
Etude de l'effet des conditions climatiques, de l'influence du choix variétal et de l'efficacité des traitements fongicides sur la dynamique des principales maladies fongiques du blé d'hiver

Auteur : Meurs, Rémi

Promoteur(s) : Dumont, Benjamin

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

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

Année académique : 2017-2018

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/5179>

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.

Etude de l'effet des conditions climatiques, de l'influence du choix variétal et de l'efficacité des traitements fongicides sur la dynamique des principales maladies fongiques du blé d'hiver

Meurs Rémi

Année académique
2017-2018

Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Master Bio Ingénieur - Sciences agronomiques

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.

Etude de l'effet des conditions climatiques, de l'influence du choix variétal et de l'efficacité des traitements fongicides sur la dynamique des principales maladies fongiques du blé d'hiver

Meurs Rémi

Année académique
2017-2018

Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Master Bio Ingénieur - Sciences agronomiques

Promoteur : Benjamin Dumont

Remerciements

Je tiens avant tout à remercier mon promoteur Benjamin Dumont sans qui ce projet n'aurait pas eu lieu. Je tiens aussi à le remercier pour l'aide et le soutien apportés tout au long de ce travail de fin d'études.

Je remercie également toute l'équipe de l'unité de phytotechnie et de la ferme expérimentale et, plus particulièrement, Jérôme Pierreux, Rémy Blanchard et Laurent Quertinmont pour avoir pris le temps de répondre à mes questions, ainsi que Carine Demazy pour l'aide apportée durant les cotations.

J'adresse également un grand remerciement à Margot Pion pour tout le soutien et les innombrables relectures réalisées au cours de ce travail.

Je remercie tous les étudiants ayant réalisé leur TFE dans l'unité de phytotechnie pour l'aide apportée. De plus, je remercie François Duchesne et Françoise Vanoverbeke pour m'avoir soutenu ainsi que pour les bons moments partagés avec eux.

Je remercie finalement ma famille pour le soutien qu'elle m'a apporté au cours de mes années d'études et de la rédaction de ce mémoire.

Résumé

Le blé est la culture la plus répandue en Belgique et la deuxième céréale cultivée à travers le monde. Il représente un enjeu majeur dans de nombreux pays. En effet, le blé est un produit incontournable principalement dans l'alimentation humaine et animale. En Belgique, les trois principales maladies du froment sont : la septoriose (*Zymoseptoria tritici*), la rouille jaune (*Puccinia striiformis*) et la rouille brune (*Puccinia triticina*). C'est pourquoi ce travail s'est attardé sur ces trois maladies, et ce, malgré la présence d'autres maladies en Belgique. Cette étude a été réalisée en dynamique et porte sur l'influence de trois principaux facteurs, à savoir : la date de semis, la variété et le traitement fongicide.

L'année 2018 a été propice au développement de la rouille brune mais dans une moindre mesure au développement de la rouille jaune. L'étude en dynamique a apporté des informations sur la manière dont les maladies se propagent sur les plantes, ainsi que sur l'influence de la date de semis et de la résistance variétale dans le développement des trois principales maladies du blé.

L'étude de l'influence du génotype dans l'expression des gènes de résistance a confirmé que les stades de développement avaient une influence sur le développement de la rouille brune et de la rouille jaune. Ce phénomène n'a, par contre, pas pu être observé pour la septoriose.

L'analyse de l'efficacité des traitements fongicides a permis de montrer que l'application de deux traitements fongicides ne permettait pas toujours d'obtenir de meilleurs résultats pour le contrôle des rouilles que l'application d'un traitement unique. Pour la septoriose par contre, l'application de deux traitements limite plus efficacement le développement de cette maladie qu'un seul traitement.

Mots clés : blé, dynamique, *Zymoseptoria tritici*, *Puccinia striiformis*, *Puccinia triticina*, génotype, fongicide, résistance.

Abstract

Wheat is the most cultivated cereal in Belgium and the second most cultivated throughout the world. It is a major issue in many countries. Indeed, wheat is an essential product, particularly in human and animal nutrition. In Belgium, there are three main wheat diseases: septoria (*Zymoseptoria tritici*), yellow rust (*Puccinia striiformis*) and brown rust (*Puccinia triticina*). This paper tackles those three diseases, despite other ones being diagnosed in Belgium. The dynamic research was based on the influence of 3 main factors: sowing date, variety and fungicide treatment.

This study showed that the 2017–2018 season was favourable to the development of the brown rust, but not of the yellow rust. The dynamic test provided information regarding the way the diseases spread on the plants and how the sowing date and varietal resistance had an impact on their development.

The study of the influence of the genotype on the resistance gene expression confirmed that phaenological stages had an impact on the progress of yellow and brown rust, but it could not be observed on septoria.

The analysis of the fungicide treatments' efficacy suggests that the application of two fungicide treatments did not always provide better results regarding the control of rust than the application of one single treatment. As far as septoria is concerned, however, the application of two treatments limited more efficiently the growth of the disease than one single treatment.

Keywords : wheat, dynamic, *Zymoseptoria tritici*, *Puccinia striiformis*, *Puccinia triticina*, genotype, fungicide, resistance.

Table des matières

1.	Introduction	1
2.	Etat de l'art	2
2.1.	Froment d'hiver : état des lieux et perspectives	2
2.2.	Maladies étudiées	2
2.2.1.	Septoriose	2
2.2.1.1.	Classification	2
2.2.1.2.	Cycle de la septoriose	3
2.2.1.3.	Dynamique et propagation	4
2.2.1.4.	Symptômes	5
2.2.1.5.	Impact	5
2.2.1.6.	Influence des facteurs climatiques	5
2.2.1.7.	Influence du génotype	6
2.2.1.8.	Facteurs agronomiques influençant le développement de la septoriose	7
2.2.2.	Rouille jaune	7
2.2.2.1.	Classification	7
2.2.2.2.	Cycle de la rouille jaune	8
2.2.2.3.	Symptômes	9
2.2.2.4.	Impact	10
2.2.2.5.	Influence des facteurs climatiques	10
2.2.2.6.	Influence du génotype	12
2.2.2.7.	Facteurs agronomiques influençant le développement de la rouille jaune	12
2.2.3.	Rouille brune	13
2.2.3.1.	Classification	13
2.2.3.2.	Cycle de la rouille brune	13
2.2.3.3.	Symptômes	14
2.2.3.4.	Impact	15
2.2.3.5.	Influence des facteurs climatiques	15
2.2.3.6.	Influence du génotype	16
2.2.3.7.	Facteurs agronomiques influençant le développement de la rouille brune	17
3.	Objectifs	18
4.	Matériel et méthode	19
4.1.	Site expérimental	19
4.2.	Itinéraire phytotechnique	19
4.3.	Données météorologiques et prédition du développement des maladies	20

4.4.	Dispositif et conditions expérimentales.....	20
4.4.1.	Dispositif expérimental	20
4.4.2.	Dates de semis	21
4.4.3.	Variétés.....	22
4.4.4.	Modalités de traitements fongicides.....	22
4.5.	Relevés de terrain et cotations des maladies fongiques.....	24
4.5.1.	Echantillonnage en champ.....	24
4.5.2.	Détermination des stades.....	24
4.5.3.	Cotation des maladies fongiques	24
4.6.	Traitement des données	26
4.6.1.	Comparaison des cinq variétés	26
4.6.2.	Dynamique de la maladie	26
4.6.3.	Influence des stades.....	26
4.6.4.	Efficacité des traitements fongicides	27
5.	Résultats	28
5.1.	Description des conditions météorologiques de la saison culturelle 2017-2018.....	28
5.2.	Dynamique des maladies.....	29
5.2.1.	Septoriose	29
5.2.1.1.	Comparaison des cinq variétés	29
5.2.1.2.	Description des variétés par étage foliaire.....	31
5.2.1.3.	Interprétation des résultats.....	33
5.2.2.	Rouille jaune.....	35
5.2.2.1.	Comparaison des cinq variétés	35
5.2.2.2.	Description des variétés par étage foliaire.....	37
5.2.2.3.	Interprétation des résultats	39
5.2.3.	Rouille brune	40
5.2.3.1.	Comparaison des cinq variétés	40
5.2.3.2.	Description des variétés par étages foliaires.....	42
5.2.3.3.	Interprétation des résultats	44
5.3.	Influence du génotype	46
5.3.1.	Septoriose	46
5.3.1.1.	Description des résultats pour la septoriose	47
5.3.1.2.	Interprétation des résultats	47
5.3.2.	Rouille jaune.....	48
5.3.2.1.	Description des résultats pour la rouille jaune.....	49
5.3.2.2.	Interprétation des résultats	49

5.3.3.	Rouille brune	51
5.3.3.1.	Description des résultats pour la rouille brune	52
5.3.3.2.	Interprétation des résultats.....	52
5.4.	Efficacité des traitements fongicides.....	54
5.4.1.	Description des différences entre les traitements sur la variété Benchmark	54
5.4.1.1.	Septoriose	56
5.4.1.2.	Rouille jaune.....	56
5.4.1.3.	Rouille brune	57
5.4.2.	Description des différences entre les traitements sur la variété Alcides	57
5.4.2.1.	Septoriose	59
5.4.2.2.	Rouille jaune.....	59
5.4.2.3.	Rouille brune	59
5.4.3.	Interprétation des résultats.....	59
5.4.3.1.	Septoriose	59
5.4.3.2.	Rouille jaune.....	60
5.4.3.3.	Rouille brune	61
6.	Conclusions et perspectives.....	63
7.	Bibliographie	65

Table des figures

Figure 1 : Cycle de la septoriose causé par <i>Zymoseptoria tritici</i> (Livre blanc Céréales : Septoriose, 2017).....	3
Figure 2 : Dynamique annuelle des épidémies de septoriose du blé (dues à <i>Zymoseptoria tritici</i>) selon Gigot (2013). Légende : Flèches rouges : ascospores ; flèches bleues : pycnidiospores, l'épaisseur des flèches est proportionnelle à l'importance attendue du mécanisme considéré.....	4
Figure 3 : Symptômes de septoriose (Livre Blanc Céréales : Septoriose, 2017)	5
Figure 4 : Cycle biologique de <i>Puccinia striiformis</i> f.sp. <i>tritici</i> (Bahri, 2008)	9
Figure 5 : (A) Feuille recouverte par des pustules de rouille jaune (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017) ; (B) Pustules noires contenant des téleutospores (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017).....	9
Figure 6 : Répartition géographique de la rouille jaune (Wellings, 2011)	10
Figure 7 : Cycle de <i>Puccinia triticina</i> Erik. (Bolton et al., 2008)	13
Figure 8 : (A) Photo de rouille brune sur feuille de blé prise le 08-05-2018, (B) Comparaison des rouilles : pustule de rouille brune à gauche (entourée en rouge) et pustules de rouille jaune à droite (encadrées en jaune) (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017).....	14
Figure 9 : Vue aérienne du champ expérimental de Lonzée (Google Maps, 2018)	19
Figure 10 : (A) Organisation des blocs, champs d'essais variétés 2018 ; (B) Répartition des variétés et des traitements fongicides à l'intérieur du sous-bloc R1, semis d'octobre (FH18-01)	21
Figure 11 : Schéma d'une parcelle du dispositif expérimental	21
Figure 12 : Période d'infection par les maladies fongiques touchant le froment et positionnement des traitements fongiques (Duvivier et al.,2018)	23
Figure 13 : Plante décortiquée	25
Figure 14 : Echelle de cotation : Septoriose (Koyshibayev and Muminjanov, 2016)	25
Figure 15 : Echelle de cotation : Rouilles (Koyshibayev and Muminjanov, 2016)	25
Figure 16 : Conditions météorologiques 2017-2018	28
Figure 17 : Evolution de la sévérité moyenne de la septoriose sur les 5 variétés au cours du suivi (comparaison des deux dates de semis), (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre	29
Figure 18 : Sévérité de la septoriose par étage foliaire sur la variété sensible Triomph ; (A) semis d'octobre ; (B) semis de novembre	31
Figure 19 : Sévérité de la septoriose par étage foliaire sur la variété sensible aux trois maladies Benchmark ; (A) semis d'octobre ; (B) semis de novembre	32
Figure 20 : Sévérité de la septoriose par étage foliaire sur la variété résistante aux trois maladies Alcides ; (A) semis d'octobre ; (B) semis de novembre	33
Figure 21 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille jaune sur les 5 variétés au cours du suivi (comparaison des deux dates de semis), (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre	35
Figure 22 : Sévérité de la rouille jaune par étage foliaire sur la variété sensible RGT Reform ; (A) semis d'octobre ; (B) semis de novembre	37
Figure 23 : Sévérité de la rouille jaune par étage foliaire sur la variété sensible aux trois maladies Benchmark ; (A) semis d'octobre ; (B) semis de novembre	38
Figure 24: Sévérité de la rouille jaune par étage foliaire sur la variété résistante aux trois maladies Alcides ; (A) semis d'octobre ; (B) semis de novembre	38
Figure 25: Evolution de la sévérité moyenne de la rouille brune sur les 5 variétés au cours du suivi (comparaison des deux dates de semis), (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre	40
Figure 26: Sévérité de la rouille brune par étage foliaire sur la variété sensible Edgar ; (A) semis d'octobre ; (B) semis de novembre	42

Figure 27 : Sévérité de la rouille brune par étage foliaire sur la variété sensible aux trois maladies Benchmark ; (A) semis d'octobre ; (B) semis de novembre.....	43
Figure 28: Sévérité de la rouille brune par étage foliaire sur la variété résistante aux trois maladies Alcides ; (A) semis d'octobre ; (B) semis de novembre	43
Figure 29 : Comparaison de la sévérité de la septoriose en fonction des stades de développement (le graphique représente la prédition du risque d'infection par la septoriose (%) fournies par « Pessl instruments »).....	46
Figure 30: Comparaison de la sévérité de la rouille jaune en fonction des stades de développement (le graphique représente la prédition du risque d'infection par la rouille jaune (%) fournies par « Pessl instruments »).....	48
Figure 31 : Comparaison de la sévérité de la rouille brune en fonction des stades de développement (le graphique représente la prédition du risque d'infection par la rouille brune (%) fournies par « Pessl instruments »).....	51
Figure 32 : Efficacité des traitements fongicides pour les 3 maladies sur la variété Benchmark, semis d'octobre	54
Figure 33 : Efficacité des traitements fongicides pour les 3 maladies sur la variété Benchmark, semis de novembre	55
Figure 34 : Efficacité des traitements fongicides pour les 3 maladies sur la variété Alcides, semis d'octobre	57
Figure 35 : Efficacité des traitements fongicides pour les 3 maladies sur la variété Alcides, semis de novembre	58

Table des tableaux

Tableau 1 : Classification et nomenclature des formes sexuées de <i>S. tritici</i> et <i>S. nodorum</i> (Bensch,) ...	3
Tableau 2 : Classification de <i>Puccinia Striiformis</i> f.sp. <i>tritici</i> Erikss (Amil, 2016)	8
Tableau 3 : Conditions environnementales nécessaires au développement la rouille jaune (Roelfs et al.,1992).....	11
Tableau 4 : Classification de <i>Puccinia triticina</i> Erik. (Bolton et al., 2008)	13
Tableau 5 : Conditions environnementales nécessaires du développement de la rouille brune (Roelfs et al.,1992).....	16
Tableau 6 : Opérations culturales effectuées sur les parcelles	19
Tableau 7 : Caractéristiques des variétés suivies au cours de l'expérimentation (Meza et al., 2017)...	22
Tableau 8 : Traitements fongicides	23
Tableau 9 : Comparaison de la sévérité de la septoriose sur les 5 variétés au cours de la saison culturelle, pour le semis d'octobre en l'absence de traitement fongicide (T0) - Résultats des tests post-hoc SNK.....	29
Tableau 10 : Comparaison de la sévérité de la septoriose sur les 5 variétés au cours de la saison culturelle, pour le semis de novembre en l'absence de traitement fongicide (T0) - Résultats des tests post-hoc SNK	30
Tableau 11 : Comparaison de la sévérité de la rouille jaune sur les 5 variétés au cours de la saison culturelle, pour le semis d'octobre en l'absence de traitement fongicide (T0) - Résultats des tests post-hoc SNK	35
Tableau 12 : Comparaison de la sévérité de la rouille jaune sur les 5 variétés au cours de la saison culturelle, pour le semis de novembre en l'absence de traitement fongicide (T0) - Résultats des tests post-hoc SNK	36
Tableau 13 : Comparaison de la sévérité de la rouille brune sur les 5 variétés au cours de la saison culturelle, pour le semis d'octobre en l'absence de traitement fongicide (T0) - Résultats des tests post-hoc SNK	40
Tableau 14 : Comparaison de la sévérité de la rouille brune sur les 5 variétés au cours de la saison culturelle, pour le semis de novembre en l'absence de traitement fongicide (T0) - Résultats des tests post-hoc SNK	41
Tableau 15 : Résultats des tests SNK de comparaison de l'efficacité des traitements fongicides (0T, 1T, 2T), sur la variété Benchmark, pour les deux dates de semis. Les résultats sont rapportés pour différentes dates d'observations (DOY), correspondant en moyenne à un temps de rémanence de l'effet du produit par rapport à la date d'application.....	55
Tableau 16 : Résultats des tests SNK de comparaison de l'efficacité des traitements fongicides (0T, 1T, 2T), sur la variété Alcides, pour les deux dates de semis. Les résultats sont rapportés pour différentes dates d'observations (DOY), correspondant en moyenne à un temps de rémanence de l'effet du produit par rapport à la date d'application.....	58

1. Introduction

Le froment est la deuxième céréale cultivée à travers le monde. En Belgique, elle représente 36% des surfaces cultivées (FAO, 2018 ; Statbel, 2017). Depuis des années, avec l'intensification des systèmes de production, les maladies fongiques causent énormément de problèmes aux agriculteurs.

En Belgique, trois maladies sont particulièrement présentes : la septoriose (*Zymoseptoria tritici*), la rouille jaune (*Puccinia striiformis*) et la rouille brune (*Puccinia triticina*). Ces trois maladies peuvent, si elles ne sont pas contrôlées, avoir un impact important sur le rendement. Selon Morais (2015), la septoriose peut provoquer des pertes allant jusqu'à 40%. La rouille jaune peut causer des pertes allant jusqu'à 70% (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017). Pour la rouille brune, les pertes peuvent s'élever jusqu'à 30% (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017). Pour cette raison, l'utilisation de fongicides dans l'agriculture conventionnelle s'est généralisée dans toute l'Europe.

Cependant, depuis quelques années, l'agriculture ne peut plus uniquement se contenter de produire mais doit répondre à de nouveaux enjeux qui sont à la fois sociaux et environnementaux. Une large partie de la population s'est rendue compte de l'impact de l'agriculture sur l'environnement et sur la santé humaine, l'agriculture se doit donc d'être plus propre et ce, notamment en réduisant l'utilisation de produits phytosanitaires, d'intrants chimiques, etc. (Actu environnement, 2009). De plus, face au changement climatique, une partie de l'Europe, dont la Belgique, va faire face à une augmentation des risques liés aux ravageurs et aux maladies fongiques (Tröschler).

C'est dans ce contexte que de nouvelles recherches ont été lancées afin de mieux appréhender les maladies. Pour Savari et al. (2016), il est essentiel de disposer de ces mesures de sévérité de la maladie aux différents stades de développement de la culture. En effet, ces informations pourront permettre de déterminer les facteurs associés à l'inoculation primaire du champ et à l'intensification des maladies. C'est, en effet, de cette compréhension que viendra un meilleur contrôle des maladies et une extensification de l'utilisation d'intrants chimiques.

C'est pourquoi l'objectif de ce travail a été de suivre la dynamique de la septoriose, de la rouille jaune et de la rouille brune. A partir des informations recueillies, la dynamique générale, l'impact des traitements fongicides et l'influence du génotype dans l'expression des résistances aux maladies ont été analysés.

2. Etat de l'art

2.1. Froment d'hiver : état des lieux et perspectives

Le froment est l'une des cultures les plus répandues à travers le monde. Il s'agit de la deuxième céréale la plus cultivée au monde, la première étant le maïs. Durant la saison 2016-2017, la production mondiale de froment s'est chiffrée à 757.2 millions de tonnes avec une utilisation de 734.8 millions de tonnes (FAO, 2018).

En 2016, les principaux producteurs de blé étaient : l'Union européenne (134.8 millions de tonnes), suivie de la Chine (128.6 millions de tonnes) et de l'Inde (93.5 millions de tonnes) (Graphagri, 2017). En Europe, les principaux producteurs sont la France (27.6 millions de tonnes), l'Allemagne (24.3 millions de tonnes) et le Royaume-Uni (14.4 millions de tonnes) (Eurostat, 2017).

La Belgique, quant à elle, produit 1.4 millions de tonnes. Le froment d'hiver représente 36% des surfaces cultivées en Belgique ce qui en fait la première culture du pays. Avec une moyenne sur ces cinq dernières années de 8,7 tonnes à l'hectare, la Belgique se montre très performante au niveau des rendements (Statbel, 2017).

Depuis quelques années, les stocks sont en croissance ce qui a pour conséquence une baisse du prix du froment. Cependant, la FAO prévoit une diminution, dans le futur, de la production avec une utilisation qui continuera à croître : les stocks devraient donc diminuer ce qui sera favorable au prix du froment et pourrait redonner l'intérêt d'autan pour cette culture auprès des agriculteurs (FAO, 2018).

De plus, le blé est un produit incontournable qui est valorisé sous diverses formes regroupées sous l'appellation des « 4F » ; « Food » (alimentation humaine) ; « Feed » (alimentation animale) ; « Fuel » (valorisation énergétique avec la production de bio fuel) ; « Fiber » (valorisation « matière »). En Belgique, la valorisation principale du blé reste l'alimentation animale avec 45% de la production belge. La valorisation dans l'alimentation humaine est très marginale avec seulement 9% de la production. En effet, le blé produit en Belgique ne répond pas aux exigences de qualité demandées par les meuneries et ce, principalement au niveau de la teneur en protéines. Enfin, environ 27% de la production de blé est utilisée pour produire du bioéthanol (Delcour et al., 2014).

Vu l'importance de cette culture en Europe et à travers le monde, celle-ci mérite d'être au centre de l'attention. En effet, la production de blé, en termes de qualité et de quantité, est fortement influencée par les facteurs climatiques. De plus, des améliorations peuvent être faites au niveau agronomique avec, notamment, une amélioration de la lutte contre les maladies, celle-ci passant avant tout par une meilleure connaissance de ces dernières.

2.2. Maladies étudiées

2.2.1. Septoriose

2.2.1.1. Classification

La septoriose est causée par deux champignons : *Zymoseptoria tritici* (anciennement *Mycosphaerella graminicola*) qui est actuellement l'espèce dominante en Belgique et *Phaeosphaeria nodorum* qui est retrouvé de manière sporadique dans les champs wallons (Livre Blanc Céréales : Septoriose, 2017). Ces champignons ont une première phase biotrophe qui a lieu du début du cycle jusqu'à la fin de la phase de latence. Ensuite, ils passent par une phase nécrotrophe pendant la sporulation (Slimane, 2011).

Tableau 1 : Classification et nomenclature des formes sexuées de *S. tritici* et *S. nodorum* (Bensch,)

	<i>S. tritici</i>	<i>S. nodorum</i>
Ordre	Dothideales	Pleosporales
Famille	Mycosphaerellaceae	Phaeosphaeriaceae
Genre	Mycosphaerella	Phaeosphaeria
Espèce (forme sexuée)	<i>M. graminicola</i> [Fückel] Schroeter	<i>Phaeosphaeria nodorum</i> Müller
Autre nom de l'agent fungique	Septoria tritici blotch	Septoria nodorum blotch

2.2.1.2. Cycle de la septoriose

Ci-après, la figure 1 représente le cycle de la septoriose. Durant l'intersaison, le champignon va survivre sur les repousses et les résidus de culture (5). Ensuite, durant l'automne et l'hiver, les périthèces¹ vont libérer des ascospores (spores issues de la reproduction sexuée) dans l'air. Les ascospores vont être transportées sur de longues distances par le vent et vont permettre l'inoculation primaire du champ. Dans le cas d'un précédent froment, l'inoculation primaire peut également être causée par des pycnidiospores (spores issues de la reproduction asexuée) libérées à partir des résidus de culture (Figure 2). L'infection par les spores se produira, dans les deux cas, à partir des stomates des feuilles (1) (Livre Blanc Céréales : Septoriose, 2017).

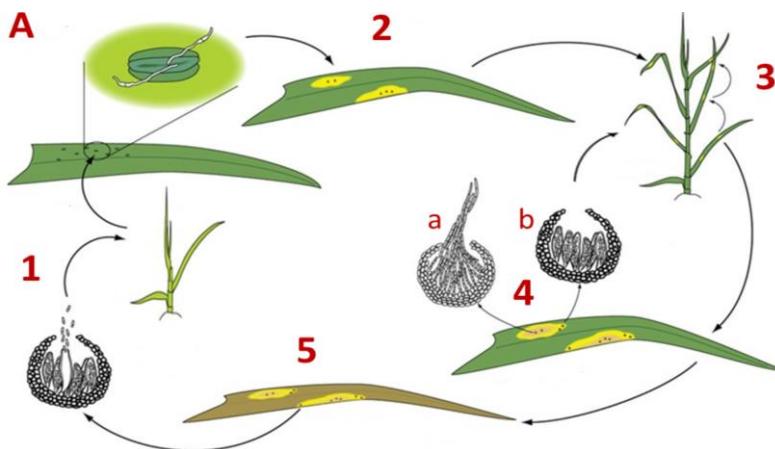


Figure 1 : Cycle de la septoriose causé par *Zymoseptoria tritici* (Livre blanc Céréales : Septoriose, 2017)

La reproduction sexuée continue tout au long de la saison mais n'est pas la cause principale de la propagation du champignon dans le champ (Livre Blanc Céréales : Septoriose, 2017). En effet, une propagation secondaire de la septoriose a lieu : le champignon développé sur les plantes de blé produit des structures reproductrices appelées pycnidies (petites taches noires), permettant la multiplication asexuée (2). Celles-ci libèrent des pycnidiospores qui sous l'action des éclaboussures de la pluie se

¹ Fructifications, en forme de bouteille, des champignons ascomycètes (groupe des pyrénomycètes), renfermant les asques (Larousse, 2018)

propagent verticalement et horizontalement (3). Les lésions vont aussi produire des périthèces qui permettront la reproduction sexuée (4b) (Livre Blanc Céréales : Septoriose, 2017 ; Eriksen et al., 2003).

Lorsque la spore arrive sur une feuille, une phase de latence débute. Elle correspond à la période durant laquelle le champignon est associé à la feuille sans que celle-ci n'exprime de symptôme. Cette phase dure environ 14 jours en été et peut aller jusqu'à 28 jours lorsque les conditions climatiques sont froides (Fones and Gurr, 2015). Mais d'après Verreet et al. (2000), cette phase de latence est au minimum de 28 jours.

2.2.1.3. Dynamique et propagation

Etant donné que la cause principale de propagation de la septoriose dans le champ est la reproduction asexuée, ce point s'attardera à décrire la dynamique de celle-ci (Livre Blanc Céréales : Septoriose, 2017).

La propagation de la septoriose est déterminée par deux conditions : des conditions météorologiques favorables à la septoriose (cfr 2.2.1.6.) et la disponibilité d'inoculum près des feuilles non infectées des étages supérieurs (Moreau and Maraite, 1999).

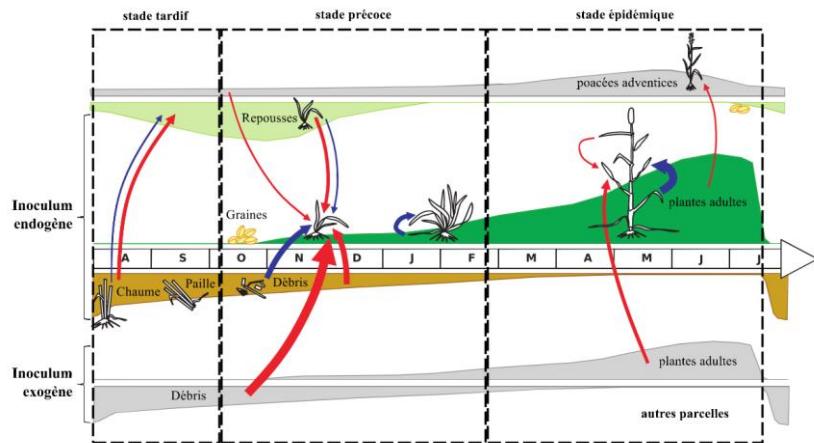


Figure 2 : Dynamique annuelle des épidémies de septoriose du blé (dues à *Zymoseptoria tritici*) selon Gigot (2013). Légende : Flèches rouges : ascospores ; flèches bleues : pycnidiospores, l'épaisseur des flèches est proportionnelle à l'importance attendue du mécanisme considéré

Dans un premier temps, la septoriose se propage principalement grâce aux éclaboussures de gouttes de pluie qui permettent de disperser les pycnidiospores sur un rayon d'environ un mètre (Livre Blanc Céréales : Septoriose, 2017 ; Moreau and Maraite, 1999). Cette propagation se fait progressivement des étages les plus bas vers les étages les plus hauts. Les feuilles F5 et F4 (cfr annexe 2), étant situées proches du sol, peuvent dans n'importe quelles conditions être atteintes par l'inoculum situé sur les étages inférieurs. Ensuite, la feuille F3 peut être touchée sous certaines conditions : elle doit être émergente et les F5 et F4 doivent présenter des pycnides. Dans le cas contraire, celle-ci s'éloigne des F5 et F4 et ne peut dès lors plus être infectée. La F2 peut être touchée si elle est en émergence et que les F4 et F3 sont touchées (pour les mêmes raisons que la F3). F1 sera infectée si les feuilles F3 et F2 sont infectées (Moreau and Maraite, 1999).

Malgré le faible rayon de propagation via les gouttes de pluie (1 mètre), la maladie peut rapidement se propager à l'entièreté du champ grâce au potentiel élevé de production de spores provenant d'une seule infection (entre 50 000 et 500 000 spores par hectare) mais également grâce au fait qu'en un à deux cycles sexués, les symptômes sont observés sur la quasi-totalité du champ (Livre Blanc Céréales :

Septoriose, 2017 ; Ben Mohamed et al., 2000). La production de spores asexuées peut être estimée à 10^{10} pycnidiospores par hectare sur une saison culturelle (Fones and Gurr, 2015).

2.2.1.4. Symptômes

Les premiers symptômes sont observés tôt durant la saison culturelle, ils peuvent également être observés sur les premières feuilles formées avant l'hiver (Livre Blanc Céréales : Septoriose, 2017).



Figure 3 : Symptômes de septoriose (Livre Blanc Céréales : Septoriose, 2017)

Dans les premiers stades de l'infection, *Septoria tritici* cause des taches jaune clair qui peuvent être globulaires ou oblongues. La maladie évolue ensuite et dans des stades plus avancés, les taches auront tendance à devenir linéaires et parallèles aux nervures (Figure 3). Cela peut avoir pour conséquence finale un recouvrement total de la feuille par le champignon (Gieco et al., 2004).

2.2.1.5. Impact

La septoriose se développe dans les principaux territoires cultivant du blé au sein de l'Union européenne (Fones and Gurr, 2015). Elle est la maladie la plus problématique en Wallonie (Livre Blanc Céréales : Septoriose, 2017). Celle-ci peut causer des pertes de rendement importantes allant jusqu'à 40% (Morais, 2015). Ainsi, un développement précoce de la septoriose durant la saison culturelle a un impact important sur le développement de la maladie et donc sur son impact sur les rendements. Cependant, ce sont principalement les infections sur les étages supérieurs de la plante qui peuvent causer ces pertes importantes (Moreau and Maraite., 1999). Selon Fones and Gurr (2015), lors de graves infections, les pertes de rendement liées à la septoriose peuvent s'élever jusqu'à 50%. L'utilisation de cultivars résistants, l'application de fongicides et le respect de bonnes pratiques agricoles permettent de limiter les pertes de 5% à 10%.

Pour les trois principaux producteurs de blé en Europe, à savoir la France, l'Angleterre et l'Allemagne, les pertes se situent entre 120 millions et 700 millions d'euros par an auxquels s'ajoute un coût en traitements fongicides pour les agriculteurs se situant entre 160 et 500 millions (Fones and Gurr, 2015).

2.2.1.6. Influence des facteurs climatiques

La septoriose se développe principalement en présence de climats humides et notamment dans les zones maritimes comme par exemple : le nord de la France, l'Angleterre, la Belgique et l'Allemagne (Fones and Gurr, 2015).

Deux facteurs climatiques vont principalement influencer la propagation de la maladie : la température et l'humidité (Ben Mohamed et al., 2000).

Les températures ont un rôle important dans le développement de la maladie (Fones and Gurr, 2015).

Les températures optimales durant le cycle de développement sont comprises entre 18°C et 25°C (Ben Mohamed et al., 2000). La germination des spores peut, elle, se dérouler dans des températures comprises entre 2°C et 37°C, avec un optimum compris entre 22°C et 24°C. L'optimum de températures pour l'infection est, quant à lui, compris entre 16°C et 21°C. L'infection est inhibée lorsque les températures sont en-dessous de 7°C (Verreet et al., 2000). Ainsi, au Royaume-Uni par exemple, des températures inférieures à -2°C durant les stades précoce de croissance réduisent les risques de développement de la maladie (Fones and Gurr, 2015). Une période de gel continu durant l'hiver limitera également le développement de la septoriose (Verreet et al., 2000)

Néanmoins, d'après Savary et al. (2016), la septoriose semble être moins affectée par les températures que la rouille jaune.

Selon Fones and Gurr (2015), pour se développer, se propager et infecter de nouvelles feuilles, *Septoria tritici* a besoin d'humidité et d'éclaboussures sur la surface des feuilles. Les conditions nécessaires pour avoir un développement de la septoriose sont donc :

- Une journée très humide, c'est-à-dire avec des précipitations supérieures à 10mm de pluie ou,
- Plusieurs jours humides consécutifs, c'est-à-dire trois jours consécutifs avec, au minimum, 1mm de pluie par jour ou,
- Des précipitations totales de plus de 5mm durant deux jours consécutifs (Verreet et al., 2000).

L'infection nécessite, elle, au minimum six heures d'humidité à la surface de la feuille (Ben Mohamed et al., 2000).

Le développement de la septoriose est donc associé à une augmentation des précipitations et de la fréquence de celles-ci, les conditions sèches étant défavorables à son développement bien que l'humidité relative de l'air n'ait que peu d'influence (Savary et al., 2016 ; Verreet et al., 2000).

2.2.1.7. Influence du génotype

Les deux principales méthodes utilisées pour lutter contre la septoriose sont l'utilisation de fongicides et l'utilisation de variétés moins sensibles. En effet, aucune variété commerciale de froment n'est totalement résistante à la septoriose en France. Etant donné la grande diversité génétique et l'épidémiologie des populations de septoriose, l'utilisation des gènes majeurs de résistance, c'est-à-dire qui donnent un niveau de résistance totale à la plante, n'est pas une solution durable (Morais, 2015). Cependant, certains facteurs peuvent influencer la résistance du blé à cette maladie comme, par exemple, le stade phénologique de la culture lors de l'attaque du champignon.

Lors d'une étude visant à déterminer les interactions entre la résistance à *Septoria tritici* et les stades phénologiques, une interaction significative a été observée entre certains génotypes et le moment d'inoculation du blé par *Septoria tritici*. Certains génotypes manifestaient, en effet, une sensibilité au champignon lorsque qu'ils étaient inoculés au stade plantule alors qu'ils étaient résistants lorsque qu'ils étaient inoculés aux stades tallage et dernière feuille. L'inverse a également pu être observé. Ces observations suggèrent donc la présence de gènes de résistance spécifiques aux stades. Elles suggèrent également l'implication du génotype dans les interactions entre la résistance à la septoriose et les stades phénologiques (Gieco et al., 2004).

Effectivement, dix-huit locus majeurs de résistance à la septoriose ont été identifiés. Certains peuvent être efficaces soit au stade plantule soit au stade plante adulte (à ce stade, les gènes s'activent au cours

de la montaison) et d'autres gènes offrent une résistance à tous les stades phénologiques de la plante (Dreisigacker et al., 2015). Par conséquent, cela souligne de nouveau l'importance et l'influence du génotype dans l'expression de la résistance en fonction du stade.

De plus, la structure ainsi que la croissance du froment peuvent avoir une influence conséquente sur la propagation de la septoriose (Ben Romdhane, 2003). En effet, les trois dernières feuilles du froment d'hiver, celles qui ont le plus d'influence sur le rendement en grains, émergent à une hauteur plus basse que les feuilles plus vieilles déjà infectées par la septoriose. Durant une courte période, appelée période de chevauchement, les nouvelles feuilles se trouvent proches de feuilles présentant des lésions. Elles peuvent donc être facilement infectées par contact direct ou par de faibles éclaboussures : ces éclaboussures demandant moins d'énergie cinétique que pour infecter des feuilles se trouvant plus haut dans la canopée. Cette courte période dépend des caractéristiques variétales, les variétés résistantes ayant une période de chevauchement plus courte. Après cette période, la croissance de la tige va éloigner les feuilles saines des feuilles infectées et donc rendre moins aisée la propagation de la septoriose (Lovell et al., 1997). Si cette période de chevauchement se déroule en même temps que des conditions météorologiques propices au développement de la maladie, les dernières feuilles seront plus à risque d'être infectées. A contrario, si les conditions météorologiques ne sont pas propices durant cette période, la propagation de la maladie sera ralentie.

2.2.1.8. Facteurs agronomiques influençant le développement de la septoriose

Les pratiques agricoles peuvent avoir un impact sur le développement précoce et la sévérité de la septoriose. Par exemple, au Royaume-Uni, les semis précoces durant l'automne et particulièrement en septembre ont tendance à favoriser la septoriose. En effet, ces semis subissent des conditions climatiques qui favorisent le développement de la maladie à savoir des températures et une humidité propices à la propagation de la maladie (Fones and Gurr, 2015). Ainsi, des recherches ont mis en évidence, aux Pays-Bas, qu'un semis tardif diminue le risque d'infection par rapport à un semis précoce. En effet, un semis au mois de décembre peut présenter jusqu'à 50 pourcents de lésions en moins qu'un semis de septembre. Cela s'explique par le fait qu'un semis tardif permet d'éviter la période d'intense libération d'ascospores et donc de diminuer le niveau d'infection primaire (Ben Romdhane, 2003). Le facteur date de semis ne devra donc pas être négligé durant l'analyse future des résultats.

D'autres pratiques peuvent, quant à elles, permettre de limiter le développement de la septoriose dont, notamment, le labour (qui permet d'enfuir les résidus), la rotation de culture et l'utilisation de cultivars résistants. Limiter la fumure azotée et la densité de semis aura également un impact positif (Livre Blanc Céréales : Septoriose, 2017).

2.2.2. Rouille jaune

2.2.2.1. Classification

La rouille jaune est une maladie fongique causée par *Puccinia striiformis* Westend. La sous-espèce touchant le blé est *Puccinia Striiformis* f.sp. *tritici* Erikss, ce champignon appartient à la classe des basidiomycètes et est strictement biotrophe (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017).

Tableau 2 : Classification de *Puccinia Striiformis f.sp. tritici Erikss* (Amil, 2016)

Puccinia Striiformis f.sp. tritici Erikss	
Règne	EUMYCETES (Fungi)
Embranchement	Basidiomycètes
Classe	Urediniomycetes/ Pucciniomycetes
Ordre	Uredinales/Pucciniales
Famille	Pucciniaceae
Genre	Puccinia
Espèce	<i>Puccinia striiformis</i> f.sp. tritici Erikss

2.2.2.2. Cycle de la rouille jaune

La rouille jaune est un champignon hétéroïque². De plus, il réalise deux types de cycle : un cycle asexué et un cycle sexué. Le cycle asexué se réalise sur ses hôtes primaires qui sont principalement le blé, l'épeautre et le triticale. Le cycle sexué se réalise, quant à lui, sur son hôte secondaire à savoir l'épine-vinette (*Berberis* spp.) (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017).

La reproduction asexuée va être observable à la fin de l'hiver. En effet, les urédies (petits conceptacles en forme de petits cratères contenant les urédospores) vont apparaître (F.U.S.A.Gx and C.R.A.Gx, 1990). Tant que les conditions météorologiques le permettent, les urédospores seront produites. Ces spores sont transportées par le vent sur de longues distances (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017). Il faut 6 à 8 jours après l'infection pour que les symptômes soient observables. Les pustules apparaissent, quant à elles, 12 à 14 jours après l'infection si les conditions sont favorables (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017). Jusqu'à six cycles peuvent se succéder au cours d'une saison culturelle (Bahri, 2008).

Le cycle sexué n'a, quant à lui, jamais été observé en Europe. En effet, pour boucler ce cycle, il faut une synchronisation entre la prévalence, la susceptibilité et la phénologie de l'hôte alternatif (l'épine-vinette) et de l'hôte primaire (la céréale) (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017). Cependant, le début du cycle sexué peut avoir lieu. En effet, le déclenchement de la sénescence des tissus ou une élévation des températures peuvent entraîner la production de téléutospores noires. Ces pustules noires, plus allongées que les urédies et contiennent des téléutospores ayant pour vocation de permettre la recombinaison génétique, de survivre durant l'intersaison et de germer au printemps afin d'assurer la survie du parasite en infectant un hôte intermédiaire. En l'absence d'hôtes évidents, ce cycle n'a pas lieu en Europe (Bahri, 2008).

Les repousses et certaines graminées sauvages permettent à la maladie de survivre durant la période estivale, il est donc important de les détruire. L'inoculum ayant survécu sur les repousses peut en effet infecter les nouvelles plantes de blé d'hiver dès le stade 2 feuilles (Figure 4) (Morais, 2010).

Durant l'hiver, la maladie progresse peu. C'est à la sortie de l'hiver et au printemps que son développement peut rapidement se généraliser. Les attaques précoces (durant la montaison) sont celles qui ont le plus d'impact sur le rendement (Figure 4) (Bahri, 2008).

² Relatif aux parasites qui, pour accomplir leur cycle reproductif complet, doivent parasiter plusieurs hôtes successifs.

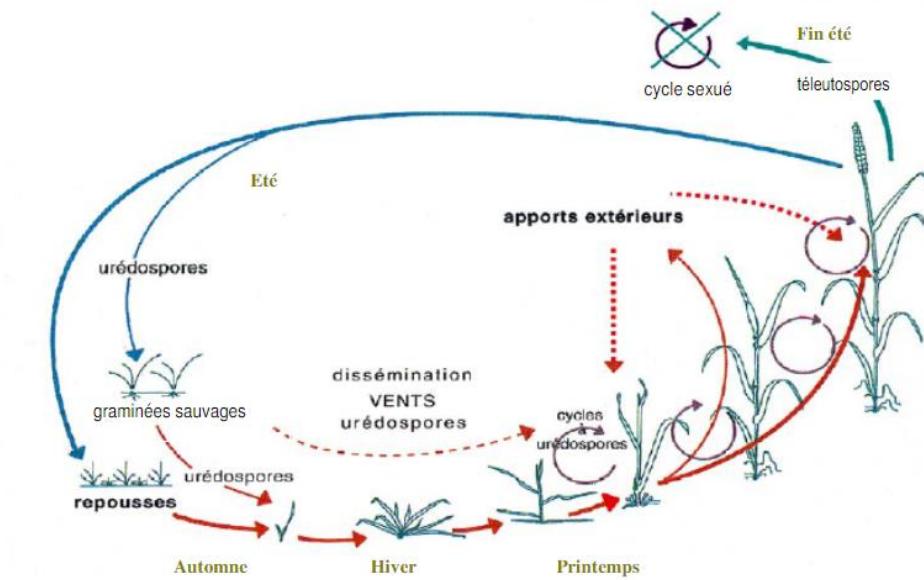


Figure 4 : Cycle biologique de *Puccinia striiformis* f.sp. *tritici* (Bahri, 2008)

2.2.2.3. Symptômes

En Belgique, les premiers symptômes sont le plus souvent observés entre mars et avril. Cependant, lorsque les conditions sont favorables, la maladie peut être observée dès le mois de février (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017).



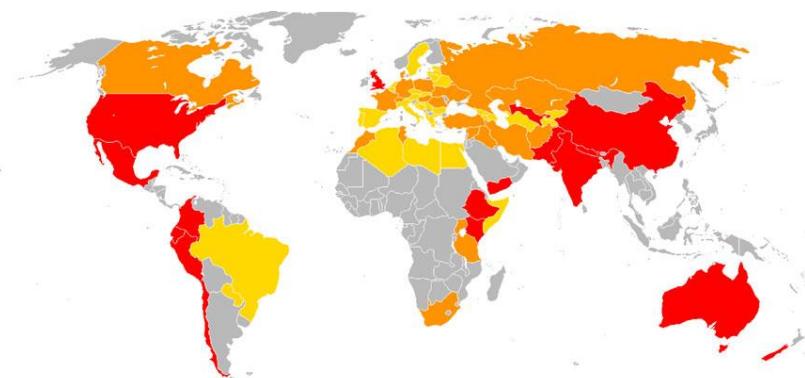
Figure 5 : (A) Feuille recouverte par des pustules de rouille jaune (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017) ; (B) Pustules noires contenant des téleutospores (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017)

Les premiers symptômes sont des pustules jaunes présentes sur les feuilles basses de certaines plantes. L'infection se propage ensuite aux plantes adjacentes et gagne les différents étages foliaires de la plante pour, parfois, atteindre l'épi. Des foyers circulaires sont observables au niveau du champ. Si les conditions climatiques le permettent, l'infection peut rapidement se propager à tout le champ (F.U.S.A.Gx and C.R.A.Gx, 1990).

Les symptômes sont caractérisés par des fructifications ou sores ressemblant à de petits cratères contenant à maturité une poussière rousse constituée de milliers de spores. Ces petites pustules mesurent entre 0.3mm et 1mm de long (Figure 5A). Ces spores peuvent être emportées par le vent sur de longues distances. Dans le cas de la rouille jaune, ces petits cratères sont alignés le long des nervures des feuilles et des tiges (F.U.S.A.Gx and C.R.A.Gx, 1990). En fin d'épidémie, après la floraison du blé, le champignon se met à produire des pustules noires allongées contenant des téleutospores (Figure 5B) (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017).

2.2.2.4. Impact

On retrouve la rouille jaune dans la plupart des pays cultivant du blé (Wellings, 2011).



Code	Incidence	Sévérité
Jaune	Rare	pertes négligables
Orange	Localisé, 2 en 5 ans sur plus de 25% des surfaces cultivées	1-5% de pertes
Vert	Répandue, 2 ou 3 ans sur 5 sur toute la région de production	5-10% de pertes

Figure 6 : Répartition géographique de la rouille jaune (Wellings, 2011)

En Belgique, on peut observer la rouille jaune sur l'ensemble du territoire. Cependant, les régions côtières sont, en général, les plus touchées : les conditions climatiques retrouvées dans ces régions sont favorables au développement de la maladie (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017).

Dans le cas d'infection importante sur une variété sensible, on peut observer jusqu'à 70% de pertes de rendement (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017). Aux pertes de rendement s'ajoutent des effets dépressifs sur la qualité des grains récoltés (Bahri, 2008).

Selon Afzal et al. (2007), dans les situations où la rouille jaune se développe précocement, de manière continue et si le cultivar est sensible, les pertes peuvent aller jusqu'à 100%, ce qui signifie une destruction totale de la culture. Cependant, dans la plupart des cas, les pertes oscillent entre 10% et 70% en fonction de la précocité de l'attaque, de la sensibilité variétale, de la durée d'infection par la maladie et du taux de développement durant l'infection.

2.2.2.5. Influence des facteurs climatiques

Dans la littérature, la rouille jaune est largement reportée comme un pathogène se développant dans un environnement frais. D'autres facteurs ont, eux, une importance secondaire dans la propagation de la maladie, comme par exemple le vent (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017 ; Savary et al., 2016).

Selon Savary et al. (2016), le développement de la rouille jaune est associé à des températures moyennes de saison. Bahri (2008) rapporte que la rouille jaune est un pathogène qui se développe à des températures fraîches qui peuvent aller de -10°C à 25°C. D'après le Livre Blanc Céréales (2017), les températures optimales permettant un développement de la rouille se situent entre 9°C et 15°C. Au-delà de 15°C, le pathogène ralentit peu à peu.

L'élévation des températures maximales au-dessus de 25°C ralentit ou arrête le développement de la rouille jaune (Bahri, 2008). C'est pourquoi il ne subsiste, le plus souvent, que des nécroses à partir de juin (Syngenta, 2017).

Les températures cardinales de germination sont, quant à elles, relativement basses (Bahri, 2008) :

- Température minimale de germination : 2°C
- Température optimale de germination : 10°C
- Température maximale de germination : 28°C

Savary et al. (2016) décrivent des limites plus restrictives pour la germination des spores. Selon eux, les spores peuvent germer dans une gamme de températures allant de 5°C à 20°C, avec un optimum à 15°C. L'infection est, quant à elle, associée à une gamme de températures assez étroite se trouvant entre 5°C et 12°C.

Concernant la période de latence du champignon, celle-ci dure de 10 à 14 jours dans une gamme de températures assez large allant de 13°C à 23°C, la température n'influencant que modérément la durée de la période de latence (Savary et al., 2016).

En ce qui concerne la pluviométrie, celle-ci n'a que peu d'impacts sur le développement de la rouille jaune (Savary et al., 2016). L'humidité, par contre, va influencer la propagation de la maladie. Il faut au moins trois heures d'humidité saturée pour permettre aux urédospores de germer et infecter les tissus (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017).

Le tableau suivant synthétise les conditions environnementales nécessaires au développement de la rouille jaune décrites par Roelfs et al. (1992).

Tableau 3 : Conditions environnementales nécessaires au développement la rouille jaune (Roelfs et al., 1992)

Conditions environnementales	Température (°C)			Lumière	Eau libre
	Minimum	Optimum	Maximum		
Germination	0	9-13	23	Faible	Essentiel
Tube germinatif	-	10-15	-	Faible	Essentiel
Appressorium³			<i>Non formé</i>		
Pénétration	2	8-13	23	Faible	Essentiel
Croissance	3	12-15	20	Elevé	Non
Sporulation	5	8-13	20	Elevé	Non

D'autres facteurs climatiques vont également influencer le développement de la maladie comme, par exemple, le vent dont le timing et la direction vont jouer un rôle majeur dans la dispersion des spores et la précocité de l'infection (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017).

Enfin, un certain nombre de facteurs climatiques peut limiter le degré d'infection précoce du champ. Ainsi, des températures élevées en fin d'été vont limiter la quantité d'inoculum primaire en automne. Le gel va aussi avoir un impact sur la propagation de la maladie. En effet, le gel tue le mycélium lorsque celui-ci est en sporulation, la propagation de la maladie durant les hivers rigoureux est alors limitée. Cependant, le gel ne détruit pas le mycélium non-sporulant qui se trouve au sein des tissus de la feuille. En France, si les températures cumulées de décembre à avril sont inférieures à 7°C, il a pu être prouvé que cela diminue l'infection de la rouille jaune au printemps (Gladders, 2007).

³ Organe en forme d'ampoule adhérant à la cuticule, caractéristique des mycoses des plantes.

2.2.2.6. Influence du génotype

Une des méthodes utilisées actuellement pour contrôler la rouille jaune et considérée par Omrani et al. (2013) comme étant la meilleure est l'utilisation de cultivars résistants.

Cependant, il existe une diversité génétique parmi les pathogènes. Les variétés de froment, en fonction de leur génotype, vont soit exprimer des résistances qui peuvent être totales, c'est-à-dire qu'elles vont être résistantes à l'ensemble des souches du pathogène, soit être semi-résistantes, c'est-à-dire qu'elles ne seront résistantes qu'à certaines souches mais sensibles à d'autres. Finalement, certaines variétés seront sensibles à l'ensemble des souches. De nouvelles souches peuvent également apparaître, certaines variétés qui étaient résistantes peuvent alors devenir sensibles à la rouille jaune (Omrani et al., 2013).

Il existe deux types de gènes, les gènes mineurs de résistance, qui procurent un niveau de résistance partielle mais plus durable et les gènes majeurs qui, eux, donnent un niveau de résistance totale. L'inconvénient de ces derniers est qu'ils sont considérés comme procurant une résistance moins durable car plus facilement contournée par les différentes races de rouille jaune (du Cheyron, 2016).

De plus, certaines résistances s'expriment dès le stade plantule et sont efficaces durant toute la saison culturelle alors que d'autres résistances deviennent, elles, effectives au stade adulte c'est-à-dire au cours de la montaison (du Cheyron, 2016).

Amil (2016) classe, quant à lui, les gènes de résistance en deux groupes : les « R-genes » aussi appelés « all stage resistance » ou « seedling stage resistance » et les « APR » (Adult Plant Resistance genes). Les « R-genes » sont actifs et efficaces contre la maladie à tous les stades de la culture. Ils sont plus efficaces que les APR si le pathotype de la maladie ne change pas. En effet, les « all stage resistance » sont généralement spécifiques à certains pathotypes. La seconde classe de gènes de résistance, les APR, sont, eux, généralement sensibles dans les premiers stades de développement mais expriment ensuite, dans des stades plus avancés, une résistance au pathogène. Cette résistance au stade adulte est généralement plus robuste et plus efficace.

Dans ce contexte, l'INRA a développé une double échelle de résistance, l'une décrit la résistance au stade plantule et l'autre au stade adulte (du Cheyron, 2016).

2.2.2.7. Facteurs agronomiques influençant le développement de la rouille jaune

Certains facteurs sont associés positivement à la sévérité de l'épidémie de rouille jaune comme : des pluies durant la récolte, la présence de plantes hôtes durant l'inter-culture ou encore des semis tardifs et des hivers doux (Gladders, 2007).

Une densité de semis importante et un excès de fumure azotée vont également favoriser la rouille jaune (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017).

2.2.3. Rouille brune

2.2.3.1. Classification

La rouille brune est une maladie fongique causée par *Puccinia triticina* Erik.

Tableau 4 : Classification de *Puccinia triticina* Erik. (Bolton et al., 2008)

Puccinia triticina Erik.	
Règne	EUMYCETES (Fungi)
Embranchement	Basidiomycètes
Classe	Urediniomycetes/ Pucciniomycetes
Ordre	Uredinales/Pucciniales
Famille	Pucciniaceae
Genre	Puccinia
Espèce	<i>Puccinia triticina</i> Erik

2.2.3.2. Cycle de la rouille brune

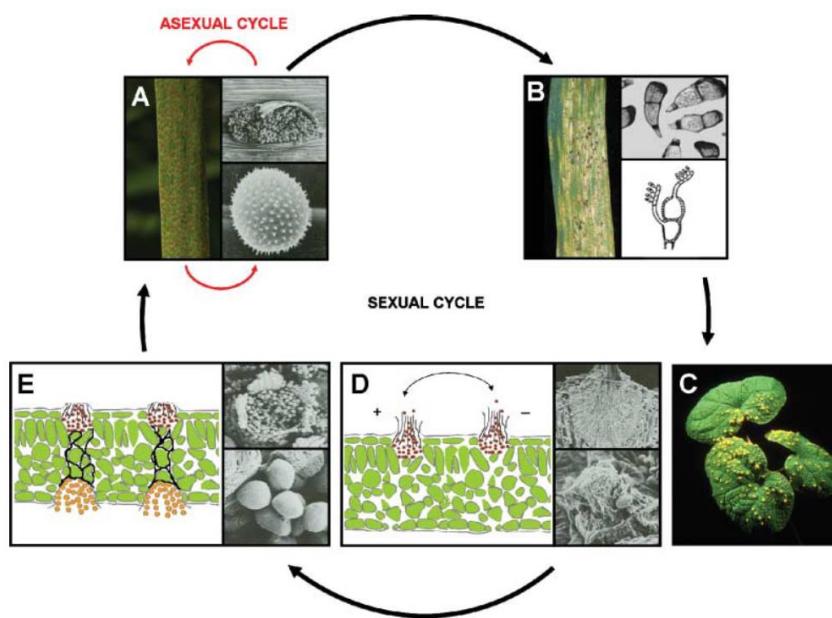


Figure 7 : Cycle de *Puccinia triticina* Erik. (Bolton et al., 2008)

La rouille brune est un champignon hétéroïque et biotrophe. Son cycle complet est composé de cinq spores différentes (Figure 7). Afin de boucler son cycle, la rouille brune a besoin d'un hôte primaire qui peut être *P. triticina* (le blé commun), *T. turgidum* ssp. *Durum* (le blé dur), *T. dicoccoides* (l'amidonnier sauvage), *T. dicoccon* (l'amidonnier domestique) ou *X. triticosecale* (le triticale) et d'un hôte secondaire qui peut être *Thalictrum speciosissimum* (le pigamon) ou *Isopyrum fumaroides* (l'isopyre faux pigamon). Deux types de reproduction ont lieu : une reproduction asexuée sur un hôte primaire et une reproduction sexuée sur un hôte secondaire. En Belgique, les deux hôtes secondaires sont uniquement présents comme plantes ornementales et ne sont que rarement retrouvées. Elles ne contribuent donc que

très peu à la propagation de la maladie sur notre territoire. Seul le cycle asexué sera développé dans ce point (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017 ; Duvivier et al., 2016 ; Bolton et al., 2008).

Durant la période de chevauchement, un phénomène appelé « green bridge » se déroule. En effet, la rouille est biotrophe⁴ et les cultures de froment ne se chevauchent pas en Belgique, une période de minimum deux mois séparant la récolte et les nouveaux semis. Le champignon va donc infecter les repousses de froment et de certaines graminées afin de survivre jusqu'à l'infection des cultures de froment nouvellement semées. Une fin d'été et un automne chauds et humides permettront de favoriser ce phénomène. A contrario, un hiver rigoureux peut diminuer le taux de survie de la rouille (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017 ; Duvivier et al., 2016).

Le cycle asexué du pathogène est composé de plusieurs étapes : l'infection, la croissance du pathogène dans les tissus foliaires et la production de spores. Lorsque les conditions sont optimales, à savoir une température comprise entre 15 et 25°C, le champignon prend 8 à 15 jours pour boucler son cycle (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017 ; Azzimonti, 2013).

Durant ce cycle, les urédospores vont d'abord être transportées par le vent ou la pluie ce qui va permettre l'inoculation. Les spores vont ensuite germer sur la feuille puis l'infecter. Après l'infection, débute une période de latence dont la durée dépend des températures. Par la suite, le mycélium va produire des urédies qui vont libérer des urédospores. Pour qu'une épidémie de rouille brune soit sévère, il faut qu'il y ait 4 à 5 cycles asexués durant la saison culturelle (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017 ; Duvivier et al., 2016 ; Azzimonti, 2013 ; Bolton et al., 2008).

2.2.3.3. Symptômes

La rouille brune apparaît plus tardivement que la rouille jaune. En général, elle se développe vers la fin du mois de mai. Cependant, lorsque l'hiver est doux et le semis précoce, elle peut être observée dès le stade 2 nœuds (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017).

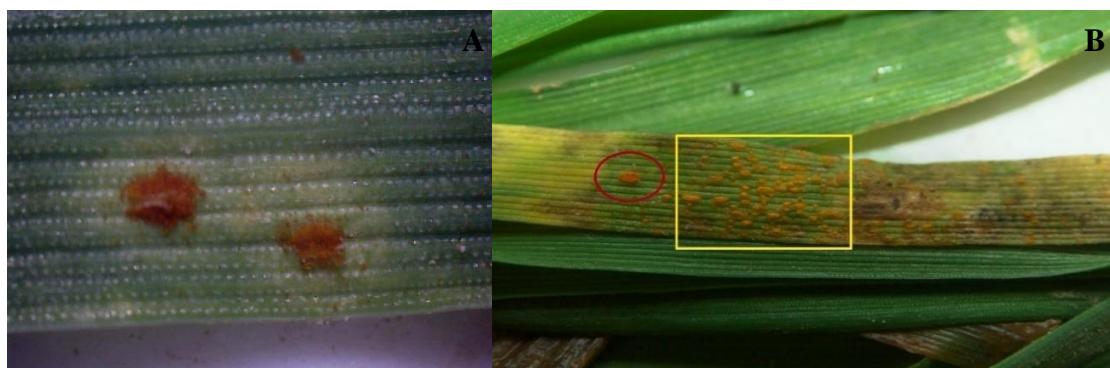


Figure 8 : (A) Photo de rouille brune sur feuille de blé prise le 08-05-2018, (B) Comparaison des rouilles : pustule de rouille brune à gauche (entourée en rouge) et pustules de rouille jaune à droite (encadrées en jaune) (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017)

La rouille brune est caractérisée par les urédies qui sont des fructifications rondes ou ovoïdes pouvant atteindre 1,5 mm de diamètre. Ces pustules sont de couleur jaune à orangée. Les urédies ne causent pas de chlorose ou de nécrose dans les tissus de l'hôte. Contrairement à la rouille jaune, la rouille brune est répartie uniformément dans le champ. De plus, les pustules sont distribuées aléatoirement sur le limbe supérieur de la feuille. De la poudre brune est libérée des urédies : il s'agit des spores de la rouille brune. Celles-ci sont rondes et légères ce qui leur permet d'être facilement emportées par le vent. Elles sont

⁴ Qui a besoin d'un hôte vivant pour survivre et se multiplier.

également facilement observables au binoculaire lors de leur libération. Un halo chlorotique se forme autour des urédoles, celui-ci deviendra nécrotique à la fin du cycle (Figure 8A) (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017 ; Azzimonti, 2013 ; Bolton et al., 2008).

Il n'est pas toujours aisé de distinguer la rouille brune de la rouille jaune. La plus grosse différence réside dans la répartition de ces maladies. En effet, la rouille jaune est répartie en foyers dans le champ. De plus, ses pustules sont alignées sous forme de stries. La rouille brune se retrouve, quant à elle, de façon homogène dans le champ et ses pustules sont plus grosses et réparties aléatoirement sur la feuille (Figure 8B) (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017).

2.2.3.4. Impact

Le fait que les variétés de froment ont des résistances spécifiques à certaines races de rouille brune et que la rouille possède un très haut niveau de virulence, engendre des problèmes partout à travers le monde. Les populations de rouille brune sont considérablement différentes sur l'ensemble du globe, il existe une très grande diversité génétique. En Europe, 105 races ont été identifiées (Huerta-Espino et al., 2011 ; Bolton et al., 2008).

La rouille brune cause des pertes de rendement significatives. Celles-ci sont en général moins importantes que celles liées à la rouille jaune. Cependant, cette maladie est la plus fréquente et la plus répandue à travers le monde. Elle est observée dans la totalité des régions où le blé est présent (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017 ; Huerta-Espino et al., 2011 ; Bolton et al., 2008).

Les pertes de rendement causées par la rouille brune sont souvent liées à une diminution du nombre de grains par tige et à une baisse du poids des grains. Lorsque la feuille drapeau est touchée à 60-70% par de la rouille brune, les pertes de rendement sont de 30%. Si la maladie se développe à des stades précoce, les pertes peuvent aller jusqu'à 50% de rendement (Huerta-Espino et al., 2011 ; Bolton et al., 2008). En Europe, elle peut causer jusqu'à 30% de pertes de rendement (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017). Selon Kolmer (1996), les épidémies de rouille brune entraînent des baisses de rendement de 5 à 15% et parfois plus en fonction du stade de développement du froment lorsque la maladie apparaît et selon Azzimonti (2013), si la parcelle n'est pas traitée, les pertes peuvent atteindre 40%.

2.2.3.5. Influence des facteurs climatiques

Selon l'étude menée par Savary et al. (2016), la rouille brune est associée à une saison culturelle chaude et une pluviométrie moyenne.

Selon Kolmer (1996), la température optimale permettant un développement de la rouille brune se situe entre 15°C et 20°C. Lorsque la température dépasse 25°C, les urédoles présentent des chloroses. Si elle est inférieure à 10°C, la maladie se développe lentement et les pustules sont de taille plus petite.

La gamme de températures permettant la germination des spores et l'infection par la rouille brune est très large. En effet, les spores peuvent germer dans une gamme de températures comprises entre 0°C et 32°C (Savary et al., 2016). La germination des spores dure 4 à 8 heures à une température de 20°C (Kolmer, 1996).

L'infection peut, quant à elle, se dérouler entre 5°C et 25°C (Savary et al., 2016). Mais, selon Duvivier et al. (2016), la gamme de températures permettant l'infection est située entre 10°C et 25°C

La période de latence est corrélée à la température. Elle dure de huit à vingt jours lorsque les températures sont comprises entre 10°C et 20°C. L'optimum de températures se trouve à 26°C. Une période de 8 à 20 jours est nécessaire si les températures se situent entre 10°C et 20°C. Le Livre Blanc

Céréales (2017) parle d'une période de latence comprise entre 8 à 12 jours lorsque la température se situe entre 15 et 20°C (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017 ; Duvivier et al., 2016 ; Savary et al., 2016 ; Azzimonti, 2013 ; Bolton et al., 2008).

L'accomplissement du cycle de la rouille brune requiert néanmoins une certaine humidité. En effet, la rouille brune a besoin de 4 à 6 heures d'humidité pour infecter un hôte (Savary et al., 2016). Une humidité relative supérieure à 60% est favorable au développement de la rouille (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017).

De plus, la spore a besoin de rosée ou de pluie pour germer (Kolmer, 1996). Le facteur critique déterminant la sévérité de l'infection et le nombre de cycles sur une année est de disposer de périodes de rosée assez longues que pour permettre la germination des spores (Azzimonti, 2013).

Le tableau suivant reprend les conditions environnementales nécessaires au développement de la rouille brune décrites par Roelfs et al. (1992).

Tableau 5 : Conditions environnementales nécessaires du développement de la rouille brune (Roelfs et al., 1992)

Conditions environnementales	Température (°C)			Lumière	Eau libre
	Minimum	Optimum	Maximum		
Germination	2	20	30	Faible	Essentiel
Tube germinatif	5	15-20	30	Faible	Essentiel
Appressorium	-	15-20	-	Faible	Essentiel
Pénétration	10	20	30	Pas d'effet	Essentiel
Croissance	2	25	35	Elevé	Non
Sporulation	10	25	35	Elevé	Non

Les facteurs climatiques peuvent avoir une influence sur la résistance du blé à la rouille brune. Par exemple, des températures importantes peuvent inhiber le développement des pustules de rouille brune. Des températures modérées peuvent, quant à elles, altérer la résistance procurée par les gènes de résistance de la plante hôte, certaines variétés deviennent alors plus résistantes à la rouille alors que d'autres peuvent devenir plus sensibles (McCallum et al., 2016).

Ce constat avait déjà été révélé dans les travaux de Kolmer (1996). Celui-ci avait déterminé que certains gènes comme par exemple Lr18, Lr14a, Lr30, Lr15 et Lr11 étaient moins exprimés lorsque les températures étaient basses que lorsqu'elles étaient hautes.

2.2.3.6. Influence du génotype

L'influence des stades sur l'expression des gènes de résistance a été observée pour la première fois au Canada en 1943 par Newton and Johnson. Ces derniers avaient remarqué que certaines variétés étaient résistantes à la rouille brune lorsque les plantes étaient adultes, mais qu'elles ne l'étaient pas durant les premiers stades de développement. D'autres variétés peuvent être résistantes jusqu'au stade plantule mais deviennent moins résistantes au cours de la maturation (McCallum et al., 2016).

Certains gènes de résistance peuvent commencer à s'exprimer à un stade de croissance précoce mais ne sont complètement exprimés qu'à un stade plus avancé. Par exemple, le gène Lr35 commence à être actif au stade 2 feuilles mais n'est totalement exprimé qu'après le stade 6 feuilles (Kolmer, 1996).

L'expression de résistances quantitatives peut également être influencée par le stade de développement (Azzimonti, 2013).

2.2.3.7. Facteurs agronomiques influençant le développement de la rouille brune

Tout comme pour la rouille jaune, une densité de semis importante et un excès de fumure azotée favorisent le développement de la rouille brune (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017).

Selon le Livre Blanc Céréales (2017), les semis précoces sont plus exposés à l'inoculum primaire ayant survécu grâce au phénomène de « green bridge ». L'inoculum survivant sur les repousses, il est dès lors important de détruire ces dernières pour limiter l'infection primaire du champ.

3. Objectifs

L'objectif de ce travail de fin d'études est d'aborder la problématique des maladies fongiques du blé d'un point vue dynamique. L'approche en dynamique étudie le développement hebdomadaire des champignons. Elle apporte des informations sur le développement de ceux-ci au niveau de la parcelle, de la plante, de la progression dans le feuillage et elle permet de déterminer l'impact de certains facteurs sur la dynamique de propagation de la maladie.

De plus, ce travail de fin d'études s'inscrit dans le projet mondial : AGMIP (the Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project) pests and diseases. Les données recueillies alimenteront une base de données qui permettra de mieux comprendre les maladies fongiques du blé et de les modéliser.

Plus spécifiquement, ce travail comparera le développement des maladies sur cinq variétés. Celles-ci ont été sélectionnées en fonction de leurs résistances aux trois principales maladies fongiques présentes en Belgique : la septoriose, la rouille jaune et la rouille brune.

Ce travail étudie l'efficacité de différentes modalités de traitements fongicides pour les trois maladies séparément et ce, afin de déterminer l'efficacité globale de chaque modalité 15 jours après le traitement et la rémanence du traitement pour les trois maladies. Les modalités sont comparées entre elles et ce travail tente de déterminer si les modalités de traitements étaient justifiées pour différentes combinaisons de facteurs (variétés * dates de semis).

Le dernier chapitre sera consacré à l'étude de l'impact des stades de développement dans la résistance aux maladies fongiques.

4. Matériel et méthode

4.1. Site expérimental

Les parcelles suivies tout au long de ce mémoire sont situées sur le champ expérimental de l'unité de phytotechnie des régions tempérées de Gembloux Agro-Bio Tech (ULG). Le champ expérimental est localisé à Lonzée, les coordonnées géographiques sont : [50°32'58.8"N 4°43'59.3"E]. L'essai suivi vise à étudier l'effet de la date de semis, du traitement fongicide et de l'effet variétal sur la résistance du blé aux maladies.

La parcelle est caractérisée par un type de sol limoneux à drainage naturel modéré à imparfait (Service public de Wallonie, 2016).



Figure 9 : Vue aérienne du champ expérimental de Lonzée (Google Maps, 2018)

4.2. Itinéraire phytotechnique

Différentes opérations culturales ont eu lieu au cours de la saison, ces opérations sont décrites dans le tableau suivant.

Tableau 6 : Opérations culturales effectuées sur les parcelles

	Semis d'octobre		Semis de novembre	
	Date	Application	Date	Application
Densité de semis	17-oct.	250 gr/m ²	16-nov.	350 gr/m ²
Fumure				
Tallage	08-avr.	60 kgN/ha	08-avr.	60 kgN/ha
Redressement	15-avr.	50 kgN/ha	15-avr.	50 kgN/ha
Dernière feuille	15-mai	60 kgN/ha	23-mai	60 kgN/ha
Fongicide		Voir point 4.4.4.		
Précédent		Pomme de terre		
Raccourcisseur	19-avr.	CCC 1l/ha		
Désherbage	6-avr.	Pacifica 300g/ha + capri 200g/ha + végétop 1l/ha + gratil 20g/ha		
Insecticide	25-mai	Karaté zéon 50ml/ha		
Récolte	19-juill.		23-juill.	

4.3. Données météorologiques et prédition du développement des maladies

Les données météorologiques utilisées sont celles de la station de Lonzée qui est une station officielle gérée par le CRAW et PAMESEB. Elles sont comparées aux données moyennes (de 1980 à 2013) de la station d'Ernage qui est la station de référence (IRM) la plus proche de la parcelle. Les conditions météorologiques seront discutées dans le point résultat et discussion (cfr 5.1).

Les données de la station de Lonzée sont similaires à celles recueillies par l'outil de modélisation « Pessl instruments ». La station mesure les conditions microclimatiques du champ et les analyse. Ces données alimenteront un modèle qui calcul en temps réel le risque d'infection du champ pour les différentes maladies fongiques du blé. Ces risques d'infections ont été utilisés afin de déterminer quand l'infection a eu lieu dans le point 5.3. (Puccinia striiformis Infection Model, 2015 ; Puccinia tritici Infection Model, 2015). Une description des modèles se trouve en annexe 1.

4.4. Dispositif et conditions expérimentales

Le dispositif expérimental est un dispositif en split-plot. Celui-ci comprend trois facteurs qui sont :

- La variété,
- La date de semis,
- Les traitements fongicides appliqués.

Au cours de cette expérimentation, nous avons suivi :

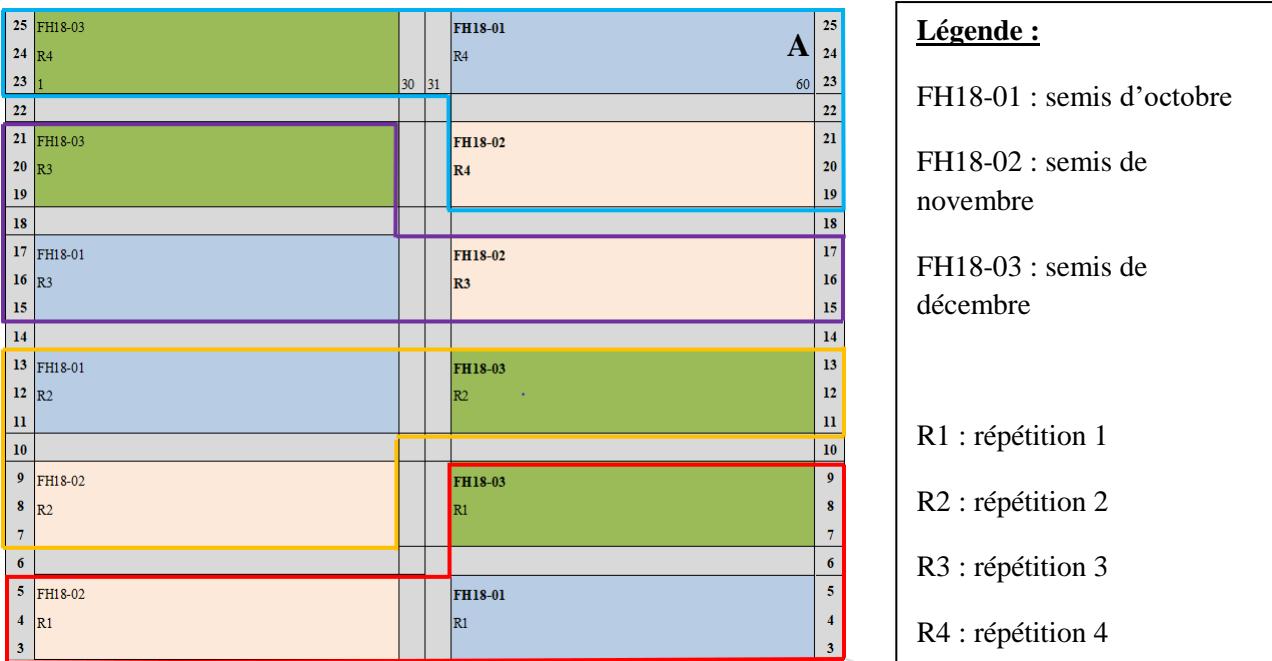
- 2 dates de semis (cfr 4.4.2.),
- 5 variétés (cfr 4.4.3.),
- 3 modalités de traitements fongicides (cfr 4.4.4.).

Chaque modalité a été répétée quatre fois, ce sont donc 120 parcelles qui ont été suivies.

4.4.1. Dispositif expérimental

Ce dispositif expérimental comprend quatre répétitions réparties chacune dans un bloc (Figure 10A). A l'intérieur de chaque bloc, les trois dates de semis sont organisées en trois sous-blocs à l'intérieur desquels sont réparties aléatoirement 28 variétés. L'ordre des traitements est, quant à lui, organisé de manière systématique : les traitements sont disposés dans un ordre spécifique, identique dans chaque sous-bloc (Figure 10B). L'entièreté des plans expérimentaux se trouve en annexe 3.

Les parcelles suivies au cours de cette expérimentation sont schématisées ci-dessous. Elles sont longues de 8 mètres et large de 2 mètres. Les parcelles ont, à leurs extrémités, des bordures de 50 centimètres permettant de limiter l'effet de bordure et d'éviter la contamination des parcelles lors de l'application des différentes modalités de traitements fongicides. Lors de cette expérimentation, les plantes ont été prélevées dans les bordures afin de ne pas biaiser les mesures de rendements (Figure 11).



Légende :

FH18-01 : semis d'octobre

FH18-02 : semis de novembre

FH18-03 : semis de décembre

R1 : répétition 1

R2 : répétition 2

R3 : répétition 3

R4 : répétition 4

	Triumph	Salari	RGT Sac	RGT Rec	Ragnar	Portus	Olympus	Motic	Mentor	Limabel	Lenox	KWS Tal	KWS Sm	KWS Sal	KWS Do	Johnson	Hiking C	Henrik	Gleam	Geler	Chevign	Berchim	Anpolis	Ambroise	Alvides	Graham	Edgar	Bergane	B	
530	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	
B	87	84	81	78	75	72	69	66	63	60	57	54	51	48	45	42	39	36	33	30	27	24	21	18	15	12	9	6	3	2T
430	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	1T
B	86	83	80	77	74	71	68	65	62	59	56	53	50	47	44	41	38	35	32	29	26	23	20	17	14	11	8	5	2	0T
330	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	
B	85	82	79	76	73	70	67	64	61	58	55	52	49	46	43	40	37	34	31	28	25	22	19	16	13	10	7	4	1	

Figure 10 : (A) Organisation des blocs, champs d'essais variétés 2018 ; (B) Répartition des variétés et des traitements fongicides à l'intérieur du sous-bloc R1, semis d'octobre (FH18-01)

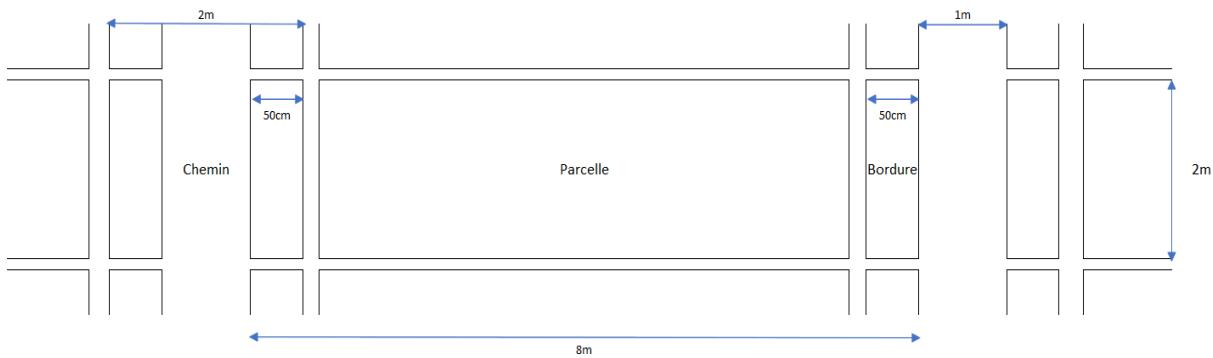


Figure 11 : Schéma d'une parcelle du dispositif expérimental

4.4.2. Dates de semis

Lors de cet essai, deux modalités de dates de semis ont été suivies, à savoir : un semis d'octobre [FH18-01] (Figure 10A), un semis de novembre [FH18-02] (Figure 10A). Le semis d'octobre est une date classique dans nos régions, le semis de novembre est un peu plus tardif mais obligatoire dans certaines conditions comme par exemple, après une récolte de betteraves. Ce sont donc les deux semis les plus courants en Belgique.

Les deux premières modalités de semis ont donc été suivies. Celles-ci ont été réalisées en suivant les recommandations fournies dans le Livre Blanc de septembre 2017 : 17 octobre 2017 [250 grains/m²], 16 novembre 2017 [350 grains/m²] (Meza et al., 2017).

Ces modalités de dates de semis sont réparties dans quatre blocs, chacun de ces blocs comprenant une répétition de ce facteur (Figure 10A).

4.4.3. Variétés

Cinq variétés ont été sélectionnées parmi les variétés recommandées par le Livre Blanc de septembre 2017. Plusieurs critères ont été pris en compte. Tout d'abord, les variétés ont été choisies par rapport à leurs caractéristiques agronomiques (rendements, poids à l'hectolitre, ...) afin de retenir des variétés intéressantes pour les agriculteurs. Parmi les variétés retenues, le critère de résistance aux maladies suivies au cours de cette saison culturelle a été pris en compte, le but étant d'avoir une diversité de résistances aux différentes maladies fongiques. Les différents profils voulus étaient :

- Sensible aux trois maladies (Benchmark)
- Résistante aux trois maladies (Alcides)
- Sensible à la septoriose mais résistante aux deux autres maladies (Triomph)
- Sensible à la rouille jaune mais résistante aux deux autres maladies (RGT Reform)
- Sensible à la rouille brune mais résistante aux deux autres maladies (Edgar)

Le tableau suivant reprend les variétés sélectionnées ainsi que leur comportement face aux maladies du feuillage. Les cotations sont tirées du Livre Blanc de septembre 2017, elles sont basées sur des observations pluriannuelles (moyennes sur six ans) et sont exprimées sur une échelle de 1 à 9, la valeur 9 étant la plus favorable. Les variétés ayant une cote supérieure à 7 sont considérées comme résistantes à la rouille brune et à la rouille jaune. Une cote supérieure à 6 est nécessaire pour être considérée comme résistante à la Septoriose (Meza et al., 2017).

Tableau 7 : Caractéristiques des variétés suivies au cours de l'expérimentation (Meza et al., 2017)

Variétés	Septoriose	Rouille jaune	Rouille brune
Edgar	6.4	8.8	7.0
Triomph	5.5	8.7	7.6
RGT Reform	6.0	6.1	7.6
Alcides	7.1	8.8	7.5
Benchmark	5.0	5.5	5.8

4.4.4. Modalités de traitements fongicides

Trois modalités de traitements fongicides ont été appliquées (la figure 12 reprend le schéma d'application des fongicides ainsi que les principales périodes d'infection par les maladies) :

- Pas de traitement, servant de référence,
- Un traitement (F') au stade dernière feuille (39),
- Deux traitements (F''), le premier au stade 2 nœuds (32) et le deuxième au stade épiaison (55).

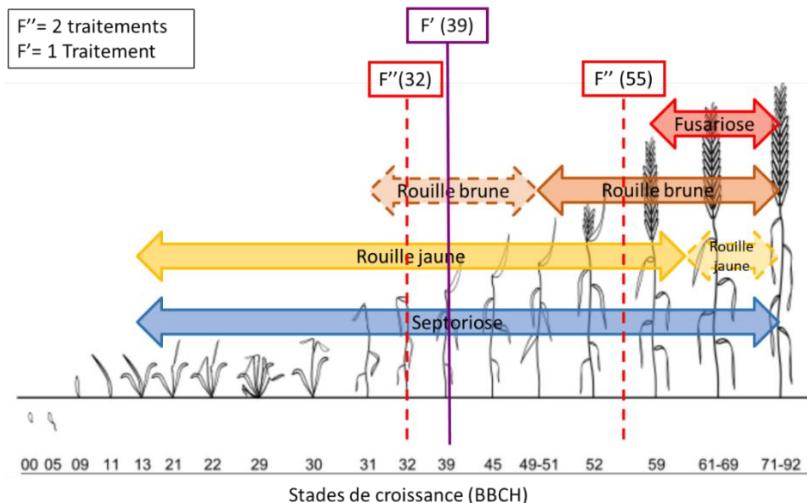


Figure 12 : Période d'infection par les maladies fongiques touchant le froment et positionnement des traitements fongiques (Duvivier et al., 2018)

Le tableau ci-dessous reprend les fongicides appliqués ainsi que les dates d’application pour les deux dates de semis.

Tableau 8 : Traitements fongicides

Date de semis	Traitement	Stade	Date	Produits
FH18-01	1 traitement	DF-39	18-mai	Adexar 1.5 l/ha
	2 traitements	2N-32	03-mai	Opus team 1.5 l/ha + bravo 1l/ha
		Epis-55	29-mai	Aviator xpro 1.25 l/ha
FH18-02	1 traitement	DF-39	24-mai	Adexar 1.5 l/ha
	2 traitements	2N-32	8-mai	Opus team 1.5 l/ha + bravo 1l/ha
		Epis-55	6-juin	Aviator xpro 1.25 l/ha

ADEXAR (10119P/B) est un fongicide à usage professionnel détenu par BASF. Il est vendu sous forme de EC, concentré émulsifiable. Il est composé de 62.5g/l d'EPOXYCONAZOLE et 62.5g/l de FLUXAPYROXAD. Ce fongicide a une action à la fois préventive et curative. Il peut être appliqué une à deux fois par an avec un intervalle de minimum 21 jours (Phytoweb, 2015).

OPUS TEAM (8473P/B) est un fongicide à usage professionnel également détenu par BASF. Il est vendu sous forme de SE, suspo-émulsion. Il est composé de 84 g/l d'EPOXYCONAZOLE et de 250 g/l de FENPROPIMORPHE. Il peut être appliqué une à deux fois par an du stade 1^{er} noeud au stade épiaison avec au minimum 21 jours d'intervalle entre deux applications. Il a une action curative et préventive (Phytoweb, 2015).

AVIATOR XPRO (9994P/B) est un fongicide détenu par Bayer CropScience. Il est commercialisé sous forme d'EC, concentré émulsionnable. Il est composé de 75g/l de BIXAFEN et 150g/l de PROTHIOCONAZOLE. Il peut être appliqué une à deux fois par an avec un intervalle d'application de 14 jours. C'est un fongicide systémique qui a une action curative (Phytoweb, 2015).

4.5. Relevés de terrain et cotations des maladies fongiques

4.5.1. Echantillonnage en champ

Dans un premier temps, les maîtres brins sont prélevés en champ avant d'être apportés au laboratoire pour réaliser des analyses. Les cinq maîtres brins sont prélevés dans les bordures des parcelles afin de ne pas affecter les mesures de rendement. Il y a quatre répétitions, au total, ce sont donc 20 maîtres brins qui sont prélevés pour chaque modalité. Les relevés se sont déroulés toutes les semaines afin d'obtenir un suivi en dynamique de l'évolution des maladies au cours de la saison culturelle.

Les prélèvements ont débuté lorsque les plantes ont atteint le stade 31. En effet, avant ce stade, les maladies sont peu présentes. De plus, les feuilles touchées sont des feuilles vouées à disparaître et n'ayant aucun impact sur les rendements futurs. Le début des prélèvements a été décalé selon les modalités. Les premiers prélèvements ont été réalisés le 23 avril 2018 dans les parcelles du semis d'octobre ne recevant pas de traitement fongicide (T0). Pour le semis de novembre, les relevés ont débuté le 2 mai 2018.

Les prélèvements dans les parcelles recevant des traitements fongicides ont, quant à eux, commencé deux semaines après l'application de ceux-ci.

Les prélèvements se sont terminés le 2 juillet 2018 pour le semis d'octobre et le 3 juillet 2018 pour le semis de novembre. À ces dates, la plupart des feuilles étaient mortes et le niveau de maladie était élevé sur les feuilles restantes.

4.5.2. Détermination des stades

La phénologie de la culture a été suivie tout au long de cette expérimentation. La détermination des principaux stades de développement de la culture est basée sur l'échelle de référence « BBCH » (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt et Chemische Industrie) qui a été inspirée de l'échelle de Zadoks et al. (1974). Cette échelle comprend 99 stades, le stade 00 correspondant au semis et le stade 99 au produit après la récolte. Le premier chiffre correspond aux stades principaux et le second aux stades secondaires (Lepage and Bourgeois, 2012). L'échelle reprenant les principaux stades se trouve en annexe 2.

4.5.3. Cotation des maladies fongiques

Après avoir déterminé à quels stades les maîtres brins se trouvent, les plantes sont décortiquées (Figure 13) afin de déterminer sur quelle feuille l'observation se portera. En effet, lorsque l'entièreté des feuilles n'a pas encore émergé de la gaine, il n'est pas aisément de déterminer précisément quelles sont les feuilles atteintes.

Le suivi s'est déroulé du stade 31 au stade 83. Durant toute la saison culturelle, la sévérité de l'attaque par chaque maladie a été déterminée sur chaque feuille. La sévérité se définit comme « la proportion de la feuille touchée par la maladie » (Savary et al., 2016). Chaque feuille est analysée séparément, les symptômes des différentes maladies sont repérés et une cotation allant de 0 à 100 est attribuée pour chaque maladie présente. Cette cotation est basée sur des échelles de cotation. Sur la figure 15, deux types d'échelle sont présentes, l'échelle factuelle de pourcentages foliaires occupés par la rouille (Figure 15A) et l'échelle de sévérité de la rouille modifiée selon Cobb (figure 15B) (Koyshibayev and Muminjanov, 2016). C'est l'échelle B qui a été retenue, car c'est l'échelle la plus représentative des dégâts causés par les rouilles. Pour la septoriose, c'est aussi l'échelle de Koyshibayev and Muminjanov (2016) qui a été utilisée. Cependant, pour la septoriose, l'entièreté de la tache brunâtre de la feuille était cotée, y compris la partie ne présentant pas de pycnide (Figure 14). L'utilisation de ces échelles a pour but de limiter les approximations et de rendre ce suivi reproductible.



Figure 13 : Plante décortiquée

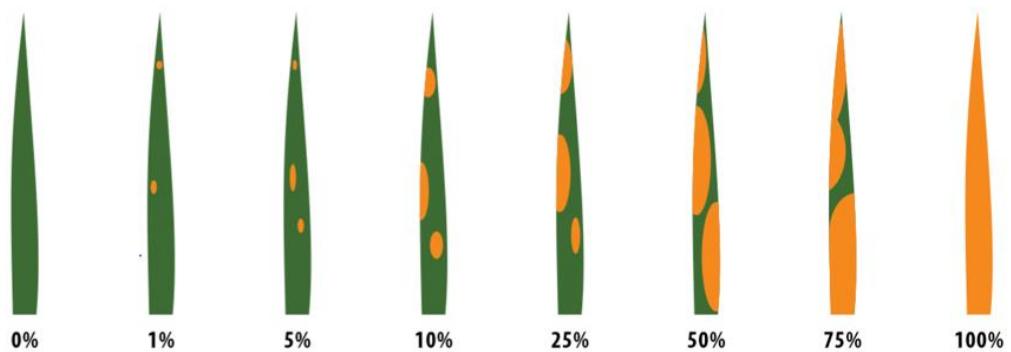


Figure 14 : Echelle de cotation : Septoriose (Koyshibayev and Muminjanov, 2016)

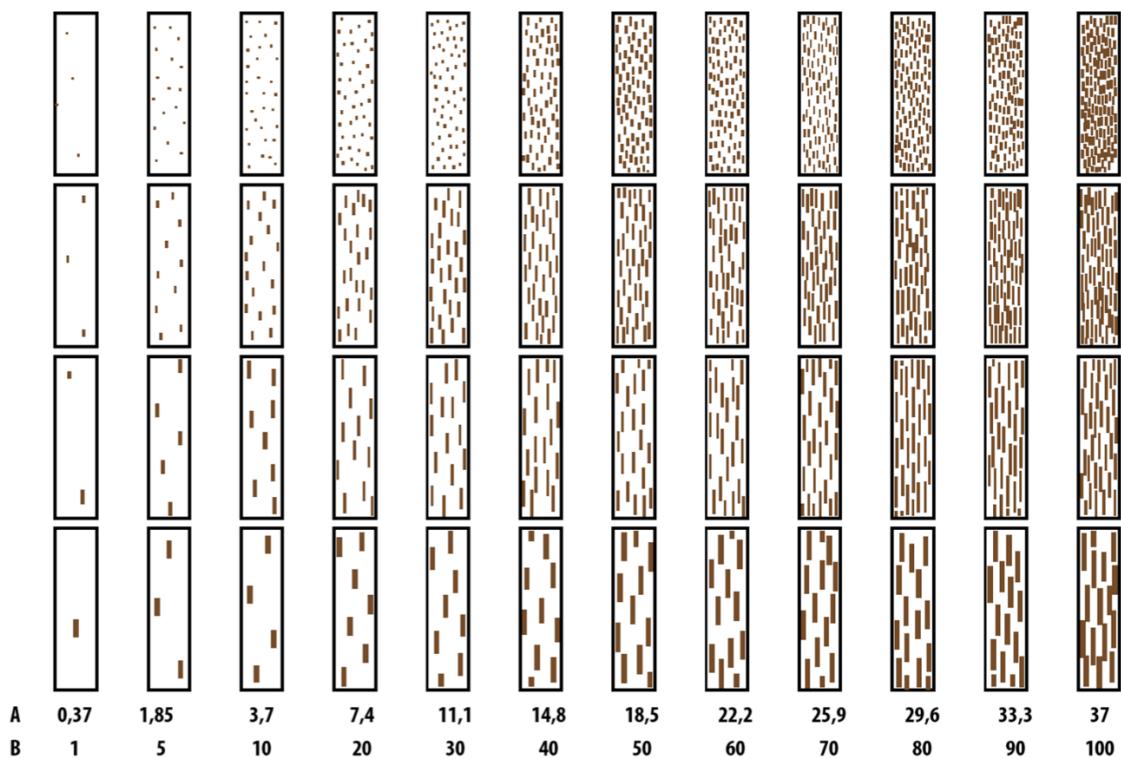


Figure 15 : Echelle de cotation : Rouilles (Koyshibayev and Muminjanov, 2016)

4.6.Traitement des données

Différentes analyses ont été réalisées à partir des observations récoltées tout au long de l'année afin de déterminer :

- La manière dont les maladies se sont propagées (à l'échelle de la variété et de la plante) ainsi que les facteurs qui ont influencé les maladies (cfr 4.6.1. et 4.6.2.),
- L'influence des stades dans l'expression du génotype (du point de vue de l'expression des gènes de résistance) (cfr 4.6.3),
- L'impact des traitements (ainsi qu'une comparaison entre les modalités de traitements) (cfr 4.6.4).

4.6.1. Comparaison des cinq variétés

La comparaison des 5 variétés est basée sur la moyenne des sévérités par plante pour chacune des maladies. Afin de réaliser une ANOVA, deux tests ont été réalisés : un test de Shapiro pour déterminer la normalité de la population et un test de Bartlett pour vérifier l'homogénéité des variances. La population n'étant pas normale, une transformation angulaire a été réalisée. Cette transformation a été choisie car la variable est exprimée en pourcents. La transformation est de la forme suivante (Jerbi, 2016) :

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

Lors de cette transformation, X doit être exprimé dans des valeurs comprises entre 0 et 1, tous les pourcentages ont donc été divisés par 100. Par la suite, la normalité et le test de Bartlett ont été recalculés (Jerbi, 2016).

Ensuite, une ANOVA à un facteur fixe (variété) a été réalisée pour chaque date de prélèvement afin de déterminer s'il existe des différences entre les moyennes des populations. Par la suite, un test « post hoc » de « Student Newman et Keuls » (SNK) a été réalisé afin de déterminer les groupes de variétés ayant réagi de la même façon.

4.6.2. Dynamique de la maladie

Afin d'étudier la dynamique de la maladie, des graphiques de la sévérité pour chacune des feuilles en fonction du DOY ont été créés. Le DOY est le « day of year », c'est-à-dire le jour de l'année ou jour ordinal. Il exprime un jour de l'année sous forme d'un nombre, le jour 1 étant le 1^{er} janvier. Il permet d'exprimer une date, ce qui permet de déterminer la manière dont la maladie se propage sur les différents étages foliaires.

Des graphiques de la sévérité de l'attaque en fonction de la fréquence des feuilles touchées (incidence⁵ de la maladie) ont aussi été réalisés afin de déterminer si l'attaque était localisée à certaines parties de la plante ou si elle était généralisée.

La dynamique de la maladie ainsi que la comparaison des cinq variétés sont discutées dans le point 5.2.

4.6.3. Influence des stades

Afin de déterminer l'influence des stades, les prédictions d'infections par les différentes maladies fournies par « Pessel intrument » ont été comparées aux sévérités des différentes maladies. Les sévérités entre les deux dates de semis ont, elles-mêmes, été comparées entre elles. Les deux dates de semis sont,

⁵ Proportion de feuilles touchées.

au début des relevés, à des stades différents, mais subissent des conditions météorologiques identiques, une partie de leurs différences pourrait être expliquée par l'influence des stades dans l'expression des résistances. Cette hypothèse est discutée dans le point 5.3.

4.6.4. Efficacité des traitements fongicides

Une ANOVA à un facteur fixe (traitements fongiques) a été réalisée pour chaque maladie et à certaines dates. Les données ont été transformées de la même manière que dans le point (4.5.4.1.), les tests de Shapiro et Bartlett ont aussi été réalisés. Par la suite, un test SNK a été réalisé afin de déterminer si des différences existent entre les parcelles traitées et non-traitées.

Les dates choisies pour cette analyse correspondent à plus ou moins deux semaines après l'application des traitements fongicides du semis d'octobre (une date de plus a été choisie afin d'avoir plus d'informations après l'application du deuxième traitement sur la modalité 2 traitements). Ce délai de deux semaines est en effet nécessaire pour que les traitements agissent et pour pouvoir observer des différences entre les traitements.

Les dates pour le semis d'octobre sont : DOY 142, 155, 162 et 169.

Les dates pour le semis de novembre sont : DOY 143, 156, 163, et 171.

L'efficacité des traitements est discutée dans le point 5.4.

5. Résultats

5.1. Description des conditions météorologiques de la saison culturelle 2017-2018

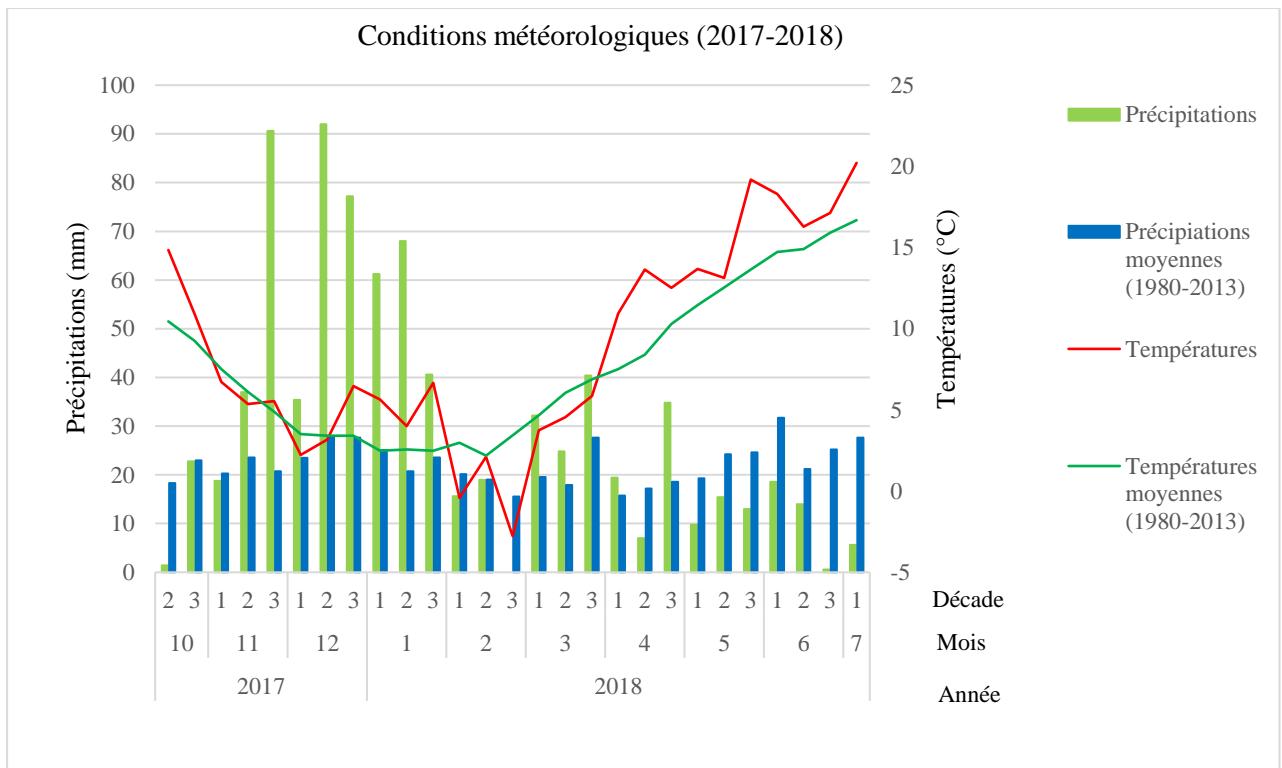


Figure 16 : Conditions météorologiques 2017-2018

La figure 16 décrit les précipitations et températures moyennes par décades de la saison 2017-2018, les données sont celles de la station de Lonzée. Ces moyennes sont comparées aux moyennes de températures et de précipitations basées sur les données recueillies à la station d'Ernage de 1980 à 2013.

En début de saison, les températures ont oscillé au-dessus et en-dessous des normales saisonnières. De la deuxième décennie de septembre 2017 à la fin du mois de janvier 2018, les températures ont été plus chaudes que la normale. A partir du début du mois de février 2018 jusqu'à la fin du mois de mars 2018, les températures ont été plus froides, ce qui a causé un retard de croissance du froment par rapport aux normales. Dès le mois d'avril, jusqu'à la fin des relevés, les températures ont été anormalement chaudes, permettant au froment de récupérer son retard de croissance.

Les précipitations ont été largement supérieures aux normales saisonnières à partir de la deuxième décennie de novembre 2017 jusqu'à la dernière de janvier 2018. Le mois de mars 2018 et la dernière décennie d'avril 2018 ont, quant à eux, été légèrement plus pluvieux que la normale. Mais, à partir de mai 2018, les précipitations ont été plus faibles que la normale causant à terme une sécheresse.

Ces températures chaudes ont favorisé un développement précoce de la rouille brune.

5.2. Dynamique des maladies

5.2.1. Septoriose

5.2.1.1. Comparaison des cinq variétés

Ci-après, la figure 17 représente l'évolution de la sévérité de la septoriose pour chacune des cinq variétés. Les tableaux 9 et 10 reprennent, quant à eux, les résultats des tests SNK respectivement pour les semis d'octobre et de novembre.

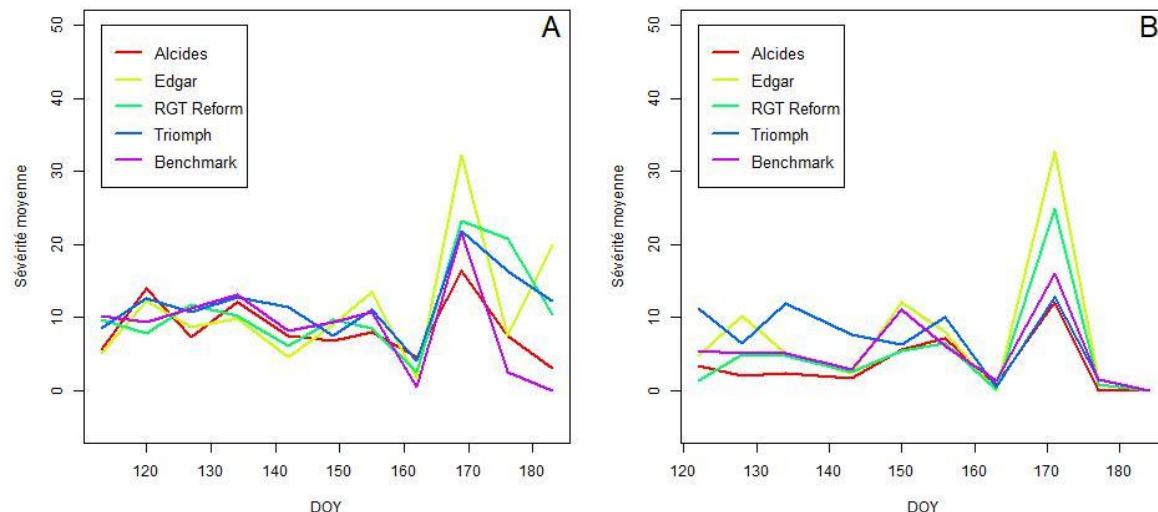


Figure 17 : Evolution de la sévérité moyenne de la septoriose sur les 5 variétés au cours du suivi (comparaison des deux dates de semis), (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre

Tableau 9 : Comparaison de la sévérité de la septoriose sur les 5 variétés au cours de la saison culturelle, pour le semis d'octobre en l'absence de traitement fongicide (T0) - Résultats des tests post-hoc SNK

DOY Variétés	113	120	127	134	142	149	155	162	169	176	183
Alcides	a	a	a	a	ab	a	a	a	b	b	ab
Benchmark	a	ab	a	a	ab	a	a	b	b	c	b
Edgar	a	ab	a	a	b	a	a	ab	a	b	a
RGT Reform	a	b	a	a	b	a	a	ab	ab	a	ab
Triomph	a	ab	a	a	a	a	a	a	b	a	ab

La figure 17 illustre l'évolution de la sévérité de la septoriose en fonction des jours de l'année pour les cinq variétés suivies. Le tableau 9 reprend les résultats des tests SNK. Il se lit par jour, les lettres indiquées permettent de mettre en évidence les groupes formés par les variétés ayant des sévérités non significativement différentes. La lettre « a » correspondant au niveau le plus sévère.

Les relevés dans le semis d'octobre (Figure 17A, Tableau 9) pour la septoriose ont débuté le 23 avril. À cette date, la culture se trouve alors au stade 31. Dès le début des relevés, la septoriose est présente dans le champ. Les résultats du test SNK révèlent qu'il n'y a pas de différence entre les variétés le 23 avril.

La semaine suivante (DOY 120), la septoriose a augmenté entre 5 et 10% pour la plupart des variétés à l'exception de la variété RGT Reform, chez qui elle diminue légèrement. Des différences ont commencé

à apparaître entre les variétés à cette date, formant 3 groupes distincts : la variété Alcides qui est la plus sévèrement touchée, suivie des variétés Benchmark, Edgar et Triomph et enfin de la variété RGT Reform qui est la moins touchée.

Début mai (DOY 127 et 134), il n'y a pas de différence significative entre les variétés. La sévérité oscille sans induire de différence entre les cultivars.

Le 22 mai (DOY 142), la variété Triomph est la plus atteinte, suivie des variétés Benchmark et Alcides. Les variétés Edgar et RGT Reform sont, elles, les moins impactées.

De la fin du mois de mai au 4 juin, aucune différence entre les variétés n'est observée.

Le 11 juin (DOY 162), plusieurs groupes se forment entre les variétés : Benchmark est la plus touchée, Alcides et Triomph sont les moins touchées et Edgar et RGT Reform sont situées entre ces deux groupes.

La semaine suivante (DOY 169), la maladie évolue nettement pour toutes les variétés, la variété Edgar est la plus touchée avec 45% de sévérité. La variété RGT Reform est la deuxième variété la plus touchée, les trois autres variétés sont les moins sévèrement atteintes.

Fin juin (DOY 176), la sévérité diminue pour toutes les variétés à l'exception de RGT Reform qui est touchée à 20%. Des groupes se reforment, les variétés RGT Reform et Triomph sont les plus touchées alors que Benchmark est la moins touchée.

Le dernier jour des prélèvements (DOY 184), la sévérité diminue, elle est nulle pour la variété Benchmark, le groupe formé par les variétés RGT Reform, Triomph et Alcides est touché à environ 10% et Edgar est la variété la plus touchée avec 20% de surface foliaire atteinte.

Pour le semis d'octobre, les cultivars Benchmark et Triomph sont globalement les plus sévèrement touchés.

Tableau 10 : Comparaison de la sévérité de la septoriose sur les 5 variétés au cours de la saison culturelle, pour le semis de novembre en l'absence de traitement fongicide (T0) - Résultats des tests post-hoc SNK

DOY Variétés	122	128	134	143	150	156	163	171	177	184
Alcides	b	b	b	b	b	a	a	c	a	-
Benchmark	b	b	b	b	a	a	a	c	a	-
Edgar	b	a	b	b	a	a	a	a	a	-
RGT Reform	b	b	b	b	b	a	a	b	a	-
Triomph	a	b	a	a	ab	a	a	c	a	-

Les relevés du semis de novembre (Figure 17B, Tableau 10) ont débuté au stade 31 (DOY 122), c'est-à-dire deux semaines plus tard que le semis d'octobre. La maladie est présente dès le début avec des sévérités moyennes variant de 1 à 11%. A cette date, des différences sont déjà observables : la variété Triomph est la plus sévèrement atteinte suivie des quatre autres variétés.

La semaine suivante (DOY 128), Edgar devient la variété la plus touchée, les quatre autres étant moins atteintes.

Le 5 mai (DOY 134), la sévérité de la maladie a diminué sur la variété Edgar. Celle-ci rejoint donc le groupe formé par les variétés Alcides, Benchmark et RGT Reform. La sévérité sur la variété Triomph a augmenté et atteint 11%.

Mi-mai (DOY 143), la maladie s'est stabilisée entre 0 et 5% pour toutes les variétés à l'exception du cultivar Triomph qui continue à être le plus touché.

Cette même tendance est observée la semaine suivante. A la fin du mois de mai (DOY 150), la septoriose se développe de manière plus importante sur les variétés Benchmark et Edgar. La sévérité sur la variété Triomph diminue légèrement et atteint un niveau intermédiaire, entre la sévérité des plus touchées et celles des moins atteintes qui sont RGT Reform et Alcides.

Le 5 juin (DOY 156), le niveau de sévérité de la septoriose augmente sur les variétés RGT Reform, Triomph et Alcides alors qu'il diminue sur Benchmark et Edgar. Il n'y a cependant pas de différence significative entre les moyennes de sévérité.

Le 12 juin (DOY 163), le niveau de septoriose tombe à une valeur proche de 0 pour toutes les variétés avant d'augmenter nettement la semaine suivante (DOY 171). A cette date, trois groupes sont formés : les variétés les moins touchées avec Alcides, Benchmark et Triomph, la variété la plus touchée est Edgar avec 34% et la variété RGT Reform se trouve entre les deux.

Enfin, la dernière semaine de juin (DOY 177), la sévérité retombe à une valeur proche de zéro pour toutes les variétés avant de devenir nulle la semaine suivante (DOY 184).

Au début des relevés, la sévérité de la septoriose sur le semis d'octobre est globalement plus importante que sur le semis de novembre. Ce constat est particulièrement marqué sur les variétés les plus sensibles à savoir Triomph et Benchmark. Vers la fin, les deux dates de semis sont touchées de manière similaire.

5.2.1.2. Description des variétés par étage foliaire

Afin de mieux comprendre la dynamique de cette maladie, une analyse de la sévérité sur les différents étages foliaires durant le suivi est établie pour les trois variétés suivantes : Triomph, Benchmark et Alcides. Chacune représente un profil de résistance différent.

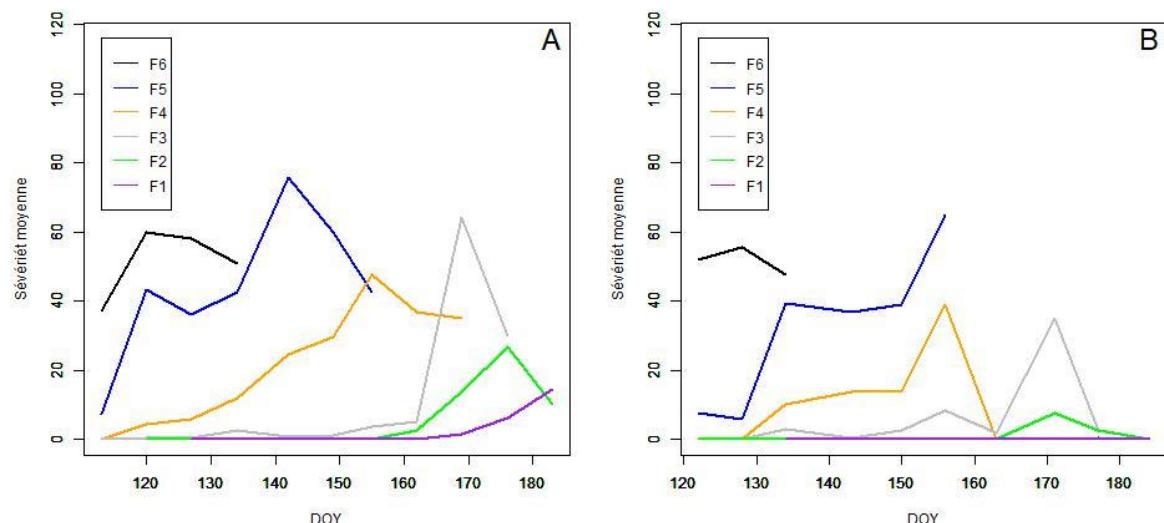


Figure 18 : Sévérité de la septoriose par étage foliaire sur la variété sensible Triomph ; (A) semis d'octobre ; (B) semis de novembre

La figure 18 met en évidence l'évolution de la sévérité de la septoriose sur les étages foliaires de la variété sensible Triomph. La figure 18A concerne le semis d'octobre et la figure 18B le semis de novembre.

Dès le début des relevés, la septoriose est présente sur les plus anciennes feuilles. La F6 (feuille la plus ancienne, cfr annexe 2) disparaît rapidement, au même moment pour les deux dates, vers mi-mai. Ces deux graphiques révèlent qu'une feuille plus ancienne est en général plus infectée que celle qui la suit. La sévérité de la septoriose augmente sur les feuilles et amène, à terme, la disparition de la feuille. Sur la figure 18A, ce phénomène est illustré : la sévérité sur F5 augmente en parallèle avec la F4 mais reste supérieure jusqu'à ce qu'elle disparaisse. Le même phénomène se passe entre F4 et F3, ainsi qu'entre F3 et F2, et finalement entre les deux dernières feuilles.

Pour les deux dates de semis, sur les F4, F3 et F2 ainsi que sur la F5 du semis d'octobre, la sévérité chute brusquement avant la disparition de la feuille.

Les plus vieilles feuilles (F6, F5, F4) commencent à être symptomatiques plus tôt dans la saison pour le semis d'octobre. Les pics de F3 se déroulent au même moment pour les deux dates de semis. En fin de saison, les dernières feuilles du semis d'octobre sont plus touchées que celles du semis de novembre.

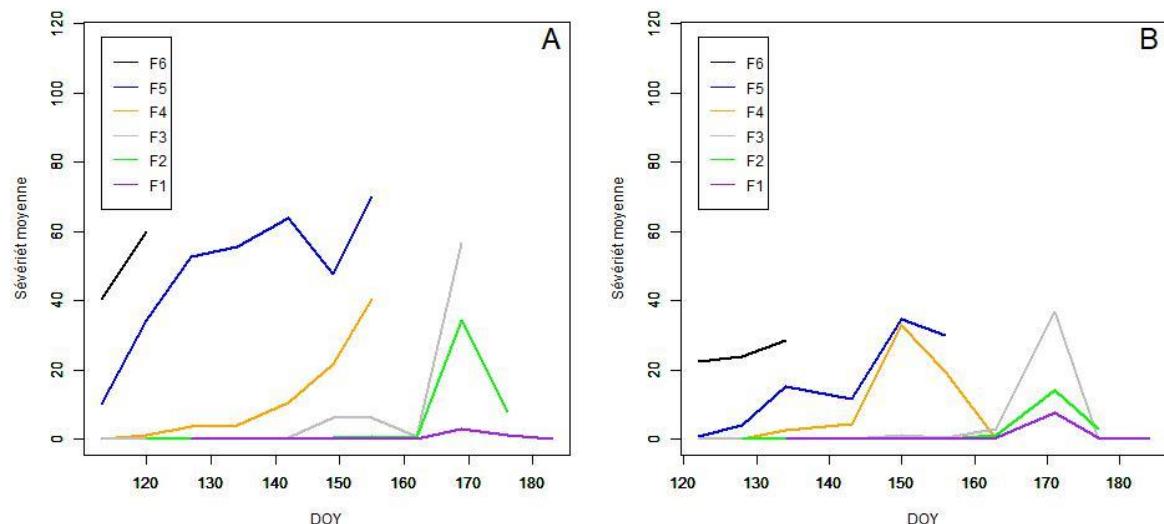


Figure 19 : Sévérité de la septoriose par étage foliaire sur la variété sensible aux trois maladies Benchmark ; (A) semis d'octobre ; (B) semis de novembre

Le développement de la septoriose étage par étage est aussi observé sur la variété Benchmark (Figure 19). La septoriose se développe plus précocement dans la saison et plus intensément sur les feuilles F6, F5, F4 et F3 du semis d'octobre. Les feuilles F2 et F1 sont touchées au même moment quelle que soit la date de semis, la gravité est cependant plus importante pour le semis d'octobre.

La diminution de sévérité, juste avant la disparition de la feuille, n'est observée que sur la feuille F2 du semis d'octobre alors qu'elle l'est pour l'ensemble des feuilles du semis de novembre.

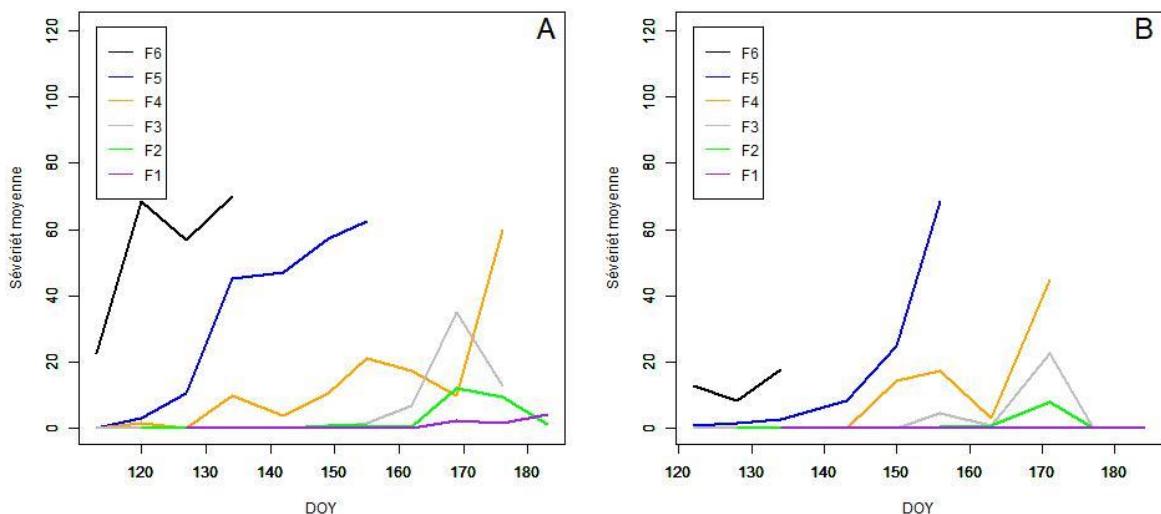


Figure 20 : Sévérité de la septoriose par étage foliaire sur la variété résistante aux trois maladies Alcides ; (A) semis d'octobre ; (B) semis de novembre

La figure 20 met en évidence que la variété résistante Alcides a été touchée par la septoriose malgré sa résistance. Ses feuilles ont mieux résisté que celles des deux variétés sensibles, elles ont disparu plus tard dans la saison et ont présenté des symptômes moins importants aux mêmes dates et ce, quelle que soit la date de semis. La chute de sévérité avant la disparition des feuilles est observée dans une moindre mesure sur la variété Alcides.

La sévérité au début des prélèvements est globalement moins importante sur le semis d'octobre mais de nouveau, en fin de saison, les différences s'atténuent entre les deux dates de semis.

5.2.1.3. Interprétation des résultats

La figure 17 montre que le semis d'octobre présente une sévérité générale plus élevée que le semis de novembre. Ce constat a déjà été relayé dans la littérature, il est lié aux conditions météorologiques favorables que subissent les semis précoce en début de saison (dès la levée) et qui permettent une infection précoce du champ (Fones and Gurr, 2015).

Les courbes de sévérité ont tendance à osciller avec des pics et des chutes (Figure 17). Ces chutes sont généralement expliquées par la disparition des feuilles plus anciennes. Celles-ci sont les plus infectées, étant donné que la septoriose se développe en premier lieu sur les feuilles plus anciennes et remonte ensuite sur les plus récentes au cours de la saison (Moreau and Maraite, 1999). La disparition des feuilles fortement infectées entraîne une chute de la sévérité moyenne. Les figures 18, 19 et 20 étayent cette hypothèse. Pour exemple, la chute entre les jours 134 et 142 sur le semis d'octobre est liée à la disparition de la feuille F6. La chute entre les jours 155 et 162 est, elle, liée à la disparition des feuilles F5 et ainsi de suite (Figures 18, 19, 20 et Figures supplémentaires 7 et 8 en annexe 5).

Les pics du 18 juin (DOY 169) dans le semis d'octobre et du 20 juin (DOY 171) dans le semis de novembre sont liés à une propagation importante de la septoriose sur les feuilles F4, F3 et dans une moindre mesure sur la feuille F2. Ces pics sont liés à une augmentation à la fois de la fréquence des feuilles touchées et de la sévérité de la maladie (Figures supplémentaires 7 et 8 en annexe 5).

En ce qui concerne la sensibilité variétale, plusieurs profils de résistance ont été analysés.

La variété ayant une sensibilité aux trois maladies (Benchmark) ainsi que la variété sensible uniquement à la septoriose (Triomph) ont toutes deux été touchées de manière importante au cours des observations. Bien que la variété sensible aux trois maladies ait été fortement atteinte par les deux autres maladies, la sévérité de son atteinte par la septoriose est globalement identique à celle de la variété uniquement sensible à la septoriose. Ces éléments amènent à poser une hypothèse selon laquelle la concurrence entre les différentes maladies sur la surface de la feuille a peu d'effets sur le niveau de sévérité de la septoriose. En effet, la septoriose est biotrophe au début de son cycle avant de devenir nécrotrophe à la fin de son cycle, alors que les rouilles sont biotrophes (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017 ; Duvivier et al., 2016 ; Slimane, 2011). Dans un premier temps, les trois maladies peuvent coexister. Par après, la septoriose entraîne une mort des tissus ce qui empêche le développement de la rouille étant donné que celle-ci est biotrophe. En résumé, les rouilles auraient peu voire pas d'influence sur le développement de la septoriose.

Parmi les variétés possédant une résistance à la septoriose, des différences ont été observées.

La variété ayant une résistance aux trois maladies (Alcides) a résisté tout au long des observations pour le semis de novembre. Cependant, elle est la variété la plus touchée le 30 avril sur le semis d'octobre. Néanmoins, après cette date, la sévérité chute et le cultivar Alcides rejoint le groupe des variétés les moins touchées. Aucune justification logique ne semble expliquer ce pic de sévérité.

Une dissociation parmi les deux dernières variétés résistantes à la septoriose (RGT Reform et Edgar) doit être faite, ces deux variétés ne réagissant pas de la même façon face à la septoriose.

Tout d'abord, RGT Reform se trouve parmi les variétés les moins touchées et ce, jusqu'au milieu du mois de juin. A ce moment, ces variétés semblent craquer pour les deux dates de semis et se retrouvent parmi les variétés les plus touchées. Pour RGT Reform, cela peut s'expliquer par le fait qu'elle ait mieux résisté durant l'année. Ce qui fait que le 18 juin, la F4 de cette variété présente une sévérité de 65%. Par contre, sur les variétés sensibles, notamment pour Benchmark, la F4 (feuille la plus touchée à cette date) a disparu ce qui entraîne une diminution de la sévérité moyenne pour cette variété. Pour la seconde variété sensible, Triomph, 50% des feuilles F4 ont disparu (Figure supplémentaire 7 en annexe 5). Cette constatation sur Triomph amène à l'hypothèse suivante : les feuilles disparues sont les feuilles les plus infectées et celles qui restent sont, quant à elles, celles qui ont le mieux résisté et qui ont une moyenne de sévérité plus faible. Cela explique que la variété Triomph ait une sévérité plus faible que RGT Reform. La même observation se retrouve sur le semis de novembre (Figure supplémentaire 8 en annexe 5).

L'ensemble de ces observations explique donc que les variétés résistantes se retrouvent parmi les variétés les plus touchées en fin de saison alors que la sévérité sur les variétés sensibles chute.

Néanmoins, une des variétés résistantes (Edgar) est plus touchée que l'autre (RGT Reform). Elle ne semble plus être totalement résistante. En effet, elle se retrouve à plusieurs reprises parmi les variétés les plus touchées dans les deux dates de semis. Cela pourrait être dû à un contournement de la résistance de cette variété par la septoriose.

5.2.2. Rouille jaune

5.2.2.1. Comparaison des cinq variétés

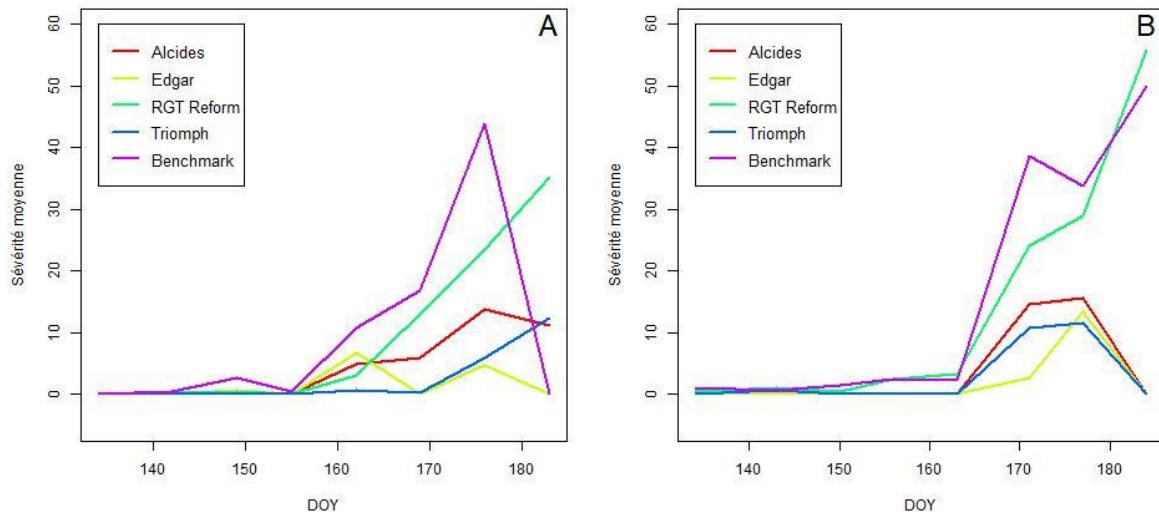


Figure 21 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille jaune sur les 5 variétés au cours du suivi (comparaison des deux dates de semis), (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre

Tableau 11 : Comparaison de la sévérité de la rouille jaune sur les 5 variétés au cours de la saison culturelle, pour le semis d'octobre en l'absence de traitement fongicide (T0) - Résultats des tests post-hoc SNK

DOY Variétés	113	120	127	134	142	149	155	162	169	176	183
Alcides	-	-	-	a	b	b	b	c	b	c	b
Benchmark	-	-	-	a	a	a	a	a	a	a	c
Edgar	-	-	-	a	b	b	b	b	c	d	c
RGT Reform	-	-	-	a	ab	b	b	c	a	b	a
Triomph	-	-	-	a	b	b	b	d	c	d	b

Dans le semis d'octobre (Figure 21A, Tableau 11), la rouille jaune n'est pas présente au début des relevés. Les premiers symptômes apparaissent le 14 mai (DOY 134). A cette date, aucune différence de sévérité n'est observée entre les variétés.

Au jour 142, la variété Benchmark devient la plus touchée. Elle est suivie de RGT Reform, les trois autres variétés ne sont globalement pas encore touchées.

A la fin du mois de mai (DOY 149), la sévérité augmente sur Benchmark qui reste la variété la plus infectée. Elle est suivie du groupe formé par les quatre autres variétés qui sont très peu touchées. Cela reste également le cas la semaine suivante (DOY 155). A partir de cette date, la rouille jaune prend de l'ampleur et sa sévérité augmente.

Au jour 162, la maladie est présente sur toutes les variétés sauf sur la variété Triomph. La maladie est alors présente dans des proportions globalement différentes pour presque tous les cultivars : Benchmark est le plus touché, suivi d'Edgar, puis d'un groupe formé par Alcide et RGT Reform et enfin par Triomph qui est le moins atteint.

A la mi-juin (DOY 169), Benchmark et RGT Reform sont les plus touchées avec un peu moins de 20% de la surface foliaire atteinte, Alcides se stabilise à 5%, Edgar n'est plus touchée et rejoint Triomph à 0% de sévérité.

Au jour 176, le pic maximum de rouille jaune est atteint par la variété Benchmark avec 44%. Elle est suivie de RGT Reform avec 25%. Alcides est la troisième variété la plus symptomatique, suivie d'Edgar et de Triomph. La sévérité de ces trois dernières a augmenté par rapport à la semaine précédente.

Durant la dernière semaine, la sévérité tombe à zéro sur Edgar et Benchmark. La sévérité sur Triomph augmente et rejoint celle d'Alcides qui s'est stabilisée à 12%. La maladie continue à se propager sur RGT Reform pour atteindre près de 35%.

Tableau 12 : Comparaison de la sévérité de la rouille jaune sur les 5 variétés au cours de la saison culturelle, pour le semis de novembre en l'absence de traitement fongicide (T0) - Résultats des tests post-hoc SNK

DOY Variétés	122	128	134	143	150	156	163	171	177	184
Alcides	-	-	b	a	b	b	c	c	b	b
Benchmark	-	-	a	a	a	a	b	a	a	a
Edgar	-	-	b	a	b	b	c	d	b	b
RGT Reform	-	-	a	a	b	a	a	b	a	a
Triomph	-	-	b	a	b	b	c	c	b	b

Pour le semis de novembre (Figure 21B, Tableau 12), la maladie se déclare à la même période que pour le semis d'octobre. Celle-ci reste assez faible durant le mois de mai, ne dépassant pas les 5%. Au jour 150, la variété Benchmark est la première à commencer à craquer.

La semaine suivante (DOY 156), la sévérité sur RGT Reform commence aussi à augmenter pour atteindre la même proportion que Benchmark (4%).

Au jour 163, RGT Reform est en tête, suivie de Benchmark qui est un peu moins touchée. Les trois autres variétés ne sont que très peu infectées.

Après le jour 163, la rouille explose, le 20 juin (DOY 171) Benchmark est le cultivar le plus touché avec 40%, suivi de RGT Reform avec 25%. Les variétés Alcides et Triomph sont touchées respectivement à 11% et 14%. Edgar est la variété la moins touchée avec 3%.

La semaine suivante (DOY 177), la sévérité de la rouille jaune sur la variété Benchmark diminue légèrement alors qu'elle augmente sur RGT Reform. Ces deux variétés sont alors touchées de manière similaire. De plus, la rouille jaune augmente très légèrement pour les variétés Alcides et Triomph, cette augmentation est plus marquée pour Edgar qui rejoint ces deux dernières à leur niveau de sévérité.

Enfin, le dernier jour (DOY 184), la sévérité tombe à 0% pour Edgar, Alcides et Triomph. Cependant, la rouille jaune continue à se propager sur RGT Reform et Benchmark pour atteindre une sévérité située entre 50 et 60%.

La rouille jaune touche globalement plus les semis de novembre que ceux d'octobre.

5.2.2.2. Description des variétés par étage foliaire

Afin de mieux comprendre la dynamique de la rouille jaune, une analyse de la sévérité sur les différents étages foliaires durant le suivi est établie pour les trois variétés suivantes : RGT Reform, Benchmark et Alcides. Chacune représente un profil de résistance différent.

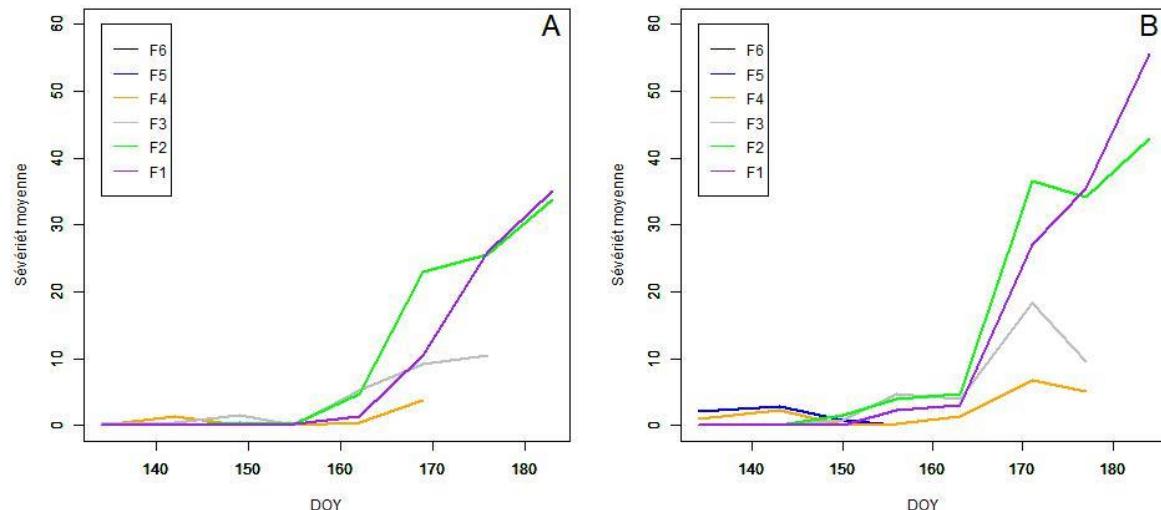


Figure 22 : Sévérité de la rouille jaune par étage foliaire sur la variété sensible RGT Reform ; (A) semis d'octobre ; (B) semis de novembre

La figure 22 représente la sévérité moyenne de rouille jaune par étage foliaire au cours du suivi de la culture. La figure 22A met en évidence que la maladie apparaît sur la F4 avant de se propager rapidement à la F3. Dans le semis du mois de novembre, la maladie apparaît une semaine plus tôt que pour le semis d'octobre et simultanément sur la F5 et la F4.

Sur le semis de novembre, la maladie se répand plus rapidement et plus sévèrement sur l'entièreté de la plante. De plus, la totalité des feuilles est touchée au jour 155 alors que dans le semis d'octobre, les feuilles sont toutes touchées au jour 162. A partir de ces deux dates, la sévérité de la rouille brune s'intensifie brusquement.

Contrairement à la septoriose, ce sont les nouvelles feuilles F1 et F2 qui atteignent les pics de sévérité les plus importants. La feuille F1 est ainsi couverte en moyenne à 55% à la fin des relevés dans le semis de novembre.

Sur les deux graphiques (Figures 22A et 22B), la sévérité de la rouille jaune sur une feuille termine toujours par dépasser la sévérité de la feuille qui la précède. Par exemple, dans la figure 22A, la sévérité de F3 dépasse celle de F4 au jour 144, F2 dépasse F3 au jour 162, et F1 dépasse F2 au jour 175.

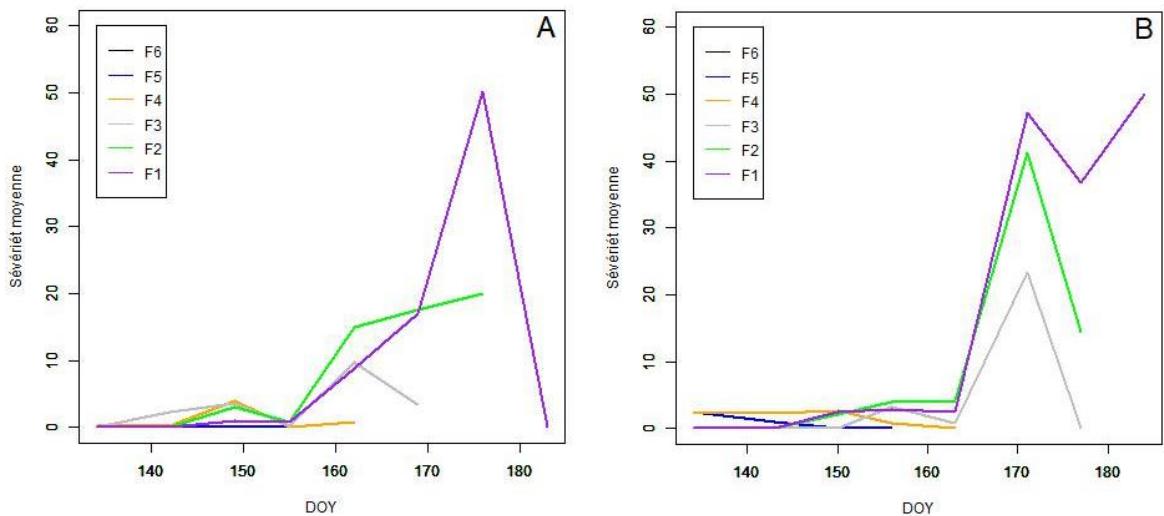


Figure 23 : Sévérité de la rouille jaune par étage foliaire sur la variété sensible aux trois maladies Benchmark ; (A) semis d'octobre ; (B) semis de novembre

Sur le semis d'octobre (Figure 23A), la rouille jaune se développe en premier lieu sur la F3 avant de se propager simultanément au jour 142 sur la F2 et la F4. Après le jour 149, la sévérité diminue. A partir du jour 155, la maladie augmente sur les F1, F2 et F3, ces feuilles commencent à craquer mais plus lentement que dans le semis de novembre. Les feuilles de la variété Benchmark meurent plus tôt que celles de la variété RGT Reform et ce, en moyenne une semaine plus tôt. La sévérité sur les F3 et F1 diminuent nettement vers une valeur proche de zéro respectivement aux jours 171 et 184.

Sur le semis de novembre, la rouille jaune apparaît en premier lieu sur les plus anciennes feuilles F5 et F4. A partir du 23 mai (DOY 143), la rouille se propage aux feuilles F2 et F1. La rouille ne se développe sur la F3 que la semaine suivante (DOY 150). C'est à partir du 12 juin (DOY 163) que la variété Benchmark craque totalement pour la rouille. La sévérité sur les feuilles F2 et F3 diminue juste avant que ces feuilles ne disparaissent.

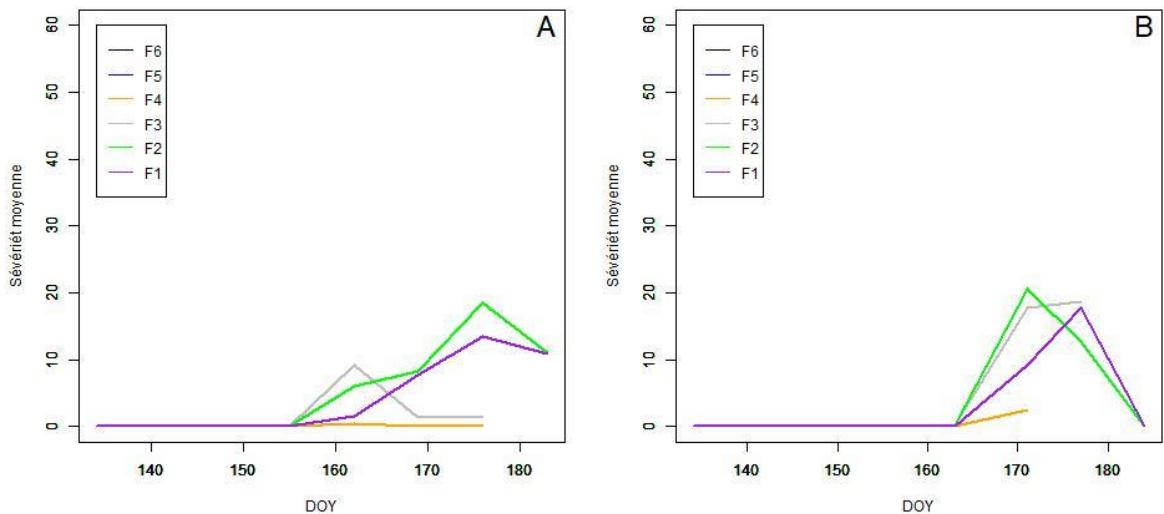


Figure 24: Sévérité de la rouille jaune par étage foliaire sur la variété résistante aux trois maladies Alcides ; (A) semis d'octobre ; (B) semis de novembre

La figure 24 montre que la variété Alcides résiste relativement bien en début de saison. En fin de saison, elle finit par présenter des symptômes mais avec une sévérité moins élevée que les variétés sensibles. La période à laquelle la variété Alcides craque est similaire à celle des variétés sensibles. Tout comme pour les variétés sensibles, le semis de novembre craque une semaine après le semis d'octobre. Cependant, il y a trois différences entre les variétés sensibles et la variété Alcides. Premièrement, aucune feuille n'est touchée avant que la variété ne craque. Deuxièmement, la rouille apparaît sur toutes les feuilles en même temps et finalement, la sévérité de la rouille sur les feuilles est plus faible que sur les variétés sensibles.

5.2.2.3. Interprétation des résultats

La rouille jaune touche plus sévèrement les semis de novembre que ceux d'octobre ce qui concorde avec les informations fournies dans la littérature par Gladders (2007). De plus, la rouille jaune apparaît pour la plupart des variétés plus préocurement sur le semis de novembre que sur celui d'octobre.

La rouille jaune est plus explosive que la septoriose qui progresse étage foliaire par étage foliaire. En effet, la figure supplémentaire 9 (annexe 5) illustre que la rouille jaune apparaît sur toutes les feuilles d'Edgar au jour 162 alors que la semaine précédente la maladie n'était pas présente. La comparaison entre les figures supplémentaires 9 et 7 (annexe 5) met en évidence que la rouille jaune a une sévérité moins importante que la septoriose et ce, à la quasi-totalité des dates d'observation (particulièrement en début de saison).

Le faible développement de la rouille jaune peut être expliqué par les conditions climatiques de cette année. En effet, la rouille jaune est favorisée par des hivers doux (Gladders, 2007), la figure 16 montre que celui-ci l'a été au début mais qu'à partir du mois de février 2018 jusque fin mars 2018, les températures sont plus basses que la normale. De plus, il y a eu une période de gel a eu lieu durant la troisième décennie de février or, toujours selon Gladders (2007), le gel a un impact négatif sur la propagation de maladie. Ces deux éléments ont donc probablement permis de limiter la propagation de la maladie durant l'hiver.

De plus, le printemps n'a pas été plus favorable que l'hiver au développement de la rouille jaune. En effet, selon le Livre Blanc Céréales (2017), la rouille jaune est favorisée par un printemps frais et humide. La figure 16 révèle également que le printemps a été, dès le début du mois d'avril, anormalement chaud et sec, ce qui n'a pas favorisé le développement de la rouille jaune.

Les chutes brutales de sévérité observées sur certaines feuilles avant leur disparition (par exemple sur la figure 23B) sont certainement liées à une disparition des feuilles les plus touchées. En effet, à la fin de son cycle, le champignon laisse derrière lui des nécroses. Cette hypothèse est confirmée par la figure supplémentaire 10 (annexe 5) qui met en évidence qu'entre les DOY 171 et 177, la F3 disparaît. De plus, l'incidence et la sévérité de la maladie sur la F2 ont diminué à cause de la disparition des F2 les plus touchées la semaine précédente.

Les variétés sensibles (RGT Reform et Benchmark) ont été touchées de manière importante, l'attaque par la rouille jaune ayant été plus importante en fin de saison.

Durant la dernière semaine des relevés, dans le semis d'octobre (Figure 21A), une chute de sévérité pour Benchmark est observée. Celle-ci est probablement liée à l'évolution de la rouille en nécroses, entraînant la mort des feuilles.

Parmi les variétés présentant un profil résistant, toutes ont réagi de manière identique pour le semis de novembre. En effet, la rouille jaune apparaît après le jour 163 pour les trois variétés résistantes.

Pour le semis d'octobre, toutes n'ont, par contre, pas réagi de la même façon. Parmi les variétés résistantes, la variété Triomph est celle qui a le mieux résisté cette saison. En effet, cette variété est celle qui a été touchée le plus tardivement. De plus, elle fait partie du groupe des variétés les moins touchées pour presque toutes les dates de relevés à l'exception du jour 183 pour le semis d'octobre et du jour 171 pour le semis de novembre. La variété Edgar a relativement bien résisté. Cependant, certaines observations sur la figure 21A tels que les pics aux jours 162 et 176, ainsi que la chute au jour 169 sont difficilement explicables. La seule explication plausible serait une erreur de la part de l'observateur qui n'aurait pas repéré ou alors confondu la rouille jaune avec de la rouille brune au jour 169. Finalement, la variété Alcides a bien résisté au début des relevés avant de craquer au jour 155.

5.2.3. Rouille brune

5.2.3.1. Comparaison des cinq variétés

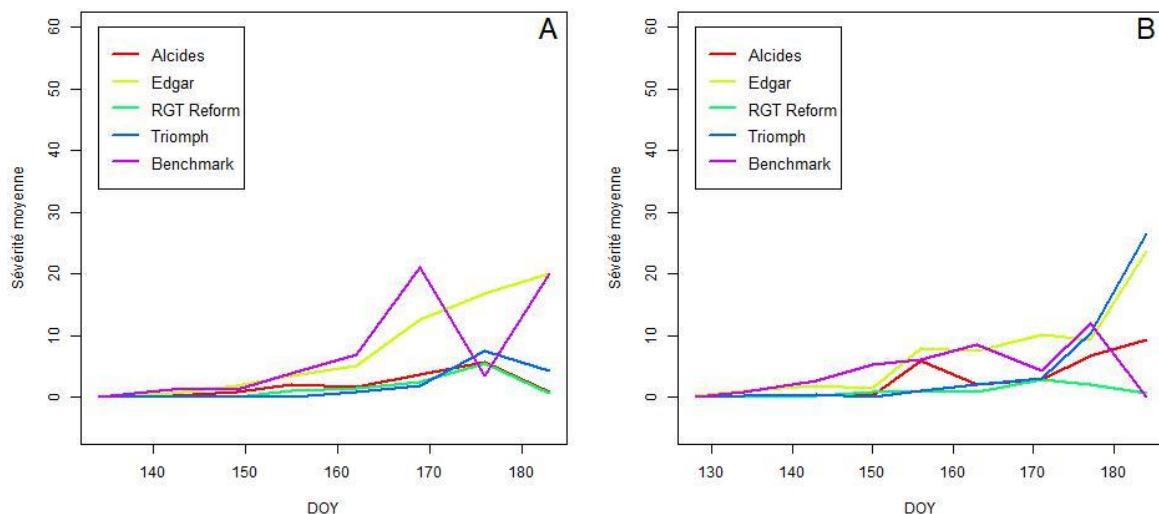


Figure 25: Evolution de la sévérité moyenne de la rouille brune sur les 5 variétés au cours du suivi (comparaison des deux dates de semis), (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre

Tableau 13 : Comparaison de la sévérité de la rouille brune sur les 5 variétés au cours de la saison culturelle, pour le semis d'octobre en l'absence de traitement fongicide (T0) - Résultats des tests post-hoc SNK

DOY Variétés	113	120	127	134	142	149	155	162	169	176	183
Alcides	-	-	-	a	b	a	b	b	c	b	b
Benchmark	-	-	-	a	a	a	a	a	a	c	a
Edgar	-	-	-	a	a	a	a	a	b	a	a
RGT Reform	-	-	-	a	b	b	b	bc	bc	b	b
Triomph	-	-	-	a	b	b	c	c	c	b	b

La sévérité de l'attaque de rouille brune sur le semis d'octobre (Figure 25A, Tableau 13) est restée relativement faible jusque fin mai (DOY 149). Au jour 134, la maladie est présente de manière très faible (0.05%) sur les variétés Benchmark et RGT Reform sans que la sévérité de la rouille sur celles-ci ne soit significativement différente de celle des autres variétés. A partir du jour 142, des groupes se sont formés entre les différentes variétés. Les variétés Benchmark et Edgar sont les plus touchées. Alcides, RGT Reform et Triomph ne présentent, elles, que très peu de symptômes.

La semaine suivante (DOY 149), Edgar, Alcides et Benchmark sont les cultivars les plus touchés. Triomph et RGT Reform ne présentent pas de symptôme. A partir du début du mois de juin (DOY 155), les différences entre les variétés se creusent. Benchmark est la variété la plus touchée avec Edgar. Triomph n'est, pour sa part, toujours pas touchée.

Le 11 juin (DOY 162), Benchmark et Edgar sont toujours les plus atteintes. De plus, les premiers symptômes apparaissent sur la variété Triomph qui reste classée dernière.

La semaine suivante (DOY 169), la sévérité de la maladie augmente pour toutes les variétés. Benchmark est plus touchée qu'Edgar. Alcides et Triomph sont les moins sévèrement atteintes.

Fin juin (DOY 176), la sévérité de la maladie chute brusquement sur Benchmark qui devient la variété la moins touchée (moins de 5%). Edgar est la variété la plus fortement touchée avec une sévérité à 20%.

Enfin, la dernière semaine (DOY 183), la sévérité sur Benchmark augmente fortement et atteint le même niveau que celle d'Edgar. RGT Reform et Alcides tombent à une valeur proche de 0%, Triomph se trouve à 4%.

Tableau 14 : Comparaison de la sévérité de la rouille brune sur les 5 variétés au cours de la saison culturelle, pour le semis de novembre en l'absence de traitement fongicide (T0) - Résultats des tests post-hoc SNK

DOY Variétés	122	128	134	143	150	156	163	171	177	184
Alcides	-	a	b	b	c	a	b	b	a	b
Benchmark	-	a	a	a	a	a	a	b	a	b
Edgar	-	a	a	a	b	a	a	a	a	a
RGT Reform	-	a	b	b	c	b	c	b	b	b
Triomph	-	a	b	b	c	b	bc	b	a	a

Sur le semis de novembre (Figure 25B, Tableau 14), la rouille brune est apparue une semaine plus tôt que sur le semis d'octobre. Au jour 128, la maladie est présente de manière très faible sur toutes les variétés à l'exception de RGT Reform qui n'est pas touchée.

La semaine suivante (DOY 134), les variétés Benchmark et Edgar sont les plus touchées. La maladie n'est plus présente sur Alcides et RGT Reform.

Au milieu du mois de mai (DOY 143), Benchmark et Edgar sont les plus touchées. Alcides, RGT Reform et Triomph ne présentent que peu de symptômes. A la fin du mois de mai (DOY 150), les sévérités sur Benchmark (5%) s'intensifient. Les quatre autres cultivars sont les moins touchés et forment un seul groupe. Cependant, la variété Triomph ne présente aucun symptôme de rouille brune.

A partir de ce moment-là, la maladie commence à se propager. Le 5 juin (DOY 156), les cultivars les plus touchés sont Edgar, Benchmark et Alcides. Triomph et RGT Reform sont, eux, moins sévèrement atteints (1%).

La semaine suivante (DOY 163), la sévérité de la rouille brune augmente sur Benchmark et diminue légèrement sur Edgar, ces deux dernières variétés forment le groupe des variétés les plus sévèrement atteintes. La sévérité sur Alcides chute de 4% mais Alcides reste plus touchée que Triomph et RGT Reform.

Le 20 juin (DOY 171), la sévérité sur Edgar continue de croître. Il s'agit de la variété la plus touchée. La sévérité sur Benchmark diminue alors qu'elle augmente sur les autres variétés.

Fin juin (DOY 177), la sévérité sur Edgar se stabilise, elle diminue pour RGT Reform et augmente pour les trois autres variétés. Benchmark, Triomph, Edgar et Alcides sont les plus touchées alors que RGT Reform est la moins touchée.

Le dernier jour des relevés (DOY 184), la sévérité sur Edgar et Triomph augmente nettement jusque plus ou moins 25% et elle monte jusque 9.5% sur Alcides. Quant à Benchmark et RGT Reform, elles n’expriment plus de symptômes.

5.2.3.2. Description des variétés par étages foliaires

Afin de mieux comprendre la dynamique de la rouille brune, une analyse de la sévérité sur les différents étages foliaires durant le suivi est établie pour les trois variétés suivantes : Edgar, Benchmark et Alcides. Chacune représente un profil de résistance différent.

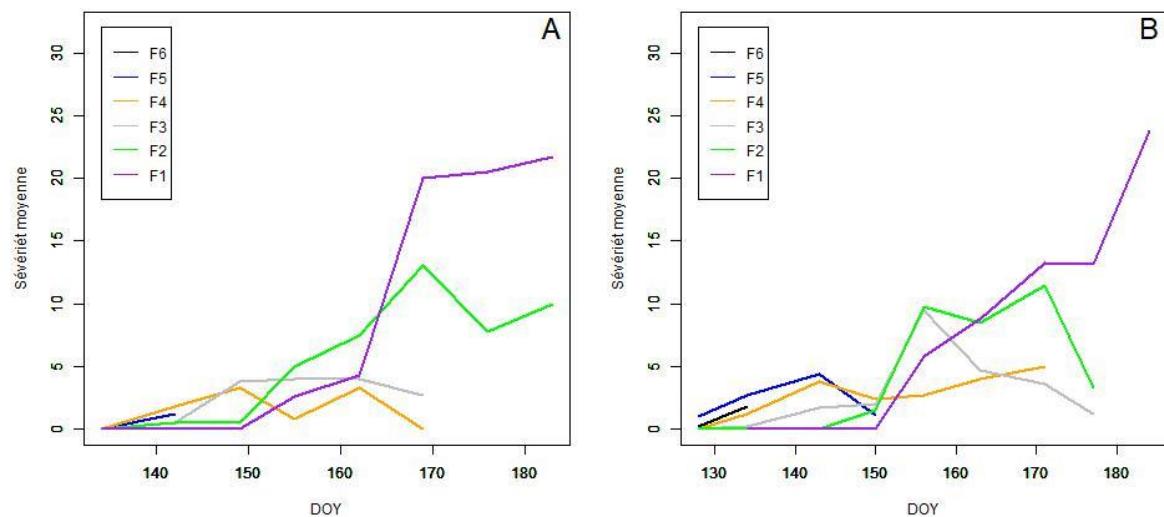


Figure 26: Sévérité de la rouille brune par étage foliaire sur la variété sensible Edgar ; (A) semis d'octobre ; (B) semis de novembre

La figure 26 représente l’évolution de la rouille brune sur les différents étages foliaires de la variété Edgar au cours du suivi.

La rouille brune apparaît plus précocement que la rouille jaune et se développe en premier lieu sur toutes les feuilles du semis de novembre, à part pour la F1. Les feuilles de ce semis sont touchées en moyenne une semaine avant les feuilles similaires du semis d’octobre.

Cette maladie apparaît en premier lieu et simultanément sur les plus vieilles feuilles (F6, F5 et F4). La sévérité sur ces trois feuilles augmente dans un premier temps pour ensuite se propager aux feuilles plus récentes.

La sévérité sur les quatre feuilles les plus vieilles (F6, F5, F4 et F3) augmente peu sur le semis d’octobre et ne dépasse pas les 5%. Sur le semis de novembre, elles sont légèrement plus touchées par la rouille brune. Cependant, elles disparaissent plus précocement sur le semis d’octobre que sur celui de novembre.

A partir du 29 mai (DOY 154), les trois feuilles principales (F3, F2 et F1) commencent à être touchées de manière importante sur les 2 semis.

Dans le semis de novembre, la F2 est touchée plus sévèrement et plus tôt dans la saison. De plus, elle disparaît plus tôt dans la saison que pour le semis d'octobre. La sévérité F1 augmente plus progressivement sur le semis de novembre que sur celui d'octobre.

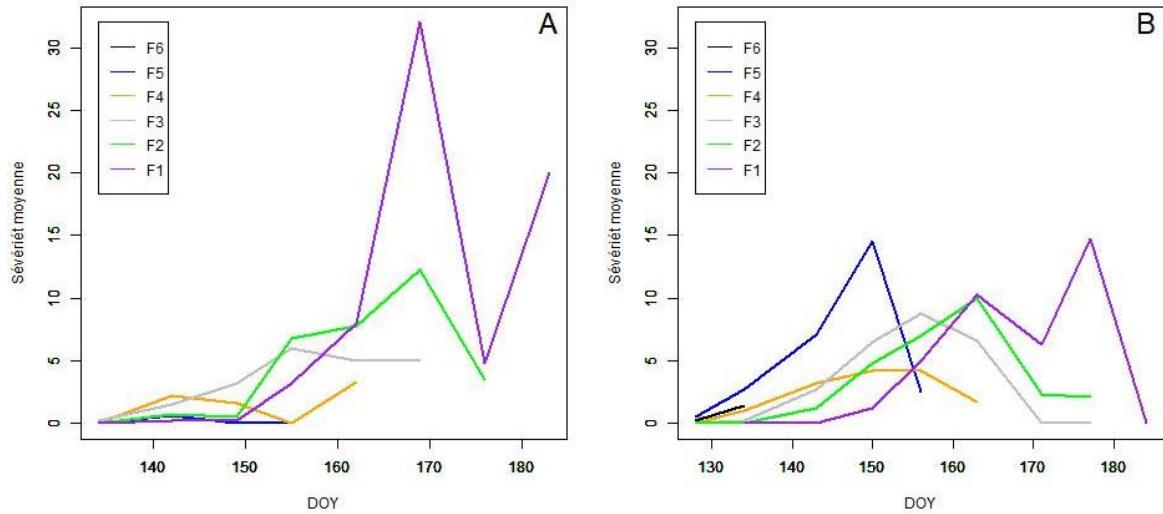


Figure 27 : Sévérité de la rouille brune par étage foliaire sur la variété sensible aux trois maladies Benchmark ; (A) semis d'octobre ; (B) semis de novembre.

La figure 27 met en évidence que la rouille brune apparaît, de nouveau, plus précocement sur le semis de novembre que sur celui d'octobre.

Les F6, F5 et F4 sont touchées plus sévèrement sur le semis de novembre. Les F3 sont infectées à la même date et sont touchées de manière similaire. La F2 est, par contre, touchée plus tôt dans la saison dans le semis de novembre mais la maladie progresse plus lentement.

La F1 est, quant à elle, touchée de manière plus explosive et plus sévère dans le semis d'octobre. Elle atteint un pic le 18 juin (DOY 169) avant de voir sa sévérité diminuer pour remonter par la suite. Dans le semis de novembre, la dernière feuille a une sévérité nulle à la fin des relevés.

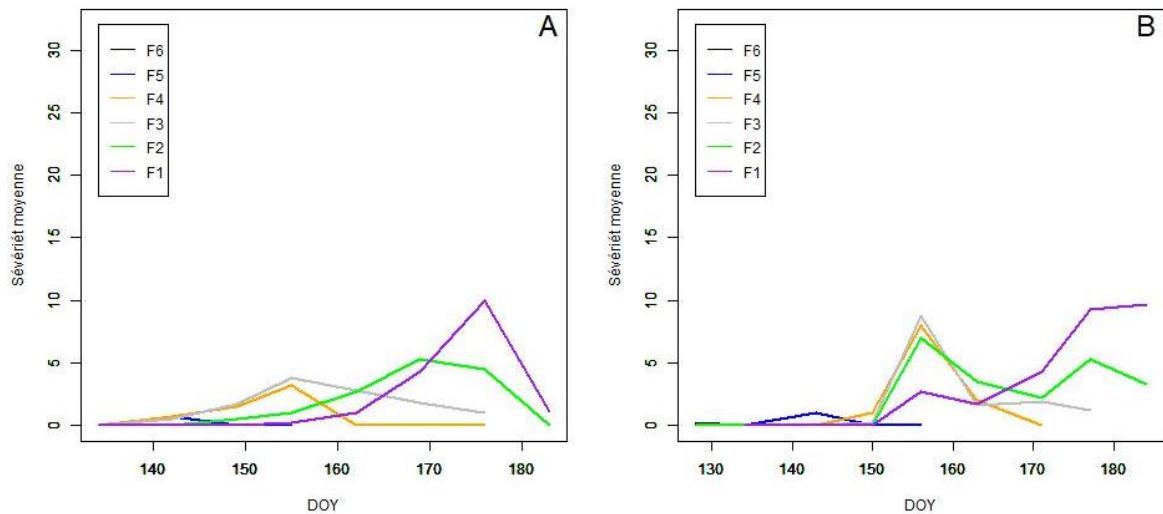


Figure 28: Sévérité de la rouille brune par étage foliaire sur la variété résistante aux trois maladies Alcides ; (A) semis d'octobre ; (B) semis de novembre

La figure 28 montre que sur la variété Alcides, la rouille apparaît à la même période que sur les variétés sensibles. Cependant, la sévérité est moins importante que sur ces dernières.

Les feuilles F6 et F5 sont peu touchées par la rouille brune. Cependant, la rouille apparaît au même moment que sur les variétés sensibles.

Pour les deux dates de semis, les feuilles les plus récentes (F4, F3, F2 et F1) sont moins sévèrement touchées et disparaissent plus tard dans la saison que sur les variétés sensibles.

5.2.3.3. Interprétation des résultats

La rouille brune apparaît une semaine plus tôt dans le semis de novembre que dans celui d'octobre. Ce constat pourrait appuyer les travaux de Azzimonti (2013) qui mettent en évidence que l'expression de résistances quantitatives pour la rouille brune est influencée par le stade de développement. Ce point sera discuté dans le chapitre suivant.

Alors que la rouille se développe en temps normal vers la fin du mois de mai (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017), cette année, elle s'est développée dès le début du mois mai sur le semi de novembre. Les températures anormalement chaudes du mois d'avril (Figure 16) ont favorisé ce développement précoce.

De plus, dès la dernière décade du mois de mai et ce jusqu'à la fin des relevés, les températures moyennes étaient comprises entre 15°C et 20°C. Cela correspond aux températures optimales pour le développement de la rouille brune (Kolmer, 1996). La figure 25 illustre d'ailleurs une augmentation de la sévérité à partir du jour 150, ce qui confirme que les conditions étaient favorables.

Le fait que la rouille brune, contrairement à la septoriose, apparaisse simultanément sur les F6, F5 et F4 est dû à la façon dont elle se propage. En effet, la septoriose se propage principalement par contact et éclaboussures de gouttes de pluie et monte donc étage par étage grâce aux éclaboussures de pluie (Livre Blanc Céréales : Septoriose, 2017). La rouille se propage par le vent, les spores de la rouille peuvent donc se déposer sur toutes les feuilles présentes lorsque les conditions sont propices à la sporulation. Le champignon prend 8 à 15 jours pour exprimer des symptômes lorsque les conditions sont optimales (Azzimonti, 2013) or, les conditions n'étaient pas optimales à cette période. L'infection a donc eu lieu au minimum 15 jours avant l'expression des symptômes qui sont apparus au jour 128 sur le semi de novembre. Quinze jours avant le jour 128, seules les feuilles F6, F5 et F4 étaient présentes. Ce constat montre que les spores de la rouille infectent toutes les feuilles présentes lors de la libération de celles-ci. Ce constat apporte également une explication à l'explosivité et à la propagation très rapide de la rouille sur l'entièreté de la plante.

La variété présentant un profil de résistance sensible uniquement à la rouille brune (Edgar) a été la variété la plus sévèrement atteinte tout au long de la saison.

La variété sensible aux trois maladies (Benchmark) s'est retrouvée dans le groupe des variétés les plus atteintes durant une grande partie de la saison mais vers la fin sa sévérité a commencé à diminuer. Il y a une explication à ce phénomène : la chute de sévérité sur Benchmark au jour 176 (dans le semis d'octobre) est liée à la disparition de sa F3 et à une chute de sévérité sur sa F1 (Figure supplémentaire 11 en annexe 5). Cette chute sur la F1 pourrait être entraînée par une évolution de la rouille, une partie des pustules disparaissent et la rouille finit par entraîner la nécrose de la feuille. Benchmark est donc en moyenne moins touchée mais il s'agit d'une conséquence des infections sévères qui sont, elles, liées à sa sensibilité et qui ont atteint Benchmark plus tôt dans la saison. Dans le semis de novembre, la chute de la sévérité le dernier jour des observations, est liée à la disparition des F1.

Les variétés présentant une résistance à la rouille sont plus faiblement touchées que les variétés sensibles, tout au long de la saison. La sévérité de l'infection par la rouille brune sur ces variétés reste d'ailleurs relativement faible tout au long des prélèvements pour le semis d'octobre. Pour le semis de novembre par contre. Ces variétés résistent bien mais la sévérité de la rouille brune augmente fortement les deux dernières semaines des relevés sur deux des variétés résistantes (Alcides et Triomph), la pression de la maladie étant probablement devenue trop importante à ces dates.

La seule variété à ne pas craquer pour le semis de novembre est RGT Reform, elle a la cotation de résistance la plus élevée selon Meza (2017). De plus, elle est sensible à la rouille jaune qui est très présente sur cette variété les deux dernières semaines de relevés. L'hypothèse la plus probable serait qu'elle n'ait pas craqué car elle est résistante. Cependant, étant donné que les 2 autres variétés également résistantes à la rouille brune ont, elles aussi, craqué, une seconde hypothèse peut être posée : RGT Reform ayant été infectée à la fois par la rouille jaune et la rouille brune, ces 2 maladies seraient alors entrées en compétition sur la surface de la feuille et ce serait la rouille jaune qui aurait pris le dessus par rapport à la rouille brune.

5.3.Influence du génotype

5.3.1. Septoriose

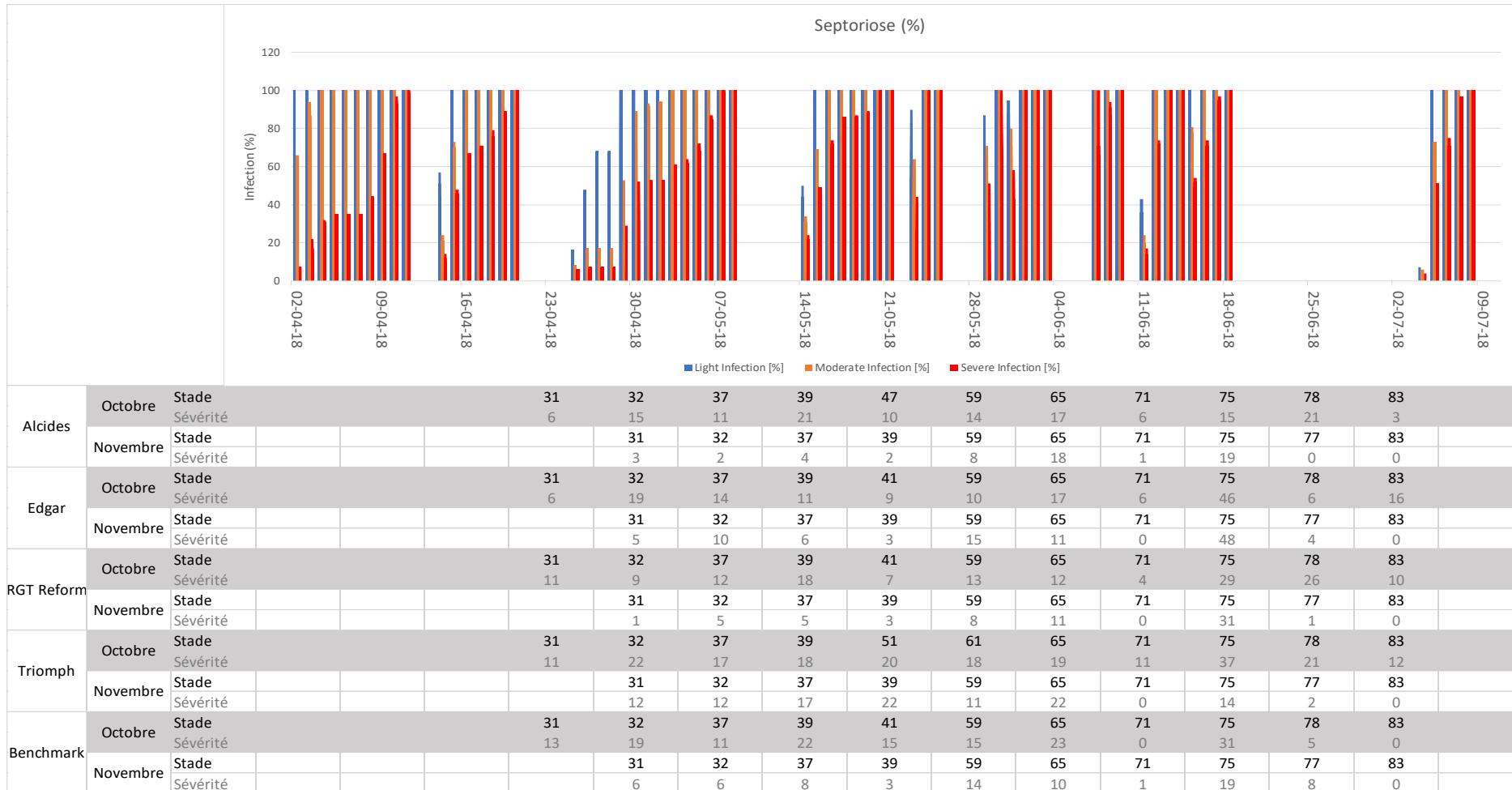


Figure 29 : Comparaison de la sévérité de la septoriose en fonction des stades de développement (le graphique représente la prédiction du risque d'infection par la septoriose (%) fournies par « Pessl instruments »)

5.3.1.1. Description des résultats pour la septoriose

La figure 29 présente les risques d'infections par la septoriose calculés par le modèle développé par « Pessel instruments », ce modèle est brièvement décrit en annexe 1. En-dessous de ce graphique, le tableau reprend les sévérités moyennes de septoriose observées au champ. Les dates présentes sur le graphique correspondent aux mesures en champ reprise du tableau dans le semis d'octobre. Le graphique et le tableau sont donc synchronisés dans le temps pour les observations de cette date de semis. Les prélèvements dans le semis de novembre ont été, eux, prélevés un jour plus tard (voir deux dans certains cas) que les dates présentes dans le tableau.

Le septoriose est présente dès le début des relevés dans toutes les variétés et ce, quelle que soit la date de semis. La sévérité moyenne de la septoriose est généralement plus importante dans le semis d'octobre que dans le semis de novembre.

Des pics d'infection par la septoriose (infection à 100%) ont lieu quasiment toute la durée des prélèvements, à l'exception de la dernière quinzaine de juin.

5.3.1.2. Interprétation des résultats

Gieco et al. (2004) et Dreisigacker et al. (2015) ont décrit l'existence de différences temporelles dans l'expression des gènes de résistance, en effet, l'expression de certains gènes se fait dès le stade plantule alors que d'autres s'expriment durant le stade plante adulte. Cependant, à la vue des résultats obtenus, il est difficile de tirer des conclusions. En effet, dès le début des observations, la septoriose est déjà bien présente dans le champ. Des différences existent entre les variétés résistantes et non résistantes à la septoriose mais l'analyse de la sévérité aux différents stades n'apporte que peu d'informations.

La différence entre les dates de semis n'est pas en lien avec l'expression de résistance aux différents stades. Cela est lié au fait que les semis d'octobre subissent la période d'intense libération d'ascospores et ont donc un niveau d'infection primaire plus important que le semis de novembre (Ben Romdhane, 2003). De plus ces semis subissent, avant l'hiver, des conditions climatiques propices au développement de la septoriose (Fones and Gurr, 2015).

La façon dont l'expérimentation s'est déroulée n'était pas adéquate pour permettre de tirer des conclusions sur l'influence de l'expression du génotype. En effet, le suivi en dynamique a commencé après l'apparition de la maladie, il manque donc des informations sur la réaction des variétés à l'établissement de la septoriose.

5.3.2. Rouille jaune

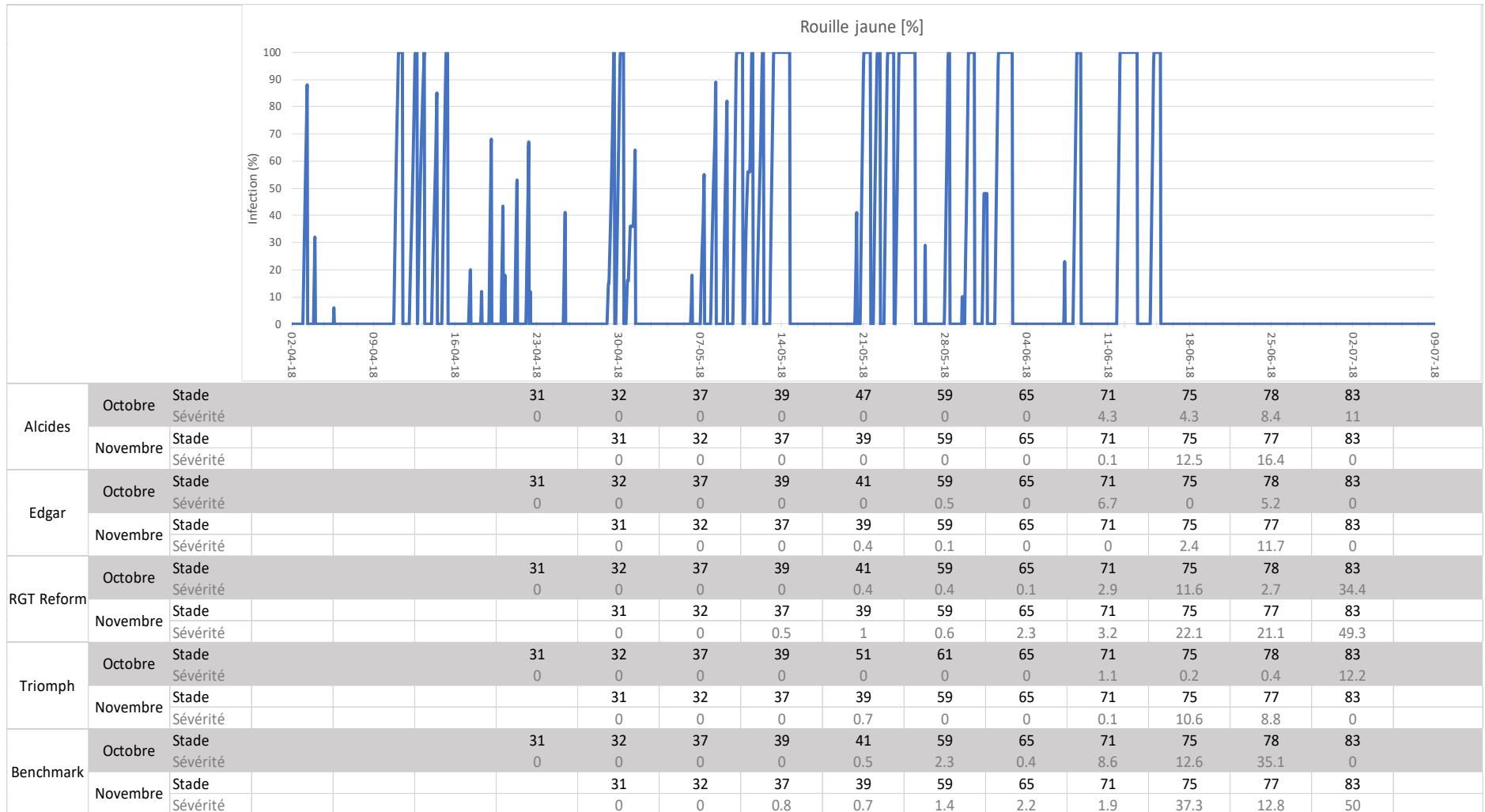


Figure 30: Comparaison de la sévérité de la rouille jaune en fonction des stades de développement (le graphique représente la prédiction du risque d'infection par la rouille jaune (%) fournies par « Pessl instruments »)

5.3.2.1. Description des résultats pour la rouille jaune

La figure 30 présente les risques d'infections par la rouille jaune calculés par le modèle développé par « Pessel instruments ». Ce modèle est brièvement décrit en annexe 1. En-dessous de ce graphique, le tableau reprend les sévérités moyennes de rouille jaune observées au champ. Les dates présentes sur le graphique correspondent aux mesures en champ reprises dans le tableau pour le semis d'octobre. Le graphique et le tableau sont donc synchronisés dans le temps pour les observations de cette date de semis. Les prélèvements dans le semis de novembre ont été, eux, prélevés un jour plus tard (voir deux dans certains cas) que les dates présentes dans le tableau.

A part pour la variété Alcides, les symptômes apparaissent sur le semis de novembre au minimum une semaine avant le semis d'octobre.

La première vague de pics d'infection a lieu du 10 au 15 avril 2018, cela veut dire qu'à cette date, si des spores de rouille jaune étaient présentes, celles-ci ont pu infecter les feuilles de blé. La deuxième vague a lieu le 29 et 30 avril. Les premiers symptômes sont, eux, observés le 14 mai sur le semis de novembre. Les variétés sensibles RGT Reform et Benchmark sont les premières touchées (elles ont des résistances respectives de 5.8 et 4.6 d'après Meza et al. (2017)). Les symptômes sur ces deux variétés apparaissent donc plus d'un mois après la première vague de pics d'infection ou alors 7 à 14 jours après la deuxième vague de pics d'infection. Une semaine plus tard, ce sont les deux variétés résistantes à la rouille jaune, Edgar et Triomph qui sont touchées (elles ont un niveau de résistance de 8.6 d'après Meza et al. (2017)). La variété Alcides, qui est résistante aux trois maladies, est touchée la dernière (le 11 mai) (résistance de 8.8 d'après Meza et al. (2017)).

5.3.2.2. Interprétation des résultats

Il est peu probable que la première vague d'infection soit responsable des symptômes. En effet, selon Savary et al. (2016), les symptômes apparaissent 10 à 14 jours après l'infection. Les symptômes auraient donc dû apparaître beaucoup plus tôt si l'infection avait eu lieu entre le 10 et 15 avril. L'hypothèse la plus probable est que, durant la première vague d'infection, les conditions étaient réunies pour permettre l'infection mais les spores n'étaient pas présentes dans la culture.

L'infection du champ a probablement eu lieu 29 et 30 avril, en effet, les symptômes apparaissent sur les variétés sensibles entre 8 à 14 jours après ces dates, ce qui correspond aux informations fournies par Savary et al. (2016).

La différence entre les deux dates de semis pourrait être liée à des résistances partielles mais qui ne sont pas exprimées dès le stade plantule. Ces résistances se mettent alors en place au stade adulte, c'est-à-dire durant la montaison (celle-ci commence au stade 30), voire plus tard (du Cheyron, 2016). En suivant l'hypothèse selon laquelle cette résistance partielle apparaît au stade 32, elle aurait été présente lors de l'infection pour le semis d'octobre mais pas pour celui de novembre (qui se trouvait au stade 31 lors de l'infection). La maladie aurait alors été freinée dans le semis d'octobre mais pas dans le semis de novembre, expliquant ainsi le décalage dans l'apparition des symptômes entre les deux dates de semis pour les variétés sensibles.

Pour les variétés résistantes, les symptômes de rouille jaune apparaissent plus tard que sur les variétés sensibles. Cependant, ils n'apparaissent pas sur les trois variétés au même moment. Pour Edgar, l'apparition des symptômes est décalée d'une semaine pour les deux dates de semis par rapport à l'apparition des symptômes sur les variétés sensibles. Et de nouveau, la maladie apparaît en premier sur le semis de novembre. C'est peut-être lié à une résistance partielle mais plus forte que sur les variétés sensibles.

Sur Alcides et Triomph, la rouille jaune apparaît tardivement (le 11 juin) et en même temps sur les deux dates de semis. Ces deux variétés ont certainement une résistance liée à des gènes majeurs de résistance. Les symptômes du 21 mai sur Triomph sont difficilement explicables.

5.3.3. Rouille brune

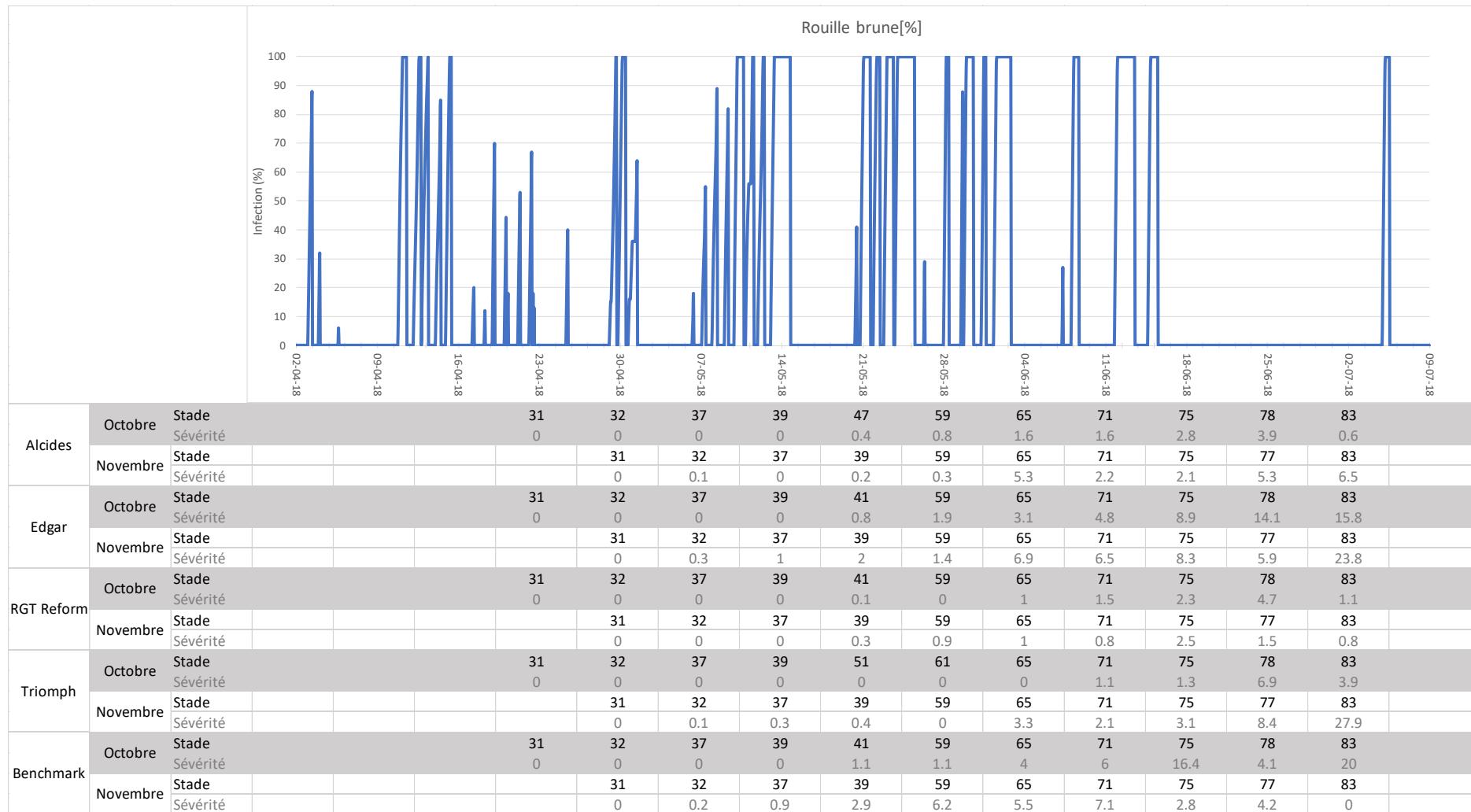


Figure 31 : Comparaison de la sévérité de la rouille brune en fonction des stades de développement (le graphique représente la prédition du risque d'infection par la rouille brune (%)) fournies par « Pessl instruments »)

5.3.3.1. Description des résultats pour la rouille brune

La figure 31 présente les risques d'infections par la rouille brune calculés par le modèle développé par « Pessel instruments ». Ce modèle est brièvement décrit dans l'annexe 1. En-dessous de ce graphique, le tableau reprend les sévérités moyennes de rouille brune observées au champ. Les dates présentes sur le graphique correspondent aux mesures en champ reprises dans le tableau pour le semis d'octobre. Le graphique et le tableau sont donc synchronisés dans le temps pour les observations de cette date de semis. Les prélèvements dans le semis de novembre ont été, eux, prélevés un jour plus tard que les dates présentes dans le tableau.

La figure 31 montre que les semis de novembre de pratiquement toutes les variétés sont touchées au minimum deux semaines plus tôt par rapport aux semis d'octobre. La seule exception est observée pour la variété Triomph où les deux dates de semis sont touchées la même semaine.

La première vague de pics d'infection a lieu du 10 au 15 avril, cela veut dire qu'à cette date, si des spores de rouille brune étaient présentes, celles-ci ont pu infecter les feuilles de blé. La deuxième vague de pics a lieu le 29 et 30 avril. Les pustules de rouilles brunes sont observées pour la première fois le 7 mai sur les semis de novembre de Alcides, Edgar, Triomph et Benchmark, c'est-à-dire qu'ils sont apparus entre 21 et 28 jours après la première vague de pics ou 9 jours après la deuxième vague de pics d'infection. Dans les semis d'octobre, les pustules sont observées pour la première fois le 21 mai (c'est-à-dire qu'ils sont apparus entre 35 et 42 jours après la première vague de pics ou 15 à 22 jours après la deuxième vague de pics d'infection) sur Alcides, Edgar et Benchmark, c'est donc deux semaines plus tard que sur le semis de novembre. Sur RGT Reform, les premiers symptômes sont détectés le 21 mai pour les deux dates de semis. Sur Triomph, les premiers symptômes de rouille brune dans le semis d'octobre sont observés le 11 juin.

5.3.3.2. Interprétation des résultats

Selon le Livre Blanc Céréales (2017), les semis précoces peuvent être infectés avant l'hiver, en effet, les jeunes plantules sont plus exposées à l'inoculum primaire ayant survécu grâce au phénomène de « green bridge ». Dans la situation où le semis est infecté avant l'hiver, les attaques peuvent alors être plus sévères sur ce semis, en effet, lorsque les températures redeviennent favorables, le pathogène reprend son cycle, les pustules apparaissent alors plus tôt et peuvent détruire une partie importante du feuillage. Dans ce cas-ci, le semis précoce n'est pas touché plus tôt, mais c'est plutôt le semis tardif qui est infecté le premier. La figure supplémentaire 17 (annexe 7) montre que ce phénomène n'a pas eu lieu cette année, en effet, les conditions requises pour l'infection n'ont pas été réunies et aucun pic d'infection n'apparaît avant l'hiver.

La période de latence de la rouille brune dure de 8 à 20 jours lorsque les températures sont situées entre 10°C et 20°C (Duvivier et al., 2016), ces conditions sont retrouvées dès premier pic d'infection (Figure 16). Les premières pustules sont apparues 21 à 28 jours après la première infection, il est donc peu probable que des plantes aient été infectées lors cette vague d'infection. En effet, les symptômes auraient dû apparaître une semaine plus tôt. Une hypothèse à l'échec de l'infection pourrait être l'absence de spores dans la parcelle à ce moment-là, aucune spore ne pouvant par conséquent germer.

La première vague d'infection la plus probable serait donc celle du 29 avril. En effet, les premiers symptômes apparaissent le 8 mai dans le semis de novembre, soit 9 jours après l'infection probable. Etant donné que les températures moyennes entre l'infection et les prélèvements sont situées entre 15 et 20°C (Figure 16), et que, selon le Livre Blanc Céréales (2017), la période de latence prend 8 à 12 jours

lorsque les températures sont comprises entre 15 et 20°C, cela paraît être la date d'infection la plus probable.

Etant donné que la période de latence dure maximum 12 jours dans cette gamme de températures, la maladie aurait dû apparaître le 14 mai dans le semis d'octobre. Or, à cette date, seul le semis de novembre de certaines variétés est infecté.

La figure 31 et la figure supplémentaire 17 (en annexe 7) n'expliquent donc pas pourquoi le semis de novembre est touché plus tôt, en effet, les dates de semis ont subi des conditions météorologiques identiques ainsi qu'une même exposition aux spores présentes dans l'air. Ils auraient donc dû être touchés à des dates plus ou moins similaires. Ce point pourrait être expliqué par les travaux de Azzimonti (2013). En effet, comme cela a déjà été énoncé, l'expression de résistances quantitatives des différentes variétés à la rouille brune est influencée par le stade de développement.

Le semis d'octobre étant en avance de stade, il pourrait avoir eu une expression des gènes quantitatifs de résistance plus précoce que le semis de novembre, il aurait alors été plus résistant que le semis de novembre pendant l'infection ou la période de latence, ce qui aurait repoussé le moment d'apparition des pustules. Le stade le plus probable d'apparition de cette résistance serait situé entre le stade 32 et 37 mais il est difficile de tirer des conclusions à partir des observations recueillies durant cette expérimentation.

5.4. Efficacité des traitements fongicides

L'efficacité des traitements est discutée sur la variété Benchmark, qui est sensible aux trois maladies ainsi que sur la variété Alcides, qui est résistante aux trois maladies. La sévérité des témoins non traités et des parcelles traitées sont comparées à l'aide d'un « boxplot » (Figures 32, 33, 34 et 35). De plus, des ANOVA et des tests « post hoc » de SNK ont été réalisés afin de déterminer s'il existe des différences entre les traitements (Tableaux 15 et 16).

Il faut 15 jours au traitement pour agir et donc pouvoir observer des différences entre les parcelles traitées et non-traitées. C'est pour cette raison que, dans le point suivant, les dates sélectionnées correspondent à 15 jours après l'application du traitement.

5.4.1. Description des différences entre les traitements sur la variété Benchmark

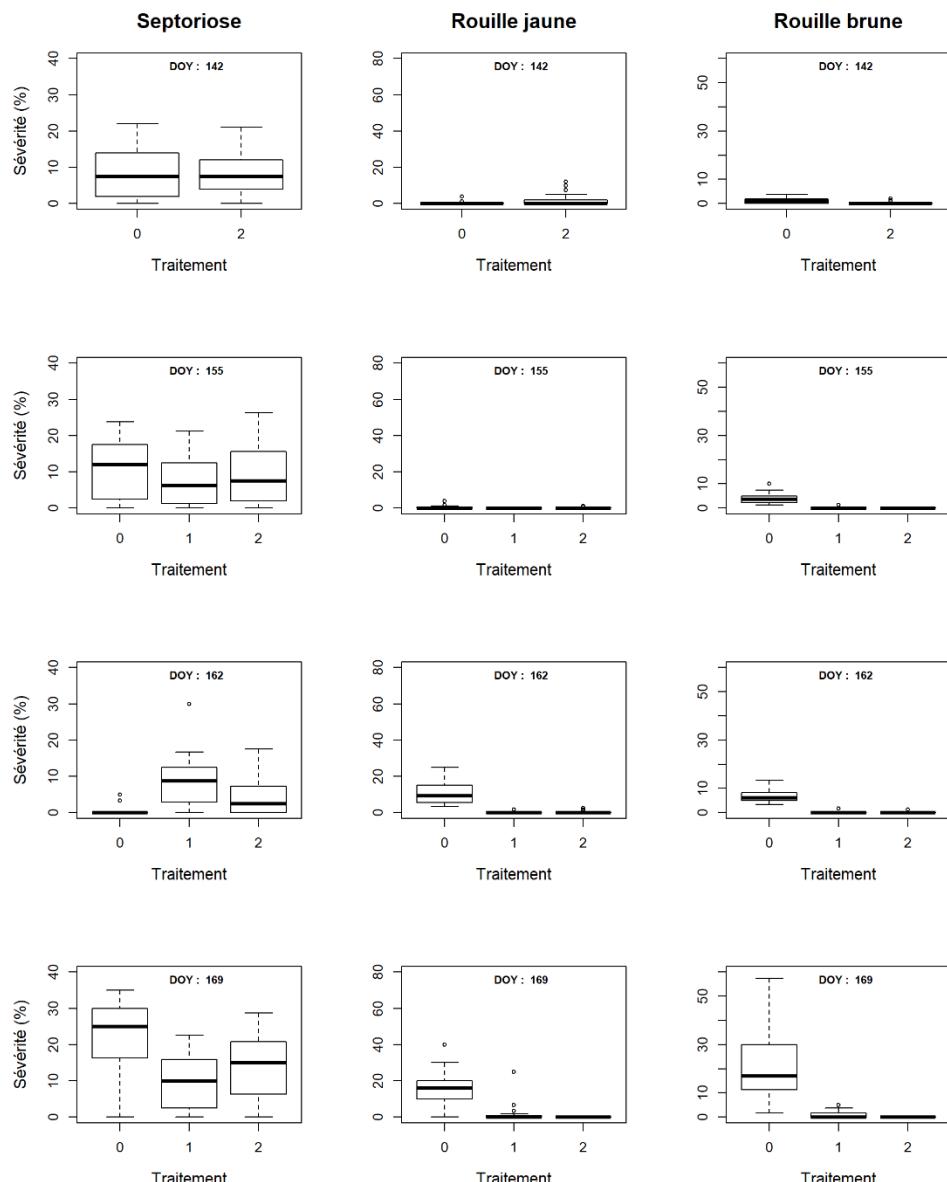


Figure 32 : Efficacité des traitements fongicides pour les 3 maladies sur la variété Benchmark, semis d'octobre

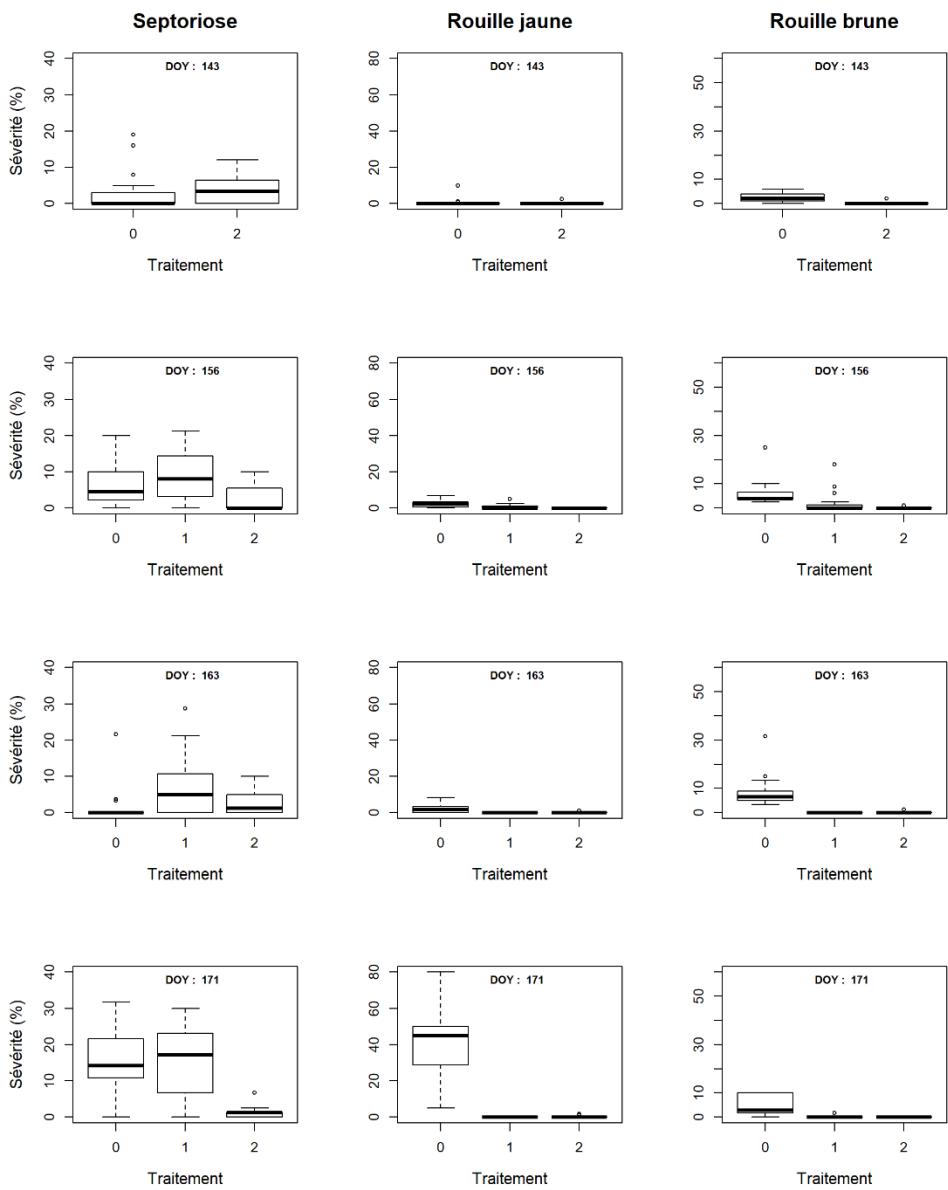


Figure 33 : Efficacité des traitements fongicides pour les 3 maladies sur la variété Benchmark, semis de novembre

Tableau 15 : Résultats des tests SNK de comparaison de l'efficacité des traitements fongicides (0T, 1T, 2T), sur la variété Benchmark, pour les deux dates de semis. Les résultats sont rapportés pour différentes dates d'observations (DOY), correspondant en moyenne à un temps de rémanence de l'effet du produit par rapport à la date d'application

Semis DOY	Octobre				Novembre			
	142	155	162	169	143	156	163	171
Septoriose								
0T	a	a	c	a	a	ab	b	a
1T	-	a	a	b	-	a	a	a
2T	a	a	b	b	a	b	b	b
Rouille jaune								
0T	a	a	a	a	a	a	a	a
1T	-	a	b	b	-	b	b	b
2T	a	a	b	b	a	b	b	b
Rouille brune								
0T	a	a	a	a	a	a	a	a
1T	-	b	b	b	-	b	b	b
2T	b	b	b	b	b	b	b	b

Les figures 32 et 33 représentent les boxplots de sévérité en fonction des traitements pour les trois maladies étudiées et ce, pour la variété Benchmark. Le tableau 15 reprend, lui, les résultats des tests SNK.

5.4.1.1. Septoriose

Les analyses reprises dans cette section portent sur les figures 32 (semis d'octobre) et 33 (semis de novembre) ainsi que sur le tableau 15.

Pour les deux dates de semis, le 22 mai (DOY 142), soit 15 jours après le premier traitement, les médianes sont identiques entre les parcelles traitées et non-traitées. De plus, le test SNK montre qu'il n'y a aucune différence entre les traitements. La sévérité sur le semis d'octobre est plus importante que sur le semis de novembre.

Le 4 juin (DOY 155), il n'y a aucune différence entre les parcelles traitées et non-traitées sur le semis d'octobre. Dans le semis de novembre, des différences sont observables. Les parcelles ayant reçu le traitement le 18 mai sont les plus touchées alors que celles ayant reçu le traitement le 3 mai sont les moins touchées. La sévérité dans les parcelles non-traitées se situe entre celle des parcelles traitées.

Le 11 juin (DOY 162), les parcelles du semis d'octobre ayant reçu un traitement le 18 mai sont les plus touchées, elles sont suivies de celles ayant été traitées deux fois. Les parcelles non-traitées sont les moins touchées, la septoriose y est d'ailleurs absente. Pour le semis de novembre, la modalité 1 traitement est la plus atteinte. Il n'y a pas de différence entre les modalités 2 traitements et 0 traitement malgré le fait que la septoriose sur la modalité 0 traitement soit quasiment absente.

Le 18 juin (DOY 169), ce sont les parcelles non-traitées qui sont les plus touchées dans le semis d'octobre. Il n'y a, par contre, aucune différence entre les parcelles ayant reçu 1 traitement ou 2 traitements. Dans le semis de novembre, les modalités 0 traitement et 1 traitement sont les plus touchées. Les parcelles ayant reçu 2 traitements sont pour leur part, les moins touchées.

5.4.1.2. Rouille jaune

Le 22 mai (DOY 142), pour Benchmark, il n'y a pas de différence entre les modalités de traitements quelle que soit la date de semis. La figure 32 révèle que la rouille jaune est plus présente dans la modalité 2T (2 traitements) que dans la modalité 0T (0 traitement) dans le semis d'octobre. Cependant, le test SNK met en évidence qu'il n'y a pas de différence significative entre les modalités. La rouille jaune n'est pas présente dans le semis de novembre.

Le 4 juin (DOY 155), les parcelles non-traitées sont les plus touchées. Il n'y a pas de différence entre les parcelles ayant reçu le traitement le 3 mai ou le 18 mai. La sévérité de la rouille jaune est plus importante sur les parcelles non-traitées du semis d'octobre que sur celles du semis de novembre.

Le 11 juin et le 18 juin (DOY 162 et 169), les parcelles non traitées sont les plus touchées. Dans les parcelles ayant reçu un traitement, la rouille jaune est quasiment absente. Entre le 11 et le 18 juin, les figures 32 et 33 mettent en évidence que la rouille se développe et s'aggrave sur les parcelles non traitées alors que son développement est presque arrêté sur les parcelles traitées.

5.4.1.3. Rouille brune

Le 22 mai (DOY 142), pour Benchmark, le traitement s'est révélé efficace sur les deux dates de semis, la sévérité dans les parcelles traitées est nulle.

Le 4 juin (DOY 155), les traitements sont à nouveau efficaces, les parcelles non-traitées sont plus touchées par la rouille brune que celles traitées. Cependant, dans modalité 1T (1 traitement) du semis de novembre, la rouille est un peu plus présente que dans la modalité 2T.

Le 11 juin (DOY 162), les traitements sont efficaces. Les parcelles non traitées sont infectées à plus de 5% alors, que dans les parcelles non-traitées, elle n'est globalement pas présente.

Le 18 juin (DOY 169), la modalité 0T est toujours la plus touchée par rapport aux modalités 1T et 2T. La rouille brune est globalement absente dans le semis de novembre. Dans le semis d'octobre, la rouille est un peu plus présente dans la modalité 1 traitement que dans la 2 traitements mais sans présenter de différence significative entre les 2 modalités.

5.4.2. Description des différences entre les traitements sur la variété

Alcides

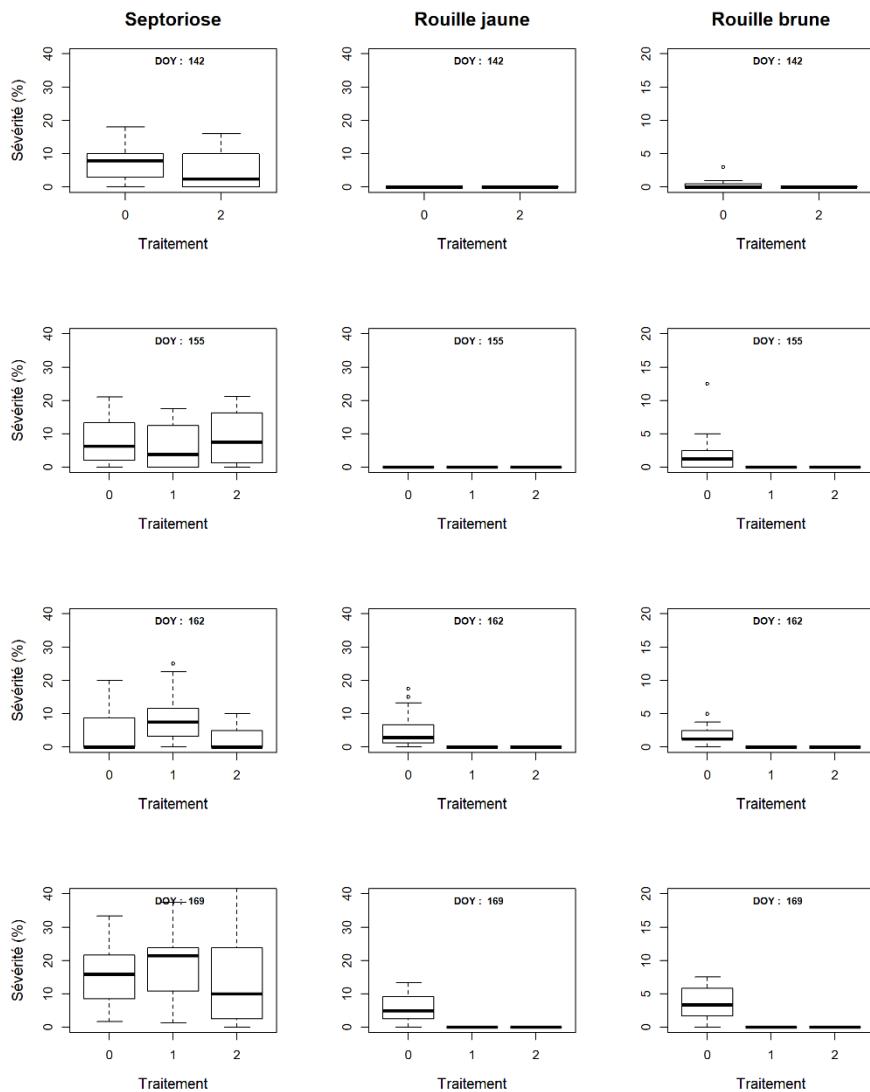


Figure 34 : Efficacité des traitements fongicides pour les 3 maladies sur la variété Alcides, semis d'octobre

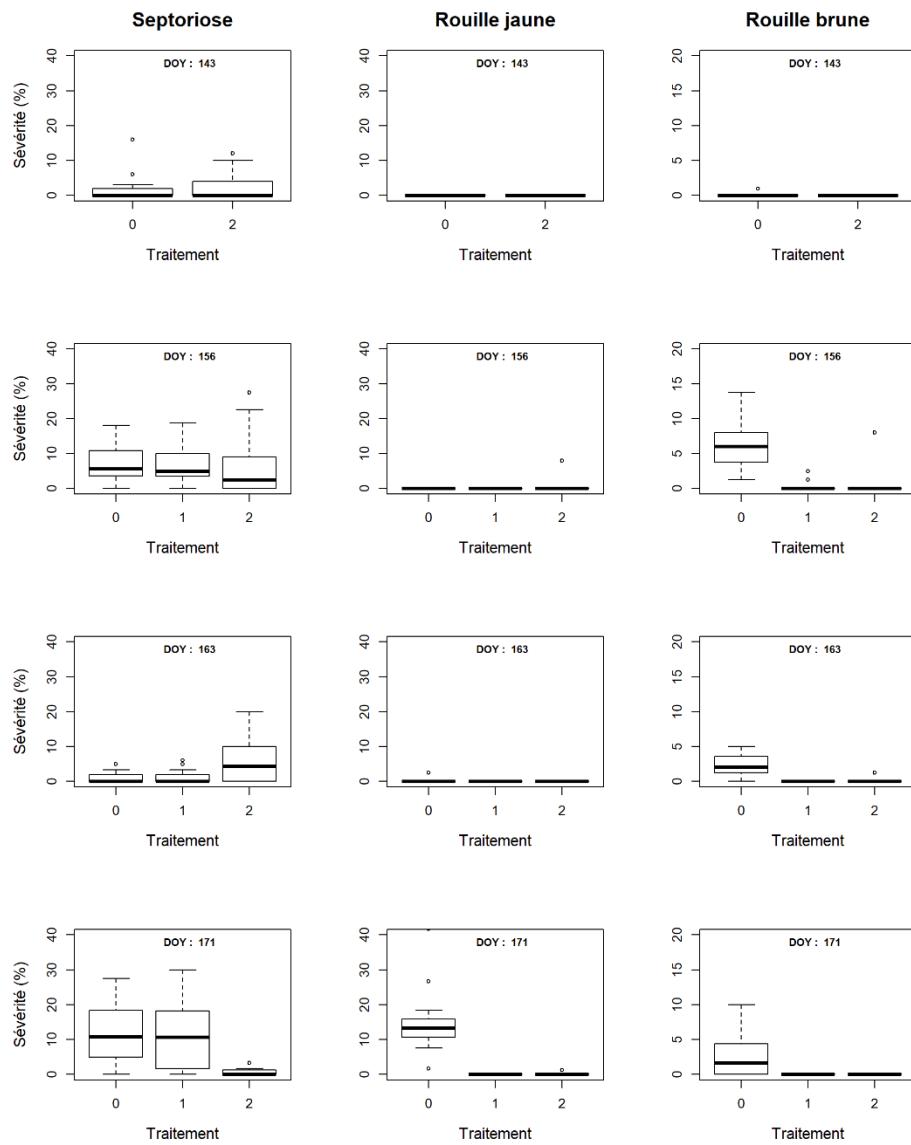


Figure 35 : Efficacité des traitements fongicides pour les 3 maladies sur la variété Alcides, semis de novembre

Tableau 16 : Résultats des tests SNK de comparaison de l'efficacité des traitements fongicides (0T, 1T, 2T), sur la variété Alcides, pour les deux dates de semis. Les résultats sont rapportés pour différentes dates d'observations (DOY), correspondant en moyenne à un temps de rémanence de l'effet du produit par rapport à la date d'application

Semis DOY	Octobre				Novembre			
	142	155	162	169	143	156	163	171
Septoriose								
0T	a	a	b	a	a	a	b	a
1T	-	a	a	a	-	a	b	a
2T	a	a	b	a	a	a	a	b
Rouille jaune								
0T	-	-	a	a	-	a	a	a
1T	-	-	b	b	-	a	a	b
2T	-	-	b	b	-	a	a	b
Rouille brune								
0T	a	a	a	a	a	a	a	a
1T	-	b	b	b	-	b	b	b
2T	b	b	b	b	b	b	b	b

Les figures 34 et 35 représentent les boxplot de sévérité en fonction des traitements pour les trois maladies étudiées et ce, pour la variété Alcides. Le tableau 16 reprend, lui, les résultats des tests SNK.

5.4.2.1. Septoriose

Le 22 mai (DOY 142) et le 4 juin (DOY 155), pour la variété Alcides, il n'y a aucune différence entre les parcelles ayant reçu un traitement fongicide et celles non-traitées. La septoriose est globalement plus présente sur le semis d'octobre que sur le semis de novembre à ces deux dates.

Le 11 juin, (DOY 162), les résultats pour les deux dates de semis sont différents. Pour le semis d'octobre, la modalité 1T est la plus touchée, les modalités 0T et 2T sont, quant à elles, les moins atteintes. Dans le semis de novembre, la modalité 2T est la plus sévèrement atteinte alors que les modalités 0T et 1T sont les moins touchées.

Le 18 juin (DOY 171), il n'y a pas de différence entre les parcelles traitées et celles non-traitées pour le semis d'octobre. Dans le semis de novembre, la modalité 2T est la moins atteinte alors que les modalités 0T et 1T sont les plus touchées.

5.4.2.2. Rouille jaune

Dans le semis d'octobre, la rouille jaune est absente sur la variété Alcides jusqu'au 4 juin (DOY 155). Les 11 et 18 juin (DOY 162 et 169), la rouille se développe sur les parcelles non traitées alors qu'elle reste absente sur les parcelles traitées.

Dans le semis de novembre, la rouille jaune est globalement absente jusqu'au 11 juin (DOY 162) dans toutes les modalités. Le 18 juin (DOY 169), la modalité 0 traitement est la plus atteinte. Les modalités 1T et 2T ne sont globalement pas atteintes.

5.4.2.3. Rouille brune

Le 22 mai (DOY 142), les parcelles traitées sont moins touchées par la rouille brune que les parcelles non-traitées, la modalité 2T n'est globalement pas infectée.

Aux trois autres dates, la modalité 0T est systématiquement plus touchée que les modalités 1T et 2T. Dans le semis d'octobre, la rouille n'est présente à aucune date sur aucune plante pour les parcelles traitées. Dans le semis de novembre, quelques plantes sont touchées dans les parcelles traitées. Le 4 juin (DOY 155), deux plantes sont touchées dans la modalité 1T et une plante dans la modalité 2T. Le 11 juin (DOY 162), seule une plante est atteinte dans la modalité 2T et aucune plante dans aucune modalité ne l'est le 18 juin pour toutes les modalités.

5.4.3. Interprétation des résultats

5.4.3.1. Septoriose

Les résultats pour la septoriose sont biaisés par la méthode utilisée pour quantifier la sévérité de l'attaque par la septoriose. En effet, l'échelle de cotation utilisée pour la septoriose, contrairement à celle utilisée pour les rouilles, ne cotait pas uniquement les symptômes actifs. Les taches brunâtres présentant des pycnides pour la septoriose ainsi que les symptômes non actifs qui ne présentaient plus de pycnides étaient pris en compte. Cela a faussé les résultats car les fongicides éliminent le développement des organes de reproduction du champignon mais les zones de nécrose persistent. Durant l'évaluation qui a lieu 15 jours après les traitements, les zones de nécrose étaient cotées comme de la septoriose alors que la septoriose n'était plus active. Les données des parcelles traitées et non-traitées sont dès lors difficilement comparables.

Dix-huit jours après le premier traitement de la modalité 2T, aucune différence n'est identifiée et ce quelle que soit la date de semis. Le traitement 1 de 2T a été appliqué le 3 mai, or la figure supplémentaire 7 en annexe 5 montre que la septoriose ne progresse que très peu entre le DOY 127 (7 mai) et le DOY 142 (22 mai). Le même phénomène est observé sur le semis de novembre (figure supplémentaire 8 en annexe 5). L'hypothèse suivante peut être émise : la cote de 2T est liée à des symptômes non actifs qui dateraient d'avant le traitement alors que sur 0T les symptômes sont actifs et ne se sont pas propagés.

Le 4 juin (DOY 155), il n'y a aucune différence entre les traitements. La question de l'efficacité de ce traitement dans la lutte contre la septoriose peut donc être posée. Sur Benchmark, dans le semis de novembre, la figure supplémentaire 14 illustre clairement que le traitement 1 a été inefficace, les feuilles F3, F4 et F5 étant les plus touchées parmi les trois modalités de traitement. Le traitement a pourtant été fait dans les conditions adéquates. Ce résultat est donc inexplicable.

Le 11 juin (DOY 162) sur la variété Benchmark dans le semis d'octobre, 0T est le moins sévèrement atteint par la septoriose, cela s'explique par le fait que sa F4 (qui est la feuille la plus atteinte par la maladie à cette date) a disparu faisant chuter la moyenne globale de la plante (Figure supplémentaire 13). 2T est lui moins touché que 1T. Toujours dans la variété Benchmark, dans le semis de novembre, 1T est en apparence le moins touché selon la moyenne globale (Figure 33). Cependant, la figure supplémentaire 14 montre qu'il est le plus touché, sa feuille F5 ayant disparu et sa F4 et sa F3 étant plus infectées que celle de 2T. Dans le semis d'octobre, pour la variété Benchmark, 1T est le plus touché. En effet, cela peut être expliqué par le fait que le 4 juin, même si la différence n'était pas significative, 1T semblait déjà plus infecté (Figure 32). Les résultats sur le semis de novembre pour la variété Alcides sont, quant à eux, difficilement explicables, si ce n'est pour le fait que 0T soit dans le groupe des moins infectés, sa F5 ayant disparu (Figure supplémentaire 16 en annexe 6).

Le 18 juin (DOY 169), pour la variété Benchmark, dans le semis d'octobre, 0T est le plus infecté ce qui est cohérent. Le test statistique ne décèle pas de différence entre 1T et 2T pourtant, la figure supplémentaire 13 en annexe 6 montre que la F2 de 2T n'est pas touchée contrairement à celle de 1T et que la F3 de 2T est moins touchée que celle de 1T. Ce qui prouve l'efficacité des deux traitements. Pour le semis de novembre, les résultats sont cohérents. Dans le semis d'octobre, pour la variété Alcides, le test statistique et le boxplot ne montrent également aucune différence mais la figure supplémentaire 15 en annexe 6 montre des résultats différents. Parmi les trois principales feuilles, F3, F2 et F1, la feuille modalité 0T est systématiquement plus infectée que la feuille de la 1T, celle-ci étant elle-même plus infectée que la 2T et ce pour les 3 feuilles. Le traitement 2T a de nouveau été plus efficace. Pour la variété Alcides, sur le semis de novembre, 2T est le moins touchée. Le test SNK ne décèle pas de différence entre les modalités 0T et 1T. Mais de nouveau, la figure supplémentaire 16 en annexe 6 montre que les F3, F2 et F1 sont moins atteintes dans la modalité 1T que dans la 0T.

Pour les deux variétés, l'utilisation de 2T par rapport à 1T a été plus efficace pour contrôler le développement de la septoriose. En effet, il a permis de mieux protéger les trois dernières feuilles qui sont celles qui vont avoir le plus d'impact sur le rendement.

5.4.3.2. Rouille jaune

Le 22 mai (DOY 142), la rouille jaune est globalement absente sur les deux variétés dans les deux dates de semis. Les parcelles 0T ne sont pas infectées par la rouille jaune ce qui révèle que le traitement à un stade si précoce de la culture n'est pas justifié pour lutter contre cette maladie. Les résultats repris pour la modalité 2T dans la figure 32 (Benchmark, semis d'octobre) semblent aberrants. En effet, le traitement étant curatif (Phytoweb, 2015), on ne devrait pas observer de rouille jaune sur 2T, or 2T est plus infecté

que 0T. Une hypothèse qui pourrait être faite est un temps de réponse plus long que 15 jours. En effet, à la date du 5 juin (DOY 156), la rouille jaune a presque disparu de la modalité 2T.

Le 4 juin (DOY 155), la rouille jaune n'est présente sur aucune des modalités de traitements pour la variété Alcides, le traitement pour lutter contre la rouille jaune aurait donc pu être retardé. Au niveau de la variété Benchmark, la rouille s'est développée sur les parcelles non traitées du semis d'octobre, la parcelle 1T n'étant pas touchée par la rouille jaune, le traitement a été efficace et justifié. Sur le semis de novembre de Benchmark, la modalité 1T est touchée mais moins sévèrement que 0T. Cela peut s'expliquer par le temps de réponse du traitement. En effet, le traitement pour la modalité 1T du semis de novembre a été réalisé le 24 mai, donc six jours plus tard que pour le semis d'octobre. Il n'y a donc eu que dix jours de délai entre l'application du traitement et l'observation qui date du 4 juin, ce qui pourrait être insuffisant pour que l'effet soit visible.

Enfin, le 11 juin et le 18 juin, la rouille jaune est globalement absente sur Alcides, les traitements ont donc été efficaces. Pour Benchmark, la même observation peut être faite. Cependant une nuance peut être apportée pour le semis d'octobre. En effet, le 18 juin, trois plantes sont touchées sur la modalité 1T, dont une à plus de 20%, ce qui signifie que l'infection n'est pas complètement maîtrisée avec un seul traitement et pourrait donc repartir si les conditions étaient favorables.

Etant donné qu'il n'y a pas de différence observée entre 2T et 1T pour la variété Alcides, l'application de deux traitements fongicides pour lutter contre la rouille jaune n'était pas justifiée cette année pour les variétés résistantes.

Sur Benchmark qui est sensible, l'application de deux traitements pourrait être justifiée pour la rouille jaune, en effet, sur le semis d'octobre, des pustules commencent à réapparaître lors de la dernière observation. Pour s'en assurer, il aurait fallu comparer les différences dans le développement de la rouille jaune après l'application des 2 traitements et ce, plus tard dans la saison.

5.4.3.3. Rouille brune

Le 22 mai (DOY 142), le premier traitement de la modalité 2T a fonctionné correctement, toutes les parcelles non-traitées sont plus touchées que les parcelles traitées.

Le 4 juin (DOY 156), les traitements ont à nouveau été efficaces. Le premier traitement de la modalité 2T qui a été réalisé le 3 mai fait encore effet jusqu'à cet instant-là. En effet, la sévérité sur cette modalité est encore proche de zéro. Sur les semis de novembre, le traitement de 1T est à nouveau un peu moins efficace que pour octobre. Tout comme pour la rouille jaune, cela pourrait être dû à l'application plus tardive du traitement sur le semis de novembre que pour le premier traitement de 2T.

Le 11 juin (DOY 162), les modalités de traitements 1T et 2T ont été efficaces, la rouille n'est quasiment pas présente dans ces modalités alors qu'elle l'est dans la modalité 0T.

Le 18 juin (DOY 169), la rouille n'est toujours présente dans les parcelles traitées que sur quelques plantes, alors que les parcelles non-traitées sont touchées.

Pour la variété sensible (Benchmark), l'application d'un seul traitement au stade 39 permet de contrôler la maladie jusqu'au 18 juin (DOY 169). L'application de deux traitements fongicides n'a donc pas apporté de satisfaction supplémentaire par rapport à l'application d'un seul traitement. Ce constat amène la question de l'utilité de ce deuxième traitement pour l'année 2018.

Pour la variété Benchmark par contre, le semis de novembre a bien résisté avec un seul traitement mais le semis d'octobre commence à craquer le 18 juin (DOY 169). La seule différence entre ces deux dates de semis est la période d'application du traitement. L'hypothèse qu'un peu avant le 18 juin (DOY 169), le fongicide n'était plus rémanent, peut être posée. En effet, il était encore efficace le 11 juin (DOY 162) mais ne l'était plus le 18 juin : le fongicide ayant été appliqué le 18 mai, il permet une protection d'un peu plus de 3 semaines.

6. Conclusions et perspectives

Les conditions météorologiques de cette année ont favorisé le développement de la rouille brune, celle-ci s'est déclarée un mois plus tôt que ce qui est habituellement observé. Les conditions ont, par contre, été moins favorables au développement de la rouille jaune qui cause habituellement plus de problèmes en Belgique. Dans un contexte de réchauffement climatique, ce type de conditions météorologiques pourraient être de plus en plus souvent observées, la rouille brune pourrait dès lors poser plus de problèmes à l'avenir.

Cette étude a confirmé (du moins pour des conditions environnementales similaires à celles de cette année) qu'un semis précoce, c'est-à-dire en octobre, est plus touché par la septoriose qu'un semis de novembre. Pour les rouilles jaune et brune par contre, le semis de novembre a tendance à être plus touché que celui d'octobre.

Les observations ont permis d'illustrer les modes de propagation des trois maladies. La septoriose va se développer principalement à partir des plus anciennes feuilles et remonter feuille par feuille jusqu'aux étages supérieurs grâce aux éclaboussures de gouttes de pluie. Les rouilles vont, elles, se propager dans la culture principalement grâce au vent, elles se généralisent par conséquent plus rapidement à la totalité des feuilles présentes sur les plantes. Les rouilles atteignent donc plus facilement les trois dernières feuilles qui ont un rôle majeur dans le remplissage des grains.

A partir des observations, la septoriose étant nécrotrophe, il ne semble pas que son développement soit impacté par le développement des rouilles. Concernant le développement des deux types de rouilles, il pourrait y avoir compétition entre celles-ci sur les feuilles. Mais, ce point se base uniquement sur une hypothèse et mériterait donc d'être approfondi.

Ce travail a également permis de mettre en évidence une probable influence des stades de développement dans l'expression des gènes de résistance contre la rouille jaune et la rouille brune. Cependant, ce phénomène, malgré qu'il soit décrit dans la littérature (Gieco et al., 2004), n'a pas été observé pour la septoriose. Cela est probablement dû au décalage entre l'apparition des symptômes et le début des observations.

L'étude de l'efficacité des traitements fongicides a permis, quant à elle, de mettre en évidence que l'application de deux traitements fongicides n'était pas justifiée pour toutes les situations afin d'empêcher le développement des maladies.

Dans le cas d'une variété résistante aux rouilles, il n'y a pas de différence entre l'application d'un ou deux traitements contre les rouilles. Appliquer deux traitements n'est donc pas justifié. Cependant, la modalité 2 traitements a mieux protégé les trois dernières feuilles que la modalité 1 traitement dans le cas de la septoriose.

Pour les variétés sensibles aux rouilles, il n'y a pas de différence entre l'application d'un traitement ou de deux traitements fongicides pour lutter contre les rouilles dans le semis de novembre. Appliquer deux traitements n'est donc pas justifié dans ce cas. Par contre au niveau du semis d'octobre, il pourrait y avoir des différences entre ces deux modalités de traitements dans la lutte contre les rouilles. Au niveau de la septoriose, l'application de deux traitements est par contre, dans tous les cas, plus efficace que la modalité 1 traitement et, ce quelle que soit la date de semis. Il aurait donc été intéressant d'analyser si des différences significatives sont observées, à des dates ultérieures, entre les deux modalités.

Le suivi en dynamique a apporté des informations intéressantes. Néanmoins, il serait intéressant, dans le futur, de changer d'échelle de cotation pour la septoriose. Il y a, en effet, un manque de cohérence dans le fait de coter uniquement les symptômes actifs pour les rouilles et de coter les symptômes actifs et les nécroses ne présentant pas de pycnide pour la septoriose. C'est particulièrement problématique lorsqu'il s'agit de déterminer l'efficacité des traitements fongicides 15 jours après l'application d'un traitement.

En ce qui concerne les perspectives, il pourrait être intéressant pour le suivi en dynamique de faire une analyse plus approfondie sur les 15 jours (voire un peu plus) précédant l'explosion de la sévérité des différentes maladies et d'analyser sur cette période les conditions climatiques précises, la présence et la quantité de spores sur la parcelle ainsi que de connaître précisément la résistance de la variété durant cette période. Cela permettrait, en effet, de mieux comprendre les facteurs favorisant l'intensification de la maladie.

De plus, il serait intéressant de développer en Belgique une double échelle de cotation des résistances aux maladies, avec une séparation, du niveau de résistance au stade plantule et du niveau de résistance au stade adulte et ce, pour chaque variété. En France, cette double cotation existe déjà pour la rouille jaune (Du Cheyron, 2016). Cette double échelle permet de distinguer plusieurs situations et donc d'affiner encore un peu plus le positionnement des traitements fongicides.

De plus, l'idéal serait d'analyser des données recueillies depuis plusieurs années afin d'avoir un panel plus large de conditions culturales. Ces données devraient de préférence être recueillies par la même personne. En effet, malgré l'utilisation d'échelles de cotation, il existe un biais lié aux différences dans les cotations attribuées par des observateurs différents. Cette différence n'a pas été prouvée mais est constatée sur le terrain.

7. Bibliographie

Agrifind alertes, Septoriose sur blé. <https://www.agrifind.fr/alertes/ble/ble-septoriose/#niveau>, (26/7/2018).

Amil R. El, 2016. Effect of host and temperature on the population structure of Puccinia striiformis f . sp . tritici , responsible of yellow rust in the Middle East.
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01261429>, (27/7/2018).

Azzimonti G., 2013. Diversification de la résistance quantitative à la rouille brune du blé , à partir de la caractérisation des composantes de la résistance To cite this version : HAL Id : pastel-00803279 L ' Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l ' Environne.

Bahri B.A., 2008. Adaptation et structuration spatiale des populations méditerranéennes de rouille jaune du blé Remerciements. *PhD Thesis*, (Ed 145).
https://www.academia.edu/1084213/Adaptation_et_structuration_spatiale_des_populations_méditerranéennes_de_rouille_jaune_du_blé_Puccinia_striiformis_f._sp._tritici_, (15/2/2018).

Ben Mohamed L. et al., 2000. Effet du génotype, de la date de semis, de la fertilisation azotée et potassique et des fongicides sur le développement de Septoria tritici Effet du génotype, de la date de semis, de la fertilisation azotée et potassique et des fongicides sur le développe. Zaragoza : CIHEAM, 349–356.
<http://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=600058><http://www.ciheam.org/>, (30/3/2018).

Ben Romdhane S., 2003. Effets de la date de semis, de la variété et des traitements fongicides sur le développement de la septoriose (Septoria tritici) du froment d'hiver. , 92.

Bensch K., Search on : Mycobank |Mycosphaerella graminicola.
http://www.mycobank.org/Biolomics.aspx?Table=Mycobank&MycoBankNr_=318177, (12/8/2018).

Bolton M.D., Kolmer J.A. & Garvin D.F., 2008. Wheat leaf rust caused by Puccinia triticina. *Mol. Plant Pathol.*, 9(5), 563–575.

CADCO, Les étages foliaires du froment.
http://cadcoasbl.be/p09_biblio/art0005/15EtageFoliaire.pdf, (12/8/2018).

Delcour A. et al., 2014. État des lieux des flux céréaliers en Wallonie selon différentes Filières d'utilisation. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 18(2), 181–192.

Dreisigacker S. et al., 2015. Adult-plant resistance to Septoria tritici blotch in hexaploid spring wheat. *Theor. Appl. Genet.*, 128(11), 2317–2329.

du Cheyron P. et al., 2016. Rouille jaune sur blé tendre : les résistances dépendent aussi du stade, 2014–2017.

Duvivier M., Bataille C. & Jacquemin G., 2018. Schéma de traitement fongicide en blé : Peut-on retarder la première intervention fongicide dans les champs wallons?, (February).

Duvivier M. et al., 2016. Real-time PCR quantification and spatio-temporal distribution of airborne inoculum of *Puccinia triticina* in Belgium. *Eur. J. Plant Pathol.*, 145(2), 405–420.

Eriksen L., Borum · F & Jahoor · A, 2003. Inheritance and localisation of resistance to *Mycosphaerella graminicola* causing septoria tritici blotch and plant height in the wheat (*Triticum aestivum* L.) genome with DNA markers. *Theor Appl Genet*, 107, 515–527. <http://wheat.pw.usda.gov/>, (11/8/2018).

Eurostat S. explained, 2017. Agricultural production - crops, 2016(November 2017), 2007–2016. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Agricultural_production_-_crops.

Eyal Z., A.L. Scharen, J.M. Prescott M. van G., 1987. The septoria disaeses of Wheat : Concepts and methods of disaese management. *CIMMYT*.

F.U.S.A.Gx et C.R.A.Gx, 1990. Le froment d'hiver. Conduite de sa culture.

Fabréga S., 2009. Actu environnement : Les enjeux de l'agriculture de demain. https://www.actu-environnement.com/ae/news/enjeux_agriculture_demain_7881.php4, (11/8/2018).

FAO, 2018. FAO Cereal Supply and Demand Brief | World Food Situation | Food and Agriculture Organization of the United Nations, <http://www.fao.org/worldfoods situation/csdb/en/>, (11/7/2018).

Fones H. & Gurr S., 2015. The impact of Septoria tritici Blotch disease on wheat: An EU perspective. *Fungal Genet. Biol.*, 79, 3–7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fgb.2015.04.004>.

Gieco J.O., Dubcovsky J. & Camargo L.E.A., 2004. Interaction between resistance to *Septoria tritici* and phenological stages in wheat. *Sci. Agric.*, 61(4), 422–426. http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162004000400011&lng=en&tlang=en, (20/3/2018).

Gigot C., 2013. Potentialités des associations de variétés pour limiter la progression épidémique de la septoriose du blé : rôle des mécanismes de dispersion des spores par la pluie dans un couvert végétal hétérogène, 1–158.

Gladders P. et al., 2007. The importance of weather and agronomic factors for the overwinter survival of yellow rust (*Puccinia striiformis*) and subsequent disease risk in commercial wheat crops in England. *Ann. Appl. Biol.*, 150(3), 371–382.

Google Maps - Lonzée, 2018. <https://www.google.com/maps/place/5030+Lonzée/@50.5490443,4.7319492,625m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x47c182ef5975140f:0xcbcc0d4621ce4b8c!8m2!3d50.55299!4d4.72637>, (11/8/2018).

Graphagri, 2017. Céréales commerce mondial, <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Gaf2017p117-128.pdf>, (11/7/2018).

- Huerta-Espino J. et al., 2011. Global status of wheat leaf rust caused by *Puccinia triticina*. *Euphytica*, 179(1), 143–160.
- Jerbi K., 2016. Homogénéité de la variance et transformations non linéaires Table.
- Kolmer J.A., 1996. Genetics of Resistance To Wheat Leaf Rust 1. *Annu. Rev. Phytopathol.*, (96).
- Koyshibayev M. and Muminjanov H., 2016. *Guidelines for monitoring diseases, pests and weeds in cereal crops*,
- Lepage M.-P. & Bourgeois G., 2012. Modèles bioclimatiques pour la prédition de la phénologie, de la croissance, du rendement et de la qualité des cultures.
http://www.agrometeo.org/help/modeles_bioclimatiques_phenologie.pdf, (14/6/2018).
- Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017. <http://www.livre-blanc-cereales.be/thematiques/maladies/froment/rouille-brune/>, (27/7/2018).
- Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017. <http://www.livre-blanc-cereales.be/thematiques/maladies/rouille-jaune/>, (27/7/2018).
- Livre Blanc Céréales : Septoriose, 2017. <http://www.livre-blanc-cereales.be/thematiques/maladies/froment/septoriose/>, (27/7/2018).
- Lovell D.J. et al., 1997. Influence of crop growth and structure on the risk of epidemics by *Mycosphaerella graminicola* (*Septoria tritici*) in winter wheat. *Plant Pathol.*, 46(1), 126–138. <http://doi.wiley.com/10.1046/j.1365-3059.1997.d01-206.x>.
- McCallum B.D. et al., 2016. A review of wheat leaf rust research and the development of resistant cultivars in Canada. *Can. J. Plant Pathol.*, 38(1), 1–18.
<http://dx.doi.org/10.1080/07060661.2016.1145598>.
- Meza R. et al., 2017. Livre blanc : septembre 2017. *Livre Blanc Céréales*, 21–75.
<http://www.livre-blanc-cereales.be/wp-content/uploads/2016/09/Livre-Blanc-sept-2017.pdf>.
- Morais D., 2015. Les déterminants des phases épidémiques précoce de la septoriose du blé (*Zymoseptoria tritici*) : quantité, efficacité et origine de l'inoculum primaire.
- Moreau J.M. & Maraite H., 1999. Integration of knowledge on wheat phenology and *Septoria tritici* into a disease risk simulation model validated in Belgium. *Asp. Appl. Biol.*, 55(November), 1–6.
- Omrani A., Khodarahmi M. & Afshari F., 2013. Genetics study of resistance to yellow rust in CIMMYT origin wheat advanced lines at seedling and adult plant stages. *Arch. Phytopathol. Plant Prot.*, 46(19), 2341–2355.
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03235408.2013.794529>.
- Phytoweb, 2015. Consulter autorisations de produits phytopharmaceutiques | Adexar.
<https://fytoweb.be/fr/autorisations>, (2/8/2018).

Phytoweb, 2015. Consulter autorisations de produits phytopharmaceutiques | Aviator Xpro.
<https://fytoweb.be/fr/autorisations>, (2/8/2018).

Phytoweb, 2015. Consulter autorisations de produits phytopharmaceutiques | opus team.
<https://fytoweb.be/fr/autorisations>, (2/8/2018).

Pornamazeh P., Afshari F. & Khodarahmi M., 2013. Study of resistance components of some promising wheat lines to yellow rust disease in the seedling stage. *Arch. Phytopathol. Plant Prot.*, 46(20), 2469–2475.

Puccinia striiformis Infection Model, 2015. <http://info.metos.at/tiki/tiki-index.php?page=Puccinia+striiformis+Infection+Model&structure=Disease+models>, (5/8/2018).

Puccinia tritici Infection Model, 2015. <http://info.metos.at/tiki/tiki-index.php?page=Puccinia+tritici+Infection+Model&structure=Disease+models>, (27/7/2018).

Roelfs A.P., Singh R.P. & Saari E.E., 1992. *Rust Diseases of Wheat: Concepts and methods of disease management.*,

Savary S. et al., 2016. Assessing plant health in a network of experiments on hardy winter wheat varieties in France: patterns of disease-climate associations. *Eur. J. Plant Pathol.*, 146(4), 741–755. <http://dx.doi.org/10.1007/s10658-016-0954-2>.

Savary S. et al., 2016. Assessing plant health in a network of experiments on hardy winter wheat varieties in France: multivariate and risk factor analyses. *Eur. J. Plant Pathol.*, 146(4), 757–778. <http://dx.doi.org/10.1007/s10658-016-0955-1>.

Septoria spp. Infection Model, 2015. <http://info.metos.at/tiki/tiki-index.php?page=Septoria+spp.+Infection+Model&structure=Disease+models>, (11/8/2018).

Service public de Wallonie (SPW), 2016. La Carte des Sols de Wallonie.
<http://geoportail.wallonie.be/catalogue/ce3b6602-1c52-483f-9133-770009cdd02b.html>, (26/7/2018).

Slimane R. Ben, Effets de la septoriose foliaire sur la sénescence et les flux d'azote pendant le remplissage des grains chez le blé tendre, <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00560282>, (13/8/2018).

Statbel, 2017. Chiffre clés de l'agriculture.

Syngenta, 2017. Rouille jaune Maladies | Syngenta France.
<https://www.syngenta.fr/traitements/rouille-jaune>, (13/2/2018).

Syngenta, 2015. Echelle BBCH céréales - Stade cultures - Syngenta.
<https://www.syngenta.fr/agriculture-durable/reglementation/dossier-bbch/article/echelle-bbch-cereales>, (11/8/2018).

Tröschler P. et al., Agriadapt | Fundación Global Nature. <https://agriadapt.eu/?lang=fr>, (11/8/2018).

Verreet J., Klink H. & Hoffmann G.M., 2000. Regional Monitoring for Disease Prediction and Optimization of Plant Protection Measures: The IPM Wheat Model. *Plant Dis.*, 84(8), 816–826. <http://apsjournals.apsnet.org/doi/abs/10.1094/PDIS.2000.84.8.816>.

Wellings C.R., 2011. Global status of stripe rust: A review of historical and current threats. *Euphytica*, 179(1), 129–141.