures: A meta-analysis perspective and identification of knowledge gaps', *Field Crops Research*, 221, pp. 298–313. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.09.006>.

Borg, J., Enjalbert, J. and Gauffreteau, A. (2015) 'Concevoir des associations variétales de blé par l'idéotypage participatif'. INRA (Adaptation des prairies semées au changement climatique). Available at: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01237191> (Accessed: 2 March 2022).

Brady, N.C. and Weil, R.R. (2014) *The Nature and Properties of Soils, 14th Edition*. 14th edition. Upper Saddle River, N.J: Pearson.

Cadotte, M.W., Carscadden, K. and Mirotchnick, N. (2011) 'Beyond species: functional diversity and the maintenance of ecological processes and services', *Journal of Applied Ecology*, 48(5), pp. 1079–1087. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02048.x>.

Chen, X.M. (2005) 'Epidemiology and control of stripe rust [*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*] on wheat', *Canadian Journal of Plant Pathology*, 27(3), pp. 314–337. Available at: <https://doi.org/10.1080/07060660509507230>.

Corteva (2022) 'brochures-befr-2022'. Available at: <https://www.corteva.be/content/dam/dpagco/corteva/eu/be/fr/files/brochures-befr/brochures-befr-2022/Fongicides%20cereales%20a%20base%20d%27Inatreq%20Active.pdf>.

Daamen, R.A. and 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), pp. 369–376. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF01974464>.

De Lucia, M. and Assennato, D. (1992) *L'après-récolte des grains - organisation et techniques*. Rome. Available at: <https://www.fao.org/3/T0522F/T0522F04.htm> (Accessed: 11 June 2022).

Devadas, R. *et al.* (2014) 'Effect of stripe rust on the yield response of wheat to nitrogen', *The Crop Journal*, 2(4), pp. 201–206. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cj.2014.05.002>.

Duan, X. *et al.* (2022) 'Cultivar Mixture Enhances Crop Yield by Decreasing Aphids', *Agronomy*, 12(2), p. 335. Available at: <https://doi.org/10.3390/agronomy12020335>.

Enjalbert, J. *et al.* (2019) 'Mélanges variétaux et mélanges plurispécifiques – atouts et contraintes', *Innovations Agronomiques*, 75, pp. 49–71.

Eyal, Z. (1999) 'The *Septoria Tritici* and *Stagonospora Nodorum* Blotch Diseases of Wheat', *European Journal of Plant Pathology*, 105(7), pp. 629–641. Available at: <https://doi.org/10.1023/A:1008716812259>.

Eyal, Z. and Center, I.M. and W.I. (1987) *The Septoria Diseases of Wheat: Concepts and Methods of Disease Management*. CIMMYT.

FEGRA (2021) *Récolte des céréales 2021 : la qualité des grains fortement affectée par les conditions météorologiques*. Available at: <https://fegra.be/Flexpage/DownloadFile?id=18624&revisionID=0> (Accessed: 21 February 2022).

Filagri (2016) ‘Les céréales’, *Filagri*. Available at: <http://filagri.be/grandes-cultures/les-cereales/> (Accessed: 22 February 2022).

Fones, H. and Gurr, S. (2015) ‘The impact of Septoria tritici Blotch disease on wheat: An EU perspective’, *Fungal Genetics and Biology*, 79, pp. 3–7. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2015.04.004>.

Ghaffary, S.M.T., Chawade, A. and Singh, P.K. (2018) ‘Practical breeding strategies to improve resistance to Septoria tritici blotch of wheat’, *Euphytica*, 214(7), p. 122. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10681-018-2205-4>.

Google Earth (2021) *Google Earth*. Available at: <https://earth.google.com/web/@50.54743445,4.74200171,167.1015081a,1391.81910623d,35y,0h,0t,0r> (Accessed: 28 March 2022).

Grettenberger, I.M. and Tooker, J.F. (2015) ‘Moving beyond resistance management toward an expanded role for seed mixtures in agriculture’, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 208, pp. 29–36. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.04.019>.

Huerta-Espino, J. *et al.* (2011) ‘Global status of wheat leaf rust caused by Puccinia triticina’, *Euphytica*, 179(1), pp. 143–160. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10681-011-0361-x>.

IRM (2022) *IRM - Climat dans votre commune, KMI*. Available at: <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/climat-dans-votre-commune> (Accessed: 29 March 2022).

Jerbi K., 2016. Homogénéité de la variance et transformations non linéaires Table.

Kang, Z. *et al.* (2019) ‘Differential sensitivity among Puccinia striiformis f. sp. tritici isolates to propiconazole and pyraclostrobin fungicides’, *Canadian Journal of Plant Pathology*, 41(3), pp. 415–434. Available at: <https://doi.org/10.1080/07060661.2019.1577301>.

Karjalainen, R. and Lounatmaa, K. (1986) ‘Ultrastructure of penetration and colonization of wheat leaves by Septoria nodorum’, *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 29(2), pp. 263–270. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0048-4059\(86\)80026-1](https://doi.org/10.1016/S0048-4059(86)80026-1).

Kiær, L., Skovgaard, I. and Østergård, H. (2009) ‘Grain yield increase in cereal variety mixtures: A meta-analysis of field trials’, *Field Crops Research*, 114, pp. 361–373. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.09.006>.

Kong, X. *et al.* (2022) ‘Wind lodging-associated yield loss is reduced by wheat genetic diversity’, *European Journal of Agronomy*, 133, p. 126441. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126441>.

Koyshibayev, M. and Muminjanov, H. (2016) ‘Guidelines for monitoring diseases, pests and weeds in cereal crops’.

Kristoffersen, R. *et al.* (2022) ‘Management of Septoria Tritici Blotch Using Cultivar Mixtures’, *Plant Disease*, 106(5), pp. 1341–1349. Available at: <https://doi.org/10.1094/PDIS-01-21-0069-RE>.

Livre Blanc Céréales (2017a) ‘Principaux stades repères de la végétation en céréales’. Available at: <https://www.livre-blanc-cereales.be/wp-content/uploads/2017/01/principaux-stades-reperes-de-la-vegetation-en-cereales.pdf> (Accessed: 15 August 2022).

Livre Blanc Céréales (2017b) ‘Rouille brune – Livre Blanc Céréales’. Available at: <https://www.livre->

- blanc-cereales.be/thematiques/maladies/froment/rouille-brune/ (Accessed: 21 March 2022).
- Livre Blanc Céréales (2017c) ‘Rouille jaune – Livre Blanc Céréales’. Available at: <https://www.livre-blanc-cereales.be/thematiques/maladies/froment/rouille-jaune/> (Accessed: 17 March 2022).
- Livre Blanc Céréales (2017d) ‘Septoriose – Livre Blanc Céréales’. Available at: <https://www.livre-blanc-cereales.be/thematiques/maladies/froment/septoriose/> (Accessed: 15 March 2022).
- Livre Blanc Céréales (no date) ‘Chapitres du Livre Blanc de Septembre 2021 – Livre Blanc Céréales’. Available at: <https://www.livre-blanc-cereales.be/chapitres-du-livre-blanc-de-septembre-2021/> (Accessed: 7 April 2022).
- Mahieu, O. (2020) ‘Résultats d’essais 2020 – Protection fongicide du froment’. Available at: http://www.carah.be/images/experimentation/FRHRapport_Fongi2020.pdf (Accessed: 28 May 2022).
- McCormick (2020) ‘Toutes les données sur la production céréalière’, *McCormick*, 20 July. Available at: <https://www.mccormick.it/fr/toutes-les-donnees-sur-la-production-cerealiere/> (Accessed: 22 February 2022).
- MeteoBelgique (2022) *Archive des stations - Météo en Belgique*. Available at: https://www.meteobelgique.be/index.php?option=com_static&staticfile=realtime-datastationmonth.php&Itemid=392 (Accessed: 27 May 2022).
- Meteoblue (2022) *Archive météo Loncée, meteoblue*. Available at: https://www.meteoblue.com/fr/meteo/historyclimate/weatherarchive/lonz%c3%a9e_belgique_2792117 (Accessed: 23 July 2022).
- Montazeaud, G. *et al.* (2020) ‘Multifaceted functional diversity for multifaceted crop yield: Towards ecological assembly rules for varietal mixtures’, *Journal of Applied Ecology*, 57(11), pp. 2285–2295. Available at: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13735>.
- Mundt, C.C. (2002) ‘Use of Multiline Cultivars and Cultivar Mixtures for Disease Management’, *Annual Review of Phytopathology*, 40(1), pp. 381–410. Available at: <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.40.011402.113723>.
- Neumann, S. *et al.* (2004) ‘Nitrogen per unit leaf area affects the upper asymptote of *Puccinia striiformis* f.sp. *tritici* epidemics in winter wheat’, *Plant Pathology*, 53(6), pp. 725–732. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2004.01107.x>.
- Newton, A. c., Begg, G. s. and Swanston, J. s. (2009) ‘Deployment of diversity for enhanced crop function’, *Annals of Applied Biology*, 154(3), pp. 309–322. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2008.00303.x>.
- Orellana-Torrejón, C. *et al.* (2022) ‘Annual dynamics of *Zymoseptoria tritici* populations in wheat cultivar mixtures: A compromise between the efficacy and durability of a recently broken-down resistance gene?’, *Plant Pathology*, 71(2), pp. 289–303. Available at: <https://doi.org/10.1111/ppa.13458>.
- Pélissier, R. *et al.* (2021) ‘Plant neighbour-modulated susceptibility to pathogens in intraspecific mixtures | Journal of Experimental Botany | Oxford Academic’. Available at: <https://academic.oup.com/jxb/article/72/18/6570/6298513?login=true> (Accessed: 23 February 2022).
- Pope De Vallavieille, C.C. *et al.* (2016) ‘Concevoir des associations variétales de blé pour réduire la progression épidémique de la septoriose: approche théorique et expérimentations au champ’, *Innovations Agronomiques*, 50, pp. 157–170. Available at:

<https://doi.org/10.15454/1.4721162285051362E12>.

Rapilly, F. (1979) ‘Yellow Rust Epidemiology’, *Annual Review of Phytopathology*, 17(1), pp. 59–73. Available at: <https://doi.org/10.1146/annurev.py.17.090179.000423>.

Reiss, E.R. and Drinkwater, L.E. (2018) ‘Cultivar mixtures: a meta-analysis of the effect of intraspecific diversity on crop yield’, *Ecological Applications*, 28(1), pp. 62–77. Available at: <https://doi.org/10.1002/eap.1629>.

Rodriguez-Algaba, J. *et al.* (2021) ‘Two Indigenous Berberis Species From Spain Were Confirmed as Alternate Hosts of the Yellow Rust Fungus *Puccinia striiformis* f. sp. tritici’, *Plant Disease*, 105(9), pp. 2281–2285. Available at: <https://doi.org/10.1094/PDIS-02-21-0269-SC>.

Sharma-Poudyal, D. *et al.* (2013) ‘Virulence Characterization of International Collections of the Wheat Stripe Rust Pathogen, *Puccinia striiformis* f. sp. tritici’, *Plant Disease*, 97(3), pp. 379–386. Available at: <https://doi.org/10.1094/PDIS-01-12-0078-RE>.

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*. phdthesis. AgroParisTech. Available at: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00560282> (Accessed: 22 March 2022).

Statbel (2020) *Exploitations agricoles et horticoles | Statbel*. Available at: <https://statbel.fgov.be/fr/themes/agriculture-peche/exploitations-agricoles-et-horticoles#figures> (Accessed: 21 February 2022).

Syngenta France (2020a) *Rouille brune, Syngenta France*. Available at: <https://www.syngenta.fr/traitements/rouille-brune> (Accessed: 21 March 2022).

Syngenta France (2020b) *Rouille jaune du blé, Syngenta France*. Available at: <https://www.syngenta.fr/traitements/rouille-jaune-du-ble> (Accessed: 18 March 2022).

Tilman, D. *et al.* (2011) ‘Global food demand and the sustainable intensification of agriculture | PNAS’, 108(50), pp. 20260–20264.

Tock, A.J. *et al.* (2021) ‘Crossover-active regions of the wheat genome are distinguished by DMC1, the chromosome axis, H3K27me3, and signatures of adaptation’, *Genome Research*, 31(9), pp. 1614–1628. Available at: <https://doi.org/10.1101/gr.273672.120>.

WalOnMap (2021) *WalOnMap*. Available at: <http://geoportail.wallonie.be/walonmap> (Accessed: 28 March 2022).

Wegulo, S.N. *et al.* (2011) ‘Economic returns from fungicide application to control foliar fungal diseases in winter wheat’, *Crop Protection*, 30(6), pp. 685–692. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.02.002>.

Wiik, L. and Rosenqvist, H. (2010) ‘The economics of fungicide use in winter wheat in southern Sweden’, *Crop Protection*, 29(1), pp. 11–19. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2009.09.008>.

9. Annexes

Annexe 1 : Détail des fongicide et leur mode d'action

Pour la modalité avec protection fongicide complète (2F), le premier traitement a été réalisé au stade 2^{ème} nœud (BBCH 32) avec du Simvéris à une dose de 1 L/ ha combiné à du Stavento à une dose de 1,5 L/ ha. La matière active Simvéris est le Metconazole qui fait partie de la famille des triazoles (Phytoweb, 2015). Cette molécule possède une action systémique, préventive et curative (Bernard, 2014). Ce fongicide permet de lutter contre la septoriose des feuilles et de l'épi, l'oïdium, la fusariose, la rouille brune et la rouille jaune (Phytoweb, 2015). Le Stavento est un fongicide dont la matière active est le Folpet. Cette molécule fait partie de la famille des phtalimides. Cette matière active possède une action systémique préventive et est multisite (Adamna, 2021). Ce fongicide permet de lutter préventivement contre la septoriose des feuilles. Ces deux produits combinés permettent de réduire les risques de résistance de souche de septoriose. Le deuxième traitement à l'épiaison (BBCH 55) a été effectué avec du Vélogy Era. Il est composé de benzovindiflupyr et de prothioconazole (Phytoweb, 2015). Benzovindiflupyr est une matière active qui appartient à la famille des SDHI. Elle a une action préventive et curative (Minnesota Department of Agriculture, 2015). Le Prothioconazole est une matière active de la famille des triazoles (Moreau, 2006). Son mode d'action est préventif et curatif (Sanssené, 2009). Vélogy Era permet de lutter contre la septoriose des feuilles et de l'épi, la fusariose, la rouille brune et la rouille jaune (Phytoweb, 2015).

Pour la modalité avec une protection partielle (1F), le traitement unique a été réalisé au stade dernière feuille (BBCH 39) avec du Revystar Gold combiné à du Stavento. Revystar Gold est composé de fluxapyroxad et de mefentrifluconazole (Phytoweb, 2015). Le Fluxapyroxad est une matière active de la famille des SDHI (Minnesota Department of Agriculture, 2012). Son mode d'action est préventif et curatif (Carpentier, 2011). Le Mefentrifluconazole est une matière active de la famille des triazoles (Minnesota Department of Agriculture, 2019). Cette matière active permet une action rétroactive sur la septoriose (Corteva, 2022). Le Revystar Gold permet de lutter contre la septoriose des feuilles, l'oïdium, la rouille brune et la rouille jaune (Phytoweb, 2015).

Annexe 2 : Plan de l'essai

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
5200	5201	5202	5203	5204	5205	5206	5207	5208	5209	5210	5211	5212	5213	5214	5215	5216	5217	5218	5219	5220	5221
	23	1	20	39	19	37	30	16	25	10	38	17	28	8	31	35	4	15	29	6	34
5100	5101	5102	5103	5104	5105	5106	5107	5108	5109	5110	5111	5112	5113	5114	5115	5116	5117	5118	5119	5120	5121
	18	27	11	9	12	42	14	26	41	24	13	22	33	2	21	7	36	3	40	32	5
5000	5001	5002	5003	5004	5005	5006	5007	5008	5009	5010	5011	5012	5013	5014	5015	5016	5017	5018	5019	5020	5021
	17	22	7	18	26	15	12	20	34	32	42	21	39	29	11	38	31	30	36	8	33
4900	4901	4902	4903	4904	4905	4906	4907	4908	4909	4910	4911	4912	4913	4914	4915	4916	4917	4918	4919	4920	4921
	35	2	28	3	14	10	27	6	40	13	37	5	9	1	16	41	19	24	23	4	25

	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
	5222	5223	5224	5225	5226	5227	5228	5229	5230	5231	5232	5233	5234	5235	5236	5237	5238	5239	5240	5241	5242
5200	2	38	27	19	8	26	24	21	23	33	40	32	37	17	34	5	31	16	25	39	20
5100	5122	5123	5124	5125	5126	5127	5128	5129	5130	5131	5132	5133	5134	5135	5136	5137	5138	5139	5140	5141	5142
	7	41	35	6	28	15	11	4	18	10	3	29	12	30	9	14	22	36	13	1	42
5000	5022	5023	5024	5025	5026	5027	5028	5029	5030	5031	5032	5033	5034	5035	5036	5037	5038	5039	5040	5041	5042
	26	35	29	15	12	18	28	34	8	38	39	24	16	25	30	13	42	22	17	33	14
4900	4922	4923	4924	4925	4926	4927	4928	4929	4930	4931	4932	4933	4934	4935	4936	4937	4938	4939	4940	4941	4942
	1	10	3	9	32	6	37	11	5	7	2	4	23	41	19	27	36	40	20	31	21

Annexe 3 : Echelle BBCH des céréales (Livre Blanc Céréales, 2017).

Légende : **Code** Définition

Stade principal 0 : germination, levée

- 00** semence sèche (caryopse sec)
- 01** début de l'imbibition de la graine
- 03** imbibition complète
- 05** la radicule sort de la graine
- 06** élongation de la radicule, apparition de poils absorbants et développement des racines secondaires
- 07** le coléoptile sort de la graine
- 09** levée: le coléoptile perce la surface du sol

Stade principal 1 : développement des feuilles 1, 2

- 10** la première feuille sort du coléoptile
- 11** première feuille étalée
- 12** 2 feuilles étalées

Stade principal 2 : le tallage³

- 20** aucune talle visible
- 21** début tallage: la première talle est visible
- 22** 2 talles visibles
- 23** 3 talles visibles
- 2 . et ainsi de suite ...**
- 29** fin tallage

Stade principal 3 : élongation de la tige principale

- 30** début montaison: pseudo-tiges et talles dressées, début d'élongation du premier entrenœud, le sommet de l'inflorescence au moins à 1 cm au-dessus du plateau de tallage.
- 31** le premier nœud est au moins à 1 cm au-dessus du plateau de tallage
- 32** le deuxième nœud est au moins à 2 cm au-dessus du premier nœud
- 33** le troisième nœud est au moins à 2 cm au-dessus du deuxième nœud et que la dernière feuille n'est pas encore visible (le stade 33 est rare en froment, on passe le plus souvent du stade 32 au stade 37)

3 . 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 ou de la panicule, montaison

41 début gonflement: élongation 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

47 la gaine foliaire de la dernière feuille s'ouvre

49 les premières arêtes (barbes) sont visibles (pour les variétés aristées)

Stade principal 5 : sortie de l'inflorescence ou épisaison

51 début de l'épisaison: l'extrémité de l'inflorescence est sortie de la gaine, l'épillet supérieur est visible

52 20% de l'inflorescence est sortie

53 30% de l'inflorescence est sortie

54 40% de l'inflorescence est sortie

55 mi-épisaison: 50% de l'inflorescence est sortie

56 60% de l'inflorescence est sortie

57 70% de l'inflorescence est sortie

58 80% de l'inflorescence est sortie

59 fin de l'épisaison: l'inflorescence est complètement sortie de la gaine

Stade principal 6 : floraison, anthèse

61 début floraison, les premières anthères sont visibles

65 pleine floraison, 50% des anthères sont sorties

69 fin floraison, tous les épillets ont fleuri, quelques anthères desséchées peuvent subsister

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: contenu de la graine 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, une empreinte faite avec l'ongle est réversible

87 stade pâteux dur: contenu de la graine dur, une empreinte faite avec l'ongle est irréversible

89 maturation complète: le caryopse est dur et difficile à couper en deux avec l'ongle

Stade principal 9 : sénescence

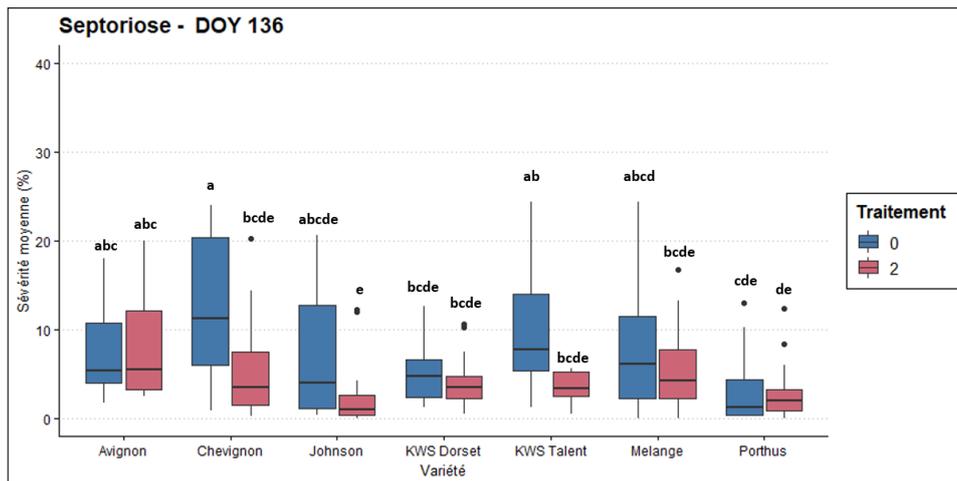
92 sur-maturité: le caryopse est très dur, ne peut pas être marqué à l'ongle

93 des graines se détachent

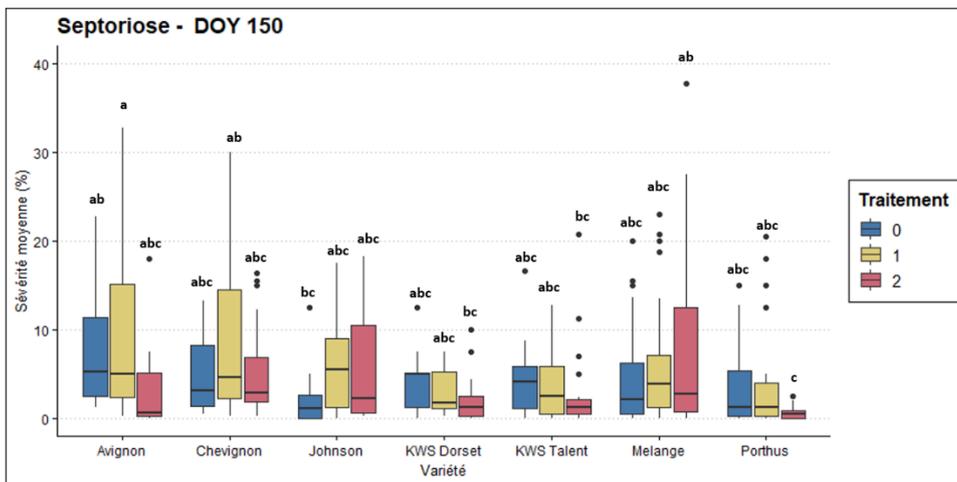
97 la plante meurt et s'affaisse

99 produit après récolte

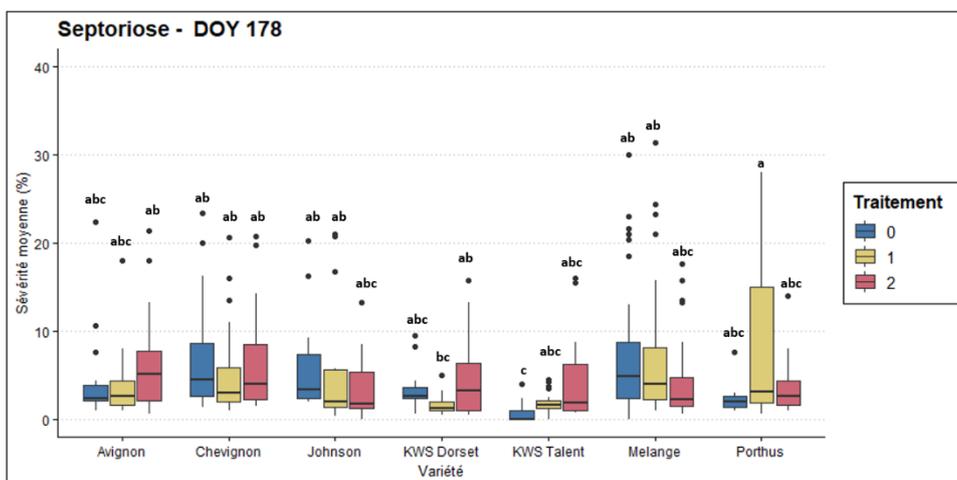
Annexe 4 : Boxplot de la sévérité moyenne lié à la septoriose au DOY 136



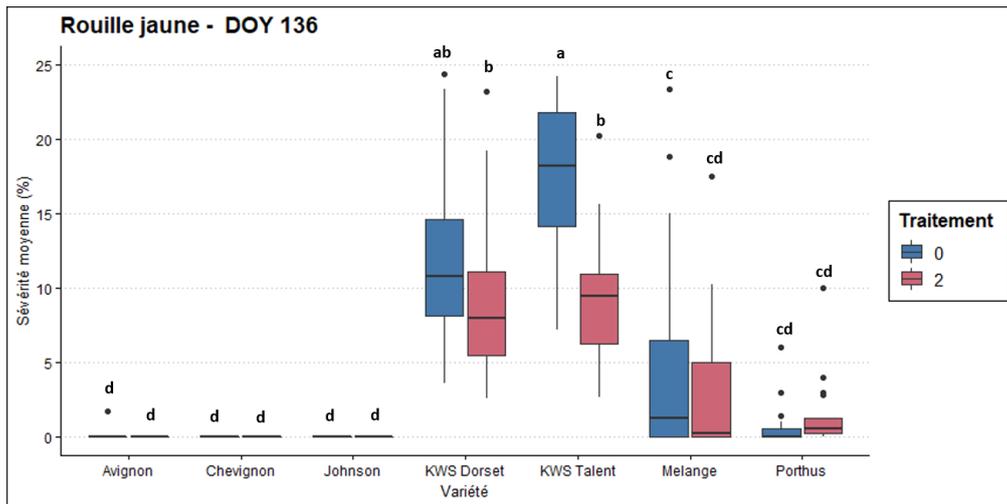
Annexe 5 : Boxplot de la sévérité moyenne lié à la septoriose au DOY 150



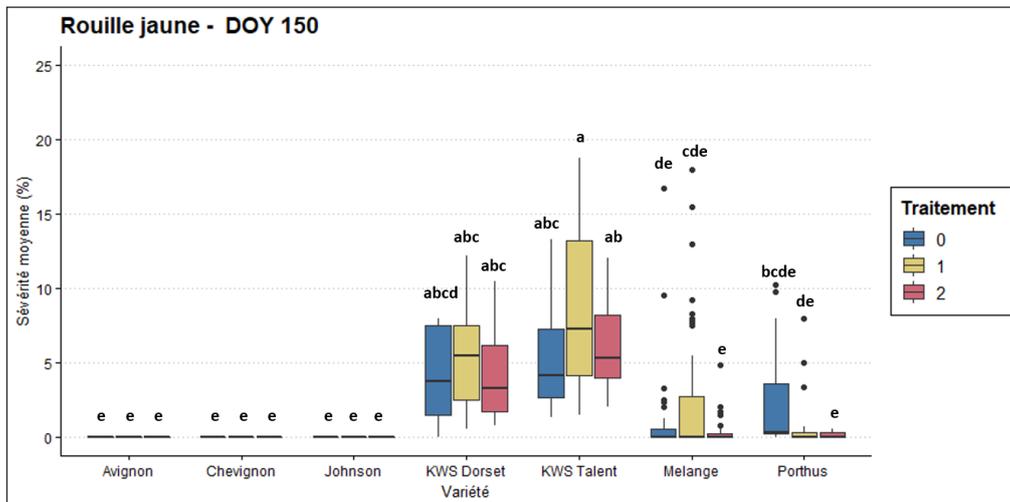
Annexe 6 : Boxplot de la sévérité moyenne lié à la septoriose au DOY 178



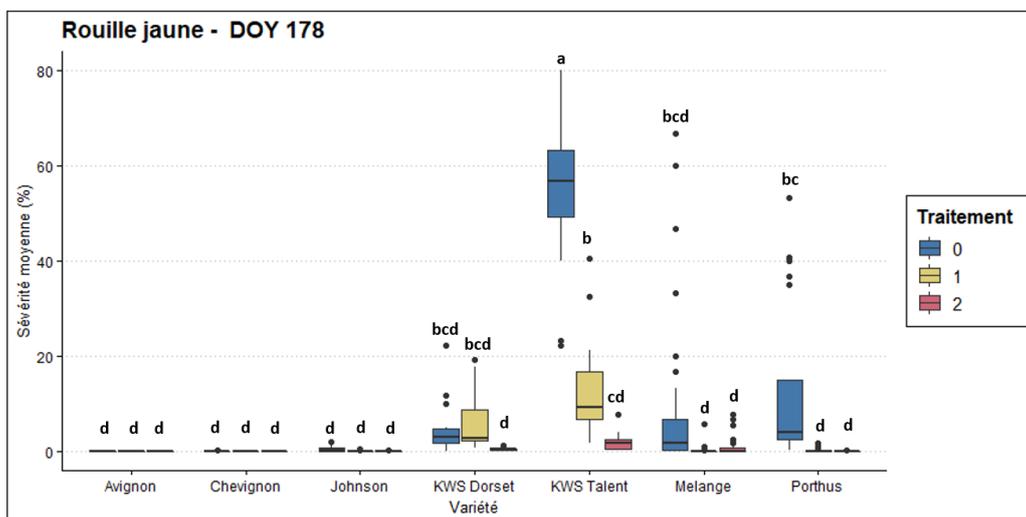
Annexe 7 : Boxplot de la sévérité moyenne lié à la rouille jaune au DOY 136



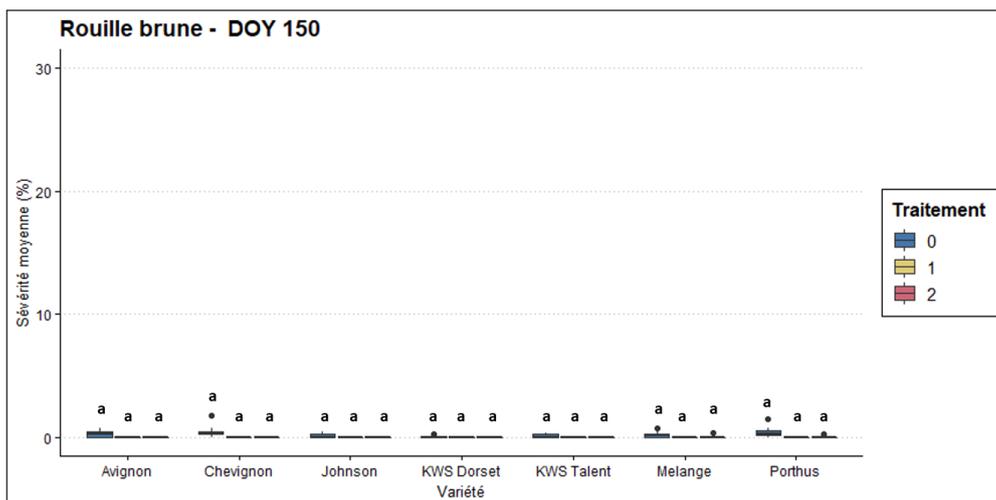
Annexe 8 : Boxplot de la sévérité moyenne lié à la rouille jaune au DOY 150



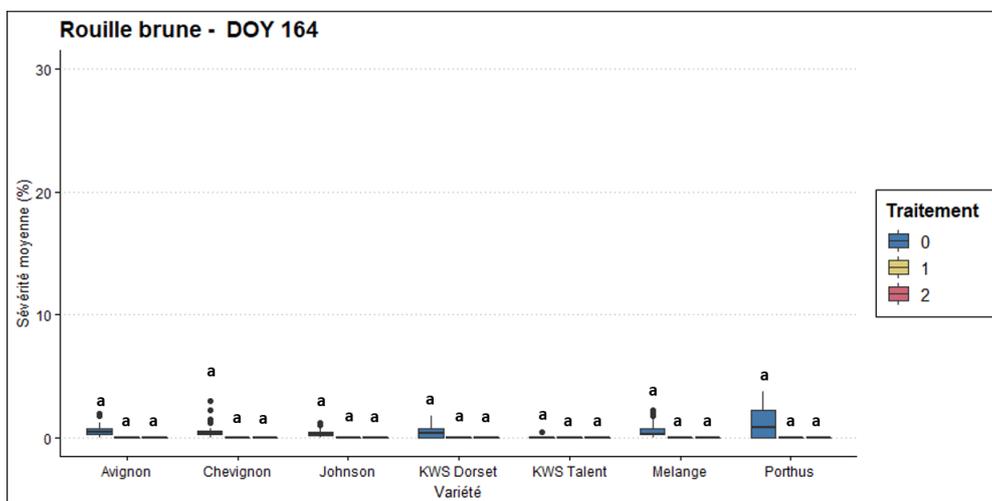
Annexe 9 : Boxplot de la sévérité moyenne lié à la rouille jaune au DOY 178



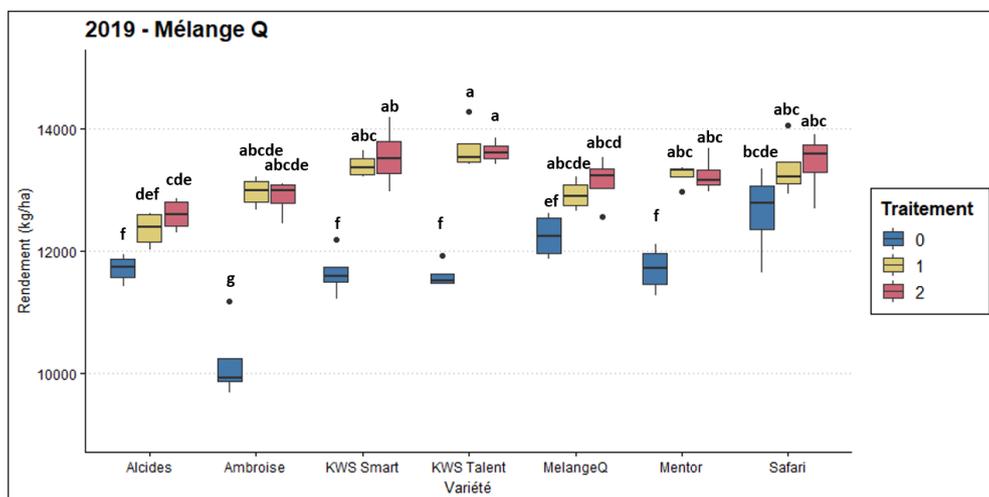
Annexe 10 : Boxplot de la sévérité moyenne lié à la rouille brune au DOY 150



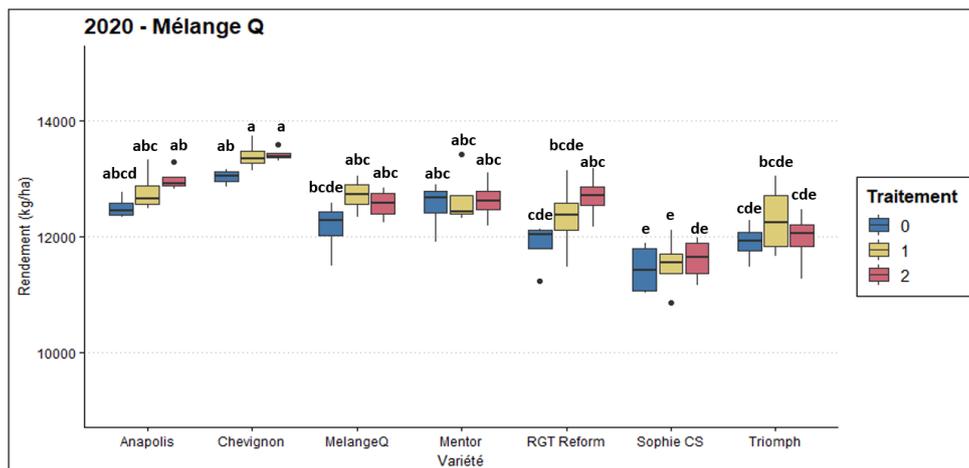
Annexe 11 : Boxplot de la sévérité moyenne lié à la rouille brune au DOY 164



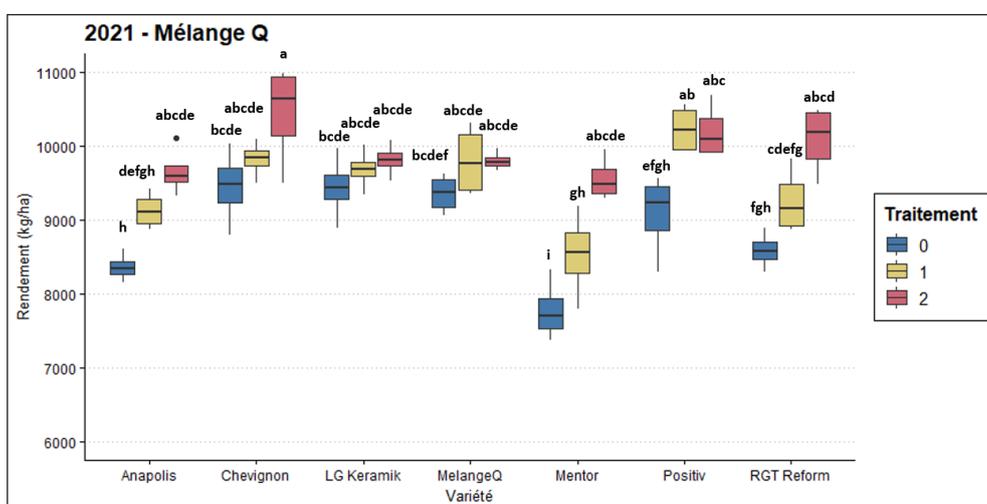
Annexe 12 : Boxplot des rendements agronomiques des variétés composant le mélange Q en 2019



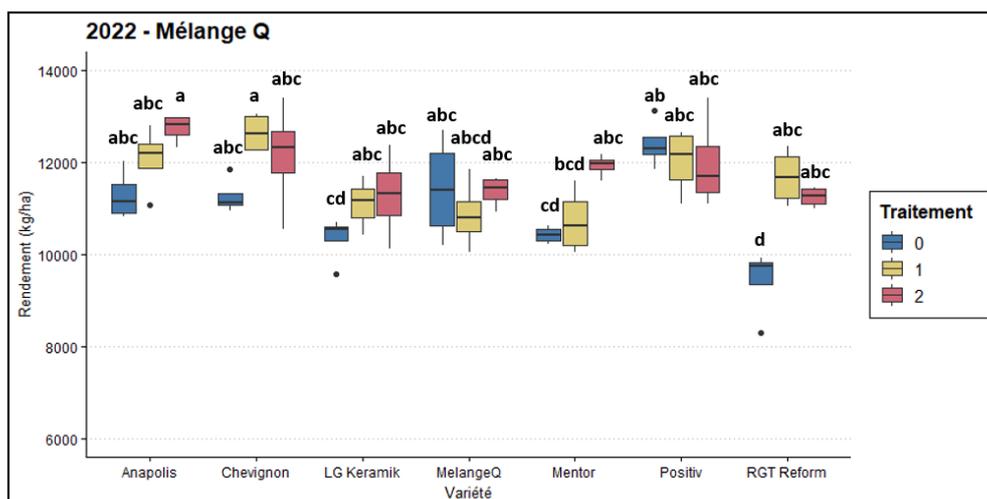
Annexe 13 : Boxplot des rendements agronomiques des variétés composant le mélange Q en 2020



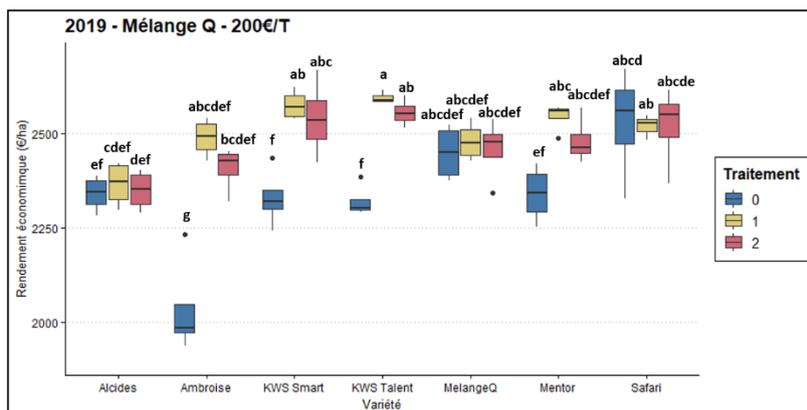
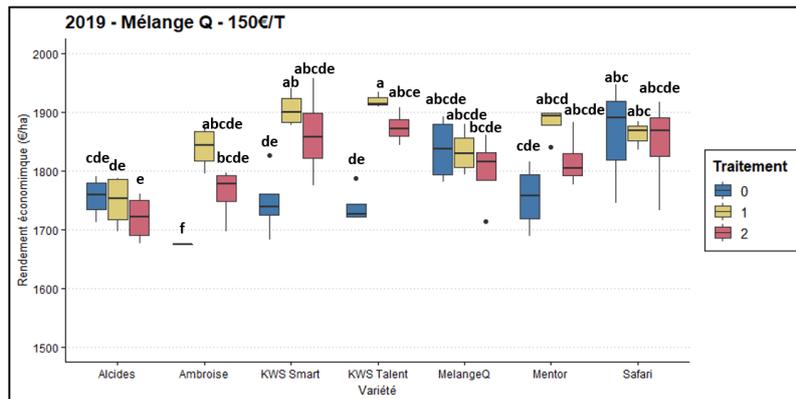
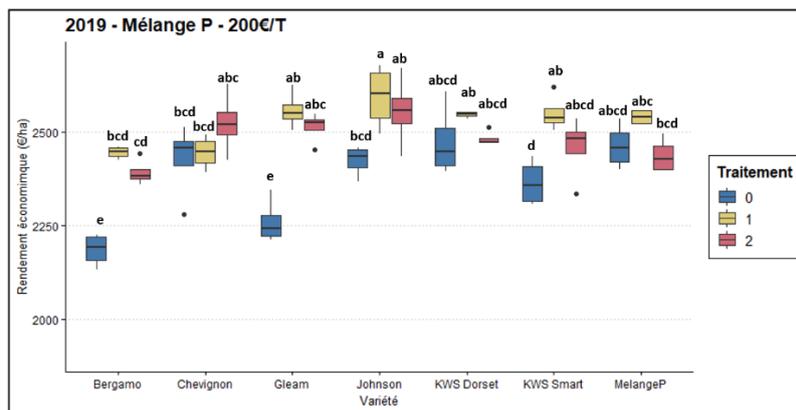
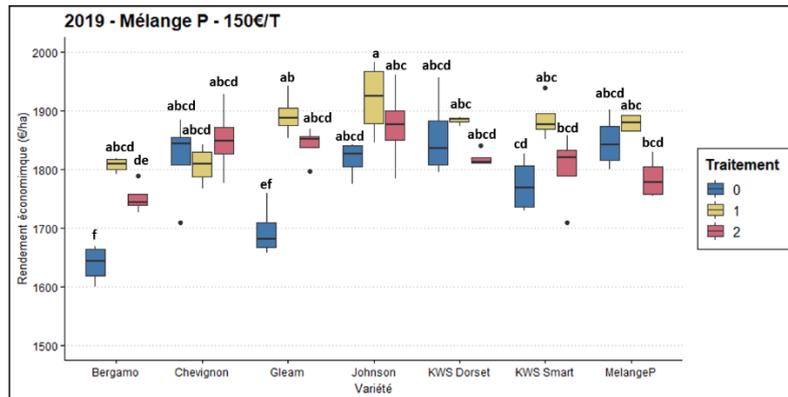
Annexe 14 : Boxplot des rendements agronomiques des variétés composant le mélange Q en 2021



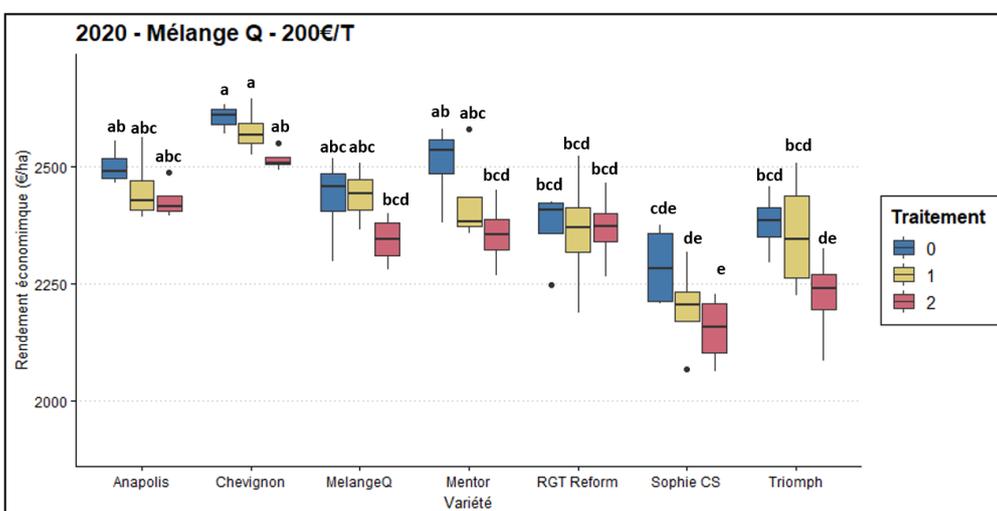
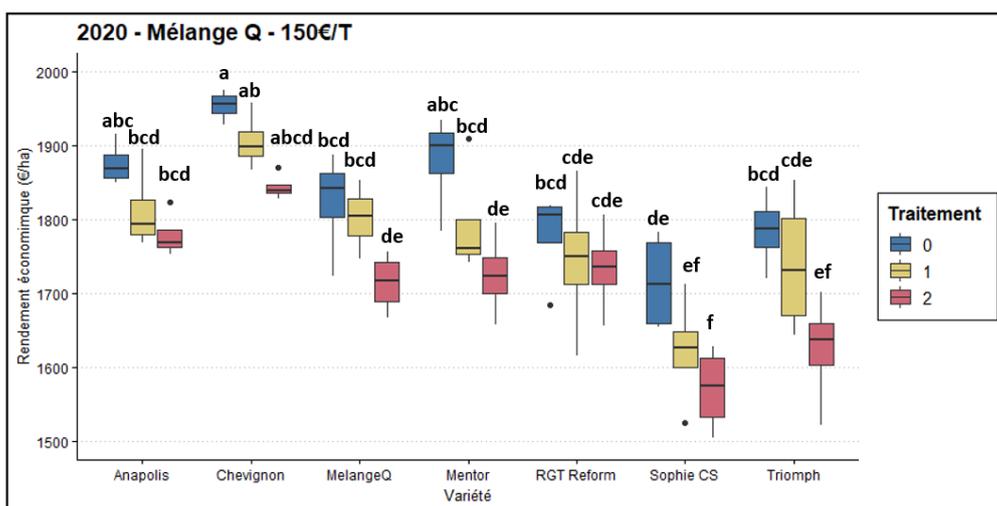
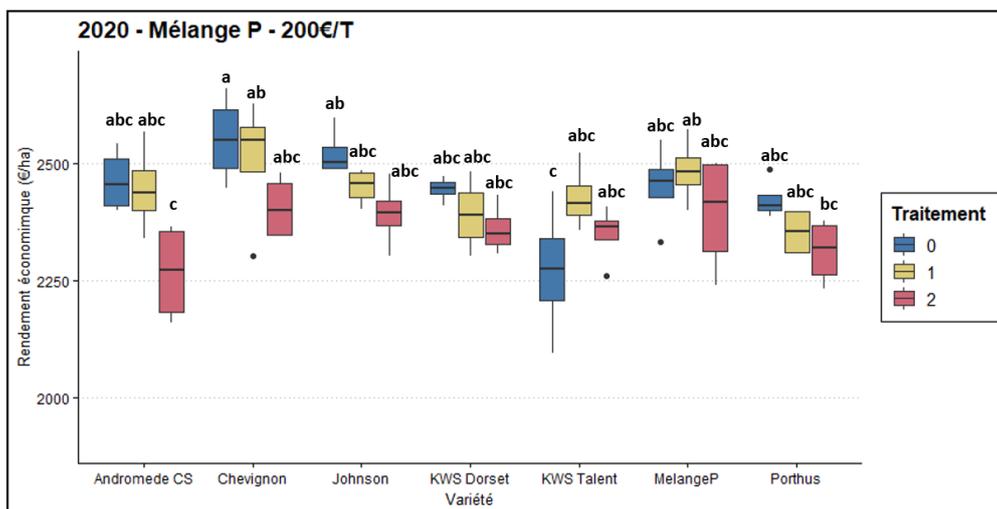
Annexe 15 : Boxplot des rendements agronomiques des variétés composant le mélange Q en 2022



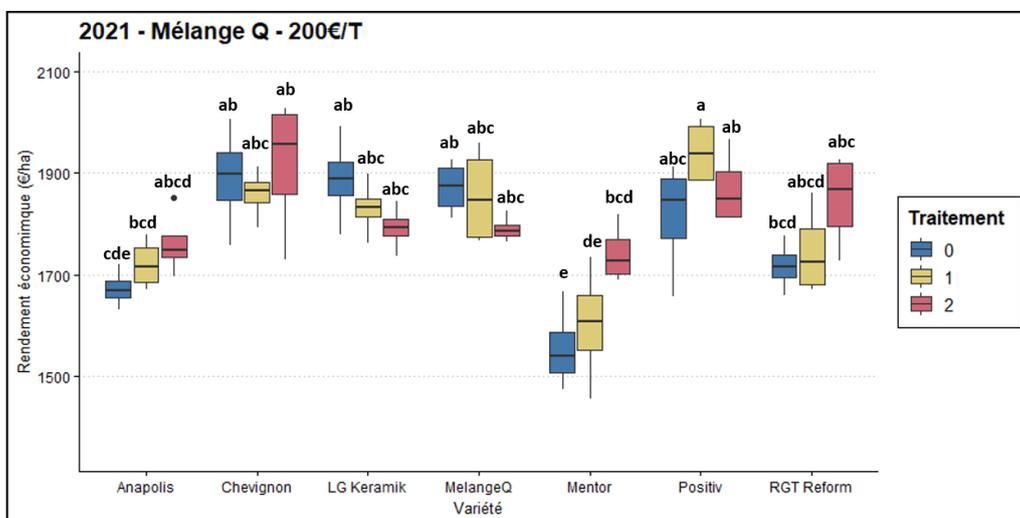
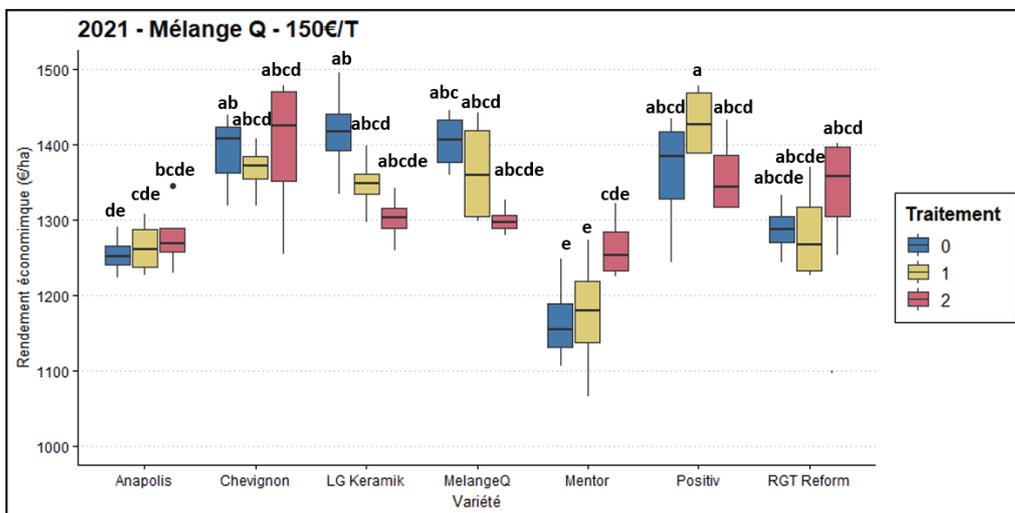
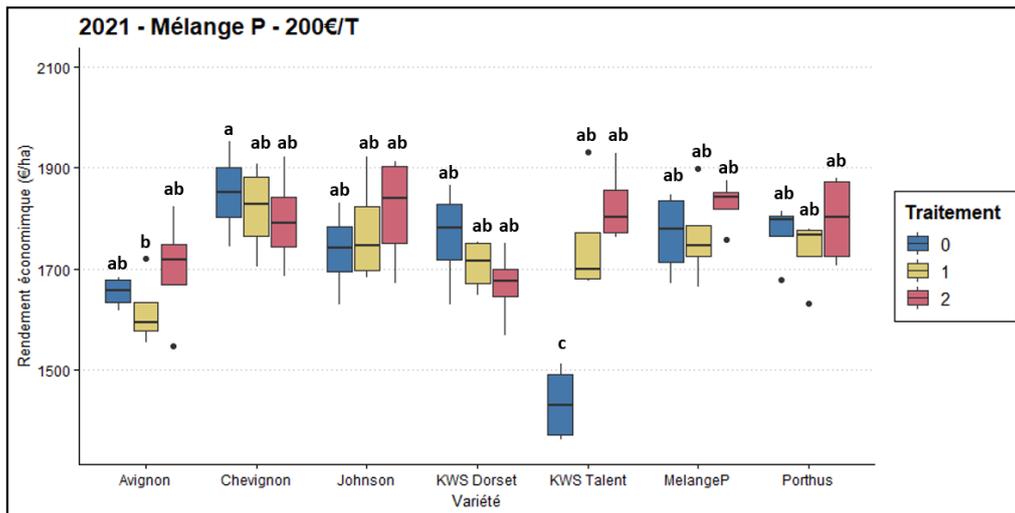
Annexe 16 : Boxplots des rendements économiques des variétés composant les mélanges en 2019



Annexe 17 : Boxplots des rendements économiques des variétés composant les mélanges en 2020



Annexe 18 : Boxplots des rendements économiques des variétés composant les mélanges en 2021



Annexe 19 : Boxplots des rendements économiques des variétés composant les mélanges en 2022

