
Dynamique des principales maladies fongiques foliaires en froment d'hiver : Approche de terrain et modélisation

Auteur : Van De Ginste, Julien

Promoteur(s) : Dumont, Benjamin

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

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

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/11114>

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.

DYNAMIQUE DES PRINCIPALES MALADIES FONGIQUES FOLIAIRES EN FROMENT D'HIVER : APPROCHE DE TERRAIN ET MODELISATION

JULIEN VAN DE GINSTE

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

ANNEE ACADEMIQUE 2020-2021

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 académique¹ de Gembloux Agro-Bio Tech.
Le présent document n'engage que son auteur.

¹ L'autorité académique est représentée par les promoteurs membres du personnel enseignant de GxABT.

DYNAMIQUE DES PRINCIPALES MALADIES FONGIQUES FOLIAIRES EN FROMENT D'HIVER : APPROCHE DE TERRAIN ET MODELISATION

JULIEN VAN DE GINSTE

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

ANNEE ACADEMIQUE 2020-2021

PROMOTEUR: BENJAMIN DUMONT

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mon promoteur, Benjamin Dumont, pour sa disponibilité lors de la rédaction ainsi que l'aide précieuse et les connaissances apportées dans la conception des modèles. Merci également à l'unité de production végétale et au Cépiscop de m'avoir permis de mener à bien ce travail.

J'aimerais aussi remercier Rémy Blanchard qui m'a encadré tout au long des observations réalisées dans les parcelles expérimentales. Merci d'avoir été disponible durant les prélèvements et leur mise en place malgré le contexte difficile.

Je remercie tout particulièrement Virginie, qui m'a supporté durant toute cette période et qui a pris de son temps pour relire ce travail et me donner des conseils de rédaction.

J'aimerais également remercier mes parents qui m'ont permis d'effectuer ces études. Merci d'avoir cru en moi et de m'avoir toujours soutenu.

Merci à mes cokotteurs du kot Mazout, Nicolas et John, pour les pauses ludiques et pour avoir accepté que j'utilise notre commun comme salle d'observation, avec toute la poussière que cela a entraîné, durant ce confinement.

Merci à tous ces amis gembloutois qui ont rendu ces 6 années si agréables. Merci notamment aux équipes bar 2019 et 2020, au comité AG 2019, à l'équipe soft, à la commission Cinsi, aux agros, ...et j'en passe, d'avoir égayé tous ces moments passés en votre présence.

Résumé

Le froment d'hiver, culture la plus répandue en Belgique, est une ressource importante dans de nombreux domaines. Les principales maladies fongiques foliaires observées sur cette Poacée sont la septoriose (*Zymoseptoria tritici*), la rouille jaune (*Puccinia striiformis*) et la rouille brune (*Puccinia triticina*). Il est important d'améliorer la lutte contre ces maladies. C'est pourquoi ce travail traite des influences de différents facteurs sur ces trois maladies ainsi que la modélisation de l'occurrence des symptômes de rouille jaune et brune. Les facteurs étudiés sont la variété, la date de semis et le traitement fongicide.

En raison de la faible pression fongique exercée en 2020, la sévérité développée par les pathogènes n'a pas été importante. Néanmoins, les observations ont permis de valider les périodes de latence fournies par le modèle d'occurrence des rouilles développé à partir de conditions issues de la littérature. A partir des conditions météorologiques, des périodes de latence pour la rouille jaune et la rouille brune peuvent être obtenues. L'apparition des symptômes peut ainsi être prédite.

L'étude de l'efficacité des traitements fongicides a mis en évidence la nécessité d'application d'un traitement fongicide pour contrôler le développement des champignons sur des variétés sensibles. L'absence de traitement sur une variété résistante peut se justifier pour lutter contre la septoriose.

Pour les rouilles, l'influence du stade de développement sur l'expression de gènes de résistance a permis d'expliquer les différences de sévérité observée à une même date entre des plantes à des stades de croissance différents.

L'étude en dynamique des maladies a permis également d'étudier la propagation et le développement différent des maladies d'un profil de variété à l'autre ainsi que d'une modalité de date de semis à une autre. Une plus grande sensibilité à la septoriose pour les semis plus précoces a notamment été relevée.

Mots-clés: blé, *Zymoseptoria tritici*, *Puccinia striiformis*, *Puccinia triticina*, modèle, résistance, latence, fongicide

Abstract

Winter wheat, the most widespread crop in Belgium, is an important resource in many areas. The main foliar fungal diseases observed on this Poaceae are septoria (*Zymoseptoria tritici*), yellow rust (*Puccinia striiformis*) and brown rust (*Puccinia triticina*). It is important to improve the control of these diseases. Therefore, this work deals with the influences of different factors on these three diseases as well as the modelling of the occurrence of yellow and brown rust symptoms. The factors studied are variety, sowing date and fungicide treatment.

Due to the low fungal pressure in 2020, the severity developed by the pathogens was not significant. Nevertheless, the observations made it possible to validate the latency periods provided by the rust occurrence model developed from conditions from the literature. From the meteorological conditions, latency periods for yellow and brown rust can be obtained. The occurrence of symptoms can thus be predicted.

The study of the efficacy of fungicide treatments has highlighted the need to apply a fungicide treatment to control the development of fungi on susceptible varieties. The absence of treatment on a resistant variety can be justified to control septoria.

For rusts, the influence of the development stage on the expression of resistance genes has made it possible to explain the differences in severity observed at the same date between plants at different growth stages.

The study in disease dynamics also made it possible to study the different propagation and development of diseases from one variety profile to another as well as from one sowing date modality to another. In particular, a greater susceptibility to septoria for earlier sowings was noted.

Keywords: wheat, *Zymoseptoria tritici*, *Puccinia striiformis*, *Puccinia triticina*, model, resistance, latency, fungicide.

Table des matières

1.	Introduction.....	1
2.	Synthèse bibliographique.....	2
2.1.	Froment d'hiver.....	2
2.2.	Maladies foliaires étudiées.....	2
2.2.1.	Septoriose	2
2.2.1.1.	Classification	2
2.2.1.2.	Symptômes	2
2.2.1.3.	Influence climatique	3
2.2.1.4.	Influence génotypique	3
2.2.1.5.	Influence de facteurs agronomiques.....	4
2.2.2.	Rouille jaune.....	4
2.2.2.1.	Classification	4
2.2.2.2.	Symptômes	4
2.2.2.3.	Influences climatiques	5
2.2.2.4.	Influence génotypique	6
2.2.2.5.	Influence des facteurs agronomiques	6
2.2.3.	Rouille brune	6
2.2.3.1.	Classification	6
2.2.3.2.	Symptômes	6
2.2.3.3.	Influence des facteurs climatiques	7
2.2.3.4.	Influence génotypique	8
2.2.3.5.	Influence des facteurs agronomique.....	8
2.3.	Modélisation.....	9
3.	Matériel et méthodes.....	10
3.1.	Site expérimental.....	10
3.2.	Itinéraire phytotechnique de la parcelle	10
3.3.	Données météorologiques	11
3.4.	Dispositif et conditions expérimentales	11
3.4.1.	Dispositif expérimental.....	11
3.4.2.	Date de semis	13
3.4.3.	Variétés	13
3.4.4.	Modalités de traitement fongicide	14
3.5.	Mesures sur terrain et observation des symptômes.....	14
3.5.1.	Echantillonnage en champ	14
3.5.2.	Détermination des stades	15
3.5.3.	Cotation des maladies fongiques	15
3.6.	Modélisation.....	16
3.6.1.	Conditions d'infection	17
3.6.2.	Période de latence	18
3.7.	Traitement des données.....	18
3.7.1.	Comparaison des cinq variétés et dynamique de la maladie	18
3.7.2.	Influence génotypique	19
3.7.3.	Efficacité des traitements fongicides	19
3.7.4.	Comparaison entre prédiction et apparition réelle des rouilles.	19
4.	Résultats.....	20
4.1.	Conditions météorologiques	20
4.2.	Dynamique des maladies	21
4.2.1.	Septoriose	21
4.2.1.1.	Comparaison des cinq variétés	21
4.2.1.2.	Description des variétés par étage foliaire	22

4.2.1.3.	Interprétation des résultats.....	24
4.2.2.	Rouille jaune.....	25
4.2.2.1.	Comparaison des cinq variétés.....	25
4.2.2.2.	Description des variétés par étage foliaire.....	27
4.2.2.3.	Interprétation des résultats.....	28
4.2.3.	Rouille brune.....	29
4.2.3.1.	Comparaison des cinq variétés.....	29
4.2.3.2.	Description des variétés par étage foliaire.....	30
4.2.3.3.	Interprétation des résultats.....	32
4.3.	Influence du génotype.....	33
4.3.1.	Septoriose.....	33
4.3.1.1.	Description des résultats.....	33
4.3.1.2.	Interprétation des résultats.....	33
4.3.2.	Rouille jaune.....	34
4.3.2.1.	Description des résultats.....	34
4.3.2.2.	Interprétation des résultats.....	34
4.3.3.	Rouille brune.....	35
4.3.3.1.	Description des résultats.....	35
4.3.3.2.	Interprétation des résultats.....	35
4.4.	Influence des traitements fongicides.....	37
4.4.1.	Description des traitements sur la variété Limabel.....	37
4.4.1.1.	Septoriose.....	39
4.4.1.2.	Rouille jaune.....	39
4.4.1.3.	Rouille brune.....	40
4.4.2.	Description des traitements sur la variété Bennington.....	41
4.4.2.1.	Septoriose.....	43
4.4.2.2.	Rouille jaune.....	43
4.4.2.3.	Rouille brune.....	44
4.4.3.	Interprétation des résultats.....	44
4.4.3.1.	Septoriose.....	44
4.4.3.2.	Rouille jaune.....	44
4.4.3.3.	Rouille brune.....	45
4.5.	Analyse des périodes de latence obtenues par le modèle.....	45
4.5.1.	Comparaison avec les observations de 2020.....	46
4.5.1.1.	Rouille jaune.....	46
4.5.1.2.	Rouille brune.....	48
4.5.2.	Comparaison avec les observations de l'année 2018.....	49
4.5.2.1.	Rouille jaune.....	49
4.5.2.2.	Rouille brune.....	51
4.5.3.	Interprétation des résultats.....	52
4.5.3.1.	Rouille jaune.....	52
4.5.3.2.	Rouille brune.....	52
5.	Conclusions et perspectives.....	54
6.	Références bibliographiques.....	56
7.	Annexes.....	60
7.1.	Annexe 1.....	60
7.2.	Annexe 2.....	61
7.3.	Annexe 3.....	62
7.4.	Annexe 4.....	63
7.5.	Annexe 5.....	64
7.6.	Annexe 6.....	65
7.7.	Annexe 7.....	66
7.8.	Annexe 8.....	67

7.9.	Annexe 9	69
7.10.	Annexe 10.....	75

Table des figures

Figure 1 : Symptômes de septoriose sur feuille avec pycnides (Livre Blanc Cereales : Septoriose, 2017)...	3
Figure 2 : Pustules de rouille jaune (BASF, 2019).....	4
Figure 3 : Pustules de rouille brune (Arvalis).....	7
Figure 4 : Vue aérienne du champ expérimental de Lonzée (Google Maps, 2020)	10
Figure 5 : Organisation des blocs pour les essais 2020	12
Figure 6 : Répartition des variétés et traitements fongicides pour les deux modalités de semis du premier bloc	12
Figure 7 : Schéma du dispositif expérimental à l'échelle d'une parcelle	12
Figure 8 : Echelle de cotation des rouilles (Koyshibayev et Muminjanov, 2016.)	16
Figure 9 : Echelle de cotation de la septoriose (Koyshibayev et Muminjanov, 2016.).....	16
Figure 10 : Etapes-clés du modèle de prédiction des rouilles.	17
Figure 11 : Conditions climatiques 2019-2020	20
Figure 12 : Evolution de la sévérité moyenne de la septoriose sur cinq variétés au cours du suivi 2020, (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre.....	21
Figure 13 : Evolution de la sévérité moyenne de la septoriose par étage foliaire sur la variété sensible Bennington : (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre.	23
Figure 14 : Evolution de la sévérité moyenne de la septoriose par étage foliaire sur la variété résistante Limabel : (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre.....	23
Figure 15 : Evolution de la sévérité moyenne de la septoriose par étage foliaire sur la variété sensible KWS Kerrin: (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre.....	24
Figure 16 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille jaune sur cinq variétés au cours du suivi 2020, (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre.	25
Figure 17 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille jaune par étage foliaire sur la variété sensible Bennington : (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre.	27
Figure 18 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille jaune par étage foliaire sur la variété résistante Limabel: (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre.....	27
Figure 19 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille jaune par étage foliaire sur la variété sensible Amboise : (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre.....	28
Figure 20 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille brune sur 5 variétés au cours du suivi 2020, (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre.....	29
Figure 21 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille brune par étage foliaire sur la variété sensible Bennington : (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre	30
Figure 22 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille brune par étage foliaire sur la variété résistante Limabel: (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre.....	31
Figure 23 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille brune par étage foliaire sur la variété sensible KWS Salix: (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre	31
Figure 24 : Efficacité des traitements fongicides sur les trois maladies pour la variété résistante Limabel, semis d'octobre.....	37
Figure 25 : Efficacité des traitements fongicides sur les trois maladies pour la variété résistante Limabel, semis de novembre	38
Figure 26 : Efficacité des traitements fongicides sur les trois maladies pour la variété sensible Bennington, semis d'octobre	41
Figure 27 : Efficacité des traitements fongicides sur les trois maladies pour la variété sensible Bennington, semis de novembre.....	42
Figure 28 : Périodes de latence de la rouille jaune en 2020	46
Figure 29 : Sévérité moyenne et périodes de latence observées de la rouille jaune pour les cinq variétés en 2020 pour le semis d'octobre (A) et celui de novembre (B).	47
Figure 30 : Périodes de latence de la rouille brune en 2020	48

Figure 31 : Sévérité moyenne et périodes de latence observées de la rouille brune pour les cinq variétés en 2020 pour le semis d'octobre (A) et celui de novembre (B).	48
Figure 32 : Périodes de latence de la rouille jaune en 2018	49
Figure 32 : Sévérité moyenne et périodes de latence observées de la rouille jaune pour les cinq variétés en 2018 pour le semis d'octobre (A) et celui de novembre (B).	50
Figure 33: Périodes de latence de la rouille brune en 2018	51
Figure 34 : Sévérité moyenne et périodes de latence observées de la rouille brune pour les cinq variétés en 2018 pour le semis d'octobre (A) et celui de novembre (B).	52
Figure 35 : Cycle de <i>Zymoseptoria tritici</i> , champignon de la septoriose (Livre Blanc Céréales : Septoriose, 2017)	60
Figure 36 : Cycle de <i>Puccinia striiformis</i> , champignon de la rouille jaune (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017)	62
Figure 37 : Cycle de <i>Puccinia triticina</i> Erik., champignon de la rouille brune (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017)	64
Figure 38 : Répartition des variétés et traitements fongicides sur l'ensemble des blocs pour les deux modalités de date de semis.	66
Figure 39 : Echelle BBCH du blé (Syngenta, 2015)	68
Figure 40 : Graphique de la sévérité en fonction de la fréquence de la septoriose pour le semis d'octobre	69
Figure 41 : Graphique de la sévérité en fonction de la fréquence de la septoriose pour le semis de novembre	70
Figure 42 : Graphique de la sévérité en fonction de la fréquence de la rouille jaune pour le semis d'octobre	71
Figure 43 : Graphique de la sévérité en fonction de la fréquence de la rouille jaune pour le semis de novembre	72
Figure 44 : Graphique de la sévérité en fonction de la fréquence de la rouille brune pour le semis d'octobre	73
Figure 45 : Graphique de la sévérité en fonction de la fréquence de la rouille brune pour le semis de novembre	74
Figure 46: Sévérité moyenne et périodes de latence observées de la rouille jaune sur les étages foliaires de la variété Amboise en 2020 pour le semis d'octobre (A) et celui de novembre (B).	75
Figure 47: Sévérité moyenne et périodes de latence observées de la rouille brune sur les étages foliaires de la variété KWS Salix en 2020 pour le semis d'octobre (A) et celui de novembre (B).	75
Figure 48 : Sévérité moyenne et périodes de latence observées de la rouille jaune sur les étages foliaires de la variété RGT Reform en 2018 pour le semis d'octobre (A) et celui de novembre (B).	76
Figure 49: Sévérité moyenne et périodes de latence observées de la rouille brune sur les étages foliaires de la variété Edgar en 2018 pour le semis d'octobre (A) et celui de novembre (B).	76

Liste des tableaux

Tableau 1 : Températures favorables à la septoriose selon différents ouvrages.....	3
Tableau 2 : Températures favorables à l'infection par la rouille jaune selon différents ouvrages	5
Tableau 3 : Températures favorables à la germination de la rouille jaune selon différents ouvrages.....	5
Tableau 4 : Conditions environnementales nécessaires au développement de la rouille jaune (Roelfs et al., 1992).....	5
Tableau 5 : Températures favorables à l'infection par la rouille brune selon différents ouvrages	7
Tableau 6 : Températures favorables à la germination de la rouille brune selon différents ouvrages	7
Tableau 7 : Conditions environnementales nécessaires au développement de la rouille brune (Roelfs et al., 1992).....	8
Tableau 8: Opérations effectuées sur les parcelles	10
Tableau 9 : Modalités de l'essai	11
Tableau 10 : Sensibilités des variétés présentes dans l'essai (Meza et al., 2019)	14
Tableau 11 : Traitements fongicides effectués sur l'expérimentation (Abréviations : DF=Dernière feuille, 2N= deux nœuds, Epi= Epiaison).....	14
Tableau 12 : Paramètres utilisés dans le modèle de prédiction d'infection des rouilles	17
Tableau 13 : Formules de latence utilisées dans le modèle de prédiction d'infection par les rouilles (Tmoy= température moyenne journalière) (El Jarroudi et al., 2014 ; El Jarroudi et al., 2017)	18
Tableau 14 : Dates retenues pour l'analyse des effets des traitements.....	19
Tableau 15: Résultats des tests SNK de comparaison de la sévérité de la septoriose sur les variétés pour le semis d'octobre en fonction des dates d'observations (DOY)	21
Tableau 16: Résultats des tests SNK de comparaison de la sévérité de la septoriose sur les variétés semées en novembre en fonction des dates d'observations (DOY).....	22
Tableau 17 : Résultats des tests SNK de comparaison de la sévérité de la rouille jaune sur les variétés pour le semis d'octobre en fonction des dates d'observations (DOY)	25
Tableau 18 : Résultats des tests SNK de comparaison de la sévérité de la rouille jaune sur les variétés pour le semis de novembre en fonction des dates d'observations (DOY).....	26
Tableau 19 : Résultats des tests SNK de comparaison de la sévérité de la rouille brune sur les variétés pour le semis d'octobre en fonction des dates d'observations (DOY)	29
Tableau 20 : Résultats des tests SNK de comparaison de la sévérité de la rouille brune sur les variétés pour le semis de novembre en fonction des dates d'observations (DOY).....	30
Tableau 21 : Comparaison de la sévérité de la septoriose en fonction des stades de développement.....	33
Tableau 22 : Comparaison de la sévérité de la rouille jaune en fonction des stades de développement.....	34
Tableau 23 : Comparaison de la sévérité de la rouille brune en fonction des stades de développement	35
Tableau 24 : Résultats des tests SNK de comparaison de l'efficacité des traitements fongicides (0T, 1T, 2T) sur la variété Limabel pour les deux dates de semis en fonction des dates d'observations (DOY)	39
Tableau 25 : Résultats des tests SNK de comparaison de l'efficacité des traitements fongicides (0T, 1T, 2T) sur la variété Bennington pour les deux dates de semis en fonction des dates d'observations (DOY)	43
Tableau 26 : Quantité de période de latence comptabilisées de la rouille jaune à chaque date d'observation en 2020.....	46
Tableau 27 : Quantité de période de latence de la rouille brune comptabilisées à chaque date d'observation en 2020.....	48
Tableau 28: Quantité de période de latence de la rouille jaune comptabilisées à chaque date d'observation en 2018 pour le semis d'octobre	49
Tableau 29 : Quantité de période de latence de la rouille jaune comptabilisées à chaque date d'observation en 2018 pour le semis de novembre	50
Tableau 30 : Quantité de période de latence de la rouille brune comptabilisées à chaque date d'observation en 2018 pour le semis d'octobre	51
Tableau 31 : Quantité de période de latence de la rouille brune comptabilisées à chaque date d'observation en 2018 pour le semis de novembre	51

Définition des symboles :

DOY : « Day of the year », nombre représentant le jour de l'année.

Tmoy : Température moyenne journalière

L(j) : Valeur de latence calculé pour le jour j

1. Introduction

Le blé, plus communément appelé froment dans nos régions, est une céréale largement cultivée à travers le monde. Sa superficie cultivée en Belgique s'élevait à 203 760 hectares en 2019 et à 215 901 958 hectares dans le monde (FAOSTAT, 2020). Une évaluation récente indique que l'offre actuelle de blé est suffisante pour la demande mondiale (FAO, 2020). Néanmoins, d'ici 2026, la production de blé devrait augmenter de 12% par rapport aux quantités produites en 2016 (OCDE/FAO, 2017). Afin d'atteindre cet objectif et de continuer à produire un blé de qualité, il est pertinent de lutter contre les menaces qui pèsent sur cette culture, comme les ravageurs et les maladies.

En région wallonne, trois maladies s'attaquent le plus souvent au froment : la septoriose (*Zymoseptoria tritici*), la rouille jaune (*Puccinia striiformis*) et la rouille brune (*Puccinia triticina*). Ces maladies sont celles ayant exercé les plus fortes pressions ces dernières années. Elles peuvent avoir des effets dévastateurs et faire chuter le rendement de variétés sensibles non traitées de près de 60% (Bodson et al., 2017). Afin de lutter contre ces maladies, l'utilisation des fongicides s'est développée en agriculture conventionnelle en Europe.

Néanmoins, suite à la prise de conscience des consommateurs de l'impact de l'agriculture sur l'environnement ainsi que leur santé, l'agriculture doit rencontrer les attentes de la population et donc répondre à de nouveaux enjeux environnementaux mais aussi sociétaux. Pour s'inscrire dans un objectif de développement durable, les pratiques agricoles doivent se vouloir plus propres et saines. Cela passe donc par une diminution des intrants chimiques et notamment les produits phytosanitaires (Fabrégat, 2009).

Cependant, pour diminuer l'utilisation de ces produits, il est primordial de pouvoir garantir un contrôle des maladies fongiques. Plusieurs leviers sont utilisables, notamment le choix de la variété mais aussi la date de semis. Une autre approche vise à utiliser des outils d'aide à la décision qui vont prédire les infections afin d'utiliser judicieusement les produits de protection des plantes.

Dans ce cadre, l'objectif du travail est le suivi de la dynamique de développement des principales maladies fongiques en froment d'hiver, à savoir la septoriose, la rouille jaune et la rouille brune au cours de la saison culturale 2019-2020 ainsi que le développement d'un modèle de prédiction de l'infection par les rouilles. A partir des observations obtenues, l'influence du traitement fongicide, de la date de semis et de la variété sera étudiée. De plus, un modèle sera élaboré afin de prédire l'apparition de symptômes de la rouille jaune et de la rouille brune. Une comparaison entre ces prédictions et les observations de 2018 et 2020 sera également effectuée.

2. Synthèse bibliographique

2.1. Froment d'hiver

Le froment d'hiver, de son nom latin *Triticum aestivum* L., appartient à la famille des *Poaceae*. Cette plante est cultivée partout dans le monde pour son grain qui est source de nourriture à la fois pour l'humain et pour les animaux. Le froment est semé avant l'hiver, germe, se maintient en phase dite végétative durant l'hiver et reprend sa croissance lorsque les températures redeviennent favorables au printemps (Curtis et al., 2002).

Le rendement de la culture peut être affecté par toute une série de facteurs, dont la date de semis, la variété, la densité, la disponibilité en nutriments, le type de sol, mais également les conditions environnementales telles que la température et l'humidité. Il existe également des maladies et ravageurs liés à ces conditions climatiques qui affectent le rendement de la culture (Hay and Porter, 2006).

Deuxième céréale la plus cultivée au monde (FAO, 2020), le blé est valorisé sous différentes formes : alimentation humaine, animale, production d'énergie (bioéthanol), ... Vu l'importance de la culture de blé, il est important d'en assurer sa production. Il est possible d'améliorer certains leviers agronomiques, comme notamment la lutte contre les maladies en établissant une meilleure connaissance de celles-ci et en prédisant leur apparition.

2.2. Maladies foliaires étudiées

2.2.1. Septoriose

2.2.1.1. Classification

Le septoriose peut être provoquée par deux espèces différentes de champignons. La première, *Staganospora nodorum* [anamorphe : *Paeosphaeria nodorum*], est retrouvée très sporadiquement dans certaines parcelles de Wallonie. La seconde, *Zymoseptoria tritici*, est l'espèce dominante rencontrée dans les parcelles de froment (Livre Blanc Céréales : Septoriose, 2017). Ces champignons appartiennent tous deux à l'embranchement des Ascomycètes. Ils ont, comme particularité, deux formes de reproduction, générant de ce fait deux types de cycles infectieux. Ils passent également par deux phases : biotrophe jusqu'à la fin de la phase de latence, et nécrotrophe durant la sporulation (Slimane, 2010). Le cycle de vie de ce champignon est décrit dans l'annexe 1 et l'impact qu'il peut avoir sur le blé est discuté dans l'annexe 2.

2.2.1.2. Symptômes

Les premiers symptômes peuvent déjà être observés sur les premières feuilles formées avant la période hivernale (Livre Blanc Céréales : Septoriose, 2017). Au début de l'infection, de petites taches de couleur jaune clair et de forme globulaires à oblongues peuvent subvenir. Ces taches évolueront ensuite en une forme plus linéaire et parallèle aux nervures (figure 1). Dans des infections sévères, la totalité de la feuille peut être recouverte par la septoriose (Gieco et al., 2004).



Figure 1 : Symptômes de septoriose sur feuille avec pycnides (Livre Blanc Cereales : Septoriose, 2017)

2.2.1.3. Influence climatique

La température et l’humidité vont principalement influencer le développement de la maladie (Ben Mohamed et al., 2000). Les conditions de températures pour les différentes étapes du cycle sont reprises dans le tableau 1. A noter que le développement du champignon est limité par une période de gel continu en hiver (Verreet et al., 2000).

Tableau 1 : Températures favorables à la septoriose selon différents ouvrages

Ouvrage	Etape	Température minimale [°C]	Température optimale [°C]	Température maximale [°C]
Ben Mohamed et al. (2000)	Développement	/	18-25	/
Verreet et al. (2000)	Germination des spores	2	22-24	37
Verreet et al. (2000)	Infection	7	16-21	/

2.2.1.4. Influence génotypique

L’utilisation de variétés moins sensibles permet de lutter contre la septoriose. Il n’existe pas de variété de froment totalement résistante étant donné l’importante diversité génétique du champignon. Cette résistance peut cependant être influencée par le stade phénologique de la culture lors de l’attaque. En effet, lors d’une étude faite par Giéco et al. (2004), une différence de sensibilité entre génotypes a été observée. Certains génotypes ont développé une sensibilité lors d’une inoculation au stade plantule et une résistance lors d’une inoculation aux stades tallage et dernière feuille. L’inverse s’est également produit. Des gènes de résistance spécifique aux stades interviendraient donc l’interaction avec la septoriose. Dreisigacker et al. (2015) a identifié la présence de dix-huit locus de résistance à la septoriose qui sont efficaces soit au stade plantule, soit au stade adulte ou soit durant tous les stades.

La structure du froment est également importante dans la propagation de la septoriose. Effectivement, les trois dernières feuilles du froment se trouvent proche des feuilles plus anciennes pouvant porter des lésions. Durant cette période dite de chevauchement, des contacts ou de légères éclaboussures suffisent à infecter la feuille. Après cette phase, les feuilles récentes vont s’éloigner des plus vieilles par un allongement de la tige, rendant la propagation plus difficile. La longueur de la période de chevauchement influence donc l’infection. Cette période est plus longue pour les variétés sensibles que résistantes (Lovell et al., 1997).

2.2.1.5. Influence de facteurs agronomiques

Les semis précoces peuvent subir des conditions météorologiques favorables au développement du champignon et ainsi favoriser la maladie (Fones and Gurr, 2015). Un semis tardif permet de limiter le risque d'infection primaire en évitant la période de libération d'ascospores (Ben Romdhane, 2003).

Le facteur date de semis a donc un impact sur le développement et la sévérité de la septoriose. D'autres pratiques peuvent diminuer le risque d'infection, notamment le labour, la rotation de culture, la diminution de la fumure azotée et la diminution de la densité de semis (Livre Blanc Céréales, 2017).

2.2.2. Rouille jaune

2.2.2.1. Classification

La rouille jaune est causée par l'espèce *Puccinia striiformis* Westend. Le froment d'hiver est l'hôte spécifique de l'une des sous-espèces de cet agent : *Puccinia striiformis* f. sp. *Tritici* Erikss (Pst). Ce champignon biotrophe se classe dans les basidiomycètes (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017). Le cycle de vie du champignon est décrit dans l'annexe 3.

2.2.2.2. Symptômes

A l'échelle d'une plante de blé, les différents étages foliaires peuvent être touchés par la rouille jaune, voir même les grains et les épis dans les cas les plus graves. Généralement, les premiers symptômes se développent entre mars et avril déjà au stade plantule, mais sont parfois observé plus précocement en février. Des pustules de couleur jaunes-orange (figure 2) sont alors présents sur les feuilles les plus basses des plantules. (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017 ; Chen, 2005). Les caractéristiques de ces symptômes sont des sores en forme de cratère mesurant de 0,3 à 1mm de long et pouvant contenir à maturité des spores à la couleur rousse. La particularité de la rouille jaune est la disposition de ces sores : en alignement le long des nervures des organes végétatifs (feuilles et tiges) pour former de longues stries étroites et parallèles. Ces fructifications peuvent développer des téléospores contenues dans des pustules noires allongées après la floraison du blé (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017).



Figure 2 : Pustules de rouille jaune (BASF, 2019)

A l'échelle de la parcelle, l'infection débute en formant des tâches jaunes d'environ 1m² dans la parcelle, pour ensuite gagner l'ensemble de la parcelle une fois les conditions réunies. (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017).

L'impact que peut avoir la rouille jaune sur le blé est discuté dans l'annexe 4.

2.2.2.3. Influences climatiques

Dans le tableau 2, les seuils de température permettant l'infection par la rouille jaune sont repris pour différents ouvrages. Les températures diffèrent d'un ouvrage à l'autre. L'infection par le pathogène n'est possible que si la température est comprise entre la température minimale et maximale.

Tableau 2 : Températures favorables à l'infection par la rouille jaune selon différents ouvrages

Ouvrage	Température minimale	Température maximale
Bahri, 2008	-10	25
Livre Blanc Céréales, 2017	9	15
Savary et al., 2016	5	12
El Jarroudi et al., 2016	4	16

Selon Bahri (2008), la rouille jaune se développe à des températures fraîches qui peuvent varier de -10°C à 25°C. Il reporte également que le développement du champignon ralentit ou cesse à des températures supérieures à 25°C.

Pour germer, les spores ont également besoin de températures spécifiques qui peuvent varier d'un ouvrage à l'autre. Ces températures sont reprises dans le tableau 3.

Tableau 3 : Températures favorables à la germination de la rouille jaune selon différents ouvrages

Ouvrage	Température minimale	Température Optimale	Température maximale
Bahri, 2008	2	10	28
Savary et al., 2016	5	15	20

Roelfs et al. (1992) fournit un tableau plus détaillé (tableau 4) avec les conditions environnementales requises pour chaque étape du cycle de développement de la rouille jaune.

Tableau 4 : Conditions environnementales nécessaires au développement de la rouille jaune (Roelfs et al., 1992)

Conditions environnementales	Température (°C)			Lumière	Eau libre
	Minimum	Optimum	Maximum		
Germination	0	9-13	23	Faible	Essentielle
Tube germinatif	/	10-15	/	Faible	Essentielle
Appressorium			Pas formé		
Pénétration	2	8-13	23	Faible	Essentielle
Croissance	3	12-15	20	Elevée	Aucune
Sporulation	5	12-15	20	Elevée	Aucune

Le champignon requiert également une humidité relative supérieure à 92% et une pluviométrie horaire inférieure à 0.1mm. L'infection est possible si les conditions sont remplies durant une période de 4 heures (El Jarroudi et al., 2016).

Le vent peut également jouer un rôle dans la dispersion des spores et la précocité de l'infection (Livre Blanc Céréale, 2017).

Certaines conditions vont permettre de limiter l'infection du champ. Des températures élevées en fin d'été vont notamment réduire la quantité d'inoculum primaire. Le gel va également limiter la propagation en tuant le mycélium qui se trouve en phase de sporulation. Le mycélium situé au sein de la feuille qui ne se

trouve pas en sporulation ne va quant à lui pas être impacté par le gel (Gladders, 2007). Une humidité trop importante durant une longue période peut également diminuer la vitalité des spores et leur dispersion (Bataille et al., 2015).

2.2.2.4. Influence génotypique

L'utilisation de variété résistantes permet de lutter contre la rouille jaune. Chaque variété dite résistante peut exprimer soit une résistance totale et va donc résister aux différentes souches du champignon, soit une semi-résistance et sera donc sensible à certaines souches et résistantes à d'autres. Les variétés sensibles ne présentent aucune résistance. Cependant, l'apparition de nouvelle souche peut rendre certaines variétés sensibles alors qu'elles étaient considérées comme résistantes (Omrani et al., 2013).

Certaines résistances peuvent s'exprimer dès le stade plantule et être efficaces toute la saison alors que d'autres apparaissent au stade adulte (du Cheyron, 2016).

2.2.2.5. Influence des facteurs agronomiques

Certains facteurs favorisent le développement du pathogène, comme des pluies lors de la récolte de blé précédente, des plantes hôtes durant l'inter-culture, un semis tardif ou des hivers doux (Gladders, 2007), ou encore un excès de fumure azotée ou une densité de semis trop élevée (Livre Blanc Céréales : 2017).

2.2.3. Rouille brune

2.2.3.1. Classification

La rouille brune est causée par l'espèce *Puccinia triticina* Erik. Ce champignon appartient au même genre *Puccinia* que la rouille jaune et est également hétéroïque (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017). Son cycle de vie est décrit dans l'annexe 5.

2.2.3.2. Symptômes

La rouille brune apparait dans nos régions vers la fin du mois de mai, à partir du stade dernière feuille étalée. Cependant, des attaques précoces sont observables à partir du stade 2 nœuds si les températures hivernales étaient douces et le semis précoce (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017).

L'apparition d'urédies pouvant mesurer jusqu'à 1,5mm de couleur jaune à orangée traduit une infection par la rouille brune. Ces pustules se répartissent aléatoirement sur le limbe des feuilles (figure 3), essentiellement sur les feuilles supérieures, et libèrent les spores rondes de couleur brune. Un halo chlorotique se développe également autour des fructifications et se nécrosent en fin de cycle (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017 ; Azzimonti, 2013 ; Bolton et al., 2008). A cette période, l'épi peut également être atteint par la rouille brune en cas d'attaque sévère. Des téléutosores (pustules noires) peuvent être observables sur les feuilles.



Figure 3 : Pustules de rouille brune (Arvalis)

Les rouilles jaune et brune sont parfois confondues entre elles. La plus grosse différence réside dans la répartition de ces champignons. Sur les feuilles, les pustules de rouille brune sont plus grandes et réparties de manière aléatoire. Au niveau de la parcelle, la rouille brune ne se concentre pas en foyer mais est plutôt répartie aléatoirement (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017).

L'impact que la rouille brune peut avoir sur le blé est décrite dans l'annexe 6.

2.2.3.3. Influence des facteurs climatiques

La rouille brune est davantage présente lors d'une saison culturale chaude et d'une pluviométrie moyenne (Savary et al., 2016).

Le tableau 5 reprend les différents seuils de température rencontrés dans la littérature qui vont permettre le développement et l'infection de la rouille.

Tableau 5 : Températures favorables à l'infection par la rouille brune selon différents ouvrages

Ouvrage	Température minimale	Température maximale
Kolmer, 1996	15	20
Savary et al., 2016	5	25
Duvivier et al., 2016	10	25
El Jarroudi et al., 2014	8	20

Dans le tableau 6, les températures favorables à la germination des spores sont reprises pour chaque ouvrage.

Tableau 6 : Températures favorables à la germination de la rouille brune selon différents ouvrages

Ouvrage	Température minimale	Température optimale	Température maximale
Savary et al., 2016	5	/	25
Duvivier et al., 2016	10	/	25
Kolmer, 1996	/	20	/

Selon Komer (1996), la germination des spores peut durer de 4 à 8 heures à une température d'environ 20°C.

Roelfs et al. (1992) fournit un tableau plus détaillé (tableau 7) avec les conditions environnementales requises pour chaque étape du cycle de développement de la rouille brune.

Tableau 7 : Conditions environnementales nécessaires au développement de la rouille brune (Roelfs et al., 1992)

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

Pour la période de latence, les seuils de température qui semblent ressortir sont 10°C et 20°C. Avec ces températures, 8 à 12 jours sont nécessaires pour terminer une période de latence (Duvivier et al., 2016 ; Savary et al., 2016). Selon le Livre Blanc Céréales (2017), cette période peut varier de 8 à 12 jours avec des températures comprises entre 15°C et 20°C.

Le développement de la rouille brune requiert également une humidité relative supérieure à 70% selon El Jarroudi et al. (2014), et supérieure à 60% selon le Livre Blanc Céréales (2017). Une pluie inductrice ou une rosée, est également nécessaire pour déclencher l'infection (Kolmer, 1996). La quantité de pluie doit être comprise entre 0.1 et 1 millimètre durant la première heure d'infection. Toutefois, la pluviométrie ne peut excéder 1 millimètre afin d'éviter un lessivage des spores. Cette phase d'infection a lieu durant 12 heures si les conditions sont optimales. De plus, l'infection se produit généralement la nuit car la germination des spores est inhibée par la lumière (El Jarroudi et al., 2014).

Certaines conditions climatiques vont permettre de limiter l'infection en champ. Ainsi, un hiver rigoureux va réduire le taux de survie du champignon (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017).

2.2.3.4. Influence génotypique

La résistance des variétés peut dépendre du stade de développement. Effectivement, certaines variétés peuvent exprimer leur résistance au stade adulte et donc être sensible au stade plantule. A l'inverse, certaines variétés, résistantes au stade plantule, peuvent perdre leur résistance à des stades plus matures (McCallum et al., 2016). Mais encore, un gène de résistance peut commencer à s'exprimer à un stade de croissance précoce mais ne s'exprimer totalement qu'à un stade plus tardif (Kolmer, 1996). De plus, selon Azzimonti (2013), le stade de développement peut influencer l'expression de résistances quantitatives.

2.2.3.5. Influence des facteurs agronomique

Selon le Livre Blanc Céréales (2017), les semis précoces peuvent subir des infections précoces suite à la survie de repousses durant le phénomène de « green bridge ». La destruction des repousses limite donc l'infection primaire à l'automne. Un excès de fumure azotée et une densité de semis élevée sont également à éviter, comme pour la rouille jaune.

2.3. Modélisation

Un modèle de maladie végétale est une simplification des relations entre le pathogène, la plante hôte et l'environnement qui vont déterminer la façon dont une épidémie va se développer dans le temps et dans l'espace. La modélisation se déroule en plusieurs étapes : définition de l'objectif du modèle, conceptualisation, développement des relations mathématiques et l'évaluation du modèle (Rossi et al., 2010).

Le développement d'outils d'aide à la décision pour l'application de traitement fongicide peut se baser sur des modèles avec des variables phénologiques et météorologiques. (El Jarroudi et al., 2014). Afin d'éviter toute application de fongicide inutile, il est nécessaire de prédire précocement les risques de maladies ou leur progression sur les feuilles (Young et al., 2003). De plus, les produits de protection n'agissant que de manière préventive, il est important d'effectuer des pulvérisations avant le développement des symptômes afin de contrôler l'épidémie et ainsi protéger le rendement (Paveley et al., 2000). Il existe des modèles qui simulent la progression de l'infection de la rouille brune sur chaque feuille, en fonction du pourcentage de feuilles touchées (Rossi et al., 1997). Ce modèle beaucoup plus complexe prend en compte la propagation des rouilles sur chaque feuille d'une même plante. D'autres modèles, plus simplistes, permettent de prédire l'infection sur une feuille unique (El Jarroudi et al., 2017).

3. Matériel et méthodes

3.1. Site expérimental

Le champ expérimental de l'unité de phytotechnie des régions tempérées de Gembloux Agro-Bio Tech (Uliège), sur lequel étaient situées les parcelles suivies lors de cette étude, est situé à Lonzée, aux coordonnées géographiques suivantes : 50° 32' 40.946" N 4° 44' 56.586" E. Le terrain est caractérisé par un sol de type limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait, voire limoneux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre par endroits.

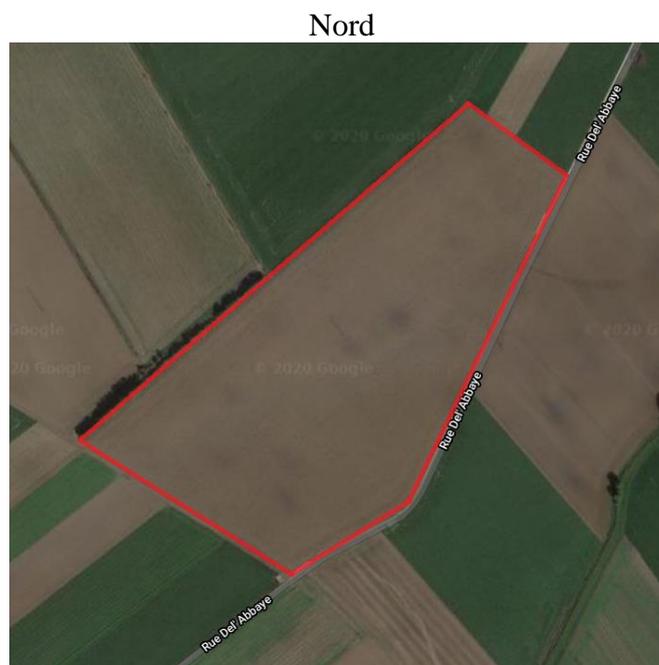


Figure 4 : Vue aérienne du champ expérimental de Lonzée (Google Maps, 2020)

3.2. Itinéraire phytotechnique de la parcelle

Les différentes opérations effectuées tout au long de la saison culturale sont reprises dans le tableau suivant.

Tableau 8: Opérations effectuées sur les parcelles

Opération	Remarque	Date semis Oct	Date semis Nov
Semis	250 gr/m ²	04/11	22/11
Fumure	50N Tallage	27/03	27/03
Fumure	50 N Redressement	24/04	24/04
Fumure	65 Dernière feuille	18/05	18/05
Désherbage	Sigma maxx + biathlon duo	09/04	09/04
Raccourcisseur	CCC	23/04	23/04
Fongicide	Opus plus + pugil à 2 Nœuds	18/05	18/05
Fongicide	Adexar à la Dernière feuille	23/05	26/05
Fongicide	Velogy era à l'Épiaison	02/06	02/06
Récolte		29/07	31/07

3.3. Données météorologiques

Afin de développer un modèle de prédiction basé sur les conditions climatiques rencontrées lors de la saison culturale, les données météorologiques requises proviennent du site PAMESEB. Ces données sont issues de la station de Sombrefe qui est la station de référence la plus proche de la parcelle. Les données pour les années 2018 et 2020 sont nécessaires pour la suite du travail et sont donc collectées sur ce site.

La station mesure les conditions microclimatiques et nous renseigne notamment sur la température de l'air et l'humidité relative de l'air à 1 mètre 50 de hauteur, le rayonnement solaire à 2 mètres de hauteur, la vitesse du vent à 2 mètres de hauteur ainsi que la pluviométrie. Ces paramètres sont enregistrés toutes les heures. Ces données permettront d'alimenter un modèle qui calculera les dates d'infection potentielle du champ pour les rouilles en culture de blé.

3.4. Dispositif et conditions expérimentales

Un dispositif en split-plot a été choisi comme dispositif expérimental pour les parcelles d'essai. Trois facteurs sont étudiés avec pour chacun, différentes modalités testées. Le tableau ci-dessous reprend ces différents paramètres.

Tableau 9 : Modalités de l'essai

Facteur	Nombre de modalités par facteur
Variété	5 variétés
Traitement fongicide appliqué	3 modalités différentes
Date de semis	2 dates de semis

Quatre répétitions sont mises en place pour chaque modalité, portant le nombre total de parcelles suivies à 120.

3.4.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental choisi comprend quatre blocs qui correspondent aux quatre répétitions (figure 5). Au sein de chaque bloc, les deux dates de semis sont réparties en deux sous-blocs à l'intérieur desquels dix variétés sont réparties aléatoirement. Chaque sous-bloc comprend donc trente parcelles puisque les variétés sont répétées trois fois afin d'y appliquer aléatoirement les trois modalités de traitement fongicide (annexe 7). Pour le premier bloc, les traitements sont effectués dans un ordre spécifique (figure 6).

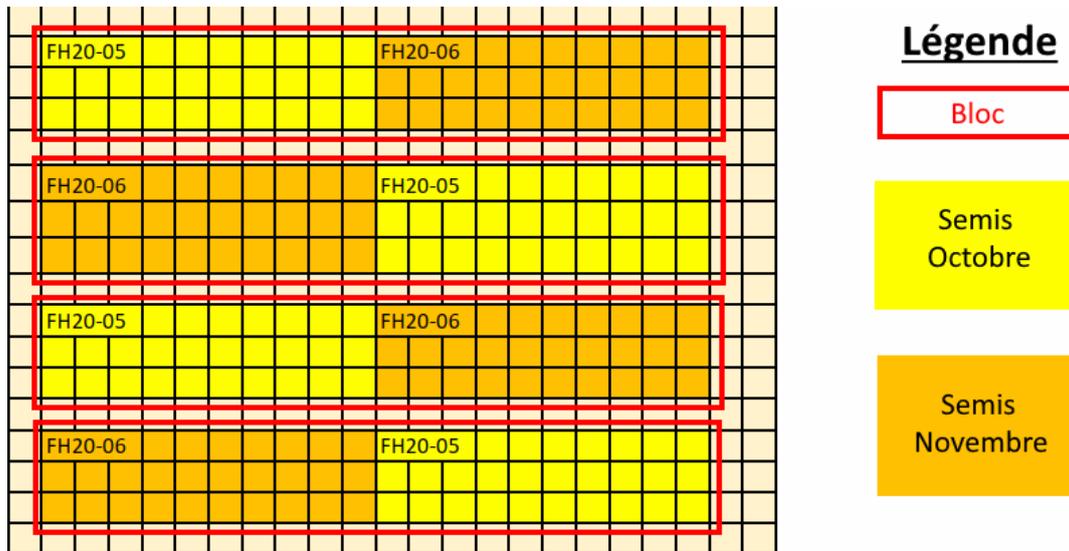


Figure 5 : Organisation des blocs pour les essais 2020

B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
	Bof	septo	bof	RB	septo	Res.	RJ	RJ	Res.	RB	Bof	septo	RB	RB	bof	Res.	RJ	RJ	septo	Res.	
	Bennington	KWS Kerris	Ragnar	LG initial	RGT reformo	imperator	amboise	WPB duran	Limabel	Kws salix	Bennington	RGT reformo	Kws salix	LG initial	Ragnar	imperator	amboise	WPB duran	KWS Kerris	Limabel	
B	1263 21 C	1264 7 C	1265 19 C	1266 70 C	1267 33 C	1268 41 C	1269 49 C	1270 81 C	1271 32 C	1272 8 C	1200 21 C	1200 33 C	1200 8 C	1200 70 C	1200 19 C	1200 41 C	1200 49 C	1200 81 C	1281 7 C	1282 32 C	
B	1172 21 B	1172 7 B	1172 19 B	1172 70 B	1172 33 B	1172 41 B	1172 49 B	1172 81 B	1172 32 B	1172 8 B	1100 21 B	1100 33 B	1100 8 B	1100 70 B	1100 19 B	1100 41 B	1100 49 B	1100 81 B	1100 7 B	1100 32 B	
B	1063 21 A	1064 7 A	1065 19 A	1066 70 A	1067 33 A	1068 41 A	1069 49 A	1070 81 A	1071 32 A	1072 8 A	1000 21 A	1000 33 A	1000 8 A	1000 70 A	1000 19 A	1000 41 A	1000 49 A	1000 81 A	1000 7 A	1000 32 A	

Figure 6 : Répartition des variétés et traitements fongicides pour les deux modalités de semis du premier bloc

Un schéma des parcelles expérimentales est disponible ci-dessous (figure 7). Ces parcelles, qui ont une longueur de 8 mètres pour une largeur de 2 mètres, sont accessibles via des chemins qui parcourent l'ensemble du champ. A chaque extrémité, des bordures de 0,5 mètres sont présentes afin de limiter l'effet de bordure potentiellement existant. Cela permet notamment d'éviter un risque de contamination lors de l'application d'un traitement fongicide à une parcelle voisine. Ces bordures ont également rendu possible la collecte de plantes pour l'observation sans biaiser le rendement de la parcelle.



Figure 7 : Schéma du dispositif expérimental à l'échelle d'une parcelle

3.4.2. Date de semis

Deux modalités de date de semis ont été testées : un premier semis en octobre [FH20-05] et le second en novembre [FH20-06] (Figure 5). Chaque modalité est comprise dans un bloc et est répétée au sein des quatre blocs. Ces deux dates de semis sont un choix adapté pour nos régions. En effet, le mois d'octobre est un mois classique dans nos régions pour semer le froment, alors que le mois de novembre est plus tardif mais devient obligatoire suite à des récoltes plus tardives (arrachage de betteraves ou chicorées, récolte de maïs grain par exemple).

Ces dates sont les plus courantes en Belgique, en fonction des conditions climatiques. En effet, le semis d'octobre a été décalé de quelques jours suite à des précipitations qui ont rendu les semis impossibles aux alentours du 15 octobre. Les semis ont donc été réalisés respectivement le 04 Novembre 2019 et le 22 Novembre 2019 à des densités de 250 grains/m².

3.4.3. Variétés

Au départ, dix variétés ont été sélectionnées et semées pour cet essai en suivant les recommandations variétales du Livre Blanc de septembre 2019. Ces variétés ont été choisies en fonction du critère de résistance aux maladies suivies au cours de cette saison culturale. Ainsi, trois maladies principales sont étudiées : la septoriose, la rouille jaune et la rouille brune. Afin de posséder une diversité de résistances, cinq profils ont été créés en fonction des résistances spécifiques. Chaque profil contient deux variétés. Un choix a été fait entre chaque variété au sein des profils en fonction de leurs caractéristiques. Voici les différents profils retenus :

- Résistant aux trois maladies (Limabel)
- Sensible aux trois maladies (Bennington)
- Sensible à la septoriose (KWS Kerrin)
- Sensible à la rouille brune (KWS Salix)
- Sensible à la rouille jaune (Amboise)

Le tableau 10 reprend l'ensemble des variétés de l'essai ainsi que leur comportement face aux trois maladies foliaires. Les cotations ont permis de sélectionner nos cinq variétés observées lors de cette expérimentation. Ces cotations sont exprimées sur une échelle allant de 1 à 9, la valeur 1 étant la moins favorable. Les variétés sont considérées comme étant résistantes à la rouille brune ou la rouille jaune lorsque leur cotation dépasse le seuil de 7 et comme étant résistantes à la Septoriose pour une cotation supérieure à 6. Ces cotations proviennent du Livre Blanc de septembre 2019 (Meza et al., 2019) et sont le fruit d'observations pluriannuelles (moyennes sur six ans).

Tableau 10 : Sensibilités des variétés présentes dans l'essai (Meza et al., 2019)

Variété	Caractéristique	Sensibilité		
		rouille brune	septoriose	rouille jaune
Limabel	résistante	8.2	7.0	8.6
Imperator	résistante	8.8	6.5	9.0
Bennington	sensible	4.7	5.2	6.5
Ragnar	sensible	5.1	4.8	6.9
KWS Kerrin	sensible septoriose	6.7	5.1	7.7
RGT Reform	sensible septoriose	7.6	5.6	6.9
KWS Salix	sensible rouille brune	4.4	6.7	8.4
LG Initial	sensible rouille brune	4.3	6.2	8.9
Amboise	sensible rouille jaune	8.4	6.6	6.8
WPB Durand	sensible rouille jaune	7.0	6.9	6.7

3.4.4. Modalités de traitement fongicide

Le tableau 11 ci-dessous reprend le schéma type d'application du traitement fongicide. Il schématise également les principales périodes d'infection par les maladies. Dans l'essai, trois modalités de traitements fongicides ont été testées :

- Aucun traitement, déterminant la référence,
- Un unique traitement (F1) effectué au stade dernière feuille (39),
- Deux traitements : la première application au stade 2 nœuds (32) et la seconde au stade épiaison (55).

Les fongicides appliqués et les dates des traitements sont repris dans le tableau 11.

Tableau 11 : Traitements fongicides effectués sur l'expérimentation (Abréviations : DF=Dernière feuille, 2N= deux nœuds, Epi= Epiaison)

DATE DE SEMIS	TRAITEMENT	STADE	DATE	PRODUIT
FH20-05	1 traitement	DF	18 mai	Opus plus + pugil
	2 traitements	2N	23 mai	Adexar
		Epi	2 juin	Velogy era
FH20-06	1 traitement	DF	18 mai	Opus plus + pugil
	2 traitements	2N	26 mai	Adexar
		Epi	2 juin	Velogy era

3.5. Mesures sur terrain et observation des symptômes

3.5.1. Echantillonnage en champ

Chaque semaine, des prélèvements ont été effectués afin de suivre la dynamique de développement des maladies sur les plantes. Au niveau de chaque parcelle, ce sont cinq maitres brins qui ont été prélevés dans les zones de bordure afin d'être observés par la suite. Pour chaque modalité, vingt maitres brins sont prélevés étant donné qu'il y a quatre répétitions.

Les prélèvements auraient dû commencer lorsque les plantes avaient atteint le stade 31. Cependant, cette année, à cause de la période de confinement, les prélèvements n'ont pu débuter que lorsque l'accès au champ était autorisé par la faculté de Gembloux Agro-Bio Tech. Les premiers plants ne recevant pas de traitement fongicide (TO) ont donc été collectés le 11 mai 2020 au stade 37 pour le semis d'octobre et le

1^{er} juin 2020 au stade 59. Le début des collectes a été repoussé au-delà du stade 37 étant donné la faible pression des maladies présentes.

Pour les modalités avec un ou deux traitement(s) fongicide(s), les prélèvements ont débuté au minimum deux semaines après l'application de ceux-ci.

Les prélèvements se sont terminés lorsque la plupart des feuilles étaient mortes et que l'observation de symptômes devenait difficile sur les feuilles vieillissantes. La dernière collecte a donc eu lieu le 6 juillet 2020.

3.5.2. Détermination des stades

L'échelle de référence « BBCH » a été utilisée afin de déterminer les principaux stades de développement de la culture de froment. Cette échelle (annexe 8), inspirée de l'échelle de Zadoks et al. (1974), comprend 99 stades avec le stade 00 qui correspond au semis et le stade 99 au produit après récolte. Dans ce nombre à deux chiffres, le premier traduit le stade principal et le second correspond au stade secondaire (Lepage et Bourgeois, 2012). Les plantes ont été suivies du stade 37 au stade 85.

3.5.3. Cotation des maladies fongiques

Une fois le stade phénologique déterminé, les plantes sont décortiquées afin de séparer toutes les feuilles. Les feuilles de chaque plante sont numérotées à partir de 1 (dernière feuille lorsqu'elle est développée) jusqu'à 6 en partant de la feuille la plus récente à la plus ancienne. Cette technique permet de déterminer quelle feuille est atteinte même si la totalité des feuilles n'a pas encore émergé.

Durant le développement de la plante, la sévérité de l'attaque de chaque maladie a été mesurée sur chaque feuille. Cette sévérité, définie comme étant la proportion de la feuille touchée par la maladie (Savary et al., 2016), a été analysée sur chaque feuille séparément en repérant les différents symptômes. Une cotation leur a été attribuée sur base d'une échelle de cotation allant de 0 à 100. Deux types d'échelles sont représentées sur la figure 8 : l'échelle factuelle de pourcentages foliaires occupés par la rouille (figure 8A) et l'échelle de sévérité de la rouille selon Cobb (figure 8B). Pour les dégâts causés par les rouilles, la seconde échelle (échelle B) a été préférée à l'échelle A car elle est plus représentative des dégâts occasionnés. Pour la cotation de la septoriose, l'échelle présentée sur la figure 9 a été utilisée. Cette échelle prend en compte l'entière de la tache brunâtre dans la cotation, y compris la partie dépourvue de pycnides.

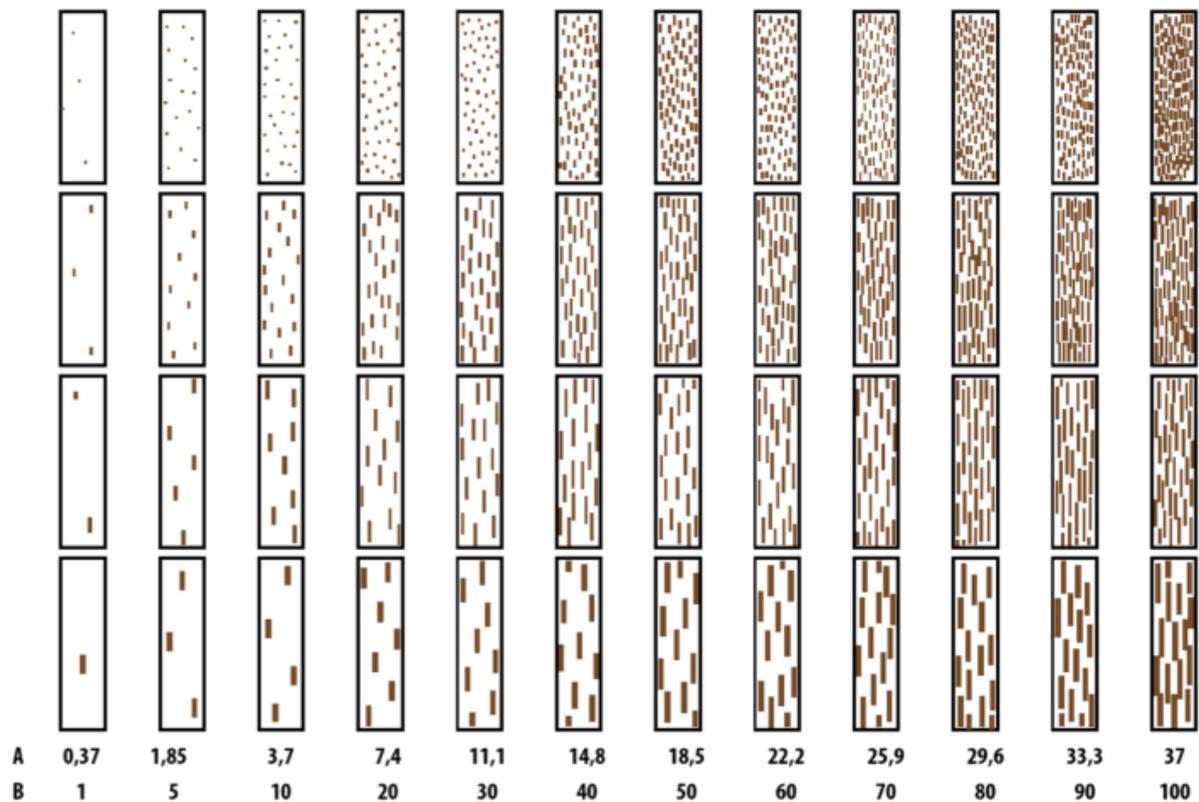


Figure 8 : Echelle de cotation des rouilles (Koyshibayev et Muminjanov, 2016.)

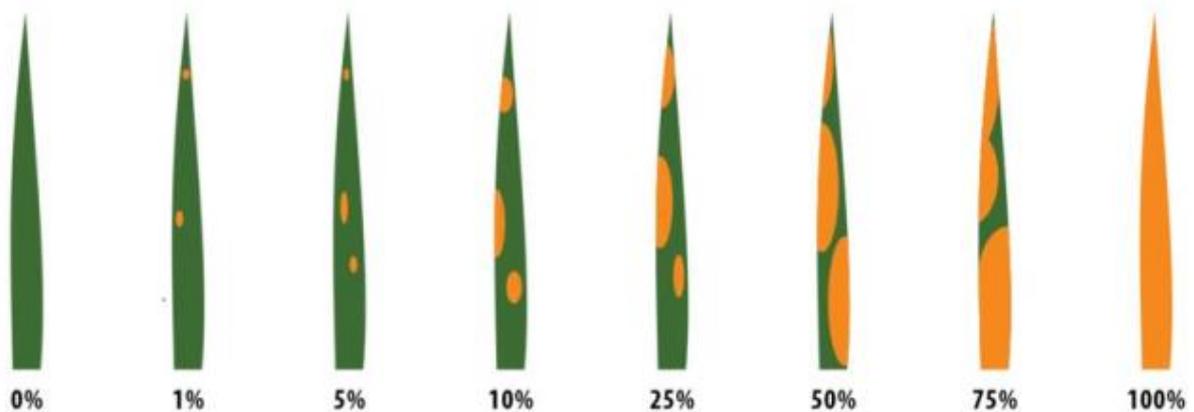


Figure 9 : Echelle de cotation de la septoriose (Koyshibayev et Muminjanov, 2016.)

3.6. Modélisation

Le logiciel de programmation R a été utilisé pour modéliser l'infection du froment par la rouille jaune et la rouille brune en Belgique. Il faut tout d'abord sélectionner une période pour laquelle des mesures sont nécessaires. Cette période peut s'étendre de la date du semis à la date de récolte. Cette période peut également être réduite uniquement à la période généralement plus propice aux infections par la rouille. Ensuite, les données météorologiques de cette période sont requises pour le modèle.

Le modèle choisi décrit plutôt une approche axée sur les conditions climatiques qui vont permettre l'infection d'une unique feuille. Les différentes étapes schématisant les opérations sont reprises sur la figure 10.

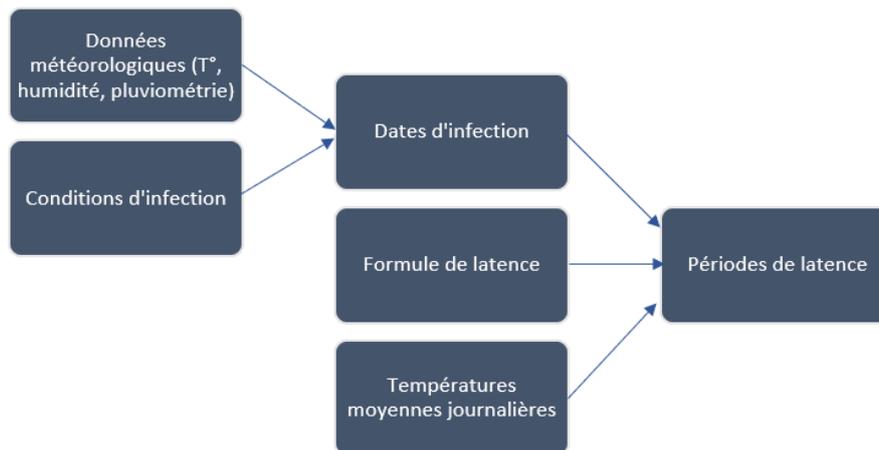


Figure 10 : Etapes-clés du modèle de prédiction des rouilles.

Tout d’abord, le cycle du champignon nécessite des conditions climatiques favorable pour se développer. Ces conditions sont la combinaison optimale de température, d’humidité et de précipitations qui vont permettre une potentielle infection des feuilles par les spores de rouille. Ces conditions sont requises également durant une durée minimum définie, sans quoi les spores ne disposeront pas assez de temps pour se développer.

Ensuite, si les conditions sont optimales, il faut déterminer une période de latence dès le début de l’infection potentielle. Cette période de latence dépend de la température et sa fin correspond à l’infection et l’augmentation de la surface foliaire infectée par la rouille.

3.6.1. Conditions d’infection

Les conditions d’infection, reprises dans le tableau 12, sont issues pour la rouille jaune de l’article d’El Jarroudi et al. (2014) et pour la rouille brune à partir d’un autre article d’El Jarroudi et al. (2017).

Tableau 12 : Paramètres utilisés dans le modèle de prédiction d’infection des rouilles

Paramètres	Rouille jaune	Rouille brune
Durée nuit	9h	9h
Durée infection	4h	12h
Température	$4^{\circ}\text{C} \leq \text{Température} \leq 16^{\circ}\text{C}$	$8^{\circ}\text{C} \leq \text{Température} \leq 20^{\circ}\text{C}$
Humidité relative minimale	92%	70%
Condition pluviométrique	Pluviométrie horaire durant la durée d’infection $\leq 0,1\text{mm}$	$0,1\text{mm} \leq \text{pluviométrie la 1}^{\text{ère}} \text{ heure de l’infection} < 1\text{mm}$
Seuil de lessivage	Pluviométrie $\geq 1\text{mm}$	Pluviométrie $\geq 1\text{mm}$

A partir de ces données, une boucle a été créée sur toutes les heures entre les deux dates choisies précédemment. L’infection est possible si la température est comprise entre les bornes de températures minimales et maximales, si l’humidité relative est supérieure au seuil, si la durée de la nuit est bien égale à 9heures et si la condition pluviométrique est remplie. La maladie est lessivée si la pluviométrie dépasse le seuil défini dans le tableau. Dans le langage R, une colonne supplémentaire a été créée pour chaque paramètre. Si chaque paramètre remplit les conditions citées précédemment, une valeur de 1 est indiquée dans le tableau et 0 si la condition n’est pas remplie. Cinq colonnes sont créées : une pour la nuit, une pour la température, une pour l’humidité relative, une pour la pluviométrie la première heure et une pour le seuil de lessivage. Pour vérifier si l’infection est possible, la somme de ces colonnes va être effectuée sur la durée de l’infection définie précédemment.

Pour la rouille brune, l’infection est possible si la somme de la pluviométrie la première heure, des humidités relatives pour 12 heures et de la température pendant 12 heures est égale à 25.

Pour la rouille jaune, l'infection est possible si la somme de la pluviométrie horaire, des humidités relatives pour 4 heures et de la température pendant 4 heures est égale à 12.

Pour les deux modèles, l'infection ne peut avoir lieu que si la durée de la nuit est de 9 heures. De plus, l'infection est annulée si une pluviométrie horaire est supérieure à 1mm durant la période d'infection. Si une infection est possible, la date de début d'infection potentielle peut être et sera utile pour savoir quand débute la phase de latence.

3.6.2. Période de latence.

La période de latence n'est dépendante que de la température moyenne et est inversement proportionnelle à celle-ci. Les formules pour le calcul de latence sont reprises dans le tableau suivant pour la rouille jaune et la rouille brune.

Tableau 13 : Formules de latence utilisées dans le modèle de prédiction d'infection par les rouilles (T_{moy} = température moyenne journalière) (El Jarroudi et al., 2014 ; El Jarroudi et al., 2017)

Maladie	Formule de latence
Rouille jaune	$L(j) = (1005 + 11,3 * T_{moy}) / (2,5 + 5,65 * T_{moy})$
Rouille brune	$L(j) = 1 / (0.00741 * T_{moy})$

Chaque jour, cette latence prend des valeurs différentes. La surface foliaire infectée commence à augmenter lorsque la somme de l'inverse de cette latence atteint la valeur de 1. L'inverse de la latence est donc obtenu avec la formule :

$$\text{inverse de la latence} = 1/L$$

où L = latence calculée précédemment

Chaque période de latence a ensuite été comptabilisée dans un tableau en fonction des dates d'observation. Ainsi, les symptômes observés pourront être comparés aux phases de latence obtenues par le modèle.

3.7. Traitement des données

Trois types d'analyses ont été effectuées à partir des observations et des données du modèle de prédiction :

- La propagation des maladies ainsi que les facteurs influençant ces maladies.
- L'influence des stades dans le développement des maladies
- L'effet des traitements avec une comparaison entre les différents traitements.
- La comparaison entre prédiction de l'infection et progression réelle observée des rouilles.

3.7.1. Comparaison des cinq variétés et dynamique de la maladie

Les cinq variétés ont été comparées sur base de la moyenne des sévérités pour chaque plante et ce pour chaque maladie. La normalité de la population a été testée avec un test de Shapiro ainsi que l'homogénéité des variances avec un test de Barlett. La population n'étant pas normale, une transformation a été effectuée. Comme la variable est exprimée en pourcents, la transformation choisie est la suivante :

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

Pour cette transformation, X doit être compris entre 0 et 1. C'est pourquoi, toutes les valeurs en pourcent ont été divisées par cent. Les deux tests ont été à nouveau réalisés et la population ainsi que les variances ont validé ces deux tests.

Afin d'étudier les différences entre les moyennes des populations, une ANOVA à un facteur fixe a été réalisée pour chaque date d'observation. Afin de déterminer des groupes de variétés qui ont réagi de la même manière à la maladie, un test SNK (test « post hoc » de « Student Newman et Keuls ») a été appliqué.

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

3.7.2. Influence génotypique

Pour l'influence génotypique, les sévérités observées pour chaque date de semis de chaque variété ont été comparées entre elles. Les deux modalités de date de semis ont été comparées étant donné qu'elles se situent à des stades différents mais bénéficient de conditions climatiques semblables. L'influence des stades dans l'expression des résistances permettrait donc d'expliquer une partie de leurs différences. Le point XX s'intéresse plus en détail à cette partie.

3.7.3. Efficacité des traitements fongicides

Pour étudier l'influence des traitements fongicides, chaque maladie à certaines dates a été analysée avec une ANOVA à un facteur fixe (les traitements fongicides). Avant ce test, une transformation identique à celle du point XX a été réalisée, avant d'effectuer également les tests de Shapiro et Barlett. Un test SNK a également été effectué pour déceler l'existence ou non de différences entre les parcelles traitées et non-traitées.

Un délai minimum de deux semaines étant nécessaire avant d'observer un réel effet des traitements fongicides, les dates reprises dans le tableau suivant (tableau 14) ont été analysées.

Tableau 14 : Dates retenues pour l'analyse des effets des traitements

Semis	DOY
Octobre	166 – 173 – 180 – 187
Novembre	166 – 173 – 180 – 187

3.7.4. Comparaison entre prédiction et apparition réelle des rouilles.

Les périodes de latence obtenues par le modèle ont été comparées aux observations de sévérité réalisées durant l'année 2020, mais également l'année 2018 en se basant sur les observations collectées par Rémy Meurs (2018) dans le cadre de son travail de fin d'étude. Les données du modèle et les observations ont donc été comparées afin d'évaluer si les prédictions obtenues semblent correspondre au développement réel de la maladie.

4. Résultats

4.1. Conditions météorologiques

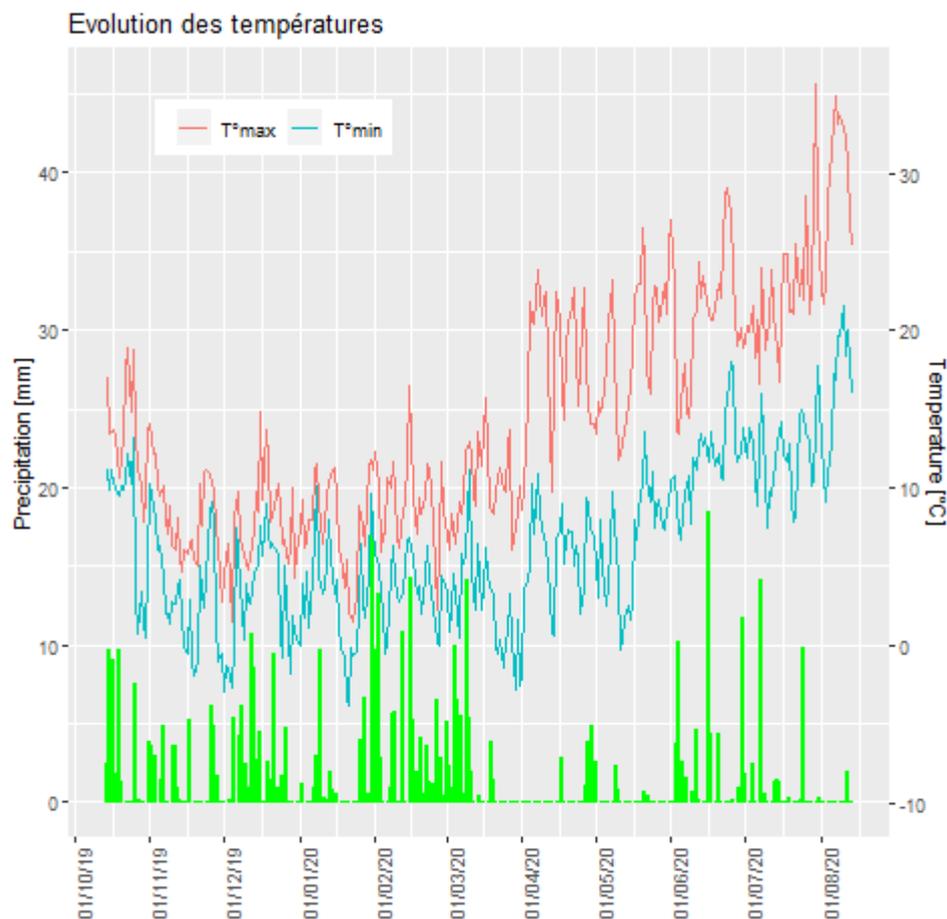


Figure 11 : Conditions climatiques 2019-2020

La figure 11 décrit les températures maximales et minimales et les précipitations durant la période culturelle 2019-2020 pour la station de Sombreffe.

En automne, les précipitations ont empêché d'effectuer les semis durant le mois d'octobre, retardant la modalité octobre à début novembre. Des périodes plus sèches en novembre ont permis aux semis de progresser. Des gelées se sont produites fin novembre-début décembre.

Durant l'hiver, des précipitations importantes ont eu lieu et des gelées sont apparues début janvier et fin mars.

Un période sans précipitation débute mi-mars et s'achève début juin. Cette période est interrompue partiellement par de faibles précipitations fin avril-début mai. Durant cette période, les températures ont été plus chaudes. Des périodes plus pluvieuses se sont produites durant le mois de juin.

4.2. Dynamique des maladies

Pour chaque maladie, une comparaison des cinq variétés ainsi que des étages foliaires de variétés types sont réalisés.

Pour la comparaison des cinq variétés, une figure représente l'évolution de la sévérité de la maladie étudiée en fonction des jours de l'année pour le semis d'octobre (A) et de novembre (B). Deux tableaux reprennent les résultats des tests SNK réalisés sur le semis d'octobre pour le premier et sur celui de novembre pour le deuxième. Les lettres présentes dans le tableau relatent les groupes formés par les variétés, chaque groupe correspondant à une sévérité différente. Dans notre cas, les groupes vont de la lettre A à la lettre D. Si différents groupes sont formés, le groupe A correspond au groupe avec la sévérité la plus importante et le dernier groupe à celui avec la sévérité la plus faible. La présence de deux lettres (« AB » par exemple) signifie que la variété ne peut se classer totalement dans l'un des groupes mentionnés.

4.2.1. Septoriose

4.2.1.1. Comparaison des cinq variétés

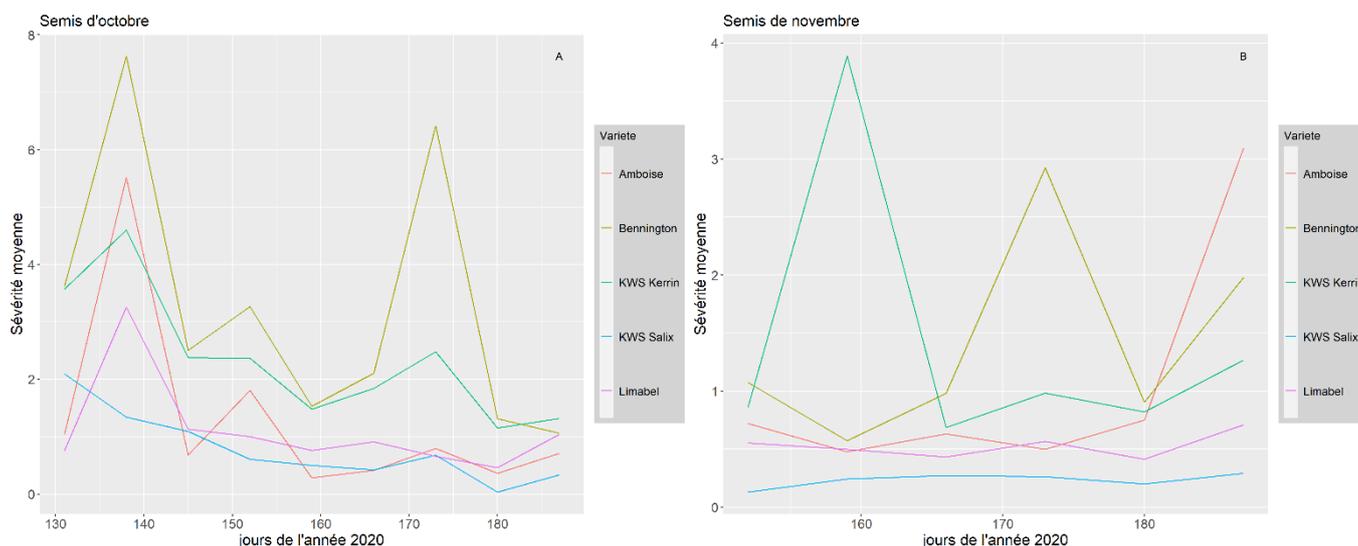


Figure 12 : Evolution de la sévérité moyenne de la septoriose sur cinq variétés au cours du suivi 2020, (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre.

Tableau 15: Résultats des tests SNK de comparaison de la sévérité de la septoriose sur les variétés pour le semis d'octobre en fonction des dates d'observations (DOY)

DATE	11/05	18/05	25/05	01/06	08/06	15/06	22/06	29/06	06/07
DOY	131	138	145	152	159	166	173	180	187
AMBOISE	bc	ab	b	bc	b	b	c	b	ab
BENNINGTON	a	a	a	a	a	a	a	a	a
KWS KERRIN	a	ab	a	ab	a	a	b	a	a
KWS SALIX	ab	c	b	c	b	b	c	b	b
LIMABEL	c	b	b	c	ab	ab	c	b	a

Pour les semis d'octobre, les observations ont débuté le 11 mai. La septoriose était déjà présente dans la parcelle et des groupes se sont formés. Les variétés Bennington et KWS Kerrin étaient les plus sévèrement touchées, suivies par la variété KWS Salix, puis par Amboise et enfin la variété Limabel.

Le 18 mai, une hausse significative a été observée pour la majorité des variétés, hormis pour la variété KWS Salix qui connaît une légère baisse. La variété Bennington a été la plus touchée et a atteint un pic à 7,5% de sévérité. Quatre groupes ont été créés, avec par ordre décroissant de sévérité : Bennington, Amboise et KWS Kerrin, Limabel et finalement KWS Salix.

De fin mai à mi-juin, (DOY 145 à DOY 166), la sévérité diminue pour l'ensemble des variétés. Des différences commencent à se marquer entre les variétés et sera confirmée plus tard. Les variétés les plus touchées étaient Bennington et KWS Kerrin.

Le 22 juin, la maladie s'est développée sur la variété Bennington. Cette variété devient la seule variété la plus touchée, suivie par la variété KWS Kerrin, et enfin les autres variétés.

Lors du dernier jour d'observations, la sévérité a diminué pour se situer entre 0 et 2%. Les variétés Bennington, KWS Kerrin et Limabel terminent dans le groupe le plus touché, suivis par la variété Amboise et finalement par KWS Salix.

Tableau 16: Résultats des tests SNK de comparaison de la sévérité de la septoriose sur les variétés semées en novembre en fonction des dates d'observations (DOY)

DATE	01/06	08/06	15/06	22/06	29/06	06/07
DOY	152	159	166	173	180	187
AMBOISE	ab	b	a	b	a	a
BENNINGTON	a	b	a	a	a	a
KWS KERRIN	a	a	a	ab	a	ab
KWS SALIX	b	b	a	b	a	c
LIMABEL	ab	b	a	b	a	bc

Pour les semis de novembre, les observations ont débuté le 1er juin. La septoriose était présente dans la parcelle et trois groupes se sont formés. La variété Bennington était la plus sévèrement touchée avec la variété KWS Kerrin, suivies par les variétés Limabel et Amboise et enfin la variété KWS Salix.

Le 8 juin, une importante hausse de la sévérité a été observée pour la variété KWS Kerrin qui a atteint un pic à 4%. Cette variété se classe ainsi seule dans le groupe le plus touché. Aux DOY 166 et 180, la maladie touchait toutes les variétés avec une sévérité comprise entre 0.2 et 1%, les classant dans un unique groupe.

Le 22 juin, la variété Bennington a subi une importante hausse de sévérité. Au niveau des groupes, la plupart des variétés appartiennent au groupe le moins touché b, sauf les variétés Bennington et KWS Kerrin, classées respectivement dans les groupes a et ab.

Début juillet, la sévérité a augmenté pour l'ensemble des variétés mais avec une intensité différente, ressentie dans la formation des groupes. En effet, les variétés Amboise et Bennington étaient les plus impactées, suivies par la variété KWS Kerrin, puis par la variété Limabel et enfin par la variété KWS Salix.

4.2.1.2. Description des variétés par étage foliaire

Une analyse de la moyenne de sévérité des étages foliaires a été réalisée et porte sur trois variétés avec des profils de résistances différents : Bennington, Limabel et KWS Kerrin.

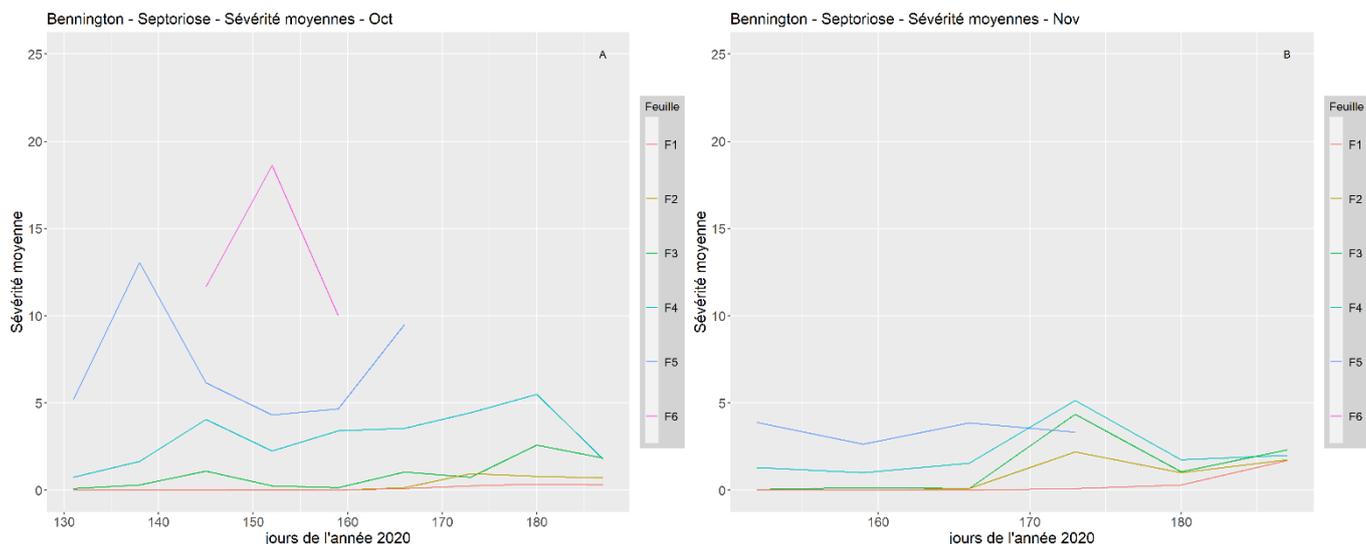


Figure 13 : Evolution de la sévérité moyenne de la septoriose par étage foliaire sur la variété sensible Bennington : (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre.

La figure 13 met en évidence le développement de la septoriose par étage foliaire sur la variété Bennington pour le semis d'octobre (A) et celui de novembre (B).

La septoriose était présente sur les plus anciennes feuilles dès le début des observations. La F6 n'était plus observable pour le semis de novembre et a disparu rapidement pour celui d'octobre. Ces figures indiquent que les feuilles plus anciennes sont plus infectées que celles qui les suivent. En effet, la sévérité sur F5 évolue en parallèle avec celle de la F4 en restant supérieur jusqu'à ce qu'elle disparaisse.

Pour la F6 du semis d'octobre et la F5 du semis de novembre, la sévérité a chuté avant la disparition de la feuille. La disparition des feuilles est survenue après l'augmentation de la sévérité de la septoriose.

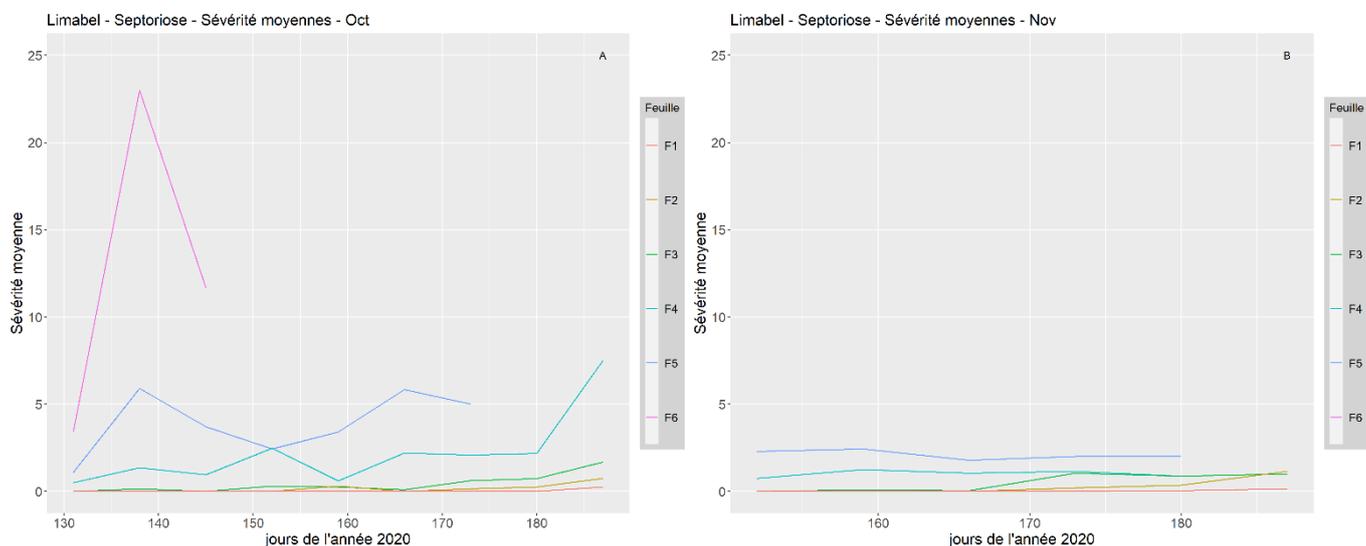


Figure 14 : Evolution de la sévérité moyenne de la septoriose par étage foliaire sur la variété résistante Limabel : (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre.

La figure 14 met en évidence le développement de la septoriose par étage foliaire sur la variété Limabel pour le semis d'octobre (A) et celui de novembre (B).

D'un point de vue général, la septoriose était plus présente sur le semis d'octobre que sur celui de novembre. La feuille F6 du semis d'octobre était particulièrement touchée.

Avant la disparition de la feuille, une chute de sévérité a été relevée pour les feuilles F6 et F5 du semis d'octobre.

Un gradient de gravité s'est établi entre les feuilles plus vieilles et plus récentes pour les deux dates de semis.

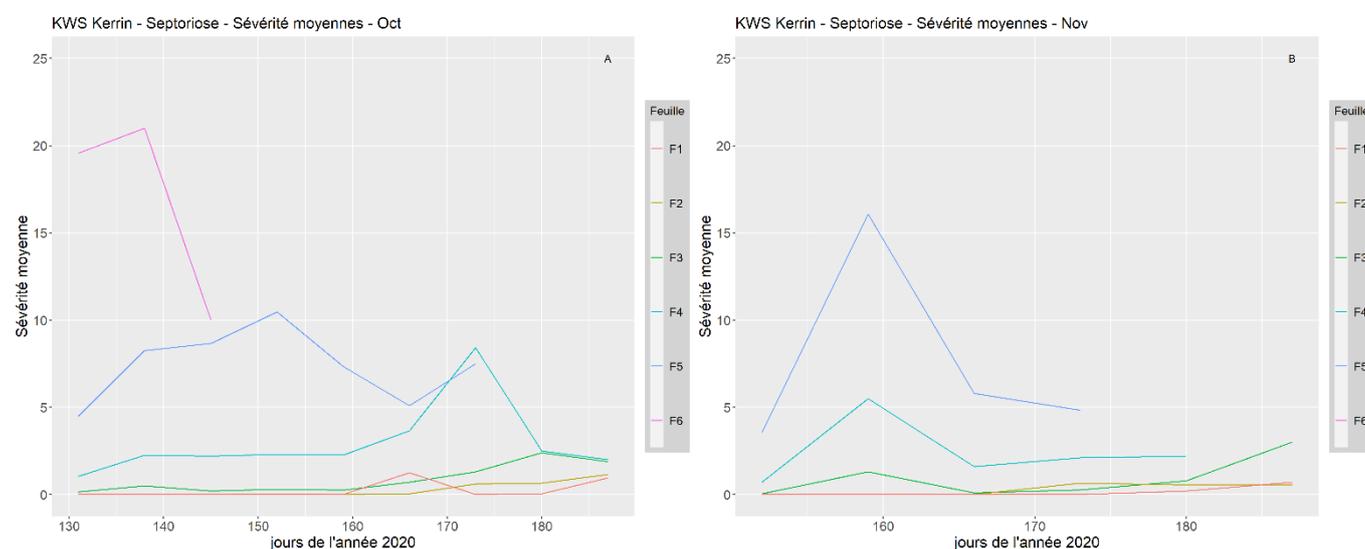


Figure 15 : Evolution de la sévérité moyenne de la septoriose par étage foliaire sur la variété sensible KWS Kerrin: (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre.

La figure 15 met en évidence le développement de la septoriose par étage foliaire sur la variété KWS Kerrin pour le semis d'octobre (A) et celui de novembre (B).

La septoriose était déjà bien présente pour le semis d'octobre alors qu'elle apparaît plus tardivement pour le semis de novembre. La sévérité était plus importante sur les plus anciennes feuilles F4, F5 et F6.

Une diminution de sévérité avant la disparition de la feuille est observée sur la feuille F6 du semis d'octobre et sur la feuille F5 de celui de novembre.

4.2.1.3. Interprétation des résultats.

La septoriose ne s'est pas développée beaucoup cette année. Cela est peut-être lié à des conditions climatiques défavorables pour le développement de son cycle.

Le semis d'octobre présente une sévérité moyenne plus importante que celui de novembre. Cette différence peut s'expliquer par le fait qu'un semis précoce peut subir des conditions météorologiques favorables en début de saison. Ces conditions optimales favorisent une infection précoce de la parcelle (Fones and Gurr, 2015).

Les feuilles plus anciennes sont les plus infectées car le champignon se développe d'abord sur les feuilles les plus vieilles pour remonter ensuite sur les feuilles plus récentes (Moreau and Maraite, 1999).

Les chutes de sévérité observées sur les maladies sont liées à la disparition des feuilles les plus anciennes qui étaient aussi les plus infectées. En effet, la chute de sévérité entre les jours 138 et 145 pour le semis d'octobre est en lien avec la disparition de la feuille F6 (annexe 9 figure 40). La même interprétation peut être faite pour la diminution entre les jours 173 et 180 suite à la disparition de la F5 (annexe 9 figure 41).

Plusieurs profils de résistance ont été analysés. En effet, la variété offrant une sensibilité aux trois maladies (Bennington) et la variété sensible uniquement à la septoriose (KWS Kerrin) ont été les variétés les plus touchées durant la période d'observation. Alors qu'elle a été atteinte par les deux autres maladies, la variété Bennington a été plus gravement atteinte par le champignon que la variété KWS Kerrin. L'hypothèse émise est la suivante : la sévérité de la maladie n'est pas impactée par la concurrence avec les rouilles. De plus, la septoriose, d'abord biotrophe en début de cycle, devient nécrotrophe en fin de cycle. Cela entraîne la destruction des tissus et donc empêche le développement des rouilles qui sont, elles, uniquement biotrophes.

Pour la variété résistante aux trois maladies (Limabel), la septoriose n'a globalement pas touché la variété.

Les deux autres variétés résistantes, Amboise et KWS Salix n'ont pas le même profil de résistance à la septoriose. La variété KWS Salix est la moins touchée durant toute la période d'observation. La variété Amboise semble craquer le dernier jour pour le semis de novembre. En effet, elle devient la variété la plus touchée. Cela peut s'expliquer par le fait que les deux dernières feuilles F1 et F2 sont particulièrement touchées (annexe 9 figure 41) début juillet.

4.2.2. Rouille jaune

4.2.2.1. Comparaison des cinq variétés

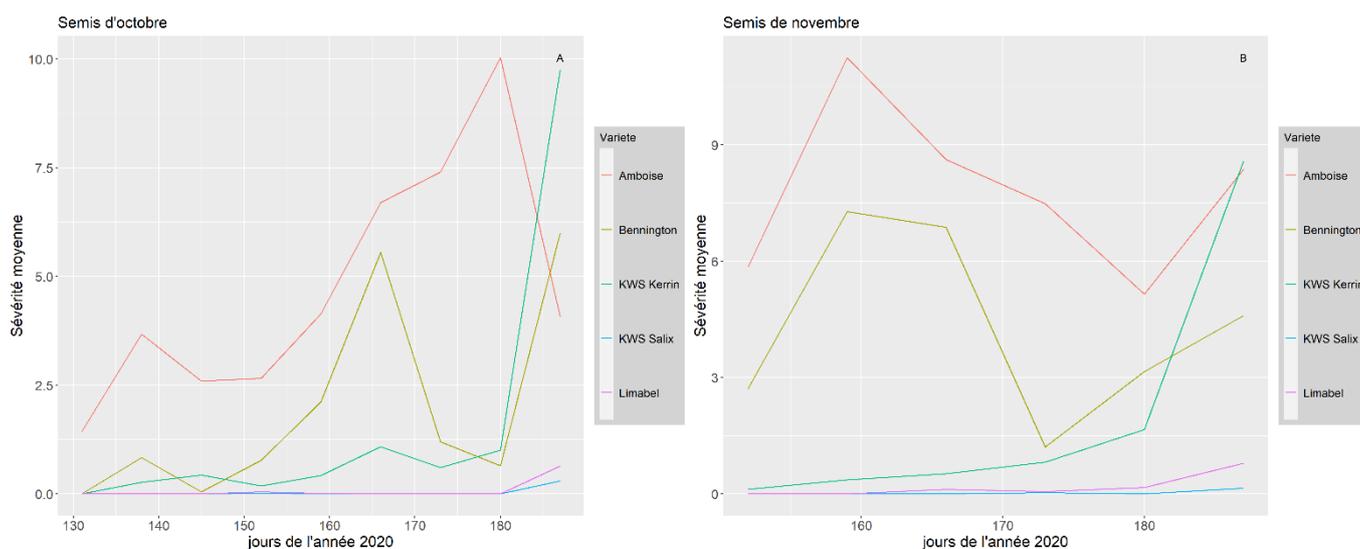


Figure 16 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille jaune sur cinq variétés au cours du suivi 2020, (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre.

Tableau 17 : Résultats des tests SNK de comparaison de la sévérité de la rouille jaune sur les variétés pour le semis d'octobre en fonction des dates d'observations (DOY)

DATE	11/05	18/05	25/05	01/06	08/06	15/06	22/06	29/06	06/07
DOY	131	138	145	152	159	166	173	180	187
AMBOISE	a	a	a	a	a	a	a	a	b
BENNINGTON	b	ab	b	b	b	a	b	b	ab
KWS KERRIN	b	ab	b	bc	c	b	bc	b	a
KWS SALIX	b	b	b	c	c	b	c	c	c
LIMABEL	b	b	b	c	c	b	c	c	c

Mi-mai, la rouille jaune était présente sur la variété Amboise, classant la variété seule dans le groupe A.

Entre le DOY 138 et 152, une progression considérable de la sévérité a été observée, pour la variété Amboise, une progression moins importante pour la variété Bennington et un statu quo pour les autres variétés.

Du 8 au 15 juin, la maladie a continué à se développer sur la variété Amboise et la variété Bennington. Cela se fait ressentir au niveau des groupes, avec Amboise dans le groupe le plus touché, rejoint mi-juin par Bennington d'abord présent dans un groupe intermédiaire et les autres variétés moins touchées se regroupent ensemble.

Jusqu' à fin juin, la rouille jaune a continué à infecter la variété Amboise qui connaît un pic de sévérité le 29 juin à 10%. Au niveau des groupes, Amboise est dans le groupe le plus touché, tandis que les variétés Bennington et KWS Kerrin, qui connaît une légère progression de la maladie, se trouvent dans le second groupe. Les variétés KWS Salix et Limabel, saines de symptômes, terminent dans un troisième groupe.

Début juillet, la sévérité a considérablement diminué pour la variété Amboise tandis qu'elle a augmentée pour les variétés KWS Kerrin et Bennington. Les variétés Limabel et KWS Salix connaissent leur première légère attaque de la rouille jaune, mais cela n'impacte pas leur groupe formé fin juin. Les variétés KWS Kerrin, Bennington et Amboise se classent respectivement dans les groupes a, ab et b.

Tableau 18 : Résultats des tests SNK de comparaison de la sévérité de la rouille jaune sur les variétés pour le semis de novembre en fonction des dates d'observations (DOY)

DATE	01/06	08/06	15/06	22/06	29/06	06/07
DOY	152	159	166	173	180	187
AMBOISE	a	a	a	a	a	a
BENNINGTON	b	b	a	b	b	b
KWS KERRIN	c	c	b	b	b	a
KWS SALIX	c	c	b	c	c	d
LIMABEL	c	c	b	c	c	c

Pour le semis de novembre, début juin, la variété Amboise était la plus atteinte par la rouille jaune, suivie par la variété Bennington et enfin les 3 autres variétés non touchées.

Mi-juin, la sévérité a continué à progresser pour la variété Amboise et a augmenté de manière importante pour la variété Bennington. Au niveau des groupes, ces deux variétés touchées se retrouvent dans le groupe a, alors que les autres sont dans le groupe suivant.

Fin juin, la sévérité a diminué pour la variété Amboise, oscillé pour la variété Bennington et augmenté légèrement pour la variété KWS Kerrin. Ces variations engendrent trois nouveaux groupes : la variété Amboise dans le groupe a, les variétés Bennington et KWS Kerrin dans le groupe b et finalement les variétés très peu atteintes par la maladie, KWS Salix et Limabel, dans le groupe c.

Début juillet, la sévérité est repartie à la hausse pour l'ensemble des variétés mais dans des proportions différentes. Cette augmentation se marque au niveau des groupes. La variété KWS Kerrin rejoint la variété Amboise dans le groupe le plus touché. Ensuite, les autres variétés, Bennington, Limabel et KWS Salix, se classent respectivement dans les groupes b, c et d.

4.2.2.2. Description des variétés par étage foliaire

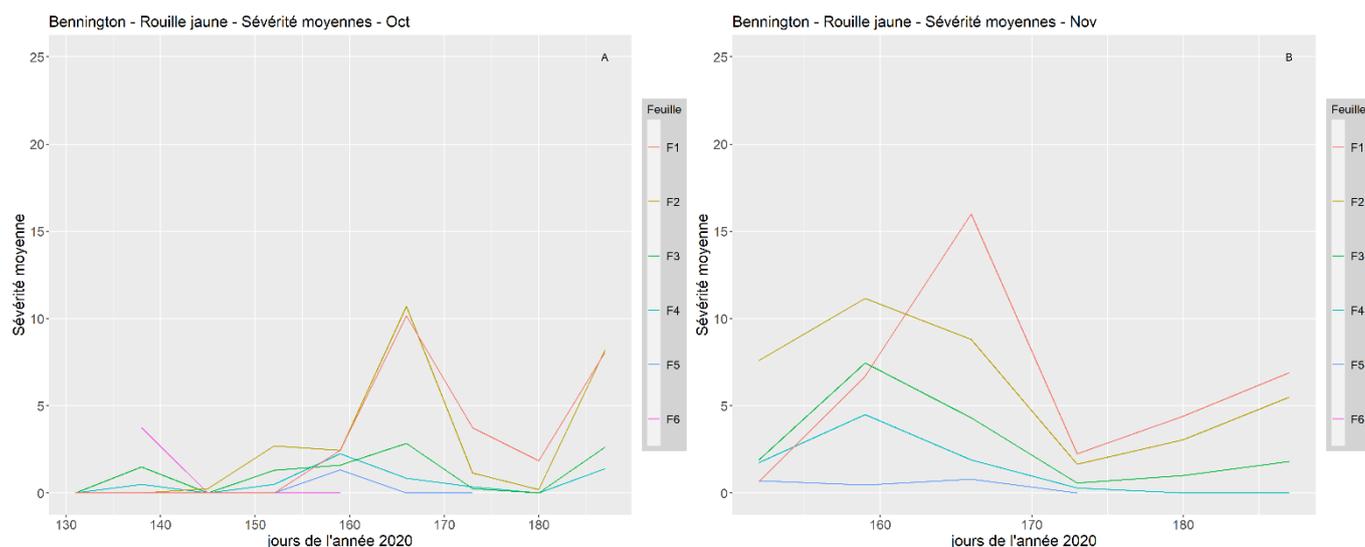


Figure 17 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille jaune par étage foliaire sur la variété sensible Bennington : (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre.

La figure 17 montre l'évolution de la sévérité moyenne de la rouille jaune par étage foliaire sur la variété Bennington pour le semis d'octobre (A) et celui de novembre (B).

Les feuilles les plus touchées par la rouille jaune étaient les deux dernières feuilles (F1 et F2). L'avant-dernière feuille (F2) a été très vite atteinte par la maladie. Le pathogène a évolué de façon similaire sur l'ensemble des feuilles, les pics de chaque feuille ayant lieu en même temps, sauf pour la F1 du semis de novembre. Les plus anciennes feuilles étaient moins touchées.

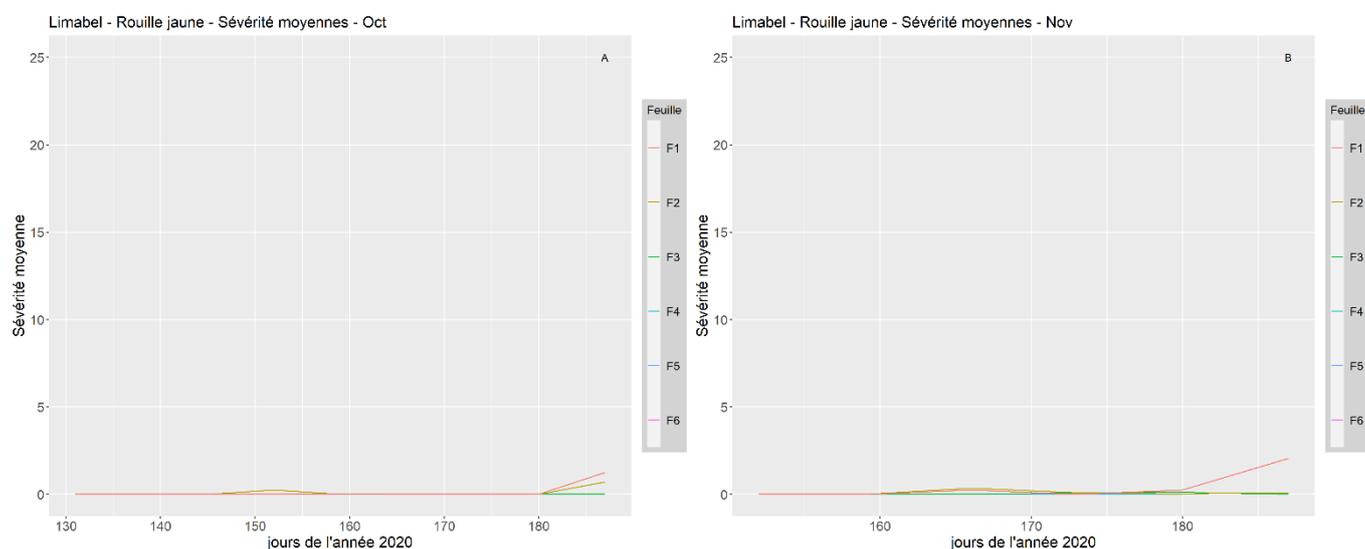


Figure 18 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille jaune par étage foliaire sur la variété résistante Limabel: (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre

La figure 18 montre l'évolution de la sévérité moyenne de la rouille jaune par étage foliaire sur la variété Limabel pour le semis d'octobre (A) et celui de novembre (B).

La rouille jaune était d'abord absente des observations. Elle est apparue légèrement au DOY 152 sur la feuille F2 du semis d'octobre mais a disparu par la suite. Pour le semis de novembre, l'apparition du champignon s'est faite au DOY 166 sur les feuilles F2 et F1.

Une hausse de la sévérité sur la dernière feuille (F1) a été observée à partir du DOY 187 pour le semis d'octobre et à partir du DOY 180 pour le semis de novembre.

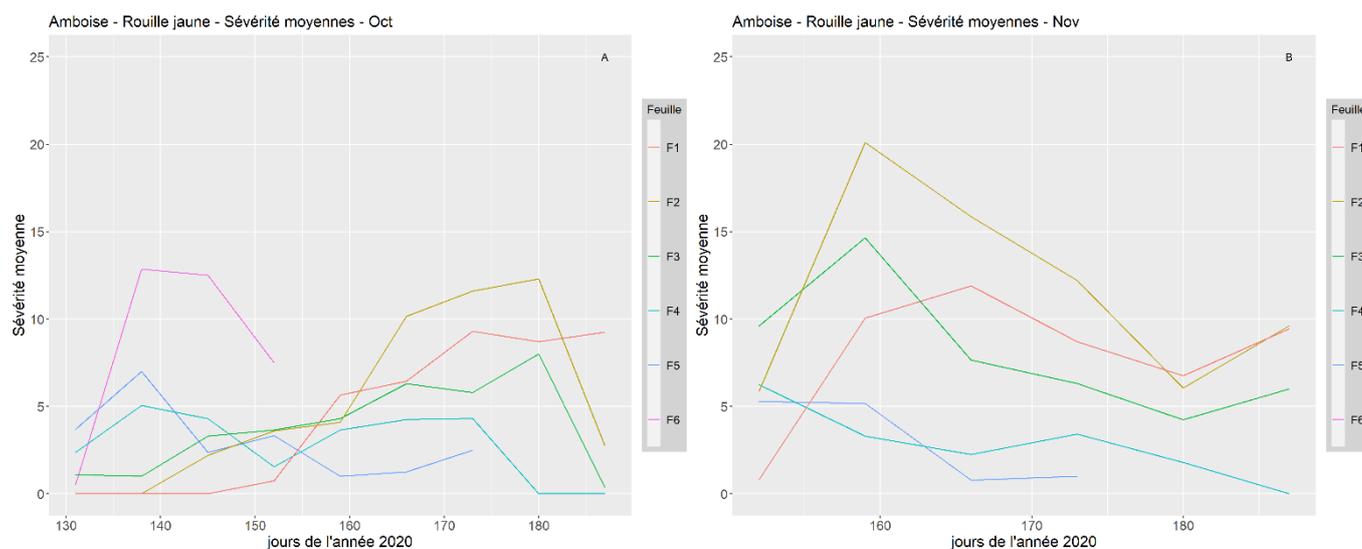


Figure 19 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille jaune par étage foliaire sur la variété sensible Amboise : (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre

La figure 19 montre l'évolution de la sévérité moyenne de la rouille jaune par étage foliaire sur la variété Amboise pour le semis d'octobre (A) et celui de novembre (B).

Au début des observations, la rouille jaune était présente pour les deux semis sur la majorité des feuilles, hormis sur la F1 et F2 du semis d'octobre ainsi que sur la F1 du semis de novembre. L'infection de la dernière feuille s'est produite au même moment pour les deux semis, aux alentours du DOY 159. La feuille la plus touchée F6 disparaît rapidement du semis d'octobre et est absente sur le semis de novembre.

Durant la période d'observations, les feuilles F1 et F2 vont continuer à être atteintes par le champignon et devenir les feuilles les plus touchées. Leur sévérité a continué à augmenter pour le semis d'octobre alors qu'elle va diminuer légèrement pour celui de novembre. La dernière feuille (F1) devient la feuille la plus touchée pour le semis d'octobre et finit avec la même sévérité que la F2 pour le semis de novembre.

4.2.2.3. Interprétation des résultats

La rouille jaune ne s'est pas développée fortement cette année. Ce faible développement peut s'expliquer par des conditions météorologiques défavorable durant l'hiver et le début du printemps. Malgré un début d'hiver doux, des gelées ont fait leur apparition mi-janvier et également plus tardivement fin mars. Or, selon Gladders (2007), le gel freine le développement de la maladie. De plus, un temps frais et humide favorise le développement de la rouille jaune au printemps (Livre Blanc Céréales, 2017). Cependant, à partir de la mi-avril, une période sèche et chaude a nui à la propagation du champignon.

La rouille jaune apparaît plus précocement sur les semis de novembre que sur ceux d'octobre. La maladie touche également directement toutes les feuilles contrairement à la septoriose qui progresse par étage foliaire. En effet, la figure 42 (annexe 9) montre que la rouille apparaît sur plusieurs feuilles de la variété Bennington en même temps au DOY 166 alors qu'elle était quasiment absente la semaine précédente.

La variété sensible Amboise a été la variété la plus touchée durant toute la période d'observations. L'autre variété sensible, Bennington, n'a pas été épargnée non plus par la maladie mais a subi une sévérité moins importante.

Parmi les variétés dites résistantes, elles n'ont pas réagi de la même façon aux apparitions de rouille jaune. En effet, les variétés KWS Salix et Limabel ont relativement bien résisté, en ne développant que de légers symptômes en fin de saison. Pour la variété KWS Kerrin, de légers symptômes sont apparus en même temps que pour les variétés sensibles mais ne se sont pas développés davantage.

4.2.3. Rouille brune

4.2.3.1. Comparaison des cinq variétés

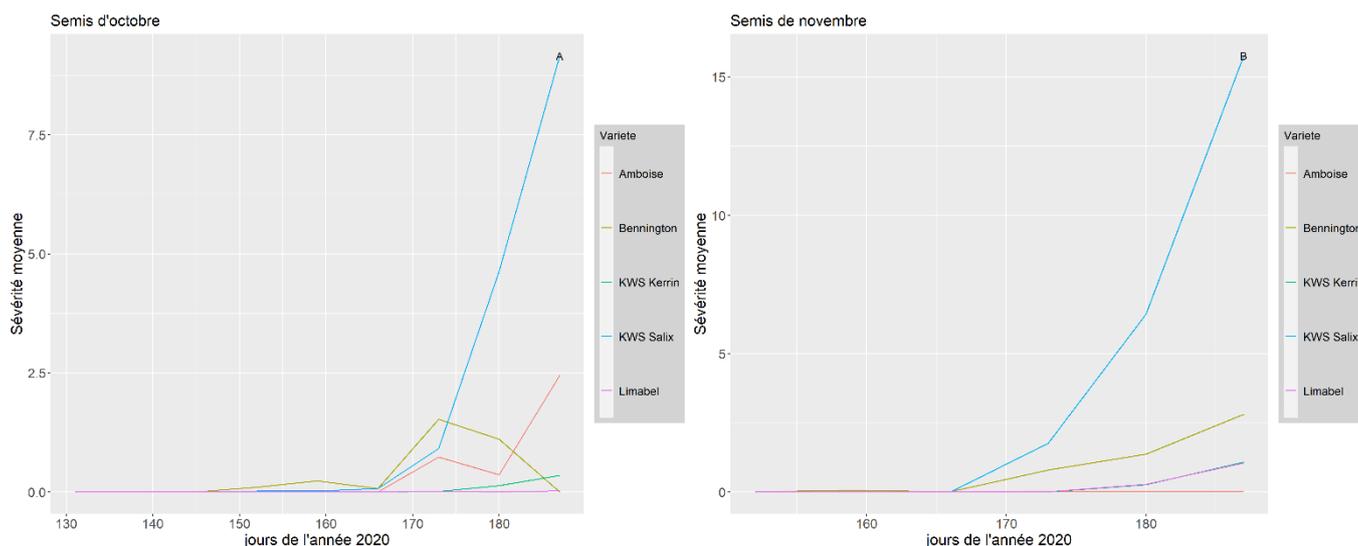


Figure 20 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille brune sur 5 variétés au cours du suivi 2020, (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre.

Tableau 19 : Résultats des tests SNK de comparaison de la sévérité de la rouille brune sur les variétés pour le semis d'octobre en fonction des dates d'observations (DOY)

DATE	11/05	18/05	25/05	01/06	08/06	15/06	22/06	29/06	06/07
DOY	131	138	145	152	159	166	173	180	187
AMBOISE	NULL	NULL	NULL	b	b	a	b	c	b
BENNINGTON	NULL	NULL	NULL	a	a	a	a	b	c
KWS KERRIN	NULL	NULL	NULL	b	b	a	c	c	c
KWS SALIX	NULL	NULL	NULL	b	b	a	b	a	a
LIMABEL	NULL	NULL	NULL	b	b	a	c	c	c

La rouille brune était absente des observations jusqu'au 1^{er} juin (DOY 152). Elle apparaît d'abord légèrement sur la variété Bennington le 1^{er} et 8 juin (DOY 152 et 159). La variété Bennington se classe donc dans le groupe le plus touché a et toutes les autres variétés dans le groupe b.

Le 15 juin (DOY166), aucune différence entre les variétés n'a été observée.

Le 22 juin (DOY 173), la rouille est apparue sur trois variétés, qui se démarquent au niveau des groupes : la variété Bennington est présente dans le groupe a, suivie par les variétés KWS Salix et Amboise dans un groupe moins touché et finalement les variétés KWS Kerrin et Limabel dans un groupe ne présentant pas de symptôme.

Fin juin et début juillet, la sévérité a grimpé en flèche pour la variété KWS Salix, diminué pour la variété Bennington et augmenté le dernier jour pour la variété Amboise. Au niveau des groupes, la variété KWS

Salix se classe dans le groupe le plus touché, suivie par la variété Amboise et finalement les trois autres variétés.

Tableau 20 : Résultats des tests SNK de comparaison de la sévérité de la rouille brune sur les variétés pour le semis de novembre en fonction des dates d'observations (DOY)

DATE	01/06	08/06	15/06	22/06	29/06	06/07
DOY	152	159	166	173	180	187
AMBOISE	a	b	a	c	c	c
BENNINGTON	a	a	a	b	b	b
KWS KERRIN	a	b	a	c	c	b
KWS SALIX	a	b	a	a	a	a
LIMABEL	a	b	a	c	c	c

Pour les semis de novembre, la rouille brune était absente des observations le 1^{er} juin (DOY 152). Le 8 juin, une légère apparition de rouille brune est observée sur la variété Bennington, qui se classe seule dans le groupe a.

Le 15 juin, la situation redevient identique à celle du 1^{er} juin avec l'absence de symptômes. Fin juin, la sévérité a augmenté pour les variétés KWS Salix et Bennington avec une intensité différente. En effet, la variété KWS Salix fait partie du groupe a étant donné qu'elle est plus atteinte, suivie par la variété Bennington dans le groupe b moins touché et enfin les trois autres variétés dans le groupe c, vierge de tout symptôme.

Le 6 juillet, la sévérité a continué à grimper pour la variété KWS Salix. Elle a également augmenté sur les variétés Bennington et KWS Kerrin. Au niveau des groupes, la variété KWS Salix compose le groupe le plus touché, les variétés Bennington et KWS Kerrin forment le groupe moins touché et enfin les variétés Amboise et Limabel se retrouvent dans le dernier groupe, sans symptômes.

4.2.3.2. Description des variétés par étage foliaire

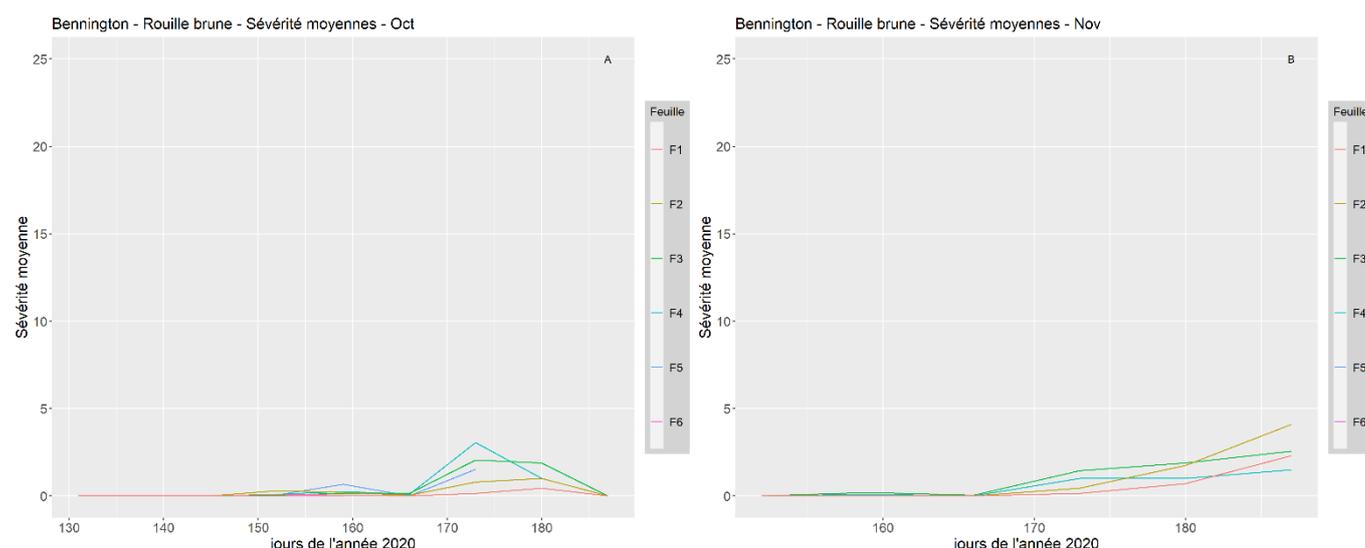


Figure 21 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille brune par étage foliaire sur la variété sensible Bennington : (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre

La figure 21 montre l'évolution de la sévérité moyenne de la rouille brune par étage foliaire sur la variété Bennington pour le semis d'octobre (A) et celui de novembre (B).

La rouille brune est apparue d'abord sur la F2 pour le semis d'octobre et ensuite sur les autres feuilles. Le 22 juin, la hausse de sévérité s'est principalement réalisée sur les feuilles F3, F4 et F5 et dans une moindre mesure sur les deux dernières feuilles F2 et F1.

Entre le 29 juin et le 6 juillet des tendances différentes sont observées pour les deux modalités de date de semis. Pour le semis plus hâtif, la sévérité a augmenté d'abord légèrement sur F2 et F1 avant de disparaître pour toutes les feuilles début juillet. Pour le semis plus tardif, la hausse la plus importante est observable sur la feuille F2 qui dépasse la feuille F3, suivie par la F1 qui progresse nettement et enfin la F4 est la moins touchée.

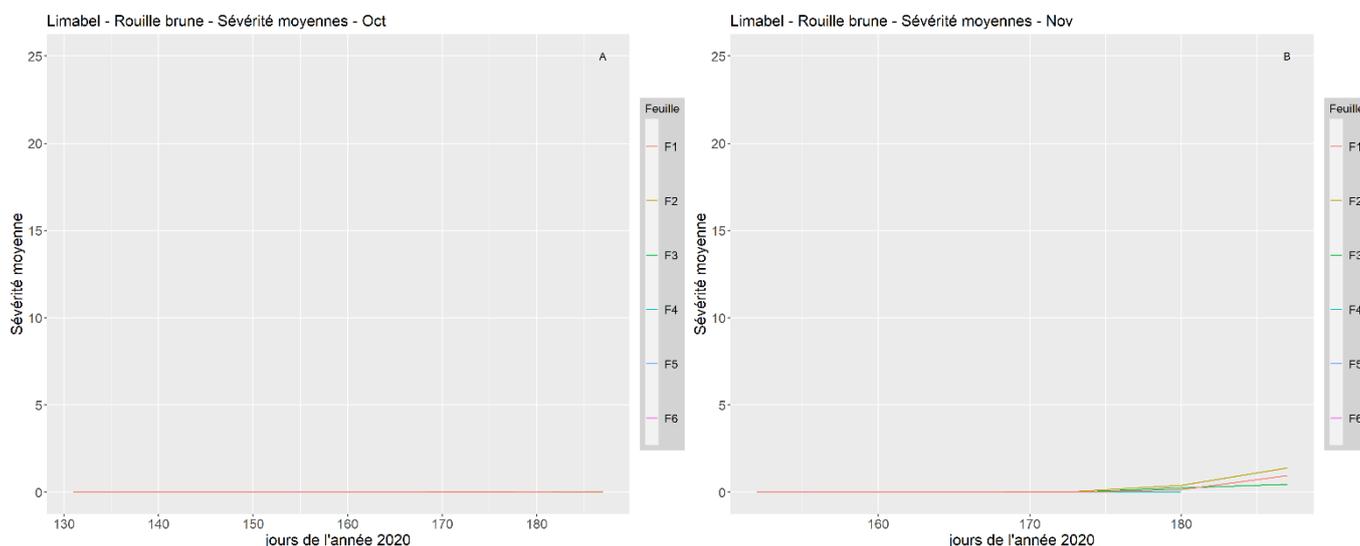


Figure 22 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille brune par étage foliaire sur la variété résistante Limabel: (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre

La figure 22 montre l'évolution de la sévérité moyenne de la rouille brune par étage foliaire sur la variété Limabel pour le semis d'octobre (A) et celui de novembre (B).

La variété Limabel n'étant touchée que les derniers jours d'observations pour le semis de novembre, aucune différence n'est discernable avant le 29 juin. À partir de cette date, les feuilles F2, F1 et F3 connaissent une hausse de sévérité et sont dans l'ordre les plus touchées.

Pour le semis d'octobre, aucun symptôme n'a été observé.

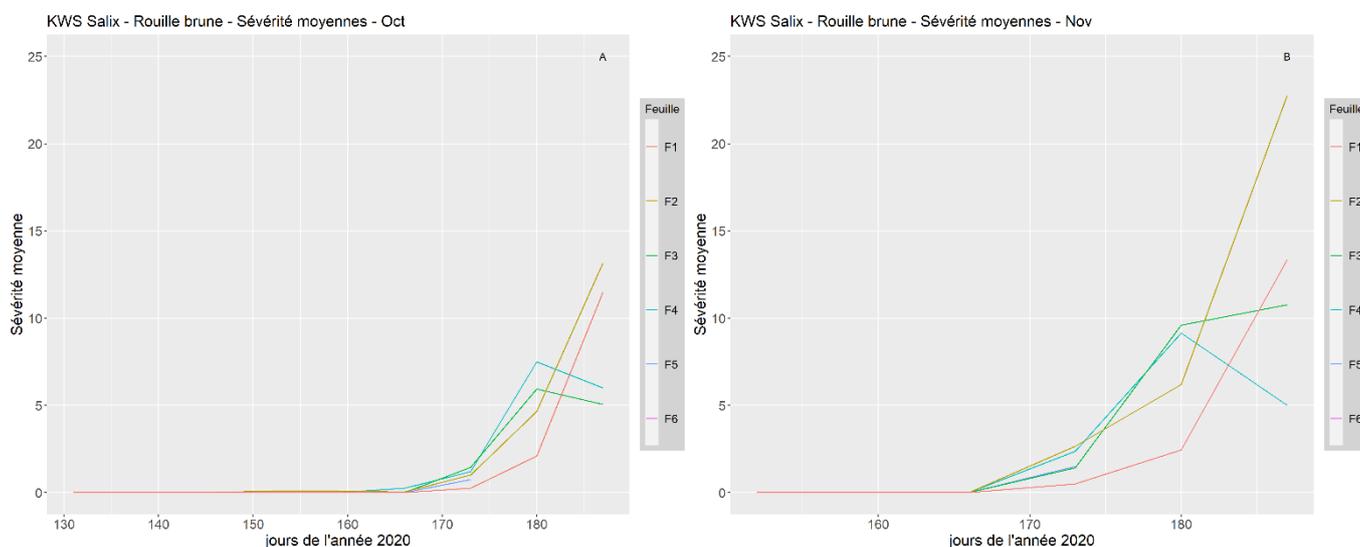


Figure 23 : Evolution de la sévérité moyenne de la rouille brune par étage foliaire sur la variété sensible KWS Salix: (A) semis d'octobre, (B) semis de novembre

La figure 23 montre l'évolution de la sévérité moyenne de la rouille brune par étage foliaire sur la variété KWS Salix pour le semis d'octobre (A) et celui de novembre (B).

Pour les deux modalités de date de semis, entre le 22 et 29 juin, les feuilles F3 et F4 ont connu une première hausse de sévérité, suivie par les feuilles F2 et F1. Ensuite, le 6 juillet, la sévérité des feuilles F3 et F4 a diminué légèrement tandis que la sévérité a augmenté drastiquement pour les feuilles F2 et F1 qui deviennent les feuilles les plus touchées.

4.2.3.3. Interprétation des résultats

La rouille brune ne s'est pas beaucoup développée cette année, comme en atteste les figures XX et XX de l'annexe X. Une des hypothèses émises est l'absence de précipitation durant une bonne partie du mois de mai. En effet, selon Kolmer (1996), la spore de la rouille brune a besoin de pluie pour germer. Et selon Azzimonti (2013), le champignon requiert des périodes de rosée assez longues pour permettre la germination des spores. La période sèche durant le mois de mai aurait donc retardé la germination des spores et donc leur propagation.

Cependant, à partir du mois de juin, le retour des précipitations ainsi que des températures comprises entre 15°C et 20°C correspondent aux conditions optimales pour le développement de la maladie (Kolmer, 1996). Une augmentation de la sévérité peut d'ailleurs être remarquée à partir du jour 173 sur la figure 20, ce qui atteste des conditions favorables rencontrées auparavant.

L'apparition simultanée de symptômes sur plusieurs feuilles, comme en témoigne la figure 23, est différente de l'apparition feuille par feuille de la septoriose. La propagation de la rouille brune, contrairement à celle de la septoriose, est due à l'effet du vent qui dépose les spores de rouille sur toutes les feuilles lorsque les conditions sont rencontrées pour la sporulation. Une fois sur ces feuilles, le champignon prend 8 à 15 jours en conditions favorables pour développer des symptômes (Azzimonti, 2013). Or, déjà 15 jours avant le jour 173, toutes les feuilles de la plante étaient déjà présentes, donc pouvaient déjà accueillir des spores. De plus, l'explosivité et la propagation rapide de la rouille peut s'expliquer par cette constatation. En effet, si plusieurs feuilles sont touchées en même temps, la sévérité peut augmenter plus rapidement.

La variété sensible KWS Salix a été la variété la plus sévèrement touchée durant la période d'observations. A l'opposé, les variétés résistantes Limabel et KWS Kerrin ont été les plus résistantes. La variété sensible Bennington a été la seconde variété la plus atteinte durant une bonne partie des observations. La variété Amboise, touchée dans une moindre mesure, a finalement craqué en fin de saison pour le semis d'octobre. Une hypothèse qui pourrait expliquer cette différence est la compétition entre la rouille jaune et la rouille brune. En effet, la variété Amboise, sensible à la rouille jaune, a développé plus de symptômes de rouille jaune pour le semis de novembre. Cette rouille jaune aurait empêché le développement de la rouille brune.

4.3. Influence du génotype

4.3.1. Septoriose

4.3.1.1. Description des résultats

Tableau 21 : Comparaison de la sévérité de la septoriose en fonction des stades de développement

Date		11-05	18-05	25-05	01-06	08-06	15-06	22-06	29-06	06-07	
DOY		131	138	145	152	159	166	173	180	187	
Amboise	Oct	Stade	37	41	54	65	71	75	77	85	85
		Sévérité	1.4	6.9	1.7	3.5	0.4	0.5	1	0.5	0.6
	Nov	Stade				59	65	69	75	79	83
		Sévérité				0.7	0.6	0.9	0.5	0.5	1.8
Bennington	Oct	Stade	37	39	51	61	69	73	75	83	85
		Sévérité	3.7	8.8	3.8	4.2	3	2.9	7.3	2.3	1.2
	Nov	Stade				57	65	69	75	79	83
		Sévérité				1.3	0.8	1.1	3	1	1.9
KWS Kerrin	Oct	Stade	37	39	49	59	69	73	77	83	85
		Sévérité	4.2	5.3	3.5	2.6	2.0	2.2	3.6	1.4	1.5
	Nov	Stade				57	65	69	75	79	83
		Sévérité				0.9	4.6	1.5	1.6	0.9	1.4
KWS Salix	Oct	Stade	37	43	51	65	69	75	79	85	85
		Sévérité	2.2	1.8	1.5	1.2	0.9	0.5	0.9	0	0.3
	Nov	Stade				59	65	71	75	79	83
		Sévérité				0.2	0.3	0.4	0.5	0.3	0.2
Limabel	Oct	Stade	37	45	54	65	71	75	77	83	85
		Sévérité	0.8	5.1	2.7	1	0.9	1.6	1.6	0.8	2.5
	Nov	Stade				59	65	69	75	79	83
		Sévérité				0.8	0.6	0.9	0.8	0.8	0.1

Le tableau 21 présente les sévérités moyennes de la septoriose en fonction des stades de développement du froment pour chaque date de semis et variété.

En règle générale, la pression observée a été faible cette année, ce qui explique les très faibles sévérités observées pour certaines variétés. La septoriose a touché toutes les variétés et toutes les modalités de date de semis. Les semis d'octobre ont été plus touchés que les semis de novembre.

Les sévérités les plus importantes ont été relevées le 18 mai sur la variété Bennington semée en octobre. Cette variété est la plus atteinte par le champignon, suivie par la variété Amboise plus touchée au début des observations et la variété KWS Kerrin. La variété Salix a présenté des symptômes en début de saison qui ont diminué par la suite, tout comme la variété Limabel.

4.3.1.2. Interprétation des résultats

L'expression de certains gènes de résistance peut se produire dès le stade plantule ou plus tard durant le stade adulte. Cette différence temporelle a été décrite par Dreisigacker et al. (2015) mais il est difficile d'attribuer les différences observées à cette théorie. En effet, la septoriose est déjà présente au début des observations et des différences entre les variétés résistantes et non-résistantes apparaissent.

Cette différence entre modalités de date de semis n'est pas liée à l'expression de résistance à des stades différents mais à la pression plus hâtive que subissent les semis d'octobre. En effet, les semis d'octobre connaissent une période de libération d'ascospores plus intense que ceux de novembre (Ben Romdhane, 2003). Ces semis d'octobre peuvent également connaître des conditions climatiques plus propices au développement du champignon (Fones and Gurr, 2015).

Suite à un suivi des symptômes qui intervient après l'apparition de la maladie, une comparaison entre les réactions des variétés à l'infection n'est pas réalisable. Il est donc impossible de tirer des conclusions sur l'influence de l'expression génotypique.

4.3.2. Rouille jaune

4.3.2.1. Description des résultats

Tableau 22 : Comparaison de la sévérité de la rouille jaune en fonction des stades de développement

	Date		11-05	18-05	25-05	01-06	08-06	15-06	22-06	29-06	06-07
	DOY		131	138	145	152	159	166	173	180	187
Amboise	Oct	Stade	37	41	54	65	71	75	77	85	85
		Sévérité	1,3	4,3	4,1	3,4	3,7	5,7	6,7	7,3	3,1
	Nov	Stade				59	65	69	75	79	83
		Sévérité				5,6	10,7	7,7	6,3	4,7	6,3
Bennington	Oct	Stade	37	39	51	61	69	73	75	83	85
		Sévérité	0	1	0	0,8	1,7	4,9	1,1	0,5	5,1
	Nov	Stade				57	65	69	75	79	83
		Sévérité				2,1	6,1	6,4	1	2,1	3,6
KWS Kerrin	Oct	Stade	37	39	49	59	69	73	77	83	85
		Sévérité	0	0,3	0,4	0,2	0,4	0,9	0,5	0,9	7,5
	Nov	Stade				57	65	69	75	79	83
		Sévérité				0,1	0,4	0,4	0,7	1,3	8,4
KWS Salix	Oct	Stade	37	43	51	65	69	75	79	85	85
		Sévérité	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2
	Nov	Stade				59	65	71	75	79	83
		Sévérité				0	0	0	0,3	0	0,1
Limabel	Oct	Stade	37	45	54	65	71	75	77	83	85
		Sévérité	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0,5
	Nov	Stade				59	65	69	75	79	83
		Sévérité				0	0	0,1	0,1	0,1	0,7

Le tableau 22 présente les sévérités moyennes de la rouille jaune en fonction des stades de développement du froment pour chaque date de semis et variété.

De manière générale, pour les variétés sensibles Amboise et Bennington, les symptômes sont déjà présents depuis une semaine sur le semis d'octobre quand les prélèvements ont débuté sur celui de novembre.

Les premiers symptômes de rouille jaune sont observés le 11 mai sur la variété Amboise pour le semis d'Octobre. Pour le semis de novembre, un pic de sévérité est observé sur cette variété le 8 juin. La même observation peut être faite pour la variété Bennington qui subit également une hausse de sévérité, mais moins importante. Pour ces deux variétés, le champignon s'est plus développé sur le semis plus tardif.

En comparaison à la variété Amboise, les symptômes sur la variété Bennington apparaissent une semaine plus tard pour le semis d'octobre et en même temps pour le semis de novembre.

La variété KWS Kerrin est la troisième variété à être touchée par la rouille jaune mais de manière moins importante, sauf le 6 juillet où le semis d'octobre connaît une hausse importante de la sévérité.

Les deux variétés KWS Salix et Limabel montrent une sensibilité très légère à la rouille jaune pour le semis de novembre essentiellement.

4.3.2.2. Interprétation des résultats

L'infection du champ a probablement lieu avant le début des observations étant donné que les premiers symptômes sont déjà visibles le 11 mai.

La différence observée entre les deux modalités de date de semis peut s'expliquer par des stades de développement différents. En effet, selon Cheyron, des résistances peuvent se mettre en place au stade adulte, durant la montaison (stade 30) ou plus tard (Cheyron,2016). Selon cette hypothèse, la différence entre les stades des deux semis pourrait s'expliquer par l'apparition de résistance partielle dans des stades plus développés de la plante. La maladie aurait alors subi un frein à son développement suite à la résistance partielle initiée dans les semis d'octobre.

L'apparition des symptômes sur les variétés résistantes s'effectue plus tardivement mais ne se réalise pas au même moment pour les trois variétés, traduisant sans doute des gènes de résistance différents.

4.3.3. Rouille brune

4.3.3.1. Description des résultats

Tableau 23 : Comparaison de la sévérité de la rouille brune en fonction des stades de développement

	Date	DOY	11-05	18-05	25-05	01-06	08-06	15-06	22-06	29-06	06-07
			131	138	145	152	159	166	173	180	187
Amboise	Oct	Stade	37	41	54	65	71	75	77	85	85
		Sévérité	0	0	0	0	0	0	1	1	3.4
	Nov	Stade				59	65	69	75	79	83
		Sévérité				0	0	0	0	0	0.3
Bennington	Oct	Stade	37	39	51	61	69	73	75	83	85
		Sévérité	0	0	0	0.1	0.2	0.1	1.5	1.1	0
	Nov	Stade				57	65	69	75	79	83
		Sévérité				0	0.1	0	0.5	1.3	2.6
KWS Kerrin	Oct	Stade	37	39	49	59	69	73	77	83	85
		Sévérité	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.3
	Nov	Stade				57	65	69	75	79	83
		Sévérité				0	0	0	0	0.2	1
KWS Salix	Oct	Stade	37	43	51	65	69	75	79	85	85
		Sévérité	0	0	0	0	0	0.1	0.9	5	8.9
	Nov	Stade				59	65	71	75	79	83
		Sévérité				0	0	0	1.7	6.8	13
Limabel	Oct	Stade	37	45	54	65	71	75	77	83	85
		Sévérité	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Nov	Stade				59	65	69	75	79	83
		Sévérité				0	0	0	0	0.2	0.9

Le tableau 23 présente les sévérités moyennes de la rouille brune en fonction des stades de développement du froment pour chaque date de semis et variété.

Les premiers symptômes de rouille brune sont observés sur la variété Bennington le 1^{er} juin pour le semis d'octobre et le 8 juin pour le semis de novembre.

Ensuite, la variété KWS Salix présente des symptômes à partir du 15 juin. Des symptômes plus importants apparaissent avec une semaine de décalage sur les semis de novembre. La sévérité progresse nettement à partir du 29 juin pour atteindre un pic le 6 juillet. C'est la variété qui subit les sévérités les plus importantes.

Ensuite, on peut remarquer le développement de sévérité très faible plus ou moins simultané sur les variétés Amboise, KWS Kerrin et Limabel. Un léger pic est observable le 6 juillet sur le semis d'octobre de la variété Amboise.

En règle générale, la sévérité développée a été plus importante pour les semis de novembre que pour ceux d'octobre.

4.3.3.2. Interprétation des résultats

Selon Duvivier et al. (2016), 8 à 20 jours sont nécessaires comme période de latence afin que la rouille brune se développe lorsque les conditions de températures sont situées entre 10 et 20°C. Les symptômes apparaissent entre le 1^{er} et le 15 juin sur les variétés sensibles. Ces symptômes seraient apparus 10 à 14 jours après l'infection selon Savary et al. (2016), donc l'infection a dû avoir lieu entre le 10 et 25 mai.

La différence observée entre les deux modalités de date de semis pourrait provenir des stades de développement différents. En effet, selon Cheyron, des résistances peuvent se mettre en place au stade

adulte, durant la montaison (stade 30) ou plus tard (Cheyron,2016). Selon cette hypothèse, la différence de sévérité observée entre les deux semis pourrait s'expliquer par l'apparition de résistance partielle dans des stades plus développés de la plante. La maladie aurait alors subi un frein à son développement suite à la résistance partielle initiée dans les semis d'octobre.

4.4. Influence des traitements fongicides

4.4.1. Description des traitements sur la variété Limabel

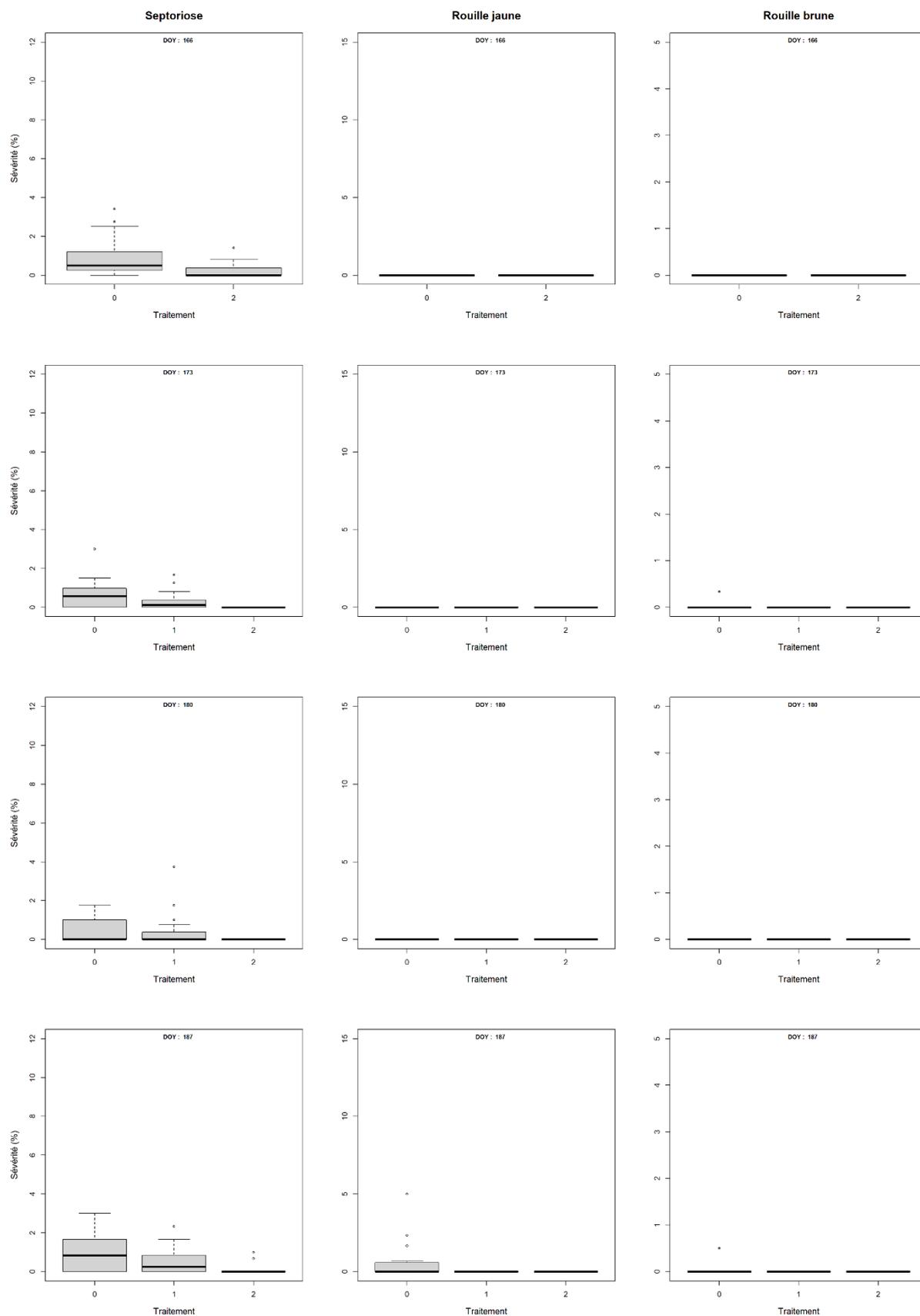


Figure 24 : Efficacité des traitements fongicides sur les trois maladies pour la variété résistante Limabel, semis d'octobre

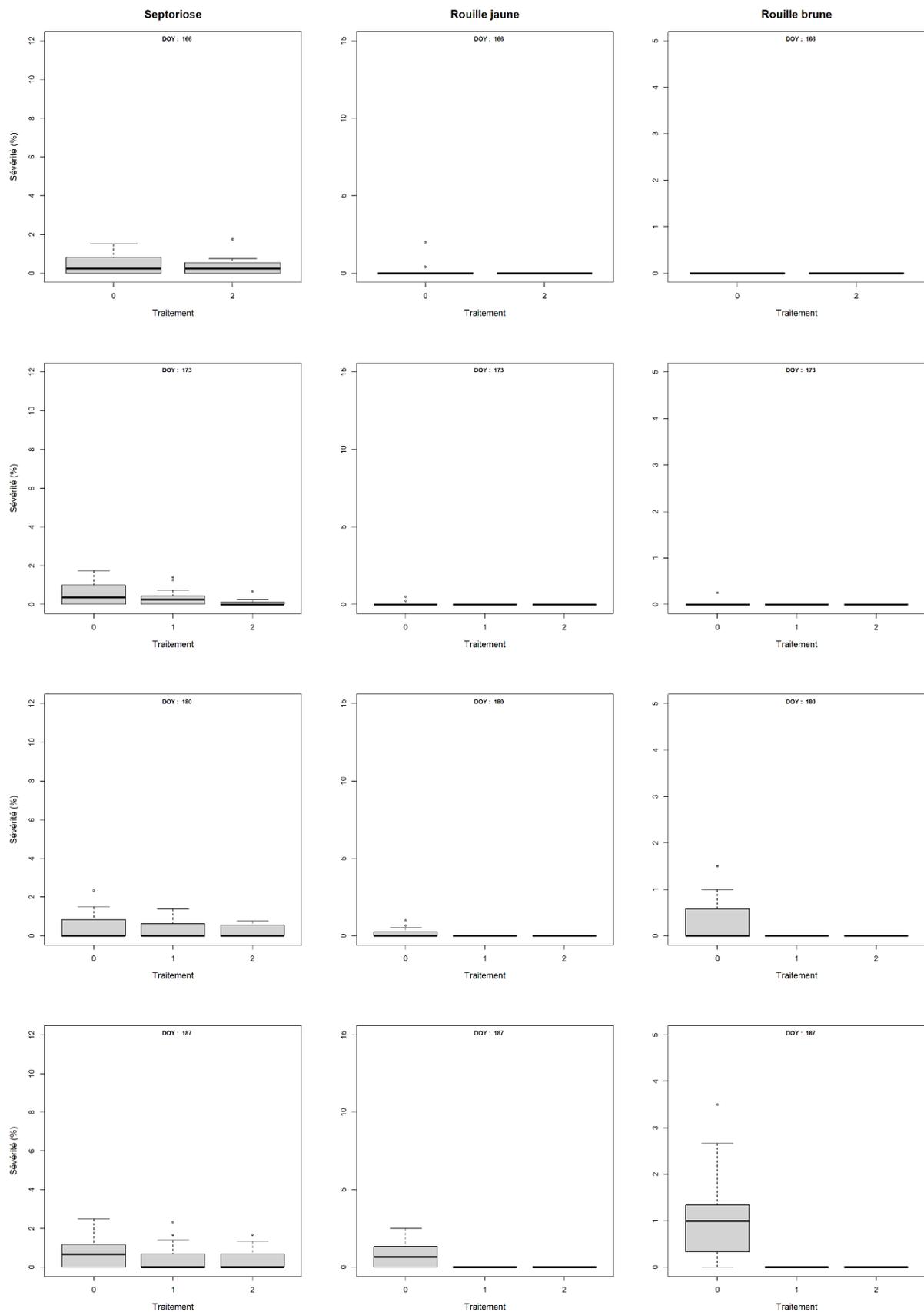


Figure 25 : Efficacité des traitements fongicides sur les trois maladies pour la variété résistante Limabel, semis de novembre

Tableau 24 : Résultats des tests SNK de comparaison de l'efficacité des traitements fongicides (0T, 1T, 2T) sur la variété Limabel pour les deux dates de semis en fonction des dates d'observations (DOY)

SEMIS	OCTOBRE				NOVEMBRE			
DATE	15/06	22/06	29/06	06/07	15/06	22/06	29/06	06/07
DOY	166	173	180	187	166	173	180	187
SEPTORIOSE								
0T	a	a	a	a	a	a	a	a
1T	-	ab	a	b	-	ab	a	a
2T	b	b	a	b	a	b	a	a
ROUILLE JAUNE								
0T	-	-	-	a	a	a	a	a
1T	-	-	-	b	-	b	b	b
2T	-	-	-	b	a	b	b	b
ROUILLE BRUNE								
0T	-	a	-	a	-	a	a	a
1T	-	a	-	a	-	a	b	b
2T	-	a	-	a	-	a	b	b

Les figures 24 et 25 sont les boxplots de sévérité des trois maladies pour la variété Limabel en fonction des traitements. Les résultats des tests SNK sont renseignés dans le tableau 24.

4.4.1.1. Septoriose

Le 15 juin (DOY 166), aucune différence n'est observée pour le semis de novembre alors que la modalité T0 du semis d'octobre est plus touchée que les autres. La septoriose est observée sur les deux modalités de date de semis.

Le 22 juin (DOY 173), les résultats sont identiques pour les deux dates de semis. La modalité T0 est la plus touchée, suivie par la modalité 1T et enfin la modalité 2T.

Le 29 juin (DOY 180), la situation est identique pour les deux dates de semis. La sévérité qui touche les différentes modalités de traitement est identique.

Début juillet (DOY 187), la situation pour le semis de novembre reste identique à celle de fin juin. Pour le semis d'octobre, la septoriose s'est plus développée sur la parcelle non-traitée, classant cette modalité dans le groupe le plus atteint, alors que les autres modalités se classent dans un autre groupe.

4.4.1.2. Rouille jaune

Pour le semis d'octobre, la rouille jaune n'est apparue que le dernier jour d'observation (DOY 187) et uniquement sur les parcelles non-traitées, les classant seules dans le groupe le plus touché. Seul le semis de novembre sera donc analysé ci-dessous.

Mi-juin, la rouille jaune est absente des parcelles.

Le 29 juin et le 6 juillet, le pathogène se développe uniquement sur les parcelles non-traitées, classant cette modalité seule dans le groupe le plus touché.

4.4.1.3. Rouille brune

Le semis d'octobre n'est pas atteint par la rouille brune.

Le semis de novembre n'est atteint par la rouille brune qu'à partir du 29 juin, uniquement pour les parcelles non-traitées. Le groupe le plus touché se compose de la modalité T0, alors que les deux autres modalités se classent dans un même groupe moins impacté.

4.4.2. Description des traitements sur la variété Bennington

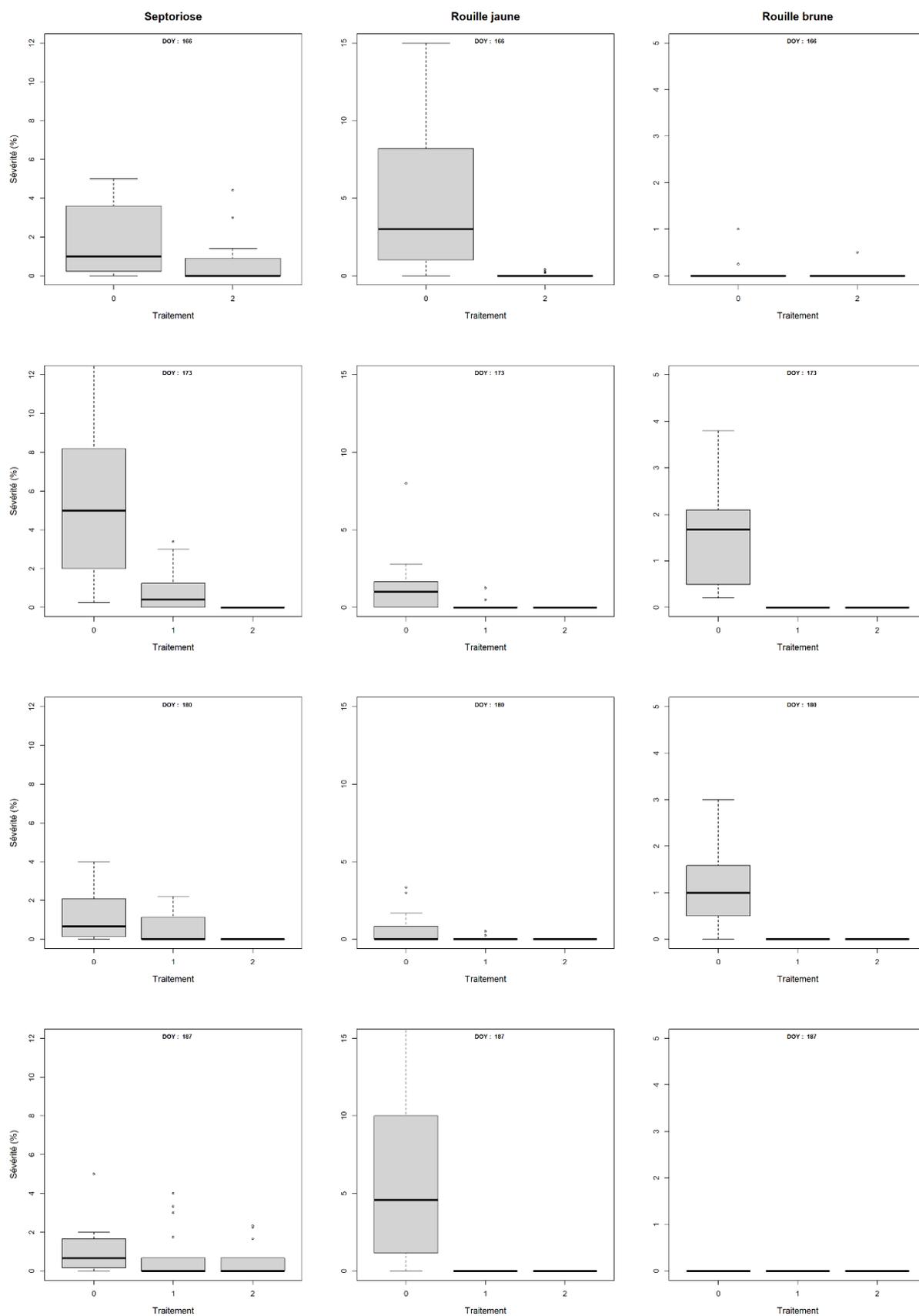


Figure 26 : Efficacité des traitements fongicides sur les trois maladies pour la variété sensible Bennington, semis d'octobre

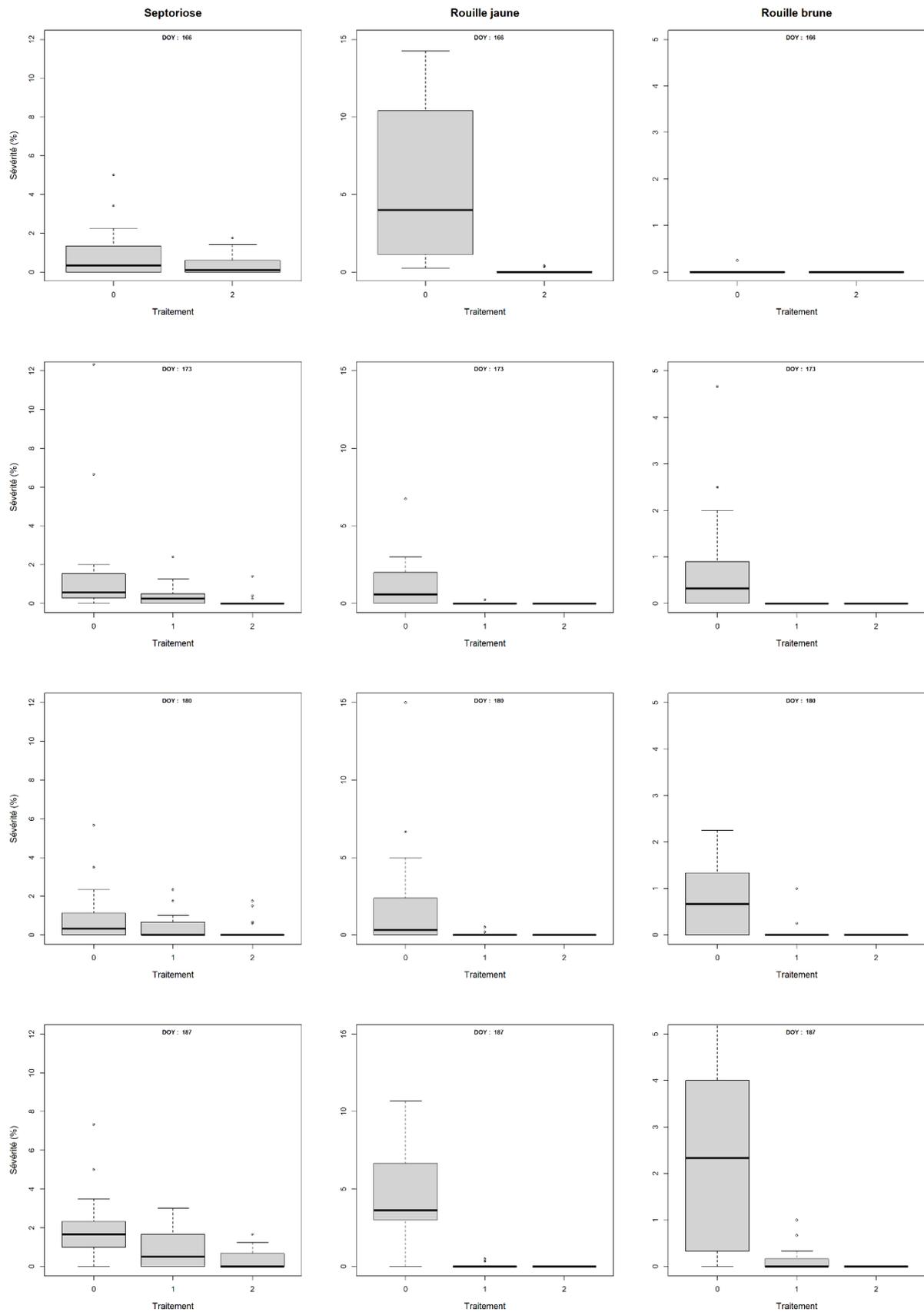


Figure 27 : Efficacité des traitements fongicides sur les trois maladies pour la variété sensible Bennington, semis de novembre

Tableau 25 : Résultats des tests SNK de comparaison de l'efficacité des traitements fongicides (0T, 1T, 2T) sur la variété Bennington pour les deux dates de semis en fonction des dates d'observations (DOY)

SEMIS DATE DOY	OCTOBRE				NOVEMBRE			
	15/06	22/06	29/06	06/07	15/06	22/06	29/06	06/07
	166	173	180	187	166	173	180	187
SEPTORIOSE								
0T	a	a	a	a	a	a	a	a
1T	-	b	b	a	-	b	a	b
2T	b	b	b	a	a	b	a	b
ROUILLE JAUNE								
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
ROUILLE BRUNE								
0T	a	a	a	-	a	a	a	a
1T	-	b	b	-	-	b	b	b
2T	a	b	b	-	a	b	b	b

Les figures 26 et 27 sont les boxplots de sévérité des trois maladies pour la variété Bennington en fonction des traitements. Les résultats des tests SNK sont repris dans le tableau 25.

4.4.2.1. Septoriose

Pour les deux dates de semis, le 15 juin (DOY 166), les parcelles sont infectées par la septoriose. Pour le semis d'octobre, la parcelle non-traitée est plus touchée que la parcelle ayant reçu le traitement. Pour le semis de novembre, aucune distinction ne peut être faite entre les deux modalités de traitement.

Le 22 juin, la septoriose progresse plus sur les parcelles non traitées que sur les autres, comme en témoignent les groupes : la modalité T0 fait partie du groupe le plus touché, alors que les modalités T1 et T2 sont moins impactées et ne présentent pas de différences.

Le 29 juin, la septoriose diminue mais pour le semis d'octobre la situation reste identique à la semaine précédente. Pour le semis de novembre, les modalités se retrouvent dans un même groupe.

Début juillet, la sévérité continue à diminuer pour les semis d'octobre, regroupant toutes les modalités de traitement dans le même groupe. Par contre, pour les semis de novembre, les parcelles non-traitées sont les plus touchées, suivies par les parcelles traitées qui se classent dans un même groupe.

4.4.2.2. Rouille jaune

Les mêmes constatations peuvent être tirées pour les semis d'octobre et de novembre au niveau de la séparation en groupes.

Le 15 juin (DOY 166), les parcelles non-traitées sont les plus touchées et appartiennent donc au groupe A, alors que les parcelles T2 appartiennent au groupe B.

Du 22 juin au 6 juillet, les parcelles non-traitées sont restées les plus atteintes par la rouille jaune, alors que les parcelles T1 et T2 se retrouvent dans le même groupe b.

4.4.2.3. Rouille brune

Pour la rouille brune, les mêmes différences peuvent être relevées pour le semis d'octobre et de novembre, sauf une hausse de sévérité en fin de saison pour les semis de novembre non-traités.

Le 15 juin (DOY 166), la rouille brune n'est pas encore présente sur la variété Bennington.

Le 22 juin (DOY 173), la rouille brune s'est développée uniquement sur la modalité T0, isolant cette variété seule dans le groupe touché. La sévérité est plus importante pour le semis d'octobre.

Fin juin (DOY 180), la sévérité de la rouille brune sur les parcelles non-traitées augmente pour les semis de novembre et diminue légèrement pour les semis d'octobre. Les parcelles traitées restent indemnes de symptômes, les différenciant ainsi des parcelles non-traitées.

Le 6 juillet, la rouille brune n'est plus présente pour les semis d'octobre. Pour le semis de novembre, la sévérité de la rouille brune a augmenté pour les semis non traités, isolant la modalité T0 dans le groupe plus touché. Le champignon s'est également développé sur la modalité T1 mais cette augmentation ne modifie pas la composition du groupe b.

4.4.3. Interprétation des résultats

4.4.3.1. Septoriose

Tout d'abord, la méthode utilisée afin de chiffrer la sévérité de l'attaque par la septoriose n'est pas totalement adéquate. En effet, lors de la cotation, l'échelle cote à la fois les symptômes actifs (pynides sur les tâches brunâtres) et les symptômes non actifs (tâches brunâtres dépourvues de pynides). Cette méthode a donc biaisé les résultats car l'utilisation d'un fongicide supprime les pynides (organes de reproduction du champignon) mais pas les tâches brunâtres (zones nécrosées). Dès lors, même si la septoriose n'était plus active, les zones de nécroses ont été cotées comme de la septoriose. Cette cotation peut donc expliquer l'absence de différence le 15 juin pour le semis de novembre.

D'un point de vue général, l'application de deux traitements semble non nécessaire au vu de l'absence de différences entre les deux modalités de semis.

L'application d'un traitement s'avère toutefois nécessaire. En effet, pour Limabel, quinze jours après l'application d'un fongicide, des symptômes sont encore présents sur les parcelles traitées mais disparaissent la semaine suivante. L'hypothèse qui pourrait expliquer cette constatation est l'effet du fongicide qui a stoppé le développement de la maladie (élimination des pynides), associé à la probable disparition des feuilles touchées qui expliquerait l'absence de symptômes non-actifs. Cependant, l'application de fongicide peut être évitée dans le cas d'un semis de novembre.

Pour la variété Bennington, quinze jours après l'application du premier fongicide, une différence se marque pour le semis d'octobre. Pour le semis de novembre, les symptômes présents sur la modalité T2 pourraient être liés aux symptômes non-actifs décrits précédemment. Par la suite, la maladie se propage davantage sur les parcelles non-traitées, témoignant de l'efficacité du traitement sur une variété sensible.

4.4.3.2. Rouille jaune

Pour la variété Limabel, la rouille est absente au début des observations mais fait son apparition fin juin-début juillet sur les parcelles non-traitées pour les deux dates de semis. Cela peut refléter l'importance d'un traitement fongicide pour protéger la plante jusqu'à la récolte.

Pour la variété Bennington, la rouille jaune est présente d'emblée sur les parcelles T0, alors qu'elle restera absente pour les autres parcelles traitées T1 et T2. L'absence de différence entre les deux modalités T1 et T2 peut soulever des questions quant à la nécessité d'un second traitement. Cependant, on peut remarquer qu'en l'absence de premier traitement, la maladie se développe de manière importante par rapport aux parcelles traitées. Le traitement à un stade précoce peut donc s'avérer justifiable pour lutter contre la rouille jaune.

Au vu de l'absence de différence entre T2 et T1, l'application d'un seul traitement peut s'avérer plus utile, à condition que celui-ci soit appliqué en début de saison pour lutter contre les attaques de rouille précoces.

4.4.3.3. Rouille brune

La maladie est absente des observations le 15 juin. De plus, le développement ne s'étant fait que sur les modalités sans traitements, aucune différence n'a pu être observée entre les modalités avec un ou deux traitements. L'application de deux traitements peut donc s'avérer inutile.

Pour la variété Bennington, le semis d'octobre a bien résisté avec un seul traitement mais par contre le semis de novembre commence à craquer début juillet. L'hypothèse qui pourrait expliquer cette différence est l'absence de rémanence du produit. Le fongicide, ayant été appliqué deux semaines avant de prendre effet, n'a protégé la plante que durant trois semaines. L'application d'un traitement fongicide est donc nécessaire pour les variétés sensibles.

4.5. Analyse des périodes de latence obtenues par le modèle

Pour chaque comparaison, une figure représente les périodes de latence durant la période d'observation pour le type de rouille. Chaque période de latence, représentée par une courbe, débute lorsque la courbe augmente et arrive à son terme quand la courbe atteint la valeur de 1.

Ensuite, un tableau reprend le nombre de période de latence (à la ligne « Latence ») ayant eu lieu la semaine précédant la date d'observation. Pour l'année 2018, deux tableaux sont présents étant donné que les dates d'observation était différente en fonction de la date de semis.

Enfin, une figure représente la sévérité moyenne de la rouille étudiée sur les cinq variétés pour les semis d'octobre (A) et de novembre (B). Chaque ligne noire verticale témoigne de la présence de période de latence ayant été comptabilisée dans le tableau précédent. C'est donc uniquement la présence et non le nombre de périodes de latence qui y est représentée.

4.5.1. Comparaison avec les observations de 2020

4.5.1.1. Rouille jaune

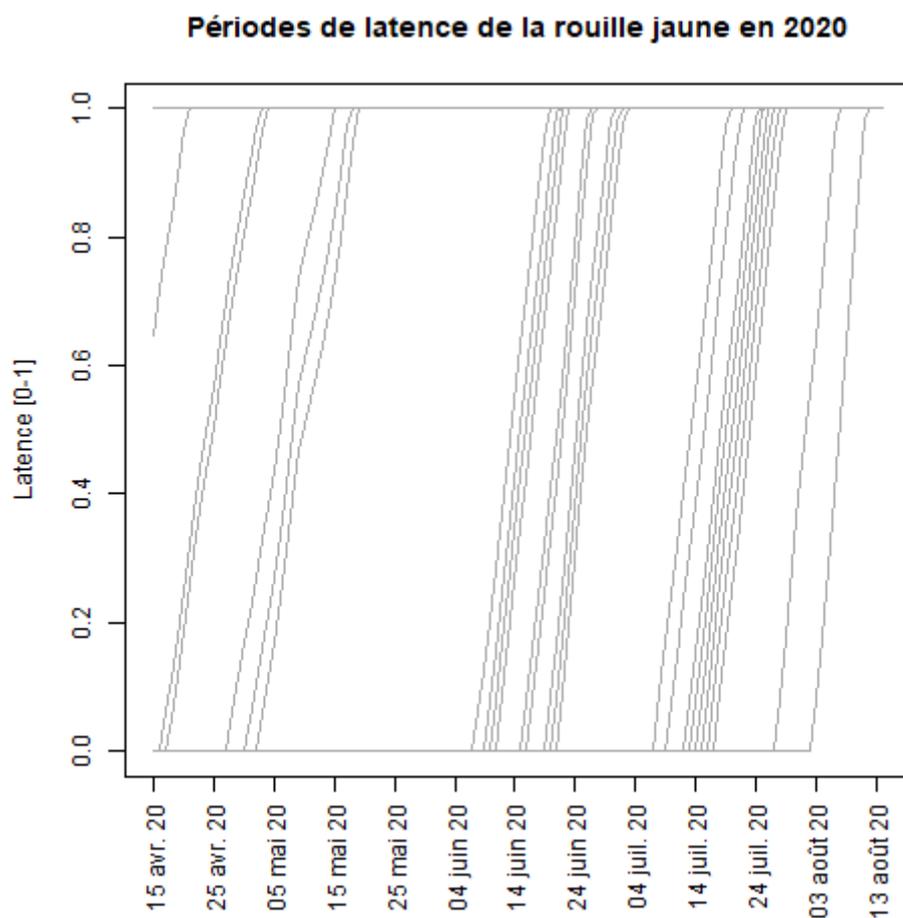


Figure 28 : Périodes de latence de la rouille jaune en 2020

Tableau 26 : Quantité de période de latence comptabilisées de la rouille jaune à chaque date d'observation en 2020

DOY	131	138	145	152	159	166	173	180	187
Date	11/05	18/05	25/05	01/06	08/06	15/06	22/06	29/06	06/07
Latence	1	2	0	0	0	0	3	5	3

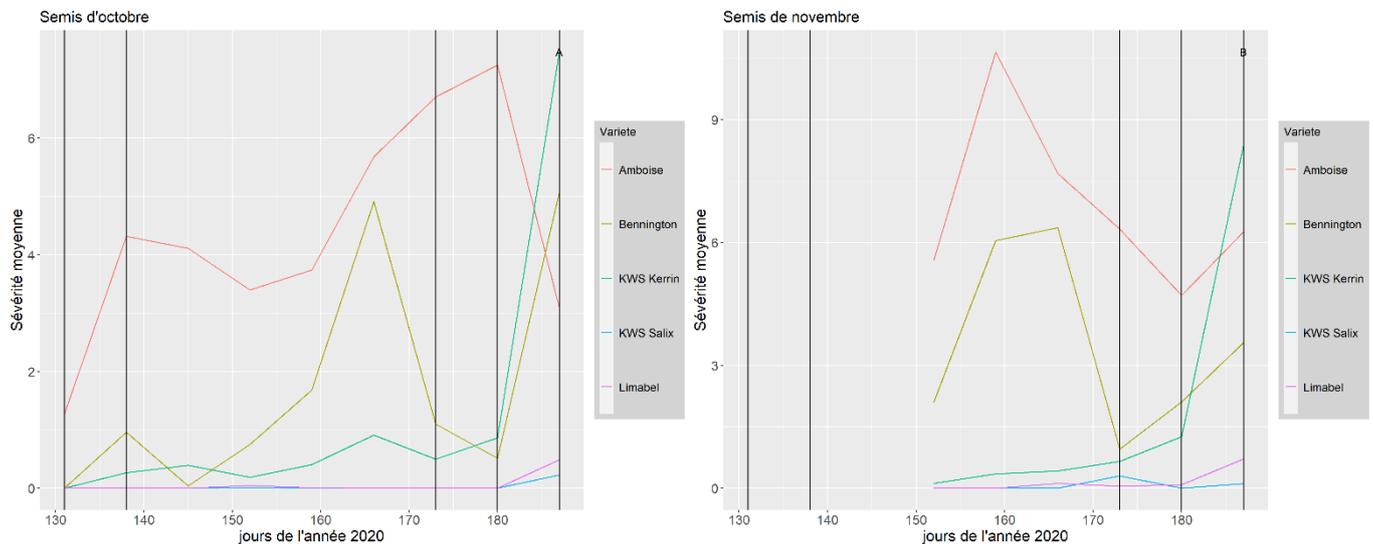


Figure 29 : Sévérité moyenne et périodes de latence observées de la rouille jaune pour les cinq variétés en 2020 pour le semis d'octobre (A) et celui de novembre (B).

Le semis d'octobre va d'abord être décrit, suivi par celui de novembre car ils présentent des comportements différents.

Une première latence peut être comptée le 11 mai (DOY131). Durant la semaine suivante, deux périodes de latence sont comptabilisées le 18 mai (DOY 138). On peut remarquer l'augmentation de la sévérité pour les deux variétés sensibles Amboise et Bennington pour le semis d'octobre.

Le 22 juin (DOY 173), trois périodes de latence arrivées à terme ont été comptabilisées. Depuis les premières périodes de latence, la sévérité a continué à augmenter pour les variétés sensibles et s'est développée sur la variété KWS Kerrin. Après le 22 juin, la sévérité augmente pour la variété Amboise et KWS Kerrin. Au 29 juin, cinq périodes de latence se sont produites.

Trois autres latences sont comptabilisées au 6 juillet. A cette date, la sévérité grimpe pour les variétés KWS Kerrin et Bennington.

Pour le semis de novembre, les phases de latence sont identiques car les observations ont été réalisées les mêmes jours. Pour la sévérité, elle est déjà élevée pour les variétés sensibles au début du mois de juin, puis connaît une baisse. Ensuite, la sévérité augmente le 29 juin pour les variétés Bennington et KWS Kerrin. Le 6 juillet, les deux variétés citées précédemment ainsi que la variété Amboise continuent à développer des symptômes.

4.5.1.2. Rouille brune

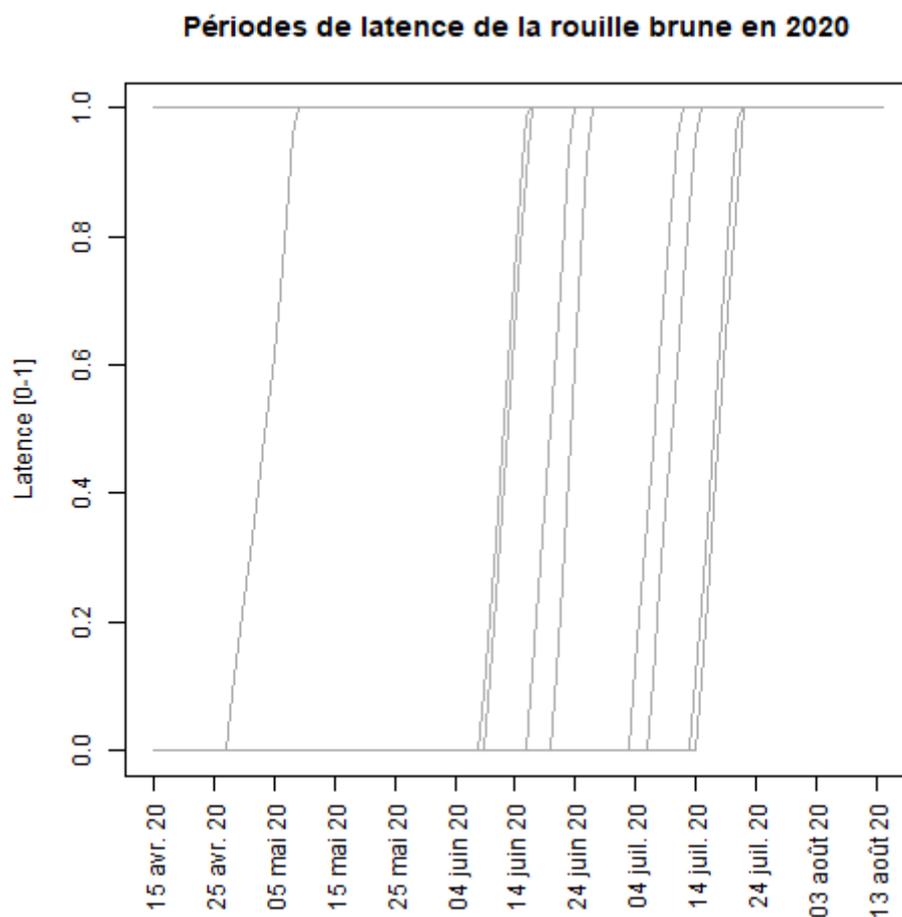


Figure 30 : Périodes de latence de la rouille brune en 2020

Tableau 27 : Quantité de période de latence de la rouille brune comptabilisées à chaque date d'observation en 2020

DOY	131	138	145	152	159	166	173	180	187
Date	11/05	18/05	25/05	01/06	08/06	15/06	22/06	29/06	06/07
SommeInf	1	0	0	0	0	0	2	2	0

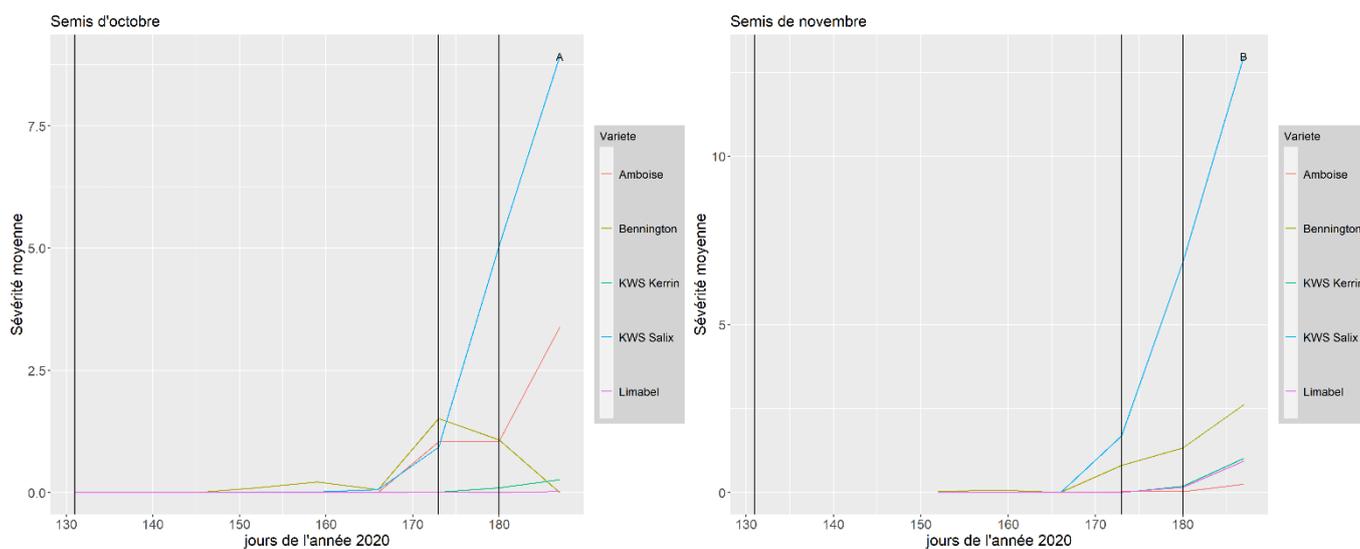


Figure 31 : Sévérité moyenne et périodes de latence observées de la rouille brune pour les cinq variétés en 2020 pour le semis d'octobre (A) et celui de novembre (B).

Une première latence peut être comptée le 11 mai (DOY131). A cette date, la rouille brune n'est pas encore présente sur le semis d'octobre et les observations n'ont pas encore débuté pour celui de novembre.

Le 22 juin (DOY 173), deux périodes de latence arrivées à terme ont été comptabilisées pour la semaine précédente. A cette date correspond également la première hausse de sévérité générale pour plusieurs variétés : Amboise, Bennington et KWS Salix pour le semis d'octobre, et KWS Salix et Bennington pour celui de novembre. Deux autres périodes de latences sont comptabilisées le 29 juin (DOY 180). La sévérité continue à augmenter pour les variétés KWS Salix et Amboise du semis d'octobre et pour les variétés KWS Salix et Bennington du semis de novembre. Le dernier jour des observations (DOY 187), une légère hausse de sévérité est observée pour les variétés non touchées précédemment : KWS Kerrin pour le semis d'octobre, et KWS Kerrin et Amboise pour celui de novembre.

4.5.2. Comparaison avec les observations de l'année 2018

4.5.2.1. Rouille jaune

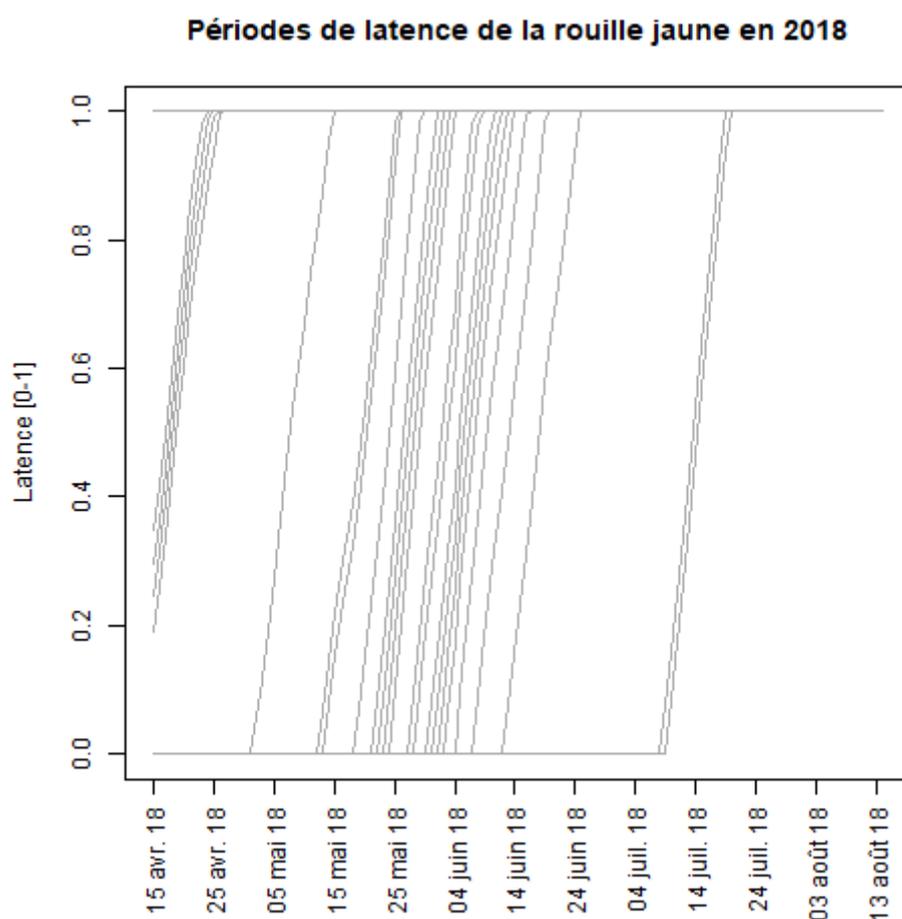


Figure 32 : Périodes de latence de la rouille jaune en 2018

Tableau 28: Quantité de période de latence de la rouille jaune comptabilisées à chaque date d'observation en 2018 pour le semis d'octobre

DOY	134	142	149	155	162	169	176	183
Date	14/05	22/05	29/05	04/06	11/06	18/06	25/06	03/07
Latence	0	1	3	5	3	4	2	0

Tableau 29 : Quantité de période de latence de la rouille jaune comptabilisées à chaque date d'observation en 2018 pour le semis de novembre

DOY	134	143	150	156	163	171	177	184
Date	14/05	23/05	30/05	05/06	12/06	20/06	26/06	03/07
Latence	0	1	3	5	4	4	1	0

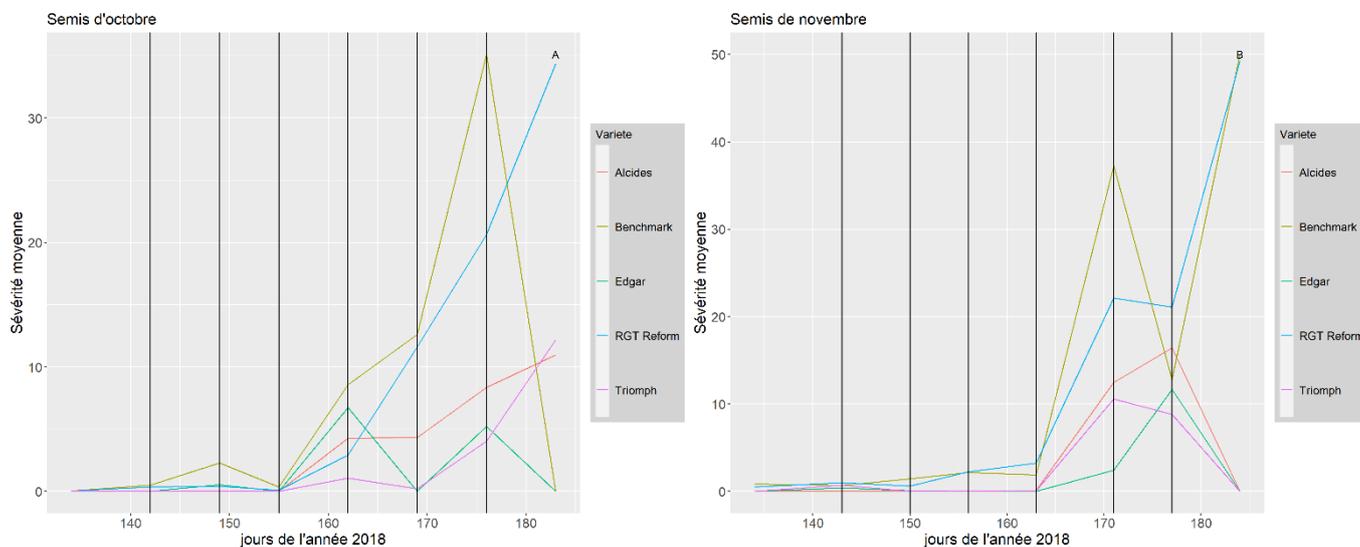


Figure 32 : Sévérité moyenne et périodes de latence observées de la rouille jaune pour les cinq variétés en 2018 pour le semis d'octobre (A) et celui de novembre (B).

Pour les deux modalités de date de semis, des périodes de latence surviennent chaque semaine d'observation entre le 22 mai et le 25 juin. L'augmentation de sévérité générale débute à partir du 4 juin (DOY 155) pour le semis d'octobre. Des latences peuvent être corrélées à des augmentations de sévérité pour certaines variétés : le 11 juin pour la variété RGT Reform, le 18 juin pour toutes les variétés et le 25 juin pour les variétés RGT Triumph, Alcides et Triumph.

Pour le semis de novembre, la quantité maximale de périodes de latences dénombrées se situe le 5 juin (DOY 156) avec un nombre de cinq latences. Une légère hausse de sévérité peut être observée à partir du 23 mai (DOY 143) qui correspond également à la première période de latence observée. Une importante augmentation de sévérité se produit entre le 12 et le 20 juin, suivie par une stabilisation ou diminution le 26 juin (DOY 177). La sévérité repart à la hausse pour les deux variétés RGT Reform et Benchmark début juillet.

4.5.2.2. Rouille brune

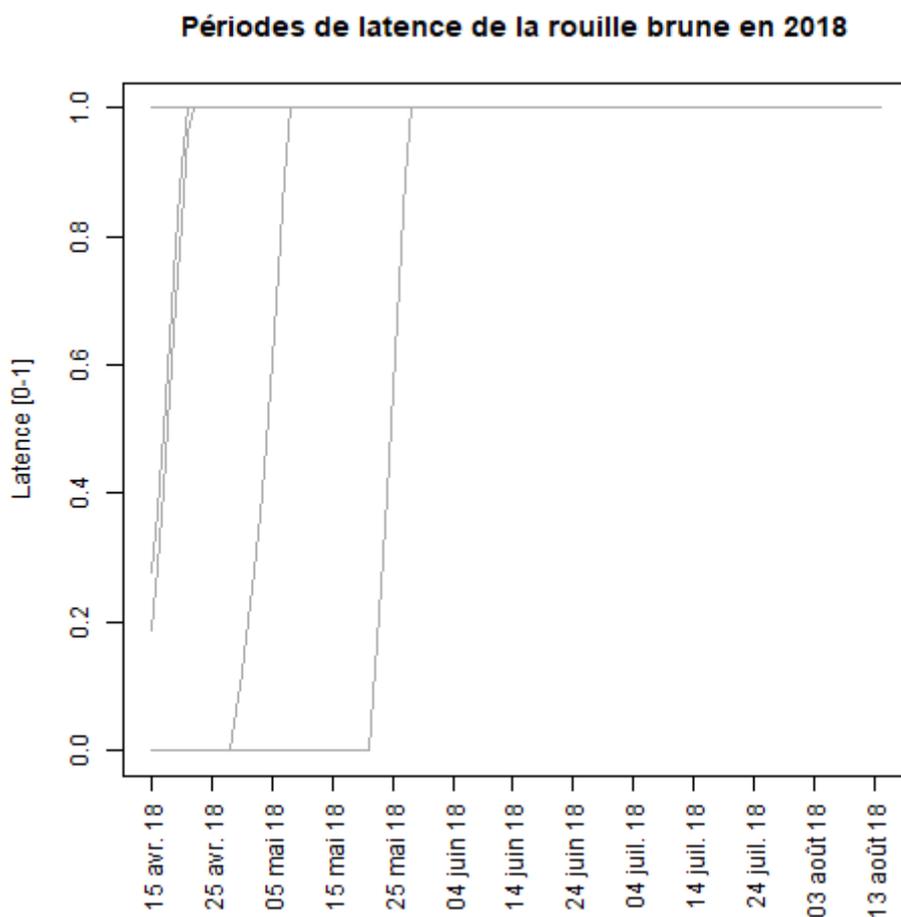


Figure 33: Périodes de latence de la rouille brune en 2018

Tableau 30 : Quantité de période de latence de la rouille brune comptabilisées à chaque date d'observation en 2018 pour le semis d'octobre

DOY	134	142	149	155	162	169	176	183
Date	14/05	22/05	29/05	04/06	11/06	18/06	25/06	03/07
Latence	1	0	1	0	0	0	0	0

Tableau 31 : Quantité de période de latence de la rouille brune comptabilisées à chaque date d'observation en 2018 pour le semis de novembre

DOY	134	143	150	156	163	171	177	184
Date	14/05	23/05	30/05	05/06	12/06	20/06	26/06	03/07
Latence	1	0	1	0	0	0	0	0

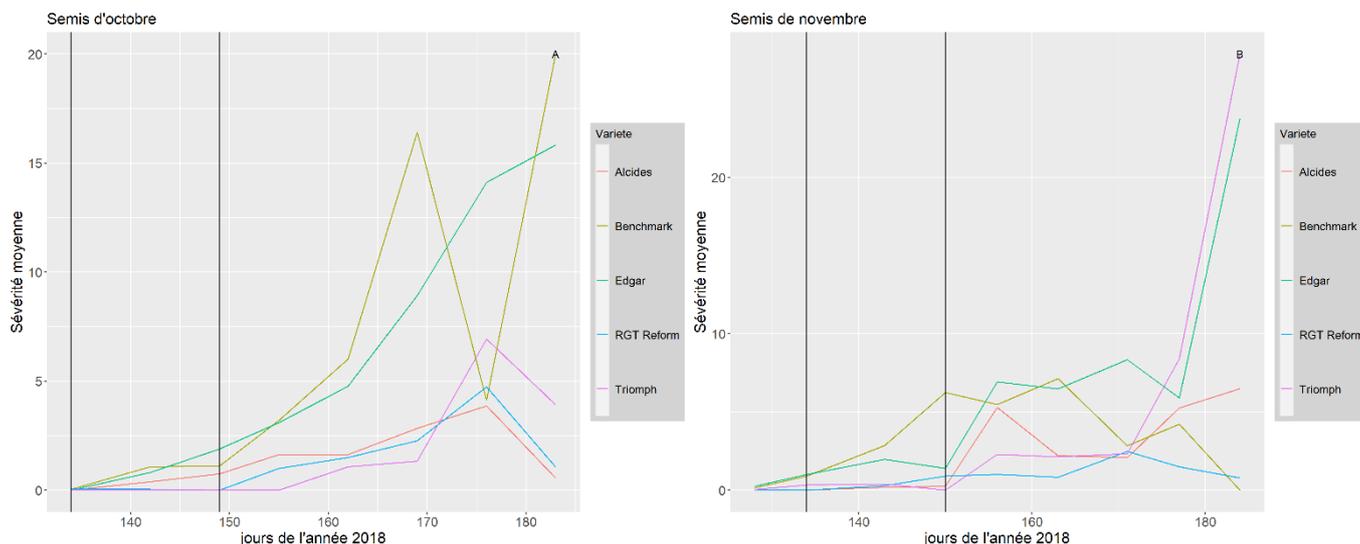


Figure 34 : Sévérité moyenne et périodes de latence observées de la rouille brune pour les cinq variétés en 2018 pour le semis d'octobre (A) et celui de novembre (B).

Deux périodes de latence ont été dénombrées, une le 14 mai et une autre le 29 mai. La sévérité augmente légèrement après la première latence pour les deux dates de semis. Après la seconde latence, la sévérité continue à augmenter pour le semis d'octobre alors que pour le semis de novembre, elle augmente uniquement pour les variétés Alcides et Edgar.

4.5.3. Interprétation des résultats

4.5.3.1. Rouille jaune

La pression de rouille jaune subie pour les deux années est différente. En effet, en 2020, la pression a été très faible comparée à 2018 où le champignon était plus présent. Pour les deux années, les premières périodes de latence observées début mai peuvent correspondre aux premiers symptômes observés de rouille jaune. Pour l'année 2020, la sévérité a très vite augmenté, alors qu'elle est restée très faible au début des observations en 2018. Une période de latence peut suffire pour déclencher le développement du champignon comme en 2020 au mois de mai. Pour 2018, plusieurs périodes de latence à la suite se sont produites. Cela a pu générer un développement plus important du champignon comme en témoigne la sévérité plus importante à partir de mi-juin.

Une autre approche qui s'intéresse au développement par étage foliaire (annexe 10, figures 46 et 48) permet d'appuyer les résultats obtenus car certaines périodes de latence déclenchent le développement de symptômes sur certaines feuilles, et d'autres sur d'autres feuilles. Notamment, les plus anciennes feuilles développent d'abord des symptômes suite à une première phase de latence, et les deux dernières feuilles suivent la même tendance suite à une seconde période de latence. Cependant, toutes les périodes de latence n'amènent pas le développement de la rouille.

4.5.3.2. Rouille brune

Le modèle de la rouille brune ne fournit pas beaucoup de périodes de latence pour les périodes d'observation. En effet, la faible quantité de période de latence pour l'année 2020 pourrait expliquer la faible pression observée. Une hausse de sévérité peut toutefois être corrélée aux latences observées fin juin. Pour l'année 2018, les périodes de latence observées peuvent expliquer l'apparition des premiers symptômes au mois de mai. Durant les périodes de latence, le champignon était donc bien présent dans la

parcelle. Le développement de la rouille brune aurait donc été initié par les premières latences avant d'exploser suite à des conditions favorables à son développement.

L'absence de période de latence durant l'explosion pourrait sembler étrange. En effet, pour infecter d'autres plantes, le champignon a besoin d'une période de latence également. Le modèle devrait donc être testé avec d'autres valeurs de paramètres ou bien être testé pour d'autres années.

La même approche que pour la rouille jaune a été menée dans l'annexe 10 (figures 47 et 49) et a conduit aux mêmes résultats. Toutes les périodes de latence entraînent l'apparition de symptômes sur certaines feuilles, sauf la première période de l'année 2020, trop précoce dans la saison.

5. Conclusions et perspectives

Les conditions climatiques de cette année 2020 n'ont pas permis aux maladies de se développer amplement étant donné les faibles sévérités mesurées. La variabilité du climat d'une année à l'autre entraîne des années plus propices aux maladies que d'autres. C'est pourquoi, il est important de fonder des théories ou des modèles sur les données de plusieurs années. Les résultats obtenus sont ainsi uniquement fondés sur l'année 2020, sauf pour le modèle de prédiction de l'apparition des symptômes de rouilles qui est fondé sur les années 2018 et 2020.

Les modes de propagation des trois maladies ont pu être illustrés au travers des observations. L'infection par la septoriose démarre d'abord des feuilles les plus anciennes avant de se propager aux étages supérieurs suite aux éclaboussures de gouttes d'eau. Les rouilles, quant à elles, se propagent grâce au vent et vont donc infecter plus facilement les dernières feuilles et se généraliser plus rapidement à la totalité des feuilles.

Une compétition entre le développement des rouilles pourrait avoir lieu sur les feuilles. Par contre, leur développement n'impacterait pas celui de la septoriose. Toutefois, cette analyse reste une hypothèse et devrait être vérifiée.

La théorie de Fones and Gurr (2015), selon laquelle les semis précoces subiraient des conditions météorologiques propices au développement de la septoriose, peut se vérifier cette année avec des semis d'octobre plus atteints que ceux de novembre. Pour la rouille brune par contre, le semis de novembre semble être le plus atteint. Aucune différence n'a pu être mise en évidence concernant la rouille jaune.

Pour les rouilles, l'expression des gènes de résistance est probablement influencée par les stades de développement. Ce phénomène n'a pas pu être observé pour la septoriose étant donné le décalage entre le début des observations et l'apparition des symptômes.

Cette année, l'application de deux traitements fongicides n'était pas justifiée. L'efficacité d'un seul traitement fongique est par contre prouvée pour les variétés sensibles. L'absence de traitement pour lutter contre la septoriose pourrait quant à lui se justifier dans l'optique de variétés résistantes. Pour les rouilles par contre, l'application d'un traitement est plus efficace pour lutter contre leur développement, surtout contre la rouille brune si le semis est tardif.

A propos du modèle de prédiction de l'infection des rouilles, les conditions d'infection choisies ont permis de faire correspondre l'apparition de symptômes à des périodes de latences. Chaque phase de latence ne semble toutefois pas induire le développement du champignon. L'induction de la maladie peut donc être prédite mais le développement du champignon nécessite aussi la présence de spores.

Pour le suivi en dynamique, il serait intéressant de changer d'échelle de cotation de la septoriose afin de coter uniquement les symptômes actifs. Des observations plus précoces pour la septoriose permettraient d'analyser l'influence du génotype des variétés sur le développement de la maladie.

A l'avenir, des sets de données de plusieurs années pourraient permettre d'étudier les maladies fongiques sous différentes conditions culturales, en plus de vérifier le modèle. Cependant, pour éviter tout biais liés à l'observateur, une seule et unique personne devrait idéalement recueillir les données.

Lors de l'apparition de symptômes, des observations plus régulières permettraient d'améliorer l'analyse des paramètres qui influencent le développement des pathogènes, comme notamment la résistance variétale ou encore l'influence du génotype. En plus de ces observations, des relevés de température, de pluviométrie et d'humidité apporteraient des informations pouvant à la fois expliquer l'intensification des maladies et nourrir le modèle de prédiction développé.

Afin d'améliorer le modèle, il pourrait être intéressant de modifier certaines valeurs des conditions d'infection du modèle afin de trouver les valeurs qui donnent les meilleures prédictions. Le modèle pourrait également développer d'autres aspects importants dans le développement des rouilles, comme l'influence du vent, mais également la propagation sur une feuille et entre les feuilles d'une même plante car il ne prend en compte actuellement que l'infection d'une feuille unique.

6. Références bibliographiques

Agrifind alertes, Les maladies courantes du blé tendre d'hiver. <https://www.agrifind.fr/alertes/ble/>, (22/04/2020).

Arvalis- Institut du végétal, . . Les fiches accidents : rouille brune. http://www.fiches.arvalis-infos.fr/fiche_accident/fiches_accidents.php?mode=fa&type_cul=1&type_acc=4&id_acc=49, (25/11/2020).

Azzimonti G., 2013. Diversification de la résistance quantitative à la rouille brune du blé , à partir de la caractérisation des composantes de la résistance.

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_, (12/09/2020).

BASF, 2019. La rouille jaune du blé.
https://www.agro.basf.fr/fr/cultures/ble/maladies_du_ble/rouille_jaune_du_ble.html#:~:text=Sympt%C3%B4mes,la%20face%20sup%C3%A9rieure%20des%20feuilles, (25/11/2020).

Bataille C., Duvivier M., Eylembosch D., Heens B., Mahieu O., Meza R. & Monfort B., 2015. Lutte intégrée contre les maladies. In : Livre Blanc Céréales – Edition février 2015. <https://www.livre-blanc-cereales.be/wp-content/uploads/2017/02/LBfev2015.pdf>.

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*. Zaragoza : CIHEAM, 349–356.
<https://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=600058>, (25/04/2020).

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.

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

Chen W., Wellings C., Chen X., Kang Z. & Liu T., 2014. Wheat stripe (yellow) rust caused by *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*.

Chen X.M., 2005. Epidemiology and control of stripe rust [*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*] on wheat.

Curtis B.C., Rajaram S. & Gómez Macpherson H., 2002. Bread wheat: improvement and production., Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.

Curtis B.C., Wheat in the world, <http://www.fao.org/3/y4011e04.htm> (18/04/20).

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. 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.
- El Jarroudi et al., 2017. A threshold-based weather model for predicting stripe rust infection in winter wheat. *Plant Disease*, 101(5), 693–703. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-16-1766-RE>.
- El Jarroudi, M., Kouadio, L., Delfosse, P. et al., 2014. Brown rust disease control in winter wheat: I. Exploring an approach for disease progression based on night weather conditions. *Environ Sci Pollut Res* 21, 4797–4808 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2463-6>.
- Fabrégat S., 2009. Actu environnement : Les enjeux de l’agriculture de demain. https://www.actu-environnement.com/ae/news/enjeux_agriculture_demain_7881.php4, (10/12/2020).
- FAO, 2020. World Food Situation. <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/en/>, (18/04/20).
- FAOSTAT, 2020. Data. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (15/12/2020).
- Fones H. & Gurr S., 2015. The impact of *Septoria tritici* Blotch disease on wheat: An EU perspective. *Fungal Genet. Biol.*, 79, 3–7. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1087184515000705?via%3Dihub>, (25/04/2020).
- 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&tlng=en, (25/04/2020).
- 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, 2020. <https://www.google.be/maps/@50.5448648,4.7506982,717m/data=!3m1!1e3!5m1!1e1?hl=fr>, (26/05/2020).
- Hay, R. and Porter, J., 2006. *The Physiology of Crop Yield*. 2nd Edition, Blackwell Publishing, Oxford.
- 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 prédiction de la phénologie, de la croissance, du rendement et de la qualité des cultures. http://www.agrometeo.org/help/modeles_bioclimatiques_phenologie.pdf, (13/10/2020).
- Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017. <https://www.livre-blanc-cereales.be/thematiques/maladies/froment/rouille-brune/>, (17/09/2020).
- Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017. <https://www.livre-blanc-cereales.be/thematiques/maladies/froment/rouille-jaune/>, (17/09/2020).
- Livre Blanc Céréales : Septoriose, 2017. <https://www.livre-blanc-cereales.be/thematiques/maladies/froment/septoriose/>, (17/09/2020).

- 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. <https://bsppjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/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., 2019. Livre blanc : septembre 2019. Livre Blanc Céréales, 29–59. https://www.livre-blanc-cereales.be/wp-content/uploads/2019/10/2019-10_Livre-blanc.pdf.
- Meurs R., 2018. 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. Data.
- Morais D., 2015. Les déterminants des phases épidémiques précoces 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.
- OCDE/FAO (2017). Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2017-2026.
- 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>.
- Roelfs A.P., Singh R.P. & Saari E.E., 1992. *Rust Diseases of Wheat: Concepts and methods of disease management*.
- Rossi V., Giosuè S., Caffi T., 2010, *Modelling Plant Diseases for Decision Making in Crop Protection* https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-90-481-9277-9_15 (06/09/2020).
- Rossi, V., Racca, P., Giosue', S., Pancaldi, D., & Alberti, I., 1997. A simulation model for the development of brown rust epidemics in winter wheat. *European Journal of Plant Pathology*, 103(5), 453–465. <https://doi.org/10.1023/A:1008677407661>.
- 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>.
- Service public de Wallonie (SPW), 2016. La Carte des Sols de Wallonie. <https://geoportail.wallonie.be/walonmap#BBOX=176335.48490919394,177956.0610670129,136779.4520329653,137558.65150803092>, (15/10/2020).
- Slimane R. Ben, 2010, 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>, (22/11/2020).
- Syngenta, 2015. L'échelle BBCH pour les céréales. <https://www.syngenta.fr/agriculture-durable/reglementation/dossier-bbch/article/echelle-bbch-cereales>, (20/04/2020).

Young, CS, Paveley, ND, Vaughan, TB, Thomas, JM et Lockley, KD, 2003 . Predicting epidemics of yellow rust (*Puccinia striiformis*) on the upper canopy of wheat from disease observations on lower leaves. *Plant Pathol.* 52: 338-349. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3059.2003.00848>.

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. <https://apsjournals.apsnet.org/doi/pdf/10.1094/PDIS.2000.84.8.816>.

7. Annexes

7.1. Annexe 1

La figure 35 résume le cycle de développement de la septoriose. Le champignon peut survivre de la culture précédente sur des repousses ou résidus de la culture de froment (5). L'inoculation primaire d'une parcelle de blé peut être causée de deux manières. D'une part, des ascospores peuvent être libérées durant l'automne et l'hiver par les périthèces (fructifications de la septoriose). Le vent va ensuite transporter ces spores issues de la reproduction sexuée sur de longues distances pour infecter une parcelle. D'autre part, si le précédent est un froment, des pycnidiospores, issus de la reproduction asexuée, peuvent être libérés directement à partir des résidus de culture précédents. Pour chacune de ces reproductions, les spores infecteront les feuilles par les stomates (1) (Livre Blanc Céréales : Septoriose, 2017).

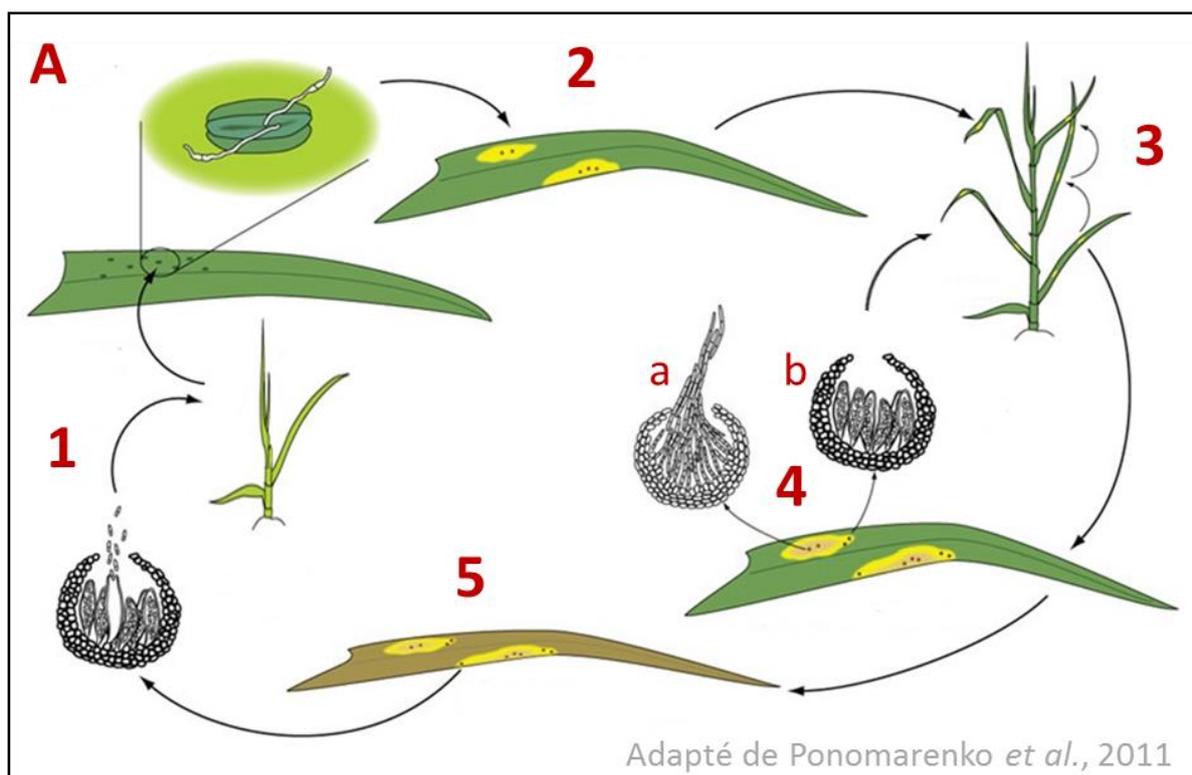


Figure 35 : Cycle de *Zymoseptoria tritici*, champignon de la septoriose (Livre Blanc Céréales : Septoriose, 2017)

La propagation du champignon dans le champ ne se réalise pas essentiellement grâce à la reproduction sexuée mais plutôt grâce à la reproduction asexuée qui permet une propagation secondaire. En effet, une fois la plante infectée par le champignon, ce dernier va développer des pycnides (2) (petites taches noires). Ces structures reproductrices de la voie asexuée vont libérer à leur tour des pycnidiospores. La propagation de ces spores se fait horizontalement et verticalement grâce aux éclaboussures de la pluie (3). Le champignon va également développer des périthèces pour pratiquer la reproduction sexuée (4b). Une propagation physique peut également se produire lorsque 2 feuilles entrent en contact (Livre Blanc Céréales : Septoriose, 2017).

Une fois la spore sur une feuille, une phase de latence va être déclenchée durant laquelle le champignon est associé à la feuille mais aucun symptôme n'est exprimé. La durée de cette phase peut varier de 14 jours en conditions optimales jusqu'à 28 jours lors de conditions plus froides (Fones and Gurr, 2015).

7.2. Annexe 2

La septoriose, maladie causant le plus de problèmes en Wallonie (Livre Blanc Céréales, 2017), peut causer des pertes de rendement allant jusqu'à 40% (Morais, 2015). Ces pertes sont principalement causées par les dégâts subis par les étages supérieurs de la plante (Moreau and Maraite., 1999). Certaines infections plus graves peuvent engendrer des pertes qui peuvent s'élever jusqu'à 50% (Fones and Gurr, 2015). Les pertes peuvent être limitée par l'application de fongicides, certaines pratiques agricoles et l'utilisation de variété résistantes.

7.3. Annexe 3

Ce champignon biotrophe est également hétéroïque. En fonction de son hôte, il réalise soit un cycle asexué, soit un cycle sexué. Sur les hôtes primaires, comme l'épeautre, le blé, le triticale, le champignon réalise son cycle asexué. Tandis que sur les hôtes secondaires tel l'épinevinette, le cycle sexué est réalisé.

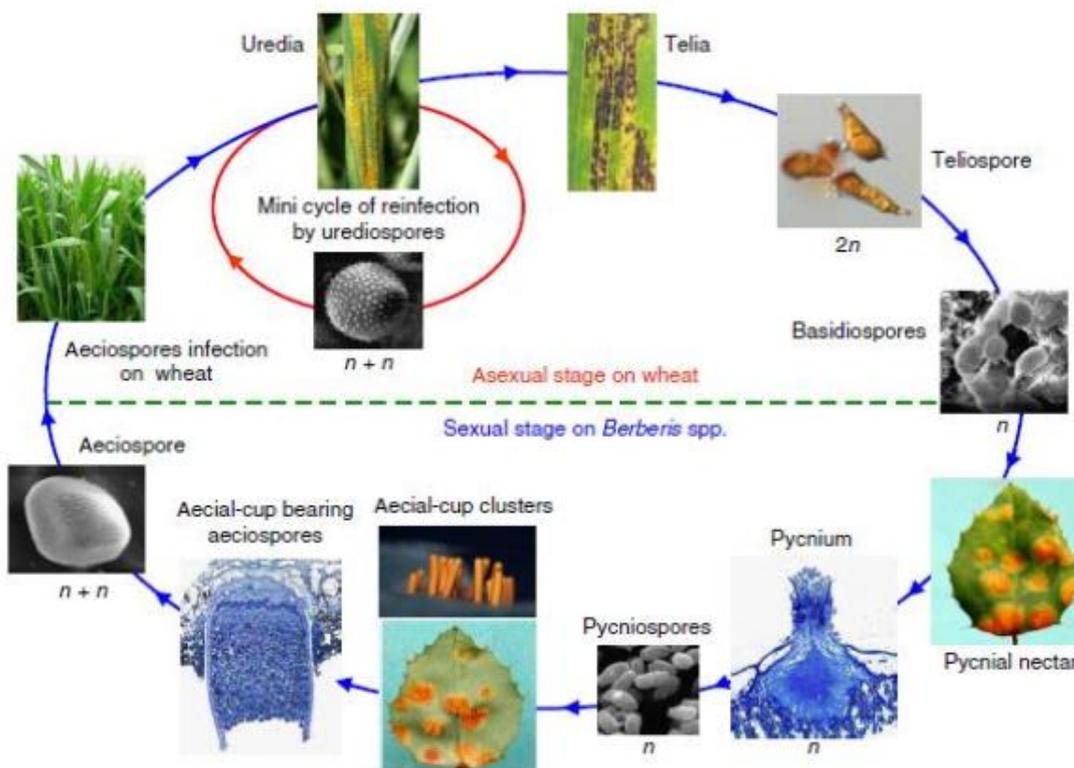


Figure 36 : Cycle de *Puccinia striiformis*, champignon de la rouille jaune (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017)

Le cycle sexué n'étant pas observé en Europe suite à une absence de synchronisation entre les phénologies des deux hôtes (primaire et secondaire), la description du cycle de vie ne se limitera qu'à la reproduction asexuée (figure 36).

Dès la sortie de l'hiver et au début du printemps, la reproduction asexuée va débuter avec l'apparition d'urédies. Ces sores vont produire des spores, les urédospores tant que les conditions de températures sont atteintes. Ce paramètre est le facteur le plus impactant pour la survie du pathogène. Le développement de ce champignon requiert également du tissu végétal vivant étant donné qu'il est dépourvu de saprophyte (Bataille et al., 2015). L'impact des gouttes de pluie peut libérer ces spores (Chen, 2005) pour être ensuite transportés sur de longues distances via le vent (Bataille et al., 2015 ; Chen et al., 2014 ; Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017). Les premiers symptômes et les pustules vont apparaître en décalage. L'observation de symptômes peut se réaliser six à huit jours après l'infection, alors que l'apparition de pustules quant à lui se produit 12 à 14 jours après l'infection en conditions favorables (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017). Les repousses de céréales ainsi que certaines graminées sauvages peuvent garantir la survie du champignon durant la période estivale et même automnale. Suite à cette survie, de nouvelles plantes de blé peuvent être infestées par l'inoculum à partir du stade 2 feuilles (Morais, 2015).

7.4. Annexe 4

Les effets de la rouille jaune peuvent se faire ressentir sur l'ensemble du territoire belge, mais les zones côtières sont plus particulièrement touchées suite aux conditions météorologiques optimales au développement du champignon rencontrées dans ces régions (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017). L'intensité de l'infection peut varier en fonction de la sensibilité de la variété, de la précocité de l'attaque, de la durée d'infection et du taux de développement de la maladie. En général, les pertes de rendement engendrées statuent entre 10 et 70% mais peuvent grimper jusqu'à 100%, ce qui détruit la culture (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017). Outre les effets de rendement, la qualité des grains de blé peut également être impactée négativement par l'infection (Bahri, 2008).

7.5. Annexe 5

Tout comme la rouille jaune, la rouille brune est biotrophe et hétéroïque. Ce champignon a donc besoin pour sa reproduction asexuée d'un hôte primaire, comme le blé ou l'amidonniér, mais également d'un hôte secondaire, comme le pigamon ou l'isopyre faux pigamon, pour sa reproduction sexuée.

La phase sexuée est peu retrouvée en Belgique étant donné que les hôtes sont uniquement retrouvés sous forme de plantes ornementales (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017 ; Duvivier et al., 2016 ; Bolton et al., 2008). Seule la phase asexuée sera donc développée ci-après (figure 37).

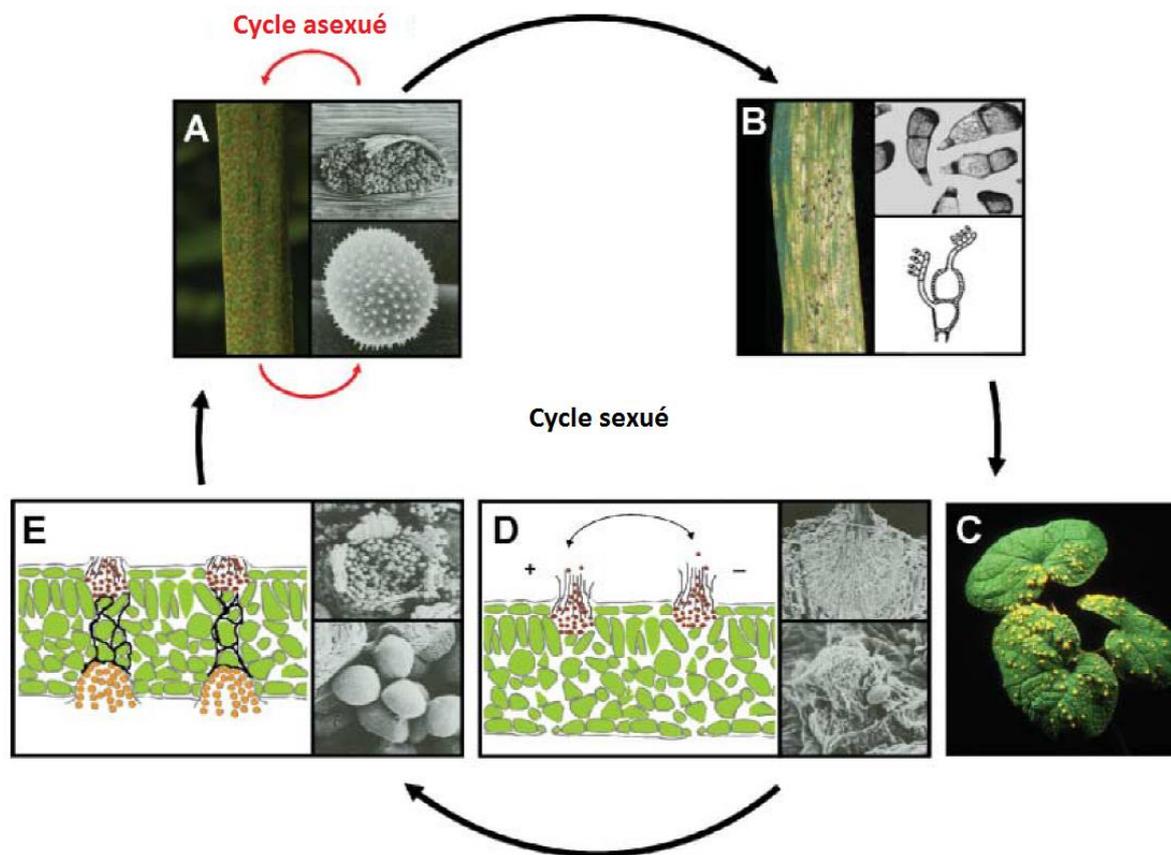


Figure 37 : Cycle de *Puccinia triticina* Erik., champignon de la rouille brune (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017)

En Belgique, une période de minimum deux mois sépare la récolte de la première culture de blé et les semis de la seconde, ce qui empêche un chevauchement des cultures. Or, le champignon étant un biotrophe obligatoire, un phénomène de « green bridge » a lieu. La rouille a besoin d'infecter les repousses de froment et de graminées durant l'interculture pour survivre jusqu'à l'émergence des nouveaux semis (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017 ; Duvivier et al., 2016).

Dès l'automne donc, les urédospores présentes sur ces « plantes relais » vont infecter les nouvelles plantules. Cette infection précoce est favorisée par la sévérité de l'attaque précédente (Duvivier et al., 2015). Ensuite, après l'hiver, le vent et la pluie vont transporter ces spores vers d'autres plantes. La germination de ces spores sur de nouvelles plantes va entraîner l'infection de la feuille. Après une période de latence, des urédies sont produites par le mycélium, qui vont à leur tour libérer des urédospores (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017 ; Duvivier et al., 2016 ; Azzimonti, 2013 ; Bolton et al., 2008).

Ce cycle peut être bouclé en 8 à 15 jours si les conditions sont optimales. La répétition de 4 à 5 cycles au cours de la même année culturale est synonyme d'épidémie sévère (Duvivier et al., 2016).

7.6. Annexe 6

La rouille brune présente une grande diversité de populations sur l'ensemble des continents. Ces populations différentes traduisent des races différentes et une diversité génétique importante. Etant donné que le niveau de virulence est variable d'une race à une autre et que les variétés de froment possèdent des résistances spécifiques à une gamme réduite de races, la rouille brune engendre des problèmes partout sur le globe (Huerta-Espino et al., 2011 ; Bolton et al., 2008).

Les pertes de rendements liés à ce champignon sont généralement moins importantes que celle de la rouille jaune. Néanmoins, comme la maladie est observée dans toutes les régions où du blé est cultivé, elle n'en reste pas moins une maladie dommageable pour cette culture. (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017).

La sévérité des pertes occasionnées dépend de la force de l'attaque. Les baisses de rendement peuvent varier entre 5 et 40% en général (Livre Blanc Céréales : Rouille brune, 2017 ; Kolmer, 1996 ; Azzimonti, 2013). Toutefois, les pertes peuvent atteindre 50% si des stades plus précoces ont été atteints par la maladie (Bolton et al., 2008). En règle générale, si la dernière feuille est atteinte à environ 60-70%, la chute de rendement se situe approximativement à 30% (Huerta-Espino et al., 2011). Ces pertes de rendement relatent une diminution du nombre de grains par épi ainsi qu'une baisse du poids des grains.

7.7. Annexe 7

B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
B	2463 8 B 2463	2464 19 B 2464	2465 21 B 2465	2466 49 C 2466	2467 81 B 2467	2468 8 C 2468	2469 7 C 2469	2470 49 A 2470	2471 41 B 2471	2472 81 A 2472	2473 21 C 2473	2474 81 A 2474	2475 70 C 2475	2476 8 B 2476	2477 49 B 2477	2478 41 C 2478	2479 7 B 2479	2480 32 B 2480	2481 33 A 2481	2482 19 B 2482	B	
B	2363 33 B	2364 32 C	2365 41 C	2366 70 C	2367 33 A	2368 81 C	2369 21 C	2370 19 C	2371 70 B	2372 49 B	2373 7 C	2374 41 A	2375 33 C	2376 32 A	2377 21 A	2378 33 B	2379 19 A	2380 81 C	2381 49 C	2382 70 A	B	
B	2263 7 B	2264 32 B	2265 8 A	2266 7 A	2267 19 A	2268 33 C	2269 32 A	2270 70 A	2271 41 A	2272 21 A	2273 8 A	2274 49 A	2275 19 C	2276 41 B	2277 8 C	2278 70 B	2279 81 B	2280 7 A	2281 32 C	2282 21 B	B	
B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
B	2063 32 C	2064 41 A	2065 49 C	2066 21 A	2067 81 A	2068 8 B	2069 70 C	2070 81 C	2071 19 A	2072 7 A	2000 33 C	2000 7 A	2000 21 B	2000 49 B	2000 19 C	2000 8 A	2000 70 B	2000 21 C	2000 81 C	2000 32 A	B	
B	1963 19 B	1964 33 A	1965 7 C	1966 49 A	1967 70 B	1968 7 B	1969 41 C	1970 32 A	1971 33 B	1972 21 B	1900 8 C	1900 32 B	1900 81 B	1900 33 B	1900 7 C	1900 49 C	1900 41 B	1900 19 A	1900 70 C	1900 41 C	B	
B	1863 33 C	1864 41 B	1865 21 C	1866 8 A	1867 32 B	1868 19 C	1869 8 C	1870 49 B	1871 70 A	1872 81 B	1800 49 A	1800 70 A	1800 19 B	1800 41 A	1800 21 A	1800 33 A	1800 32 C	1800 81 A	1800 8 B	1800 7 B	B	
B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
B	1663 49 A	1664 33 B	1665 7 A	1666 81 B	1667 8 B	1668 41 C	1669 19 A	1670 7 B	1671 49 B	1672 21 A	1673 32 C	1674 21 A	1675 49 A	1676 33 C	1677 32 B	1678 19 B	1679 41 A	1680 8 A	1681 70 A	1682 8 C	B	
B	1563 41 A	1564 32 B	1565 33 C	1566 8 C	1567 70 C	1568 21 B	1569 81 C	1570 8 A	1571 19 C	1572 70 B	1573 7 B	1574 49 B	1575 19 A	1576 81 B	1577 21 C	1578 19 C	1579 32 A	1580 70 C	1581 7 C	1582 81 A	B	
B	1463 70 A	1464 81 A	1465 19 B	1466 21 C	1467 32 A	1468 7 C	1469 32 C	1470 33 A	1471 49 C	1472 41 B	1473 33 B	1474 81 C	1475 41 C	1476 8 B	1477 70 B	1478 7 A	1479 49 C	1480 21 B	1481 41 B	1482 33 A	B	
B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
B	Bof	septo	bof	RB	septo	Res.	RJ	RJ	Res.	RB	Bof	septo	RB	RB	bof	Res.	RJ	RJ	septo	Res.	B	
B	Bennington	KWS Kerrin	Ragnar	LG initial	RGT reform	imperator	amboise	WPB duran	Limabel	Kws salix	Bennington	RGT reform	Kws salix	LG initial	Ragnar	imperator	amboise	WPB duran	KWS Kerrin	Limabel	B	
B	1263 21 C	1264 7 C	1265 19 C	1266 70 C	1267 33 C	1268 41 C	1269 49 C	1270 81 C	1271 32 C	1272 8 C	1200 21 C	1200 33 C	1200 8 C	1200 70 C	1200 19 C	1200 41 C	1200 49 C	1200 81 C	1281 7 C	1282 32 C	B	
B	1172 21 B	1172 7 B	1172 19 B	1172 70 B	1172 33 B	1172 41 B	1172 49 B	1172 81 B	1172 32 B	1172 8 B	1100 21 B	1100 33 B	1100 8 B	1100 70 B	1100 19 B	1100 41 B	1100 49 B	1100 81 B	1100 7 B	1100 32 B	B	
B	1063 21 A	1064 7 A	1065 19 A	1066 70 A	1067 33 A	1068 41 A	1069 49 A	1070 81 A	1071 32 A	1072 8 A	1000 21 A	1000 33 A	1000 8 A	1000 70 A	1000 19 A	1000 41 A	1000 49 A	1000 81 A	1000 7 A	1000 32 A	B	
B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B

Figure 38 : Répartition des variétés et traitements fongicides sur l'ensemble des blocs pour les deux modalités de date de semis.

7.8. Annexe 8

Stade principal 0	Germination, levée
0	Semence sèche (caryope sec)
1	Début de l'imbibition de la graine
3	Imbibition de la graine
5	La radicule sort de la graine
6	Élongation de la radicule, apparition des poils absorbants et développement des racines secondaire
7	Le coléoptile sort de la graine
9	Levée : le coléoptile perce la surface du sol
Stade principal 1	Développement des feuilles
10	La première feuille sort du coléoptile
11	Première feuille étalée
12	2 feuilles étalées
1.	Et ainsi de suite
19	9 ou davantage de feuilles étalées
Stade principal 2	Le tallage
20	Aucune talle visible
21	Début tallage : la première talle est visible
22	Deuxième talle visible
2.	Et ainsi de suite
29	Fin tallage
Stade principal 3	Élongation de la tige principale
30	Début montaison : pseudo-tiges et talles dressées, début d'élongation du premier entre-nœud, inflorescence au plus à 1 cm au-dessus du plateau de tallage
31	Le premier nœud est au plus à 1 cm au-dessus du plateau de tallage
32	Le deuxième nœud est au plus à 2 cm au-dessus du premier nœud
33	Le troisième nœud est au plus à 2 cm au-dessus du deuxième nœud
3.	Et ainsi de suite
37	La dernière feuille est juste visible, elle est encore enroulée sur elle-même
39	Le limbe de la dernière feuille est entièrement étalé, la ligule est visible
Stade principal 4	Gonflement de l'épi ou de la panicule, montaison
41	Début gonflement : élongation de la gaine foliaire de la dernière feuille
43	La gaine foliaire de la dernière feuille est visiblement gonflée
45	Gonflement maximal de la gaine foliaire de la dernière feuille
46	La gaine foliaire de la dernière feuille s'ouvre
49	Les premières arrêtes (barbes) sont visibles (pour les variétés aristées)
Stade principal 5	Sortie de l'inflorescence ou épiaison

51	Début de l'épiaison : l'extrémité de l'inflorescence est sortie de la gaine, l'épillet supérieur est visible
52	20 % de l'inflorescence est sortie
53	30 % de l'inflorescence est sortie
5.	Et ainsi de suite
59	Fin de l'épiaison, l'inflorescence est complètement sortie de la gaine
Stade principal 6	Floraison, anthèse
61	Début floraison, les premières anthères sont visibles
65	Pleine floraison, 50 % des anthères sont sorties
69	Fin floraison, tous les épillets ont fleuri, quelques anthères desséchées peuvent subsister
Stade principal 7	Développement des graines
71	Stade aqueux : les premières graines ont atteint la moitié de leur taille finale
73	Début du stade laiteux
75	Stade mi laiteux : contenu de la graine laiteux, les graines ont atteint leur taille finale mais sont toujours vertes
77	Fin du stade laiteux
Stade principal 8	Maturation des graines
83	Début du stade pâteux
85	Stade pâteux mou : contenu de la graine tendre mais sec, une empreinte faite avec l'ongle est réversible
87	Stade pâteux dur : contenu de la graine dur, une empreinte faite avec l'ongle est irréversible
89	Maturation complète : le caryopse est dur et difficile à couper en deux avec l'ongle
Stade principal 9	Sénescence
92	Sur-maturité : le caryopse est très dur, ne peut pas être marqué à l'ongle
93	Des graines se détachent
97	La plante meurt et s'affaisse
99	Produit après récolte

Figure 39 : Echelle BBCH du blé (Syngenta, 2015)

7.9. Annexe 9

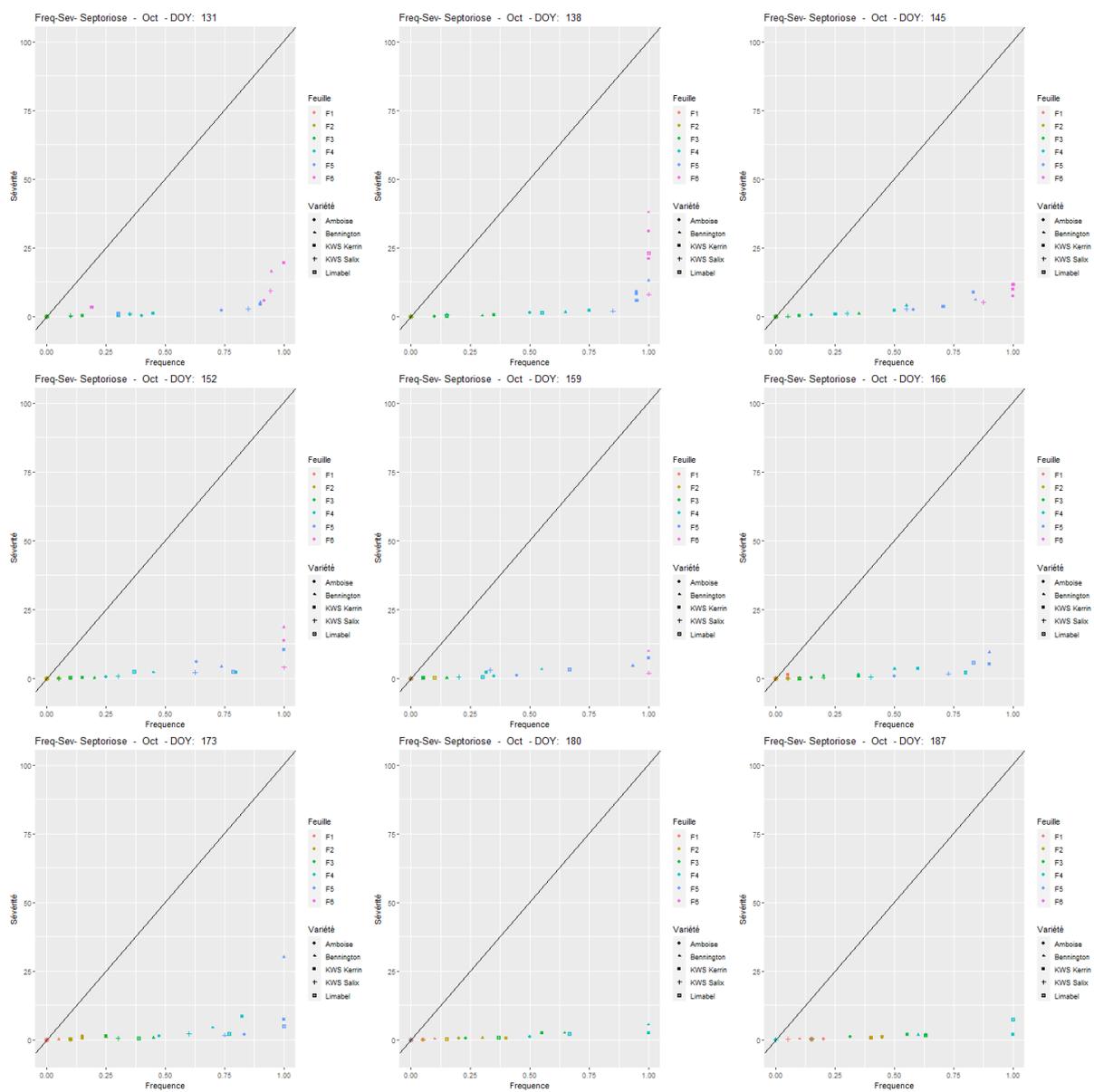


Figure 40 : Graphique de la sévérité en fonction de la fréquence de la septoriose pour le semis d'octobre

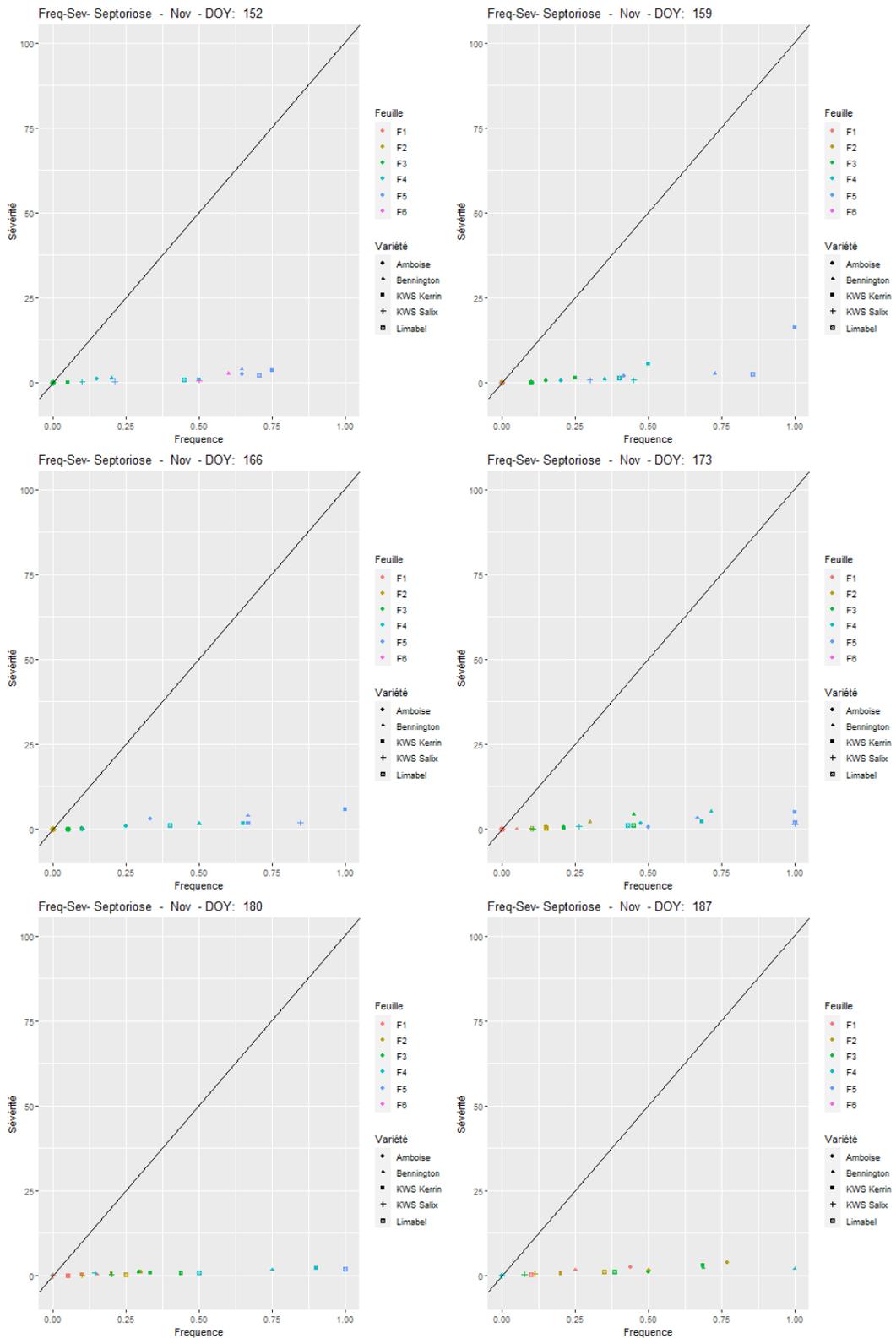


Figure 41 : Graphique de la sévérité en fonction de la fréquence de la septoriose pour le semis de novembre

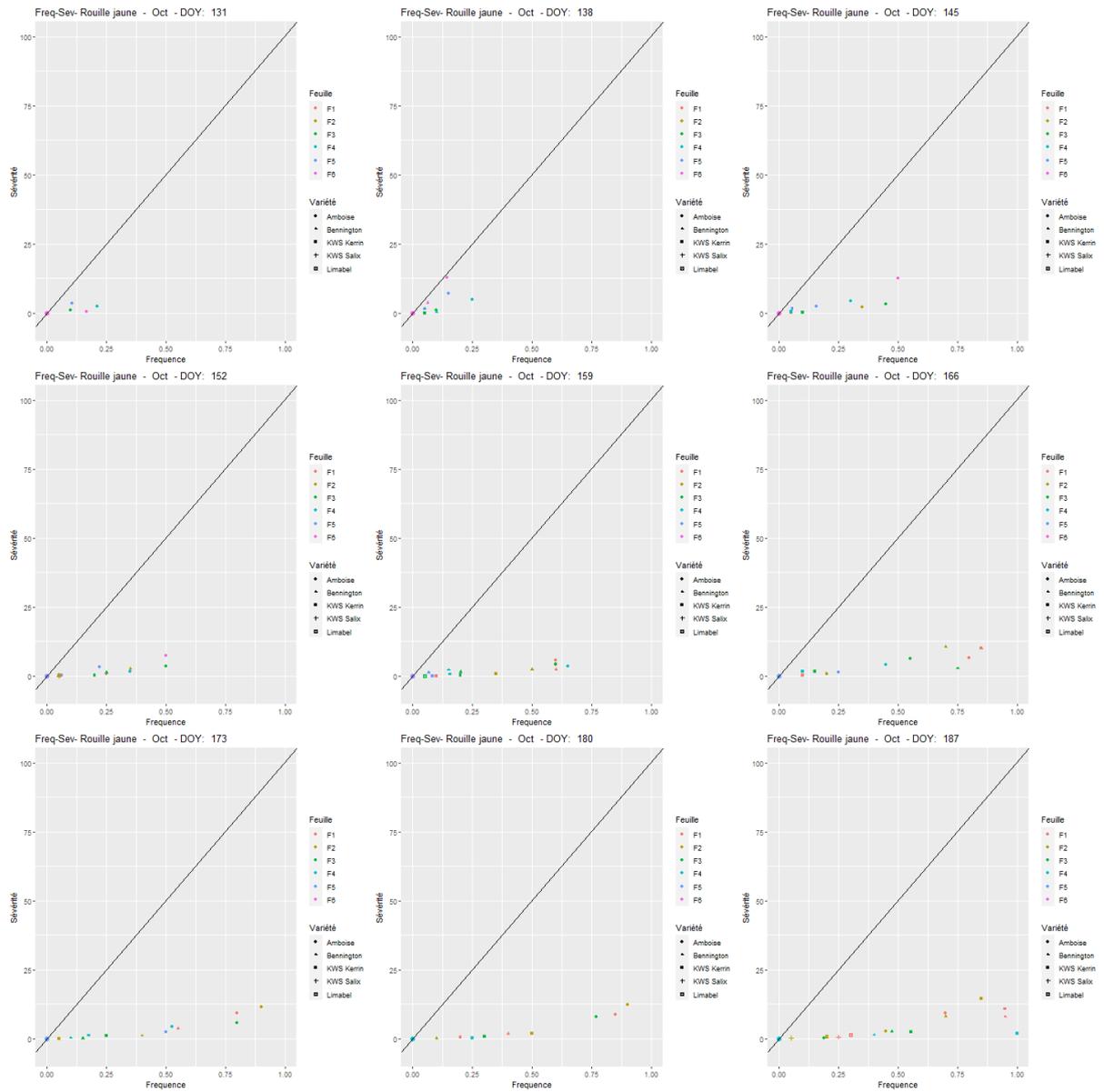


Figure 42 : Graphique de la sévérité en fonction de la fréquence de la rouille jaune pour le semis d'octobre

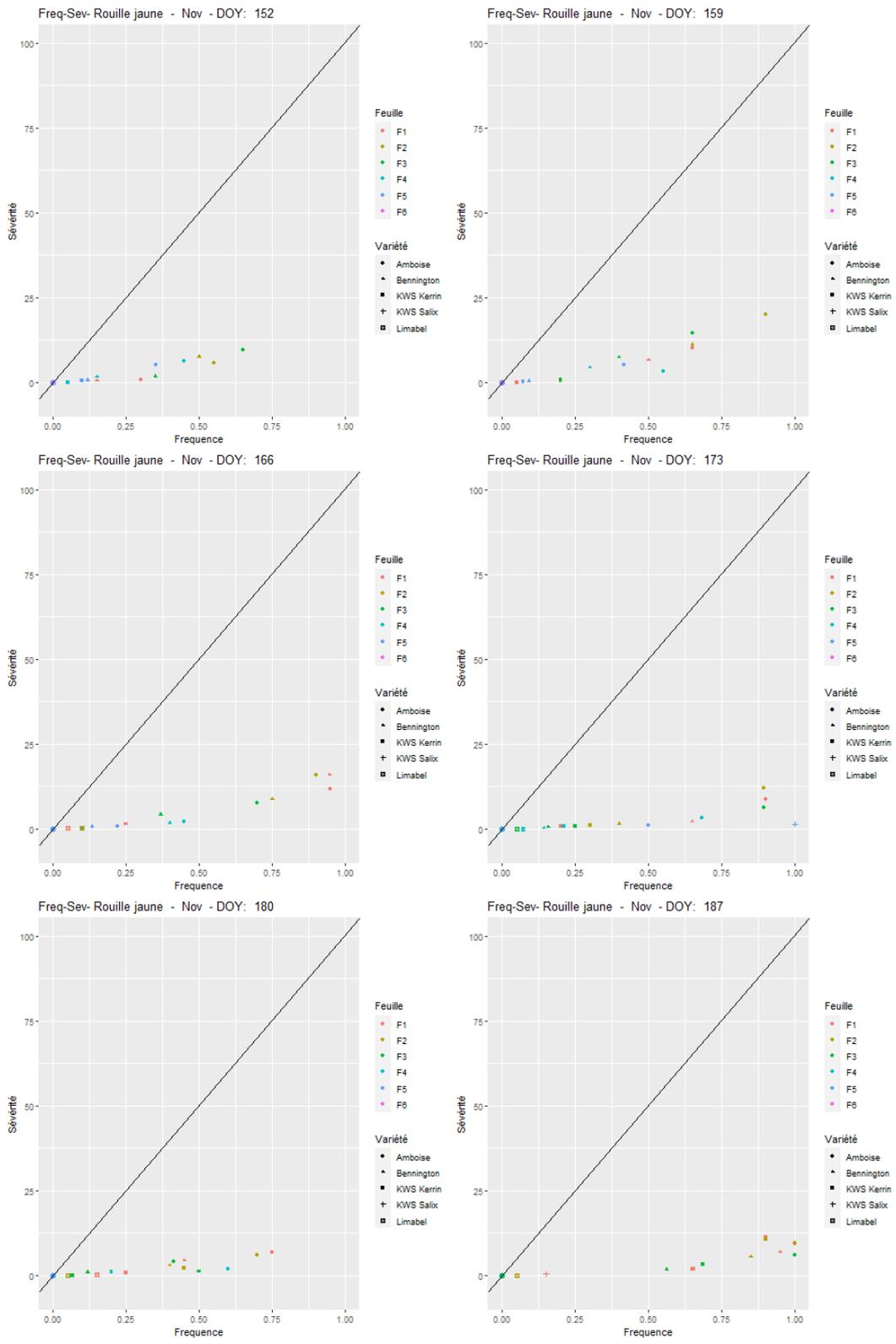


Figure 43 : Graphique de la sévérité en fonction de la fréquence de la rouille jaune pour le semis de novembre

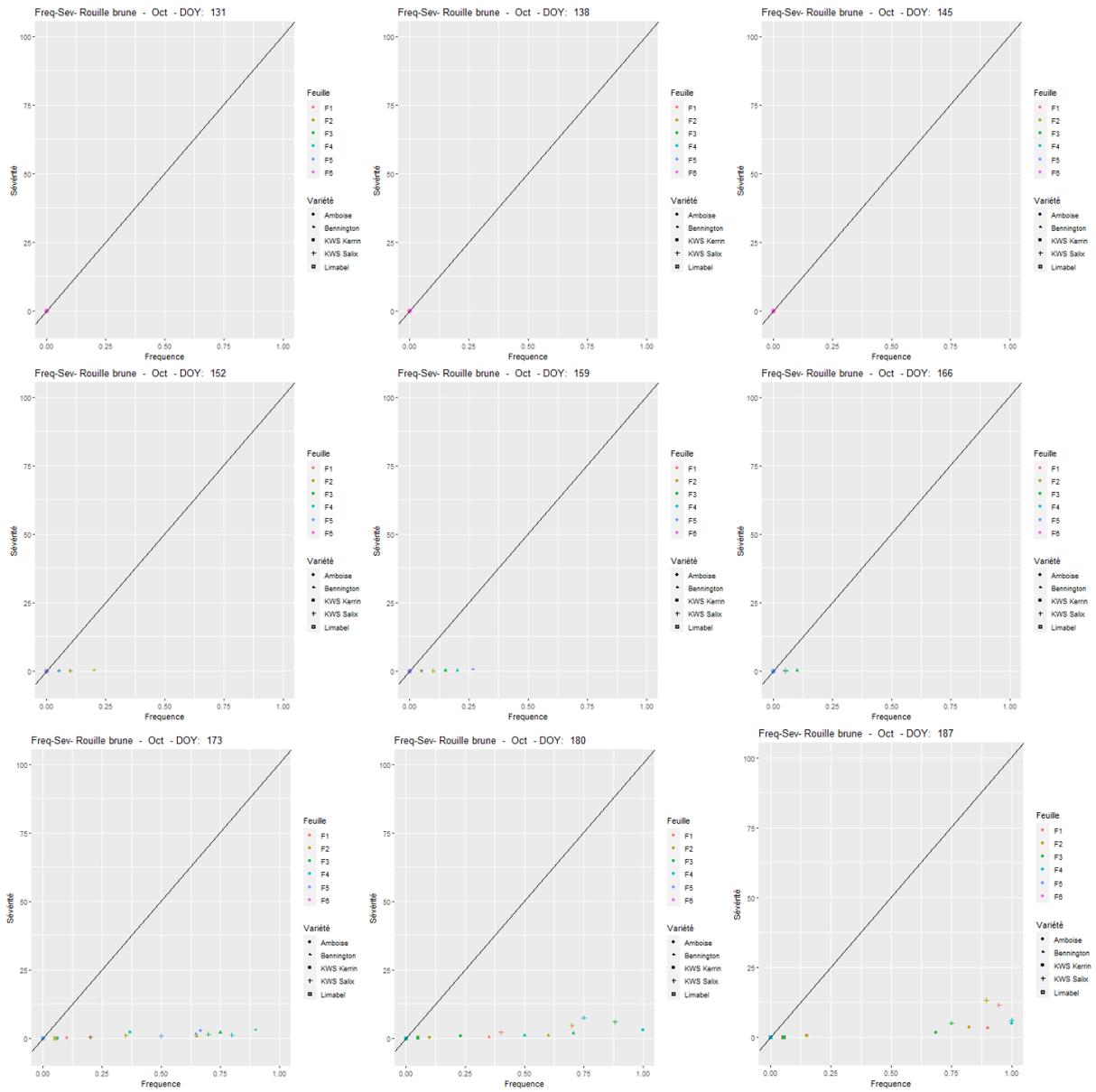


Figure 44 : Graphique de la sévérité en fonction de la fréquence de la rouille brune pour le semis d'octobre

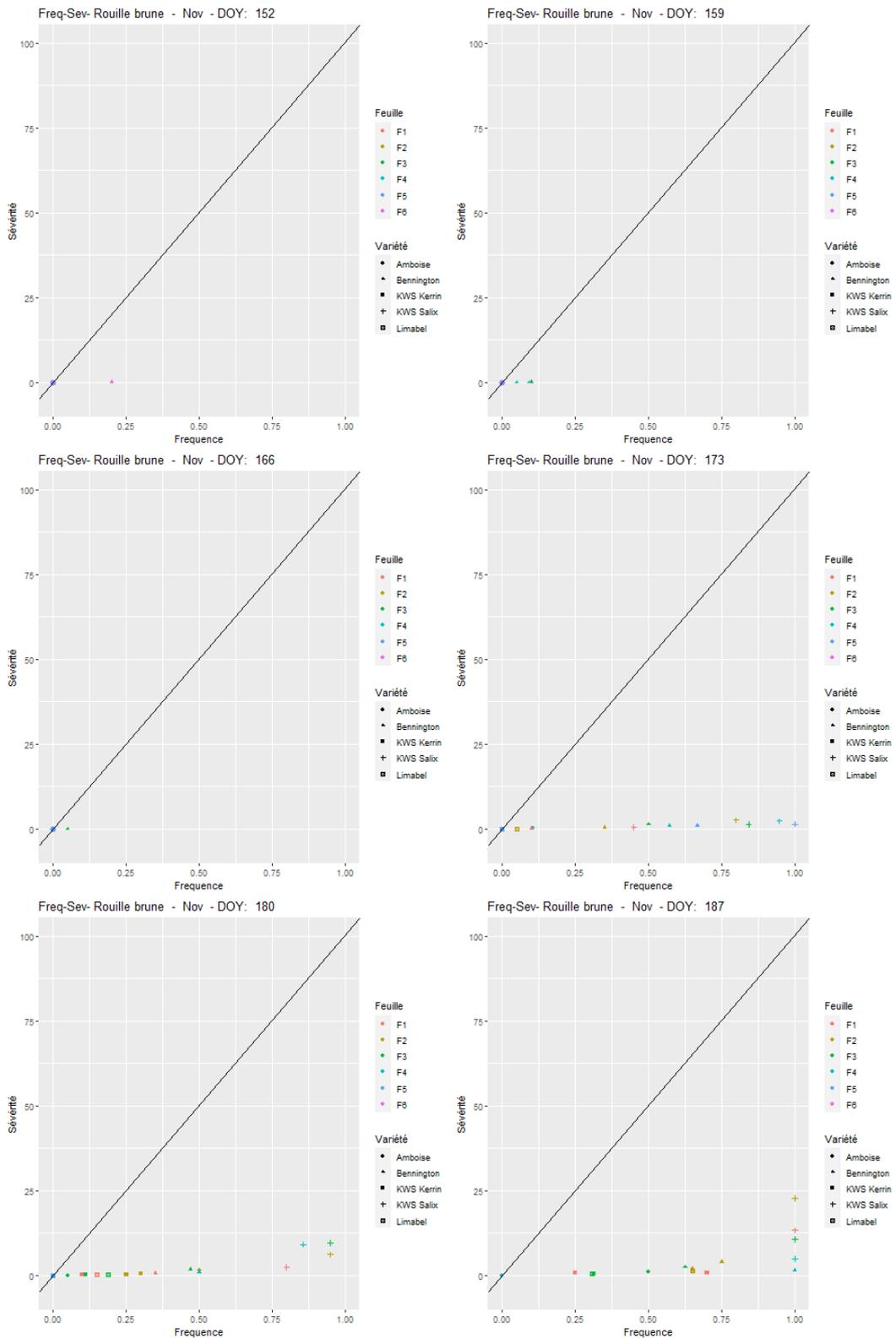


Figure 45 : Graphique de la sévérité en fonction de la fréquence de la rouille brune pour le semis de novembre

7.10. Annexe 10

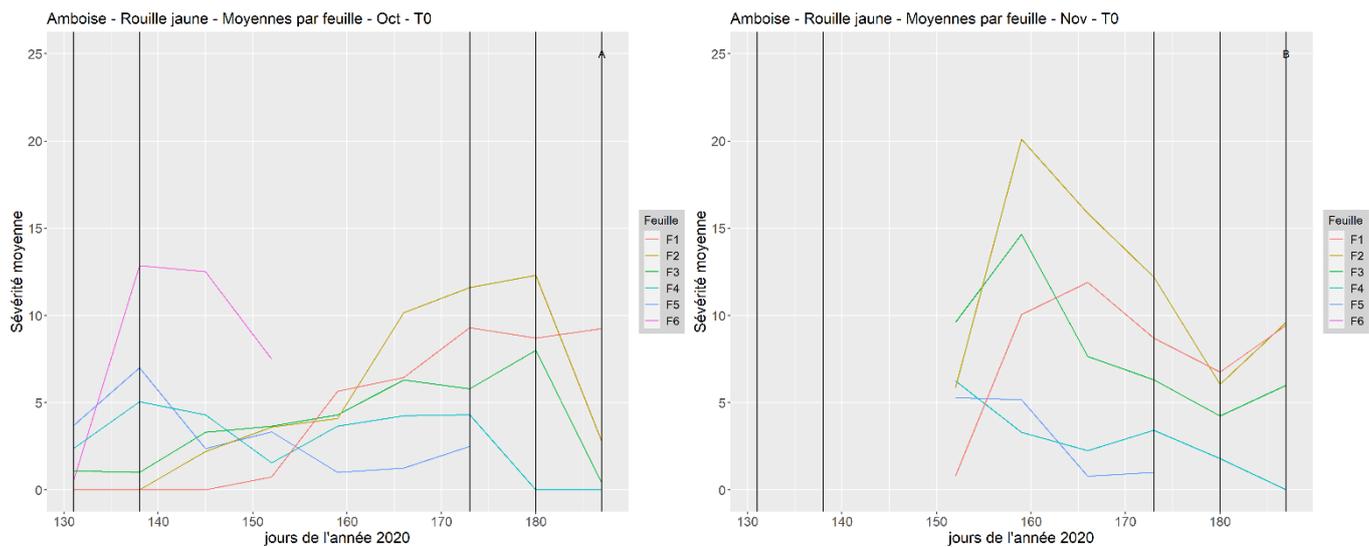


Figure 46: Sévérité moyenne et périodes de latence observées de la rouille jaune sur les étages foliaires de la variété Amboise en 2020 pour le semis d'octobre (A) et celui de novembre (B).

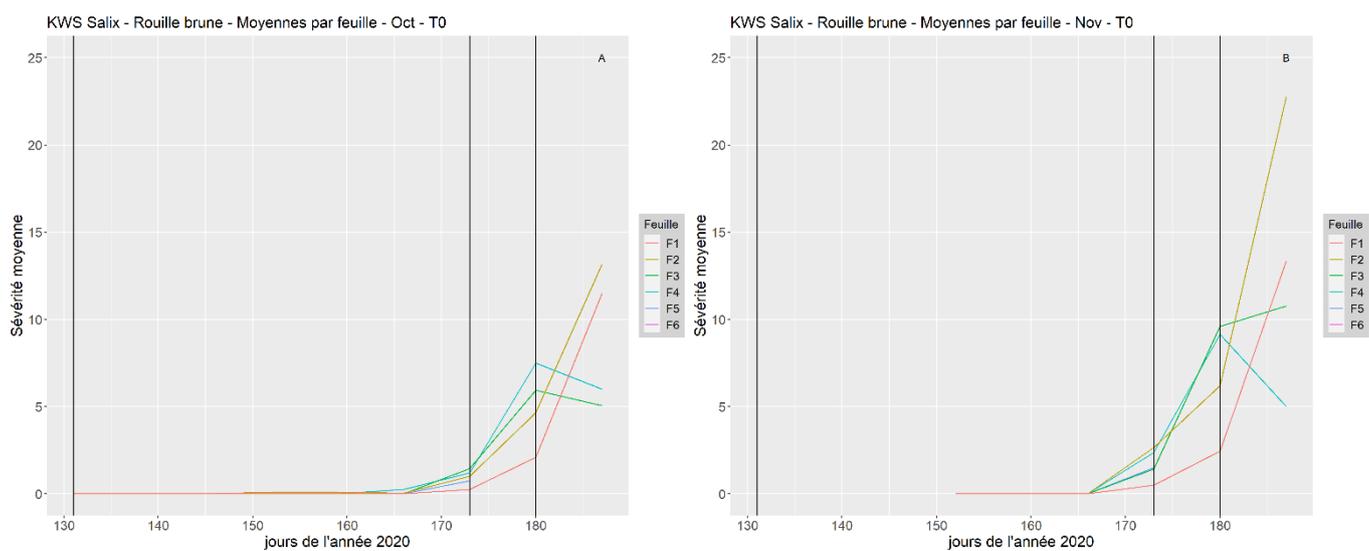


Figure 47: Sévérité moyenne et périodes de latence observées de la rouille brune sur les étages foliaires de la variété KWS Salix en 2020 pour le semis d'octobre (A) et celui de novembre (B).

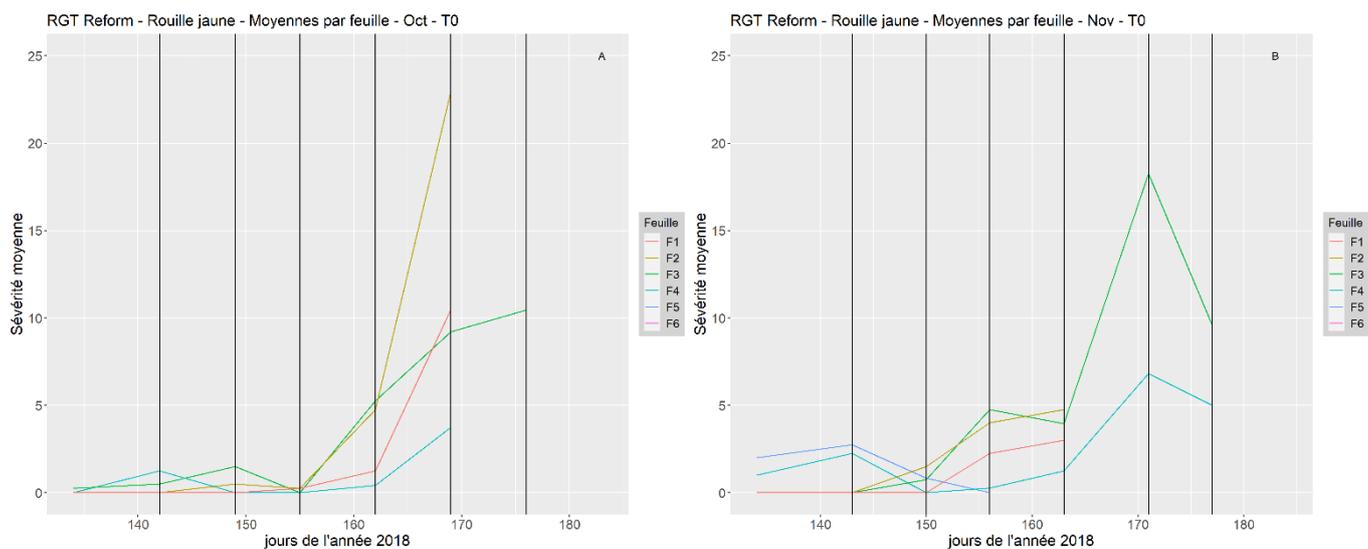


Figure 48 : Sévérité moyenne et périodes de latence observées de la rouille jaune sur les étages foliaires de la variété RGT Reform en 2018 pour le semis d'octobre (A) et celui de novembre (B).

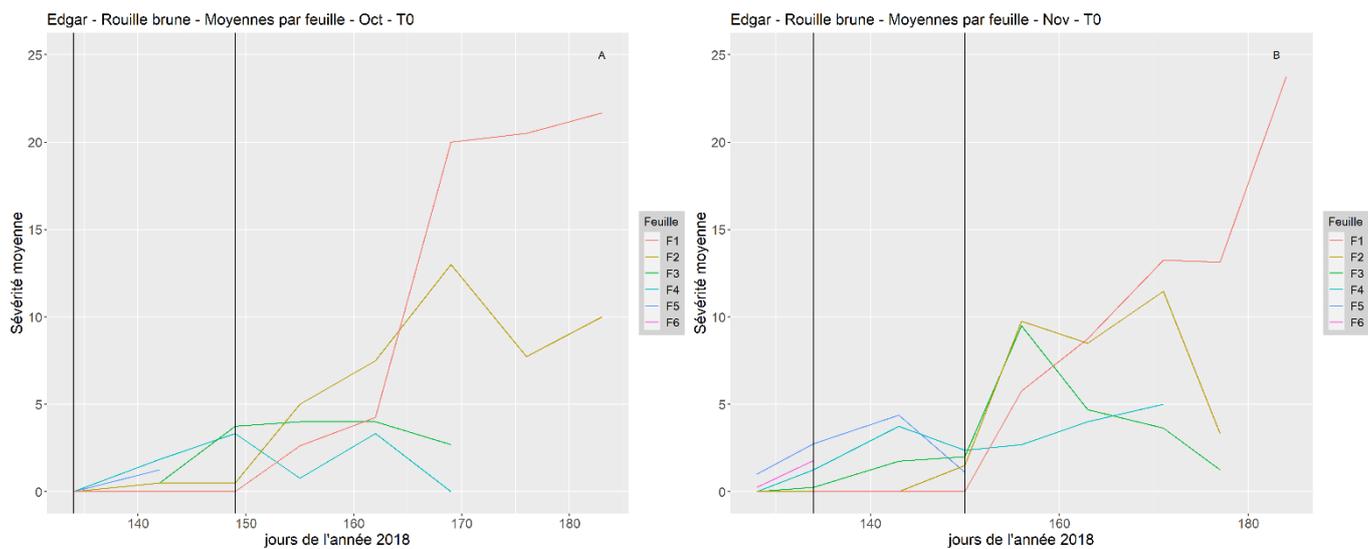


Figure 49: Sévérité moyenne et périodes de latence observées de la rouille brune sur les étages foliaires de la variété Edgar en 2018 pour le semis d'octobre (A) et celui de novembre (B).