



Mémoire de Fin d'Études

Master 2 Mention Biologie Végétale (BV)

Parcours : Gestion de la Santé des Plantes

Année universitaire 2022-2023

Evaluation de l'efficacité du biocontrôle par rapport aux fongicides dans la gestion des maladies fongiques : une étude des essais implantés par la Chambre d'agriculture des Pays de la Loire

Par : Eden CADUC

Soutenu à Angers le : 07/09/2023

Maître de stage : Alexandre GOURVENNEC

ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

Je, soussigné (e) Eden CADUC, déclare être pleinement conscient(e) que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiés sur toutes formes de support, y compris l'internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce rapport ou mémoire.

Signature :



Remerciement

Dans un premier temps, je souhaiterais remercier Alexandre Gourvennec qui a été mon tuteur d'apprentissage pendant toute la durée de mon contrat. Il m'a permis de découvrir son métier de conseiller agronome et m'a formé aux suivis des expérimentations menées par la Chambre du pays de la Loire. Au travers de ses conseils et de sa pédagogie j'ai pu développer en compétences et en connaissances. J'ai eu la chance de voir des expérimentations de la préparation des sachets de semences à l'analyse des récoltes.

Je souhaiterais également remercier Pierre Mulliez, mon chef de service, qui m'a donné la chance de pouvoir travailler sur un projet en début d'apprentissage et qui a continué à me suivre lors de toute la durée de mon contrat professionnel.

Une des raisons qui a fait la richesse de mon contrat a été la découverte d'autres métiers et d'autres activités réalisées par Chambre grâce aux autres conseillers qui font partie de la direction du végétal. Ils ont pris de leur temps pour me former et ont eu la pédagogie de m'expliquer en quoi consistait leur métier. C'est notamment grâce à ces moments que j'ai pu assimiler comment prodiguer de bons conseils en stratégie phytosanitaire. A cet égard je vous remercie tous sincèrement.

Ces remerciements ne sauraient être complet sans mention à l'équipe pédagogique de l'université d'Angers et plus encore à ma tutrice d'apprentissage, Nathalie Leduc. Ils m'ont permis d'acquérir les connaissances nécessaires à la réalisation de cet apprentissage et m'ont assisté dans mes choix, et dans mes travaux rédactionnels tout au long de mon année scolaire.

Enfin, je voudrais remercier les personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire en m'aidant sur la partie rédactionnelle. Je pense à mes parents, à mes amis ainsi qu'à mon conjoint qui m'ont corrigé pendant l'élaboration de ce mémoire.

Table des matières

<u>INTRODUCTION</u>	11
1. Contexte général de l'étude	13
1.1. Le marché du blé tendre	13
1.2. Expérimentation au champ	3
2. Synthèse bibliographique	4
2.1. Les maladies fongiques sur blé	4
2.1.1. La rouille du blé	4
2.1.2. Les maladies de la tâche, la septoriose	5
2.1.3. Fusariose de l'épi	6
2.2. Comparaison traitements biocontrôle et fongicide	7
3. Démarche	8
<u>MATERIELS ET METHODES</u>	9
1. Matériels biologiques	9
2. Traitements fongiques	9
3. Analyses de l'expérimentation au champ	10
3.1. Paramètres morpho-physiologique	10
3.2. Traitements des données	11
<u>RESULTATS</u>	12
1. Calcul des IFT par traitements	12
2. Évaluation des rendements en fonction des modalités	13
2.1. Évaluation de l'intensité et de la fréquence de la septoriose	13
2.2. Évaluation des rendements par rapport aux modalités.....	14
3. Comparaison Biocontrôle et conventionnel	15
3.1. Comparaison en fonction des rendements	16
3.2. Comparaison en fonction de l'intensité et de la fréquence des maladies.....	17
4. Étude économique en fonction des modalités	18
<u>DISCUSSION</u>	21
1. Le rendement influencé par le traitement et un effet bloc	21
2. La comparaison biocontrôle/conventionnelle	23
3. Les perspectives de ce travail	25
<u>BIBLIOGRAPHIE & SITOGRAPHIE</u>	26

ANNEXES.....

1.	Annexe I	1
2.	Annexe II	2
3.	Annexe III.....	3

Glossaire

Ascomycètes : Sous-classe de champignon (environ 15 000 espèces) dont les spores sont contenues dans des asques comme truffe, morille, pezizes, moisissures ...

Basidiomycètes : Sous classe des mycètes dont les spores sont portées sur des basides

Cryptogamiques : synonyme de fongique

Déchaumage : Travail superficiel du sol réalisé aussitôt après la moisson pour le nettoyer, faire germer les graines des plantes adventices et enterrer partiellement les chaumes

Kairomones : Substance chimique, qui, émise à dose infime par un animal dans le milieu extérieur, provoque des réponses interspécifiques

PMG : poids de mille grains

Phéromones : Substance chimique, qui, émise à dose infime par un animal dans le milieu extérieur, provoque des réponses intraspécifiques (signaux pour la reproduction).

QTL : un locus de caractères quantitatifs plus ou moins grand d'ADN

Terpéniques : composés synthétiques obtenus par polymérisation ou polycondensation des terpènes ou de leurs dérivés.

Liste des abréviations

ANOVA : (analyse of covariance) analyse de covariance

CAPDL : Chambre d'Agriculture des Pays de la Loire

CSP : Conseil stratégique phytosanitaire

CNAB : le comité national de l'agriculture biologique

DEF : la dernière feuille établée

DON : la désoxynivalénol, enzyme produite par *Fusarium*

EPI : équipement de protection individuel

FAO : l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

FDK : (*Fusarium*-damaged kernels) pourcentage de grains endommagés par le *Fusarium*

QTL : (Quantitative Trait Loci) locus de caractères quantitatifs

INAO : l'Institut National de l'origine et de la qualité

PMG : poids de mille grains

SAR : (Systemic acquired resistance) résistance systémique acquise ou immunité de la plante

Liste des tableaux

Tableau I. Tableau comparatif variétal après simulation sur outil choix variétés d'Arvalis (Arvalis, 2023).....	1
Tableau II. Composition des traitements et fréquences d'administration associées sur l'essai fongicide 2022/2023 (<i>DFE : dernière feuille étalée</i>) (CAPDL, 2023).	3
Tableau III. Produits de biocontrôle utilisés pour les maladies fongiques (CAPDL,2023).....	3
Tableau IV. Moyenne des résultats des 11 sites d'expérimentations sur la comparaison des traitements fongiques. (Milus et al., 2001)	8
Tableau V. Comparaison des fongicides et lutte biologique en Arkansas (Milus et al., 2001).....	8
Tableau VI. Caractéristiques des variétés de l'essai fongicide 2022/2023 (Arvalis 2023)	9
Tableau VII. Composition des traitements et fréquence effectués sur l'essai fongicide 2022/2023 (<i>DFE : dernière feuille étalée</i>) (CAPDL, 2023).	10
Tableau VIII. Résultats de l'analyse de variance (CAPDL, 2023)	11
Tableau IX.les résultats sur la comparaison des blocs lors du test de Tukey (CAPDL, 2023).....	11
Tableau X. IFT calculé en fonction des traitements et fréquence effectués sur l'essai fongicide 2022/2023(<i>DFE : dernière feuille étalée</i>) (CAPDL, 2023).	12
Tableau XI . Tableau récapitulatif de l'analyse statistique des données de l'essai fongicide 2022/2023 (CAPDL, 2023)	14
Tableau XII. Caractéristiques des variétés de l'essai fongicide 2021/2022 (Arvalis 2023).....	16
Tableau XIII. Composition des traitements et fréquence effectués sur l'essai fongicide 2021/2022 (<i>DFE : dernière feuille étalée</i>) (CAPDL, 2022).	16
Tableau XIV. Tableaux récapitulatifs de l'analyse statistique des données de l'essai fongicide 2021/2022 (CAPDL, 2022).....	17
Tableau XV. Tableau comparatif des coûts des traitements et des coûts réels (CAPDL,2023) ...	19

Table des figures

Figure 1. (A) Évolution de la production de blé tendre (quantité de blé produit) en France entre 2010 et 2022 ; (B) Évolution des surfaces cultivées de blé tendre de 2010 à 2022 (Agreste, 2010-2022).....	1
Figure 2. Evolution des rendements de blé tendre entre 2010 et 2022 (Agreste,2010-2022).....	1
Figure 3. Cartes des essais blé tendre en 2022 implantés par la CAPDL (recueil d'expérimentation, CAPDL 2022)	14
Figure 4. Stade du blé pendant son cycle de culture (spotifarm.fr, 2020)	3
Figure 5. Fonctionnement d'un champignon biotrophe (Guillemette, 2021)	4
Figure 6. Symptômes des maladies de la rouille causées par <i>Puccinia graminis</i> f. sp. <i>tritici</i> (A), <i>Puccinia striiformis</i> f. sp. <i>tritici</i> (B) and <i>Puccinia triticina</i> (C) (Figueroa <i>et al.</i> , 2018).....	4
Figure 7. Symptômes des maladies foliaires causés par <i>Septoria tritici blotch</i> (A) <i>Tan spot</i> (B) et <i>Septoria nodorum blotch</i> (C) (Figueroa <i>et al.</i> , 2018, Crédit photo McDonald et Hill, 2017).	5
Figure 8. Symptômes de brûlure sur l'épi : premier signe d'infection sur l'épi partiellement décoloré (A) infection avancée avec une décoloration de l'épi et un blanchissement (B) (Figueroa <i>et al.</i> , 2018).....	6
Figure 9. Catégories des produits de biocontrôle (Philagro.fr, 2022)	7
Figure 10. <i>Coccinella septempunctata</i> se nourrissant de puceron (Crédit photo Chaubet, INRAE, 2021).....	7
Figure 11. Plan de l'essai fongicide 2022/2023, implantée à Thorigné (CAPDL).....	9
Figure 12. Stade foliaire du blé (bulletin de la santé du végétal, ARVALIS, 2020)	10
Figure 13. Graphique des résidus à la suite de l'ANOVA (CAPDL,2023).....	11
Figure 14. Intensité et fréquence de la septoriose en fonction des modalités sur l'essai fongicide 2022/2023 (CAPDL, 2023) (<i>F1 : dernière feuille étalée, F2 : avant dernière feuille étalée</i>).....	13
Figure 15. (A)Intensité de la septoriose pour la variété Lg Absalon et (B) Intensité de la septoriose pour la variété Rgt Sacramento en fonction des modalités sur l'essai 2021/2022 (CAPDL, 2022)	18
Figure 16. Répartition des activités des exploitations en Maine et Loire e 2020 (Agreste, 2020)19	19
Figure 17. Plan de l'essai fongicide 2022/2023 (CAPDL,2023)	21
Figure 18. Précipitation en 2022 et 2023 à Thorigné (49220) (L 'internaute/météo France).....	22
Figure 19. Simulation des coût de production pour un blé tendre à 70 q/ha (.....	24
Figure 20. Impact de l'application d'engrais azotés sur le rendement en grains et l'azote total absorbé par la culture à maturité. (Barraclough <i>et al.</i> ,2010).....	25
Figure 21. Cartes des zones vulnérables aux pollutions par les nitrates d'origine agricole (vaucluse.gouv.fr, 2017).....	25

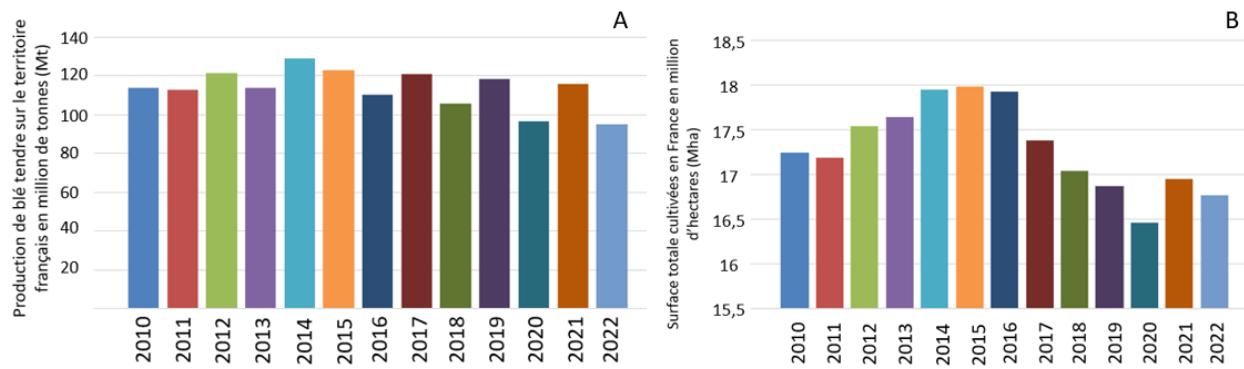


Figure 1. (A) Évolution de la production de blé tendre (quantité de blé produit) en France entre 2010 et 2022 ; (B) Évolution des surfaces cultivées de blé tendre de 2010 à 2022 (Agreste, 2010-2022)

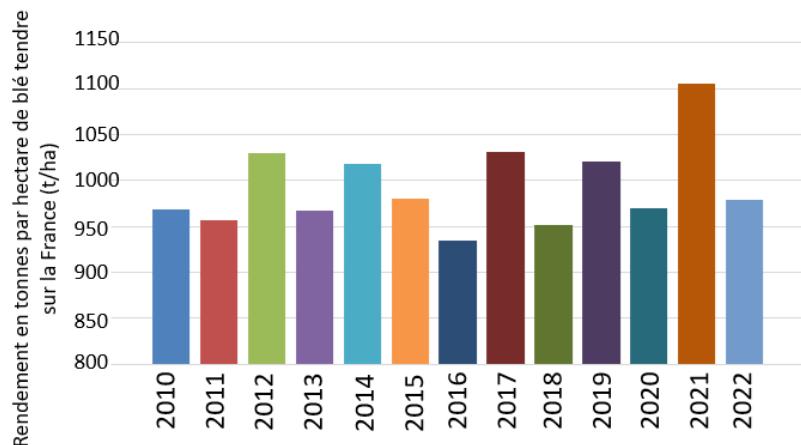


Tableau I. Tableau comparatif variétal après simulation sur outil choix variétés d'Arvalis (Arvalis, 2023)

Désélectionner	Variété	Critères physio	Tolérances et résistances								Critères qualité			Productivité
			Verse ①	Piétin versa ①	Rouille jaune ①	Septoriose ①	Rouille brune ①	Fusariose (DW) ①	Chlortoluron ①	Classe qualité ①	Poids spécifique ①	Protéines ①	Rendement ①	
AREZZO	Lignée	7	6	2	7	6	3	4.5	T	BPS	8	5	97	
CAMPESINO	Lignée	6.5	6	6	4	6.5	8	6	S	BAU	5	5	106	
DESCARTES	Lignée	7	6.5	5	8	5.5	5	5.5	S	BPS	6	5	100	
INTENSITY	Lignée	6.5	6.5	6	8	7	6		S	BPS	6	8	107	
LG ABSALON	Lignée	6.5	5.5	6	6	7.5	7	5	T	BP	7	5	99	
NEMO	Lignée	6.5	6.5	2	3	5.5	4	4	T	BPS/BP	7	5	104	
RGT SACRAMENTO	Lignée	6.5	6.5	2	4	5.5	7	4.5	S	BPS	7	6	106	

Paramètre : 49000, type de sol argilo calcaire moyen et date de semis entre 21 et 30 septembre), notation maladie 1 sensible/9 résistante, rendement : % de la moyenne

Introduction

1. Contexte général de l'étude

1.1. Le marché du blé tendre

L'agriculture française constitue une part importante de la production et de l'économie nationale. En effet, la France possède 55 millions d'hectares sur le territoire métropolitain dont 28 millions d'hectares sont aujourd'hui occupés par des activités agricoles (agriculture.gouv.fr). Le blé tendre est la principale céréale produite en France avec une surface d'environ 16 millions d'hectares (Agreste, 2022), faisant de la France le 1er pays producteur et exportateur de blé tendre de l'Union européenne. Ce statut lui incombe une production constante et croissante. Entre 2010 et 2022, les surfaces de production diminuent passant de 17,2 Mha en 2010 à 16,9 Mha en 2022 (B,figure 1). Néanmoins, la production se maintient et les rendements augmentent chaque année (figure 2), cela peut s'expliquer par l'utilisation de variétés qui produisent plus de grains, on parle alors de variétés élites. Cependant, l'utilisation des mêmes variétés de blé élites va de pair avec la réduction de la diversité génétique favorisant maladies et épidémies. La dissémination des pathogènes est facilitée si la même variété est implantée la rendant alors sensible. Cette sensibilité en cas de maladie peut non seulement affecter la production de blé mais plus encore, mener à d'importantes pertes de rendement. Beaucoup d'autres facteurs peuvent influencer le rendement comme les conditions environnementales telles que la sécheresse ou les tempêtes. Les maladies causées par les champignons sont responsables de 15% à 20% des pertes de rendement (Figueroa *et al.*, 2018). Les maladies fongiques ou maladies cryptogamiques* sont causées par des champignons ou mycètes parasites vecteurs de maladies telles que la rouille, la septoriose ou la fusariose (cf partie 2). Ces maladies peuvent être traitées par des produits phytosanitaires de la famille des fongicides qui ciblent les champignons. Ces produits phytosanitaires aussi connus sous l'appellation de pesticides, de produits conventionnels ou de produits phytopharmaceutiques (PPP) sont des préparations destinées à protéger les végétaux et les produits de culture (anses.fr). Ces préparations résultent de l'assemblage de substances actives et d'adjungants. Les substances actives sont des substances chimiques responsables des propriétés du produit phytosanitaire ou principe actif. Les adjungants sont un ensemble de produits utilisés pour sécuriser, faciliter l'utilisation et renforcer l'action des substances actives (cf Baujard, ANSES). Ces PPP sont néanmoins soumis à des réglementations importantes notamment des évaluations pour quantifier les risques environnementaux et sanitaires liés à leurs utilisations (cf partie 2).

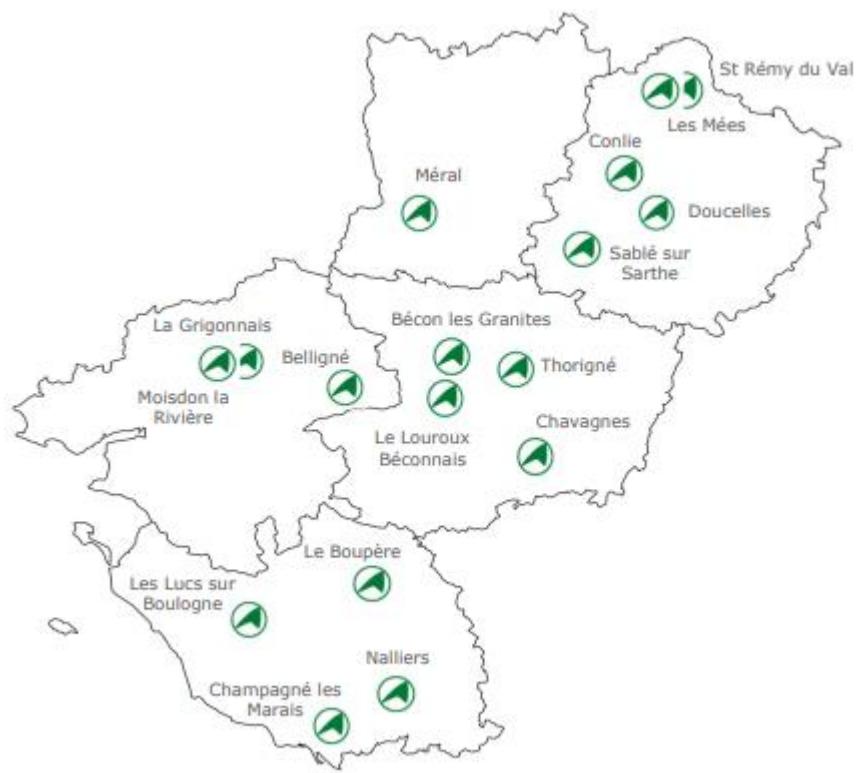


Figure 3. Cartes des essais blé tendre en 2022 implantés par la CAPDL (recueil d'expérimentation, CAPDL 2022)

Cependant, la France a depuis quelques années pour objectif de diminuer et de bannir le plus de produits phytosanitaires à travers le plan ECOPHYTO II+. Ce dernier vise à réduire les usages de produits phytopharmaceutiques de 50 % d'ici 2025. Ainsi, des méthodes alternatives aux produits phytopharmaceutiques conventionnels peuvent être utilisées pour lutter contre les maladies. Ces méthodes non soumises à la politique de réduction du plan ECOPHYTO, réunies sous le terme « biocontrôle », s'appuient sur les mécanismes et interactions existant dans la nature. Par exemple, Heliosoufre S® est un fongicide de biocontrôle à base de soufre et de dérivés terpéniques. Il est efficace dans la lutte contre la septoriose, le soufre étant capable de freiner la sporulation du champignon. Si le champignon ne sporule pas à temps, il ne peut pas se répandre davantage et accroître la maladie (helioterpen.fr). Ces méthodes alternatives sont parfois utilisées seules mais le plus souvent en association avec d'autres solutions plus anciennes (surveillance, rotation des cultures, travail mécanique...) ou au contraire plus innovantes comme avec la sélection génétique ou l'aide d'outils d'aide à la décision (logiciel) (agriculture.gouv.fr). Cependant, la meilleure façon d'évaluer leurs effets est de les comparer à des traitements fongiques conventionnels connus.

Dans cette optique, la Chambre d'agriculture des Pays de la Loire (CAPDL) implante chaque année une vingtaine d'essais sur blé (figure 3). Ces essais visent à tester de nouvelles pratiques culturales, de nouvelles variétés. Ils permettent d'évaluer la faisabilité et l'efficacité de ces pratiques en fonction des conditions locales (climat, sol, etc.), ainsi que l'impact sur l'environnement et la qualité des productions agricoles. Les résultats de ces essais sont ensuite diffusés aux agriculteurs via des formations, des publications ou encore des journées techniques. Il faut rappeler que la Chambre est un organisme professionnel agricole qui représente les intérêts des agriculteurs de la région des Pays de la Loire. Ses missions sont de conseiller et d'accompagner les agriculteurs dans leur activité, de promouvoir le développement d'une agriculture durable et responsable, tout en défendant les intérêts de la profession. Ainsi, parmi les vingt essais implantés dans la région pour le blé tendre, un en Maine et Loire est centré sur les fongicides. L'essai fongicide est implanté chez un agriculteur volontaire qui a eu des problèmes de maladie sur sa parcelle l'année précédente.

L'idée est de comparer différentes stratégies fongicides incluant des produits de biocontrôle et conventionnels. L'objectif est d'observer les rendements, la qualité et le gain économique de l'agriculteur en fonction du développement des maladies.

Tableau II. Composition des traitements et fréquences d'administration associées sur l'essai fongicide 2022/2023 (*DFE* : dernière feuille étalée) (CAPDL, 2023).

		T1			T2			T3		
		2 Nœuds			DFE			Floraison		
Fongi classique	1	TNT								
	2	MAYANDRA	0,25	l/ha	REVYSTAR XL	0,6	l/ha	PROSARO	0,4	l/ha
	3	AMISTAR	0,25	l/ha	REVYSTAR XL	0,6	l/ha			
	4	MAYANDRA	0,25	l/ha	REVYSTAR XL	0,6	l/ha			
	5	AMISTAR	0,25	l/ha	REVYSTAR XL	0,6	l/ha	PROSARO	0,4	l/ha
	6	JUVENTUS	0,55	l/ha	REVYSTAR XL	0,6	l/ha	FANDANGO S	0,7	l/ha
	7	AMISTAR	0,25	l/ha	REVYSTAR XL	0,6	l/ha			
	8				KARDIX	0,9	l/ha			
	9				LIBRAX	1	l/ha			
	10				ELATUS PLUS	0,5	l/ha			
Biocontrôle	11	QUESTAR	1	l/ha						
	12	PYGMALION	2	l/ha	PYGMALION	2	l/ha			
		HELIOSOUFRE S	3	l/ha	HELIOSOUFRE S	3	l/ha			
		PYGMALION	2	l/ha	PYGMALION	2	l/ha	ECHIQUIER	5,0	kg/ha
		HELIOSOUFRE S	3	l/ha	HELIOSOUFRE S	3	l/ha			

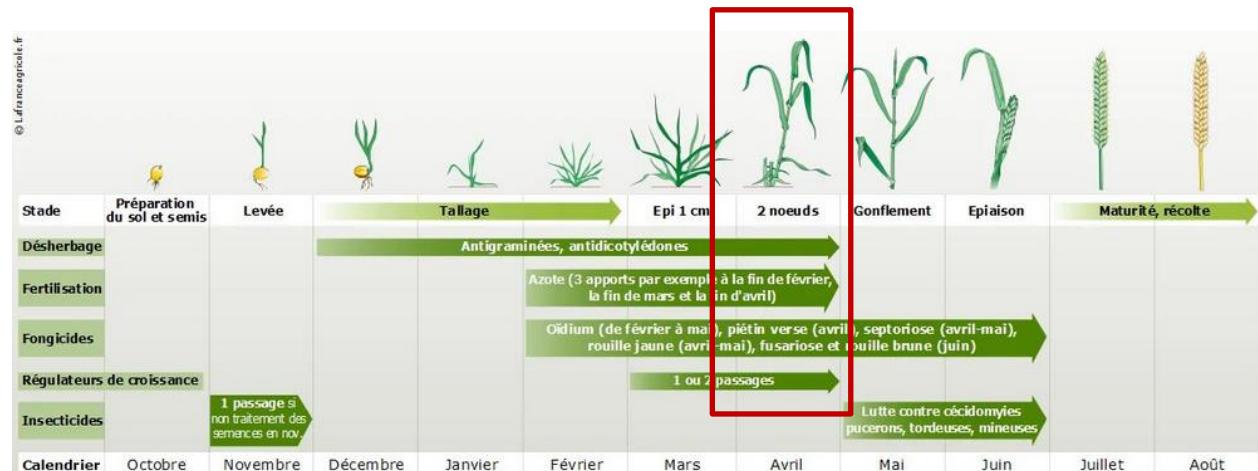


Figure 4. Stade du blé pendant son cycle de culture (spotifarm.fr, 2020)

Tableau III. Produits de biocontrôle utilisés pour les maladies fongiques (CAPDL,2023)

Maladie fongique	Produits de biocontrôle
Fusariose	Echiquier®
Septoriose	Heliosouffre®, Pygmalion®
Rouille	Biosoufre®

1.2. **Expérimentation au champ**

Les essais de la Chambre sont implantés chez des agriculteurs partenaires volontaires qui louent une partie de leur parcelle. Ces derniers doivent être sérieux et rigoureux, car il arrive qu'ils soient sollicités pour des traitements en fonction du choix de l'essai. Dans le cadre de l'essai fongicide, au moins un essai est implanté chaque année en Maine et Loire. Les paramètres à étudier peuvent changer d'une année sur l'autre. Par exemple, depuis 2018, les produits de biocontrôle sont plus populaires sur le marché et sont donc inclus dans les essais. Pour rappel, les produits de biocontrôle sont des méthodes alternatives aux fongicides conventionnels qui s'appuient sur les mécanismes et interactions existant dans la nature (cf 1.2.). Le choix des traitements dépend de la région, les essais mis en place par la Chambre se veulent représentatifs de l'agriculture retrouvée dans la zone. L'un des objectifs principaux est de pouvoir apporter des réponses aux agriculteurs sur les pratiques à envisager ou à changer (Guis, agent Chambre). Les priorités sont d'inclure des pratiques moins coûteuses, meilleures pour l'environnement et surtout plus pratiques pour les agriculteurs. De plus, les produits doivent être inscrits dans la réglementation. Celle-ci est régulièrement revue et pour cause, chaque année des produits sont retirés du marché, pour de multiples raisons : anomalie dans l'évaluation, évolution des textes de lois, substances actives retirées du marché comme le glyphosate¹ depuis 2020 (ANSES.fr). Les combinaisons de traitements mises en place dans l'essai sont à l'image des pratiques des agriculteurs. L'essai implanté par la Chambre sur l'année 2022/2023 s'intéresse à la lutte contre la septoriose. Cette maladie foliaire est principalement due à deux champignons : *Septoria tritici*, la forme asexuée et *Mycosphaerella graminicola* la forme sexuée. Leur particularité est de se développer de bas en haut au moment de la formation des étages foliaires profitant des pluies pour se disséminer par l'effet dit *splashing*. Les gouttes d'eau chargées de spores rebondissent des feuilles les plus basses vers les plus hautes. La période de risque de contamination se situe entre stade 2 nœuds (figure 4) jusqu'à floraison (phyteis.fr). L'essai fongicide comprenant dix combinaisons de traitements fongiques réalisés avec dix produits différents (tableau II) qui proviennent de plusieurs fournisseurs tels que Syngenta, BASF, Bayer, De Sangosse et d'autres. Les produits testés dépendent aussi de la disponibilité sur les départements. Les combinaisons de produits utilisés sont issues des préconisations de l'institut technique agricole, Arvalis, dans les stratégies face à la septoriose. Les deux modalités biocontrôle sont : Pygmalion® et Heliosoufre®. Ils sont tout deux des produits de référence pour la lutte contre la septoriose (tableau III).

¹ A noter que le glyphosate peut encore être retrouvé sur des cultures grâce à des dérogations

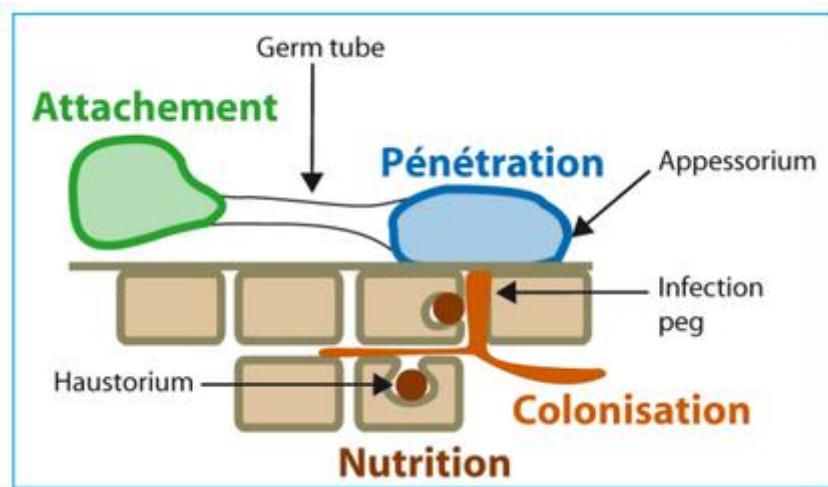


Figure 5. Fonctionnement d'un champignon biotrophe (Guillemette, 2021)

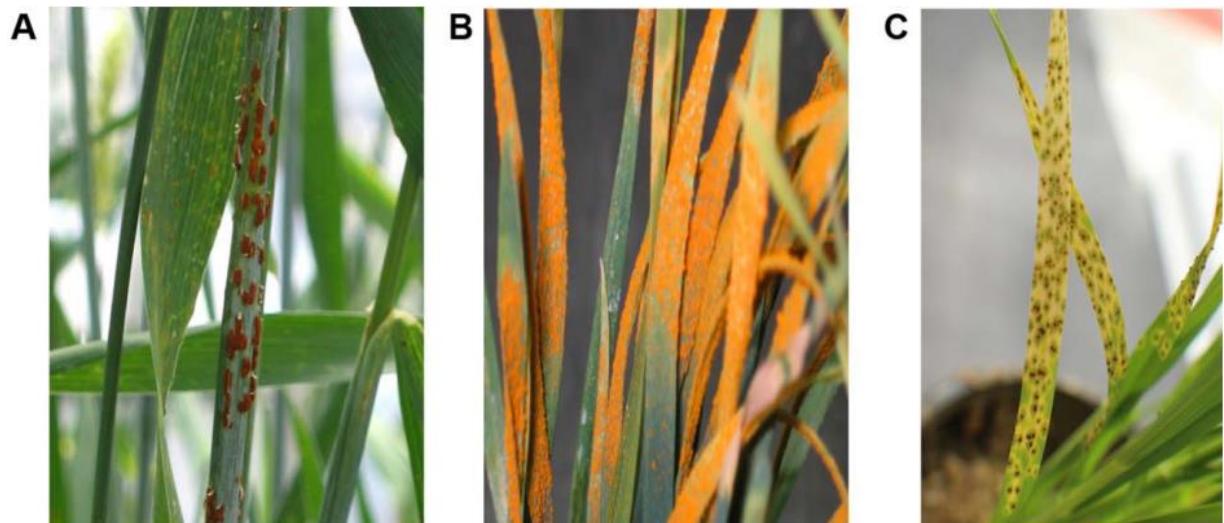


Figure 6. Symptômes des maladies de la rouille causées par *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* (A), *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* (B) and *Puccinia triticina* (C) (Figueroa et al., 2018).

2. Synthèse bibliographique

Les maladies cryptogamiques sont responsables de pertes importantes sur le blé tendre. De plus, ces maladies représentent un risque pour la sécurité alimentaire mondiale à cause des mycotoxines produites par certains mycètes. Elles nécessitent des traitements coûteux et peuvent être difficiles à contrôler. L'utilisation de variétés élites très performantes, le plus souvent créées en laboratoire, appauvri la diversité génétique retrouvée dans l'agriculture et favorise l'émergence et le maintien de maladie comme la rouille. La revue des *maladies du blé - une perspective de terrain*, éditée par *Molecular Plant Pathology* de 2018 fait le point sur l'impact, la distribution et les stratégies de gestion des principales maladies fongiques. Dans l'optique de suivre le plan ECOPHYTO II+, beaucoup d'études et de projets testent l'efficacité des produits de biocontrôle en les comparant aux fongicides par exemple. C'est le cas des articles sur *analyse des essais uniformes de 2001 sur les fongicides et le biocontrôle du blé dans les sites et l'efficacité des fongicides et des biocontrôles contre la fusariose de l'épi en Arkansas* publié en 2001 dans *National Fusarium Head Blight Forum*. Ces derniers mettent en évidence l'utilité et la nécessité des produits de biocontrôle dans la lutte contre la fusariose de l'épi dans cet exemple.

2.1. Les maladies fongiques sur blé

2.1.1. La rouille du blé

La rouille est une maladie causée par un champignon biotrophe obligatoire, qui dépend des ressources nutritionnelles de l'hôte, ici le blé (Figueroa *et al.*, 2018). Ces champignons établissent un haustorium (organe sucoir du champignon) après pénétration des tissus de la plante (figure 5) qui va puiser les nutriments présents dans la cellule pour se nourrir et se développer. Ce dernier émet des molécules (éliciteurs) pour limiter sa détection par les défenses de la plante et croître au sein de cette dernière sans être détecté. Il y a trois maladies de la rouille du blé causées par des membres de la famille des basidiomycètes* (genre de famille des mycètes) :

- La rouille des tiges (rouille noire) causé par *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* (figure 6A)
- La rouille des stries (rouille jaune) causé par *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* (figure 6B).
- La rouilles des feuilles, causée par *Puccinia triticina* (figure 6C)

Les pertes dues aux rouilles se situent entre 4,3 et 5 millions d'euros chaque année dans le monde, elles peuvent être dues à l'utilisation de monoculture et des mêmes variétés au sein des parcelles. Lorsqu'un blé devient l'hôte d'un basidiomycète provoquant la rouille, la dispersion dans la parcelle est facilitée (Figueroa *et al.*, 2018). La rouille est capable plusieurs fois lors de son cycle

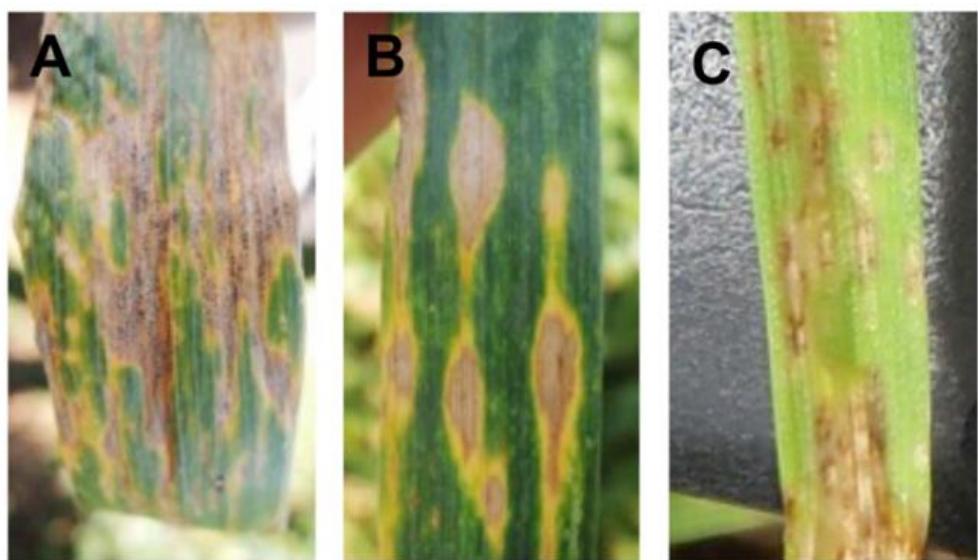


Figure 7. Symptômes des maladies foliaires causés par *Septoria tritici blotch* (A) *Tan spot* (B) et *Septoria nodorum blotch* (C) (Figueroa *et al.*, 2018, Crédit photo McDonald et Hill, 2017).

de former des spores sexués et asexués qui vont se disséminer dans l'environnement. Ce fonctionnement va accroître la contamination de manière exponentielle et favoriser l'émergence de l'épidémie. Plusieurs stratégies de gestion des maladies sont mises en place pour lutter contre la rouille. Certaines visent à atténuer les effets des maladies avec des pratiques culturales de lutte, en plus de la lutte chimique et génétique. Il est conseillé d'éliminer les « ponts verts » comme les débris de culture en les enfouissant dans le sol pour limiter la contamination de culture en culture. Depuis des années, la première ligne de défense contre les rouilles était la sélection de variétés de blé résistantes. Cependant, l'utilisation des mêmes variétés dans l'agriculture a favorisé l'émergence de nouvelles races de rouilles qui contournent ces résistances. Ce contournement a constraint les agriculteurs à reprendre la lutte chimique via les fongicides. Certains fongicides sont appliqués en prévention d'épidémie, il existe un système mondial de collecte de données géospatiales et temporelles sur la prévalence de la rouille (Park *et al.*, 2011). Cela permet de limiter les épidémies et d'avoir un suivi sur l'émergence de nouvelles variétés de pathogènes.

2.1.2. Les maladies de la tâche, la septoriose

Les maladies de la tâche sont causées par des ascomycètes* :

- La maladie de la tâche *Septoria tritici* (STB) causée par *Zymoseptoria tritici* (figure 7A)
- La maladie de la tâche bronzée (TS) causée par *Pyrenophora tritici-repentis* (figure 7B)
- La maladie de la tâche *Septoria nodorum* (SNB) causée par *Parastagonospora nodorum* (figure 7C)

Les trois maladies sont retrouvées dans le monde et notamment dans l'Europe pour la STB et surtout en Australie pour la SNB. Les pertes imputées à ces ascomycètes représentent entre 100 et 1200 millions d'euros par an dans le monde (Francki *et al.*, 2013). De même que pour la rouille, l'utilisation de fongicides est une composante majeure de la gestion des maladies. En plus de cette lutte chimique, les pratiques culturales comme l'élimination des ponts verts permettent de lutter efficacement contre les maladies de la tâche (Torrina *et al.*, 2015). La lutte génétique est une autre composante de la gestion de la septoriose, la cartographie de vingt gènes majeurs liés à la résistance qualitative de la septoriose est une bonne source pour la création de variétés résistantes ou tolérantes (Brown *et al.*, 2015). Finalement, ces maladies ont des émergences récentes, cela facilite leur traitement, car les vecteurs de ces maladies n'ont pas encore développé de tolérance aux fongicides ou aux variétés utilisées.



Figure 8. Symptômes de brûlure sur l'épi : premier signe d'infection sur l'épi partiellement décoloré (A) infection avancée avec une décoloration de l'épi et un blanchissement (B) (Figueroa *et al.*, 2018).

2.1.3. Fusariose de l'épi

La maladie de la fusariose de l'épi aussi connue sous le nom de la gale du blé ou de brûlure du l'épi est causé par un ascomycète, *Fusarium graminearum*. Cette maladie est la plus répandue parmi les maladies fongiques et entraîne une sénescence prématuée de l'épi de blé. C'est-à-dire un ralentissement ou un arrêt de la croissance de l'épi qui va totalement blanchir lors de la contamination (figure 8). L'épi n'effectue pas son cycle de remplissage du grain et réduit ainsi sa qualité (perte économique pour l'agriculteur). La maladie est favorisée en présence de pluie notamment juste avant et pendant la période de floraison (anthèse) car l'humidité est un environnement favorable pour le développement du mycète. En plus d'impacter le grain directement lors de la culture, le mycète *Fusarium* est capable de produire des mycotoxines qui peuvent présenter un risque dans la sécurité alimentaire humaine, animale et écologique après récolte. Les grains issus de ces lots contaminés après récolte vont être rejetés au moment de la mise en conservation ou de la commercialisation. En effet, si la mycotoxine est ingérée, elle peut produire des dérèglements voire des infections pour les humains et les animaux comme l'induction de cancer, des modifications de l'ADN ou des effets néfastes sur le fœtus (bayer-agri.fr). Le pathogène représente une perte économique importante qui va varier en fonction des localisations. Par exemple, entre 1990 et 2008, la perte aux Etats-Unis a été estimée à 3 milliards de dollars (Schumann *et al.*, 2009). Les pertes sont plus importantes pour les pays qui produisent principalement du blé. Pour limiter ces pertes, plusieurs stratégies de cultures sont mises en place :

- L'utilisation de résistance génétique ou la lutte génétique
- L'utilisation de fongicides

La création de variétés résistantes est lente et complexe à mettre en place dans les variétés élites commercialisées. Cette difficulté s'explique par le fait que la résistance à la fusariose est contrôlée par de multiples QTL* majeurs et mineurs souvent associés à un coût de l'aptitude ou à une pénalité de rendement. Ainsi le temps pour élaborer une nouvelle variété va être conséquent (Gilbert & Haber, 2013). Cependant ces résistances peuvent s'accompagner d'effets délétères comme la diminution du rendement.

Finalement, la méthode de lutte la plus privilégiée contre le *Fusarium* est l'utilisation des fongicides. En guise de mesure de prévention supplémentaire, les pratiques culturales peuvent s'additionner et limiter le développement du *Fusarium* en enfouissant les résidus de cultures infectées de sorte à minimiser l'apparition d'éventuels réservoirs pour les cultures futures. La rotation des cultures avec des espèces non-hôtes peut permettre de réduire l'intensité du champignon qui pourrait persister d'une année sur l'autre (Gilbert & Haber, 2013).

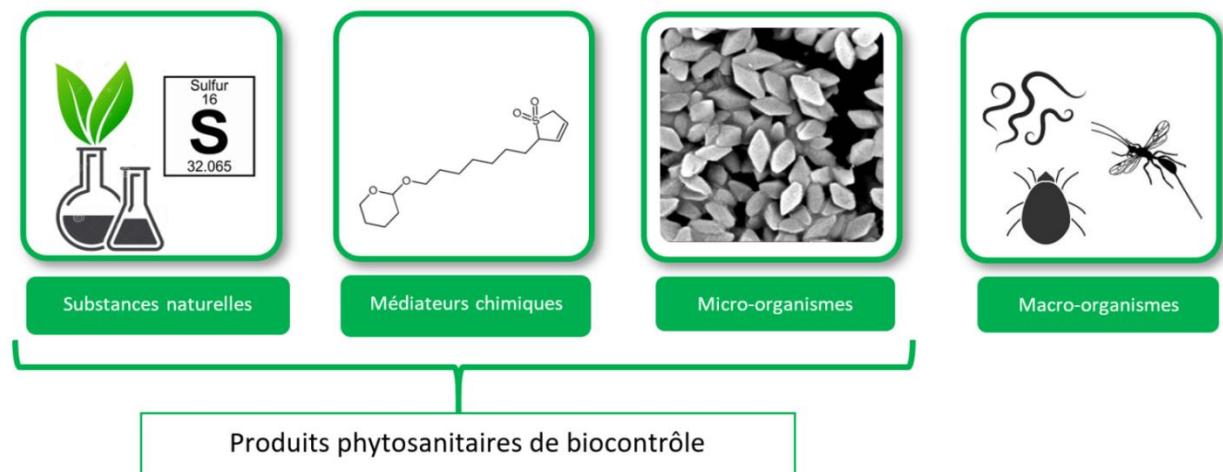


Figure 9. Catégories des produits de biocontrôle (Philagro.fr, 2022)



Figure 10. *Coccinella septempunctata* se nourrissant de puceron (Crédit photo Chaubet, INRAE, 2021)

2.2. Comparaison traitements biocontrôle et fongicide

Ces différentes maladies énumérées rendent compte de l'impact très important des maladies fongiques sur la culture du blé. Aujourd'hui la première méthode de lutte reste le traitement chimique. Depuis des décennies, la lutte contre les champignons passe par l'utilisation des fongicides. Cependant, la venue du plan ECOPHYTO II+ ouvre la lutte à d'autres méthodes moins nocives pour l'environnement : le biocontrôle. Les produits de biocontrôle peuvent être regroupés en quatre catégories (figure 9) :

- Les macro-organismes ou auxiliaires sont des invertébrés, insectes ou acariens qui parasitent ou se nourrissent des parasites, comme les coccinelles qui mangent les pucerons (figure 10).
- Les micro-organismes sont des champignons, des bactéries ou des virus utilisés pour lutter contre les ravageurs ou stimuler les défenses des plantes.
- Les médiateurs chimiques sont des phéromones* d'insectes ou des kairomones* pour influencer le comportement des ravageurs (désorientation, confusion sexuelle...).
- Les substances naturelles d'origine végétale, animale ou minérale vont impacter les ravageurs comme l'acide pélargonique sécrété naturellement par les géraniums, qui est un substitut aux herbicides conventionnels (agriculture.gouv.fr).

Les trois dernières catégories permettent de synthétiser des produits de biocontrôle pouvant lutter contre des ravageurs fongiques, la première catégorie utilise directement les êtres vivants comme produits (Briard, 2022). La liste des produits de biocontrôle est établie par le comité national de l'agriculture biologique (CNAB*) et éditée par l'Institut national de l'origine et de la qualité (INAO*) Parmi ces produits, certains sont plus souvent utilisés et sont considérés comme des références dans la lutte contre les maladies fongiques et sont comparées avec les produits conventionnels. Cette comparaison permet d'évaluer les performances de ces traitements en observant les effets sur la diminution des symptômes ou le maintien des rendements face à des maladies telles que la rouille, la septoriose ou la fusariose. Ainsi certains auteurs évaluent les performances de solution de biocontrôle face aux produits phytosanitaires. Ces articles comparent des solutions en concentration de fongicides dues aux mélanges de plusieurs fongicides (Prothioconazole, Folicur ...) et des traitements de biocontrôle obtenus à partir de suspension de levures (OH182.9) et de suspension bactériennes (TrigoCor 1448). Des plants de blé tendre d'hiver sont inoculés mi-avril avec de la fusariose puis les traitements sont appliqués au moment de la floraison. Ces expérimentations ont été menées dans 13 états différents aux Etats-Unis en 2001. Les auteurs de cette étude comparent les produits en fonction du rendement des cultures implantées (rendement, intensité de la maladie...), le pourcentage de grains endommagés par le Fusarium

Tableau IV. Moyenne des résultats des 11 sites d'expérimentations sur la comparaison des traitements fongiques. (Milus et al., 2001)

Treatment	Field severity ¹	FDK ¹	DON ¹
	(%)	(%)	(ppm)
Non-treated	20.0a	29.4a	6.2a
TrigoCor 1448	18.0ab	24.4a	5.6a
OH 182.9	15.9bc	23.1a	4.4a
Folicur	12.1cd	21.1a	5.3a
BAS505 + Folicur	11.0d	18.6a	6.7a
BAS505	10.9d	17.0a	6.2a
AMS21619	9.2d	13.9a	4.6a

¹Values within a column followed by the same letter are not significantly different by a LSD test at P=0.05

Tableau V. Comparaison des fongicides et lutte biologique en Arkansas (Milus et al., 2001)

Trt No.	Treatment and rate per acre	Yield (bu/A)	Test Wt. (lbs/bu)	Plot severity (%)	Head severity (%)	Incidence (%)	Scabby Seed (%)	DON (ppm)
1	Non-treated #1	87.1	54.5	12.7	16.5	75	59.2	29.5
2	Folicur 3.6F 4 fl oz + 0.125% Induce	87.2	55.2	13.7	18.1	74	55.0	27.9
3	AMS21619 480SC 5.7 fl oz. + 0.125% Induce	92.2	55.9	12.1	17.9	65	47.5	28.8
4	BAS505 50DF 6.4 oz + 0.125% Induce	88.5	54.3	12.3	17.5	69	59.2	41.8
5	BAS505 50DF 3.2 oz + Folicur 3.6F 2 fl oz + 0.125% Induce	84.4	53.9	13.3	17.5	76	65.0	40.5
6	TrigoCor 1448 1.7×10^{14} cfu	87.2	54.8	14.1	18.6	75	49.2	19.0
7	OH 182.9 2.4×10^{14} cfu	91.1	56.5	11.7	17.7	64	34.2	16.9
8	AMS21619 480SC 3.6 fl oz. + Folicur 3.6F 4 fl oz. + 0.06% Induce	88.2	56.1	11.8	17.0	69	46.7	22.5
9	AMS21619 480SC 5.7 fl oz. + 1% crop oil concentrate	88.1	55.3	12.7	18.2	69	55.8	33.5
10	Non-treated #2	81.6	55.0	14.6	18.6	78	50.0	27.4
	Prob > F	0.32	0.017	0.71	0.99	0.002	< .0001	0.0001
	LSD (P=0.05)	NS	1.5	NS	NS	7	11.0	10.1
	CV (%)	7.4	2.3	22.9	19.2	8.90	17.9	29.7

(FDK) et de la concentration en déoxynivalénol, une mycotoxine produite par *Fusarium* (DON). Les mesures sont réalisées sur une cinquantaine d'épis récoltés aux stades pâteux des graines, soit 75 % de remplissage du grain.

Sur les 13 États ayant participé aux études, 11 ont obtenu des résultats (annexe I). Les auteurs ont pu mettre en évidence que tous les traitements testés avaient une efficacité contre au moins une des variétés de fusarium dans certaines analyses sauf TrigoCor 1448 (produits de biocontrôle) qui n'a pas montré de différence significative par rapport au témoin non traité (tableau IV). Ce constat suit la tendance générale observée, en effet les fongicides conventionnels sont plus efficaces que les agents biologiques. Les fongicides conventionnels ont réduit la sévérité de la maladie au champ et la présence de FDK et de DON d'environ 50 % par rapport aux témoins (Milus et al., 2001). En regardant plus en détail l'analyse d'un des lieux de cette étude, ici l'Arkansas, en plus des interprétations précédentes, certains résultats montrent que les traitements de biocontrôle limitent la concentration des graines tavelées (tachées) et la concentration en DON (tableau V). Une explication fournie est que les traitements appliqués en fin d'après-midi aident les agents de lutte à s'établir. Une autre piste de réponse est que les cycles de brumisation fréquents ont augmenté la quantité de population de bactéries ou de levures et ont limité la brûlure de l'épi (Milus et al., 2001). Il faut noter que toutes les interprétations ont été réalisées en prenant en compte que la différence significative ne respectait pas le seuil d'acceptation de moins de 5%. Finalement, cette comparaison entre les produits de biocontrôle et les fongicides permet de montrer l'intérêt et le potentiel prometteur de ces nouveaux traitements alternatifs.

3. Démarche

Au cours de ce stage, l'expérimentation au champ ou la conduite des essais a été une des activités principales (semis, traitement, suivi et récolte). Ce mémoire s'intéresse aux essais fongicides et aux performances des traitements en cherchant à identifier les meilleures méthodes de lutte contre les champignons phytopathogènes. L'idée de ces essais est de répondre à deux questions. D'une part, quelles combinaisons de traitements sont les plus efficaces face à la septoriose ou à la rouille ? Et d'autre part, est-ce que les produits de biocontrôle sont aussi efficaces que les produits conventionnels ? Dans un premier temps, après la présentation du matériel et méthodes, l'évaluation des traitements fongiques pourra être mise en évidence grâce aux rendements et notations des maladies de l'essai fongicide 2022/2023. Dans un second temps, il est possible de comparer le biocontrôle au conventionnel à travers l'essai. En plus de cela, un parallèle avec le coût des traitements pourra s'ajouter aux évaluations des traitements fongiques.

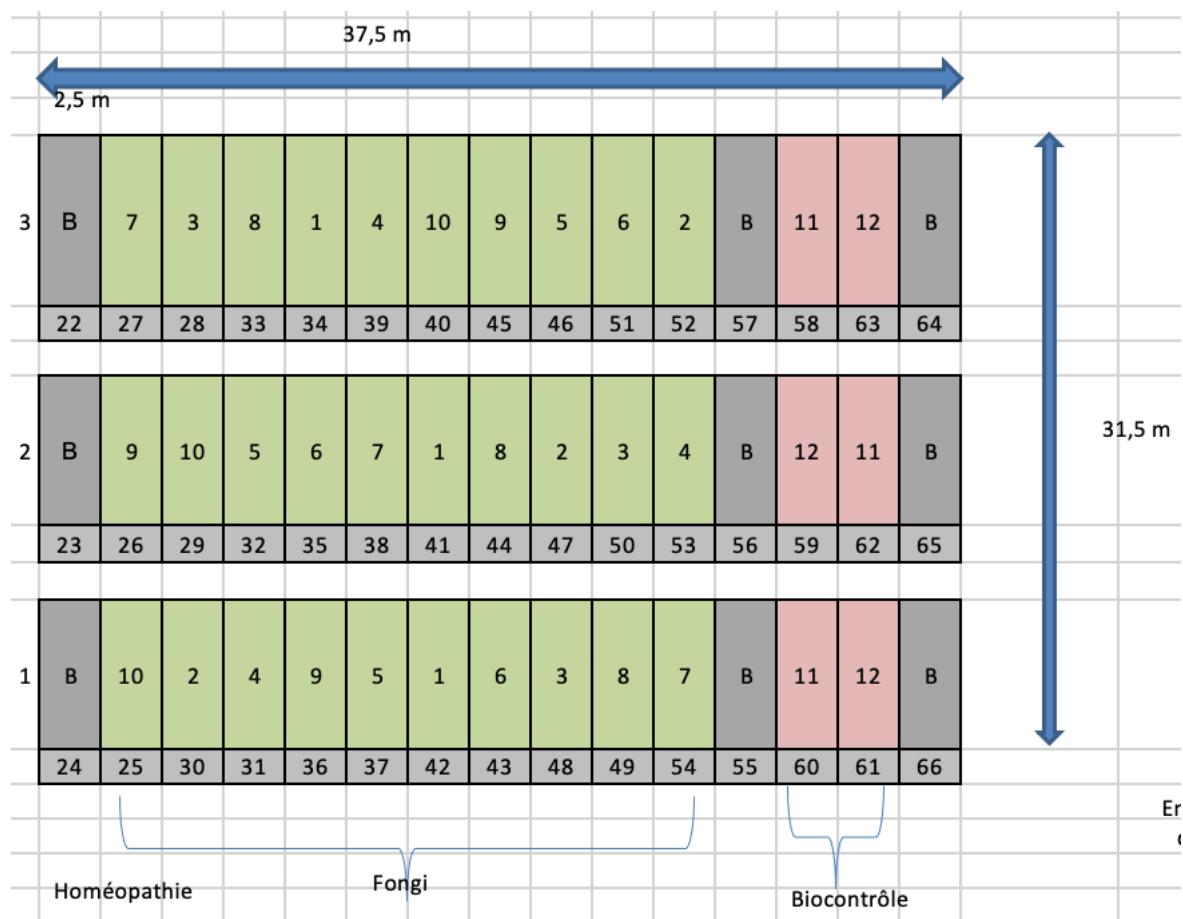


Figure 11. Plan de l'essai fongicide 2022/2023, implantée à Thorigné (CAPDL)

Tableau VI. Caractéristiques des variétés de l'essai fongicide 2022/2023 (Arvalis 2023)

Désélectionner	Variété	Critères physio	Tolérances et résistances									Critères qualité	Productivité
			Lignée / hybride	Précocité épiaison	Verse ①	Piétin verse ①	Rouille jaune ①	Septoriose ①	Rouille brune ①	Fusariose (DON) ①	Chlortoluron ①	Classe qualité ①	Poids spécifique ①	Protéines ①	Rendement ①
AREZZO	Lignée	7	6	2	7	6	3	4.5	T	BPS	8	5	97
DESCARTES	Lignée	7	6.5	5	8	5.5	5	5.5	S	BPS	6	5	100
LG ABSALON	Lignée	6.5	5.5	6	6	7.5	7	5	T	BP	7	5	99
RGT SACRAMENTO	Lignée	6.5	6.5	2	4	5.5	7	4.5	S	BPS	7	6	106

Paramètre : 49000, type de sol argilo calcaire moyen et date de semis entre 21 et 30 septembre), notation maladie 1 sensible/9 résistante, rendement : % de la moyenne

Matériels et méthodes

1. Matériels biologiques

L'essai comporte un mélange de quatre variétés de blé tendre : Sacramento, Arezzo, Descartes et LG Absalon. Les quatre variétés possèdent des tolérances diverses et complémentaires face aux maladies notamment la septoriose et la rouille. En effet, pour la septoriose, la notation de la tolérance varie entre 5,5 et 7,5 (tableau VI). Cette notation établit par Arvalis permet de souligner que Lg Absalon a une meilleure tolérance face à la maladie que les trois autres (ni sensible, ni tolérante). Pour la rouille, la variété Arezzo est sensible à la rouille brune (note 3, tableau VI) alors que Lg Absalon et Rgt Sacramento sont plutôt tolérants (note 7). De même pour la rouille jaune où dans ce cas, c'est Rgt Sacramento qui est sensible (note 4) et la variété Descartes qui est tolérante (note 8).

La parcelle a été semée par l'agriculteur en septembre et tous les apports de fertilisant et les autres traitements (désherbage et insecticides) sont réalisés par l'agriculteur sur l'ensemble de l'essai.

La Chambre a récolté l'essai le 15 juillet 2023. La surface de l'essai est de 1 182 m² avec une longueur de 37,5 m et une largeur de 31,5 m. Chaque microparcelle (ou modalité) à une largeur de 2,5 m et chaque ensemble de modalité (bloc) est répliqué au moins trois fois pour permettre une analyse statistique (figure 11). Le dispositif expérimental est sous forme de blocs randomisés. C'est-à-dire qu'il y a une répartition aléatoire des modalités dans la parcelle. Il faut aussi préciser qu'une bande de blé non traitée sépare la condition biocontrôle de la condition conventionnelle. Cette bande permet de limiter les résidus de traitement sur l'une ou l'autre.

2. Traitements fongiques

Dans le cadre de l'essai fongicide, chaque modalité représente des combinaisons de traitements fongicides conventionnels ou des produits de biocontrôle (tableau VII). Lors du cycle de culture de blé, pour certaines modalités, trois passages de traitements ont été nécessaires (modalité 2, tableau IV). Les traitements fongiques sont dispensés par un détenteur de la certification individuel de produits phytopharmaceutiques (Certiphyto). Les produits utilisés dans cet essai sont commandés chez plusieurs fournisseurs tels que Syngenta, BASF, Bayer, De Sangosse et d'autres. La préparation des traitements se fait directement au champ, les produits sont ajoutés aux bouteilles préalablement remplies d'eau. La quantité de traitements à ajouter aux bouteilles d'eau est calculée en fonction du volume de la bouteille et de la dose de référence inscrite sur les produits. Les produits sont transportés dans une caisse hermétique pour éviter la contamination dans l'environnement.

Tableau VII. Composition des traitements et fréquence effectués sur l'essai fongicide 2022/2023 (DFE : dernière feuille étalée) (CAPDL, 2023).

		T1			T2			T3		
		2 Nœuds			DFE			Floraison		
Fongi classique	1	TNT								
	2	MAYANDRA	0,25	l/ha	REVYSTAR XL	0,6	l/ha	PROSARO	0,4	l/ha
		AMISTAR	0,25	l/ha						
	3	MAYANDRA	0,25	l/ha	REVYSTAR XL	0,6	l/ha			
		AMISTAR	0,25	l/ha						
	4	JUVENTUS	0,55	l/ha	REVYSTAR XL	0,6	l/ha			
		AMISTAR	0,25	l/ha						
	5				REVYSTAR XL	0,6	l/ha	PROSARO	0,4	l/ha
	6				REVYSTAR XL	0,6	l/ha	FANDANGO S	0,7	l/ha
	7				REVYSTAR XL	0,6	l/ha			
Biocontrôle	8				KARDIX	0,9	l/ha			
	9				LIBRAX	1	l/ha			
Biocontrôle	10				ELATUS PLUS	0,5	l/ha			
					QUESTAR	1	l/ha			
	11	PYGMALION	2	l/ha	PYGMALION	2	l/ha			
	12	HELIOSOUFFRE S	3	l/ha	HELIOSOUFFRE S	3	l/ha			
		PYGMALION	2	l/ha	PYGMALION	2	l/ha	ECHIQUIER	5,0	kg/ha
		HELIOSOUFFRE S	3	l/ha	HELIOSOUFFRE S	3	l/ha			

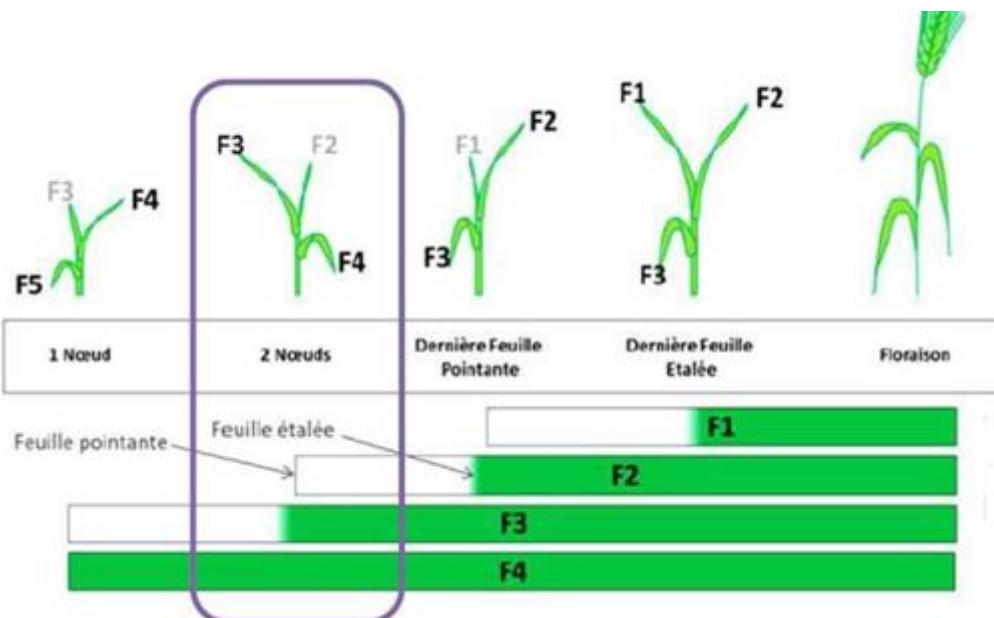


Figure 12. Stade foliaire du blé (bulletin de la santé du végétal, ARVALIS, 2020)

Avant de manipuler tous ces éléments, les personnes doivent s'équiper pour se protéger, on parle de EPI (équipement de protection individuel) composé :

- Des gants en nitrile ou en néoprène avec des manchettes longues
- Une combinaison intégrale de type 4 étanche qui couvre tout le corps et jetable
- Un masque respiratoire filtrant les produits toxiques comme un masque avec des cartouches filtrantes pouvant être changées. Ainsi que des lunettes de protection
- Des bottes imperméables sous la combinaison
- Kits de premiers secours et rince œil

Chaque produit est dispensé sur la microparcelle à l'aide d'un pulvérisateur avec une rampe de traitement réglée sur 2,5 m (largeur de chaque modalité). Dans le cadre du traitement de l'essai fongicide, les produits de biocontrôle sont appliqués en premier puis les traitements conventionnels. En plus de cela, l'hygrométrie ainsi que la température d'air sont renseignées à chaque date de traitement.

3. Analyses de l'expérimentation au champ

3.1. Paramètres morpho-physiologique

Après le stade de floraison, une notation maladie est effectuée. Pour cette notation, l'observateur définit un pourcentage de maladie sur les deux dernières feuilles du blé (F1 et F2, figure 12). Pour cette notation, il faut observer le pourcentage de couverture de la feuille pour deux maladies : la septoriose et la rouille. Cette observation est répétée sur 20 plantes par modalité. Cela permet de calculer par la suite l'intensité et la fréquence de la maladie pour chaque modalité. Le reste des mesures est effectué après les récoltes.

Une fois les récoltes terminées, les échantillons sont utilisés pour relever d'autres paramètres :

- Le PMG : le poids de mille grains, c'est-à-dire que l'on pèse le poids de mille grains de chaque échantillon
- Le PS : le poids spécifique est une mesure physique de la masse volumique
- L'humidité contenue dans les échantillons de blé

Ces deux dernières valeurs sont calculées grâce à un humidimètre (modèle GAC de chez Dickey John) dans lequel on place l'échantillon. Le taux de protéine est le dernier paramètre, il est étudié à l'aide d'une machine. Le grain est transpercé par des infrarouges pour déterminer le pourcentage de protéine à l'intérieur.

Tableau VIII. Résultats de l'analyse de variance (CAPDL, 2023)

Analysis of Variance Table						
	Response: rdt					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
moda	11	189.41	17.219	2.5784	0.0282 *	
bloc	2	254.95	127.474	19.0880	1.56e-05 ***	
Residuals	22	146.92	6.678			

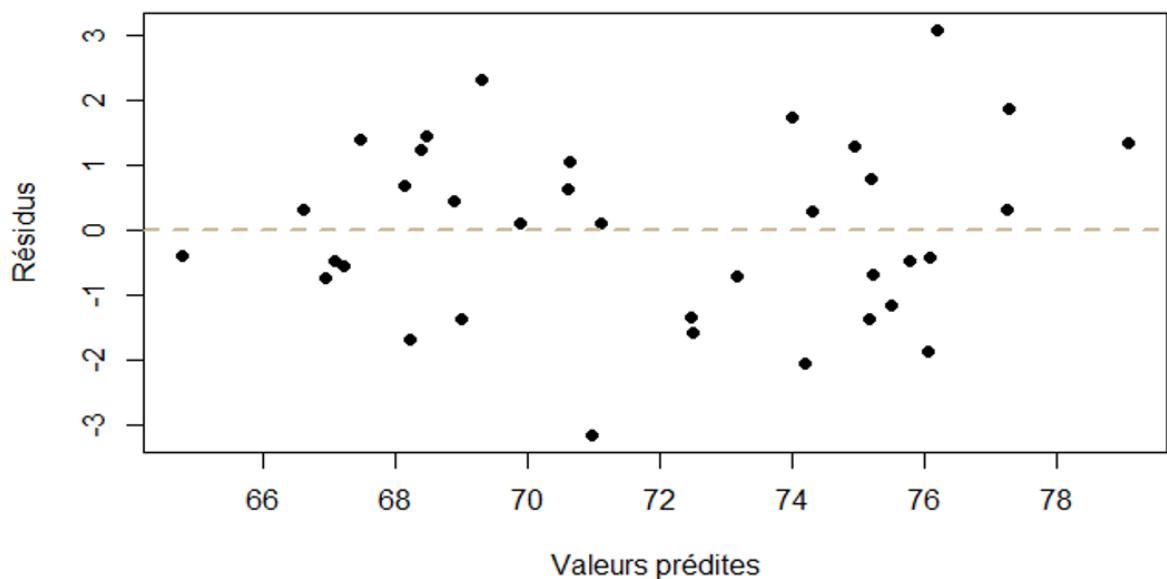


Figure 13. Graphique des résidus à la suite de l'ANOVA (CAPDL,2023)

Tableau IX.les résultats sur la comparaison des blocs lors du test de Tukey (CAPDL, 2023)

	Différence entre les moyennes	P value
Bloc I-II	2,649	0,050
Bloc II-III	3,833	0,004
Bloc III-I	6,43	0,0001

L'humidité permet de calculer le rendement à la norme en se basant sur le rendement brut. En effet, le rendement brut est calculé en tenant compte du poids total en grain de la micro parcelle lors de la récolte et des dimensions de celle-ci.

3.2. Traitements des données

L'analyse statistique s'intéresse à trois paramètres quantitatifs : le rendement, le taux de protéine et le poids de mille grains et à deux qualitatifs : la modalité, le bloc.

Pour l'analyse statistique, dans un premier temps après la vérification des paramètres de normalité pour les valeurs des rendements, le test de Bartlette permet de mettre en évidence s'il y a un effet bloc, ligne ou sous bloc. C'est-à-dire de vérifier si la position de la modalité (bloc ou ligne) dans la parcelle influence le rendement. Les résultats n'indiquent pas si un des facteurs n'influence pas le rendement donc on réalise une analyse de covariance (ANOVA) prenant en compte les trois facteurs et le rendement. Finalement, le bloc et la modalité influent sur le rendement. L'ANOVA permet de montrer que le paramètre bloc influencerait plus le rendement que le paramètre modalité (tableau VIII). Ainsi, le modèle statistique ici est

$$Y = \mu + \text{Effet(modalité)} + \text{Effet(bloc)} + E$$

Avec E = erreur résiduelle

Ce modèle statistique possède un R^2 égal à 0,60, c'est-à-dire que 60 % des valeurs testées ici, les effets sur le rendement, sont expliqués par le modèle. Il est possible après détermination de l'équation de la droite de visualiser graphiquement des résidus. On parle alors d'homogénéité des résidus le long de la valeur prédictive (figure 13). Une fois ces tests réalisés, avec un test de Tukey, on peut observer les comparaisons entre les niveaux de chaque facteur. C'est-à-dire les comparaisons modalité à modalité et les comparaisons bloc à bloc. Les résultats de ce test font ressortir deux informations qui ont des p-value inférieur à 0,05 :

- Il y a une différence entre la modalité 1 et la modalité 7 (interaction p value = 0,028)
- Il y a une différence entre tous les blocs, surtout entre le bloc I et le bloc III (tableau IX)

Le test de Tukey permet de créer des groupes d'homogénéité (GH) pour visualiser les résultats par modalité. De plus, la comparaison entre les modalités pour l'intensité de la maladie est réalisée avec un test de Student qui compare le témoin aux autres modalités.

Tableau X. IFT calculé en fonction des traitements et fréquence effectués sur l'essai fongicide 2022/2023(*DFE : dernière feuille étalée*) (CAPDL, 2023).

	1	T1			T2			T3			IFT
		2 Nœuds		DFE	Floraison						
Fungi classique	1	TNT									
	2	MAYANDRA	0,25	l/ha	REVYSTAR XL	0,6	l/ha	PROSARO	0,4	l/ha	1,25
	3	AMISTAR	0,25	l/ha	REVYSTAR XL	0,6	l/ha				0,85
	4	MAYANDRA	0,25	l/ha	REVYSTAR XL	0,6	l/ha				1,20
	5	AMISTAR	0,25	l/ha	REVYSTAR XL	0,6	l/ha	PROSARO	0,4	l/ha	0,80
	6				REVYSTAR XL	0,6	l/ha	FANDANGO S	0,7	l/ha	0,75
	7				REVYSTAR XL	0,6	l/ha				0,40
	8				KARDIX	0,9	l/ha				0,60
	9				LIBRAX	1	l/ha				0,50
	10				ELATUS PLUS	0,5	l/ha				1,15
Biocontrôle	11	PYGMALION	2	l/ha	PYGMALION	2	l/ha				0,00
	12	HELIOSOUFRE S	3	l/ha	HELIOSOUFRE S	3	l/ha				
		PYGMALION	2	l/ha	PYGMALION	2	l/ha	ECHIQUIER	5,0	kg/ha	0,00

Résultats

1. Calcul des IFT par traitements

Les IFT sont des indices de fréquence des traitements phytosanitaires, ils permettent de quantifier la dose appliquée lors des cycles de culture. Pour un exploitant agricole, l'IFT permet d'évaluer ses progrès en termes de réduction de l'utilisation des produits phytopharmaceutiques. Il permet également de situer ses pratiques au regard de celles du territoire. L'IFT est utilisé pour appuyer la mise en œuvre des politiques publiques dans une perspective de triple performance économique, environnementale et sociale (agriculture.gouv.fr).

Lorsque le produit est appliqué dans la dose recommandée, cela va représenter un IFT égale à un. Il arrive que le dosage des produits soit moins important, on parle alors de demi-dose (IFT=0,5) ou de quart de dose (IFT=0,25) par rapport à la dose de référence du produit. Certains agriculteurs réalisent des traitements avec des doses réduites, cela leur permet de limiter leur IFT. Pour l'essai, il est possible de calculer les IFT pour chaque modalité (tableau X). Pour cela, il faut calculer le rapport entre la dose appliquée et la dose de référence du produit. Par exemple pour la modalité 3, la dose de référence du produit Mayandra est de 1,25 L/ha, Amistar est de 1 L/ha et Revystar XL est de 1,5 L/ha (ephy.anses.fr) :

$$IFT(\text{moda 3}) = \left(\frac{0,25}{1,25} + \frac{0,25}{1} \right) + \frac{0,6}{1,5} = 0,85$$

Le calcul de IFT en fonction des modalités permet de montrer une disparité de résultat. Les modalités avec les IFT les moins importants sont celles qui n'ont eu qu'un seul traitement (modalité 7, 8 et 9, tableau IX). Les modalités conventionnelles avec les IFT les plus élevés sont les modalités avec le plus de produits utilisés, c'est-à-dire la modalité 2 et 4 qui respectivement ont la combinaison de 4 et 3 produits appliqués tout au long du cycle de culture. Les IFT pour les produits de biocontrôle ne sont pas calculé en temps normal dans le calcul des IFT des exploitations. C'est pour cela que les IFT des modalités de biocontrôle de l'essai sont de 0.

En définitive, le calcul d'IFT permet de mettre en évidence que les combinaisons de produits augmentent la valeur de IFT. Le plan ECOPHYTO II+ prévoit une réduction de 50 % de l'utilisation des produits phytosanitaires courant 2025. Cette réduction pourra être visible grâce aux calculs des IFT des agriculteurs. Finalement plus il y a de traitements, plus les IFT sont importants. L'essai fongicide compare différentes combinaisons de produits (modalité) mais également le nombre de passages

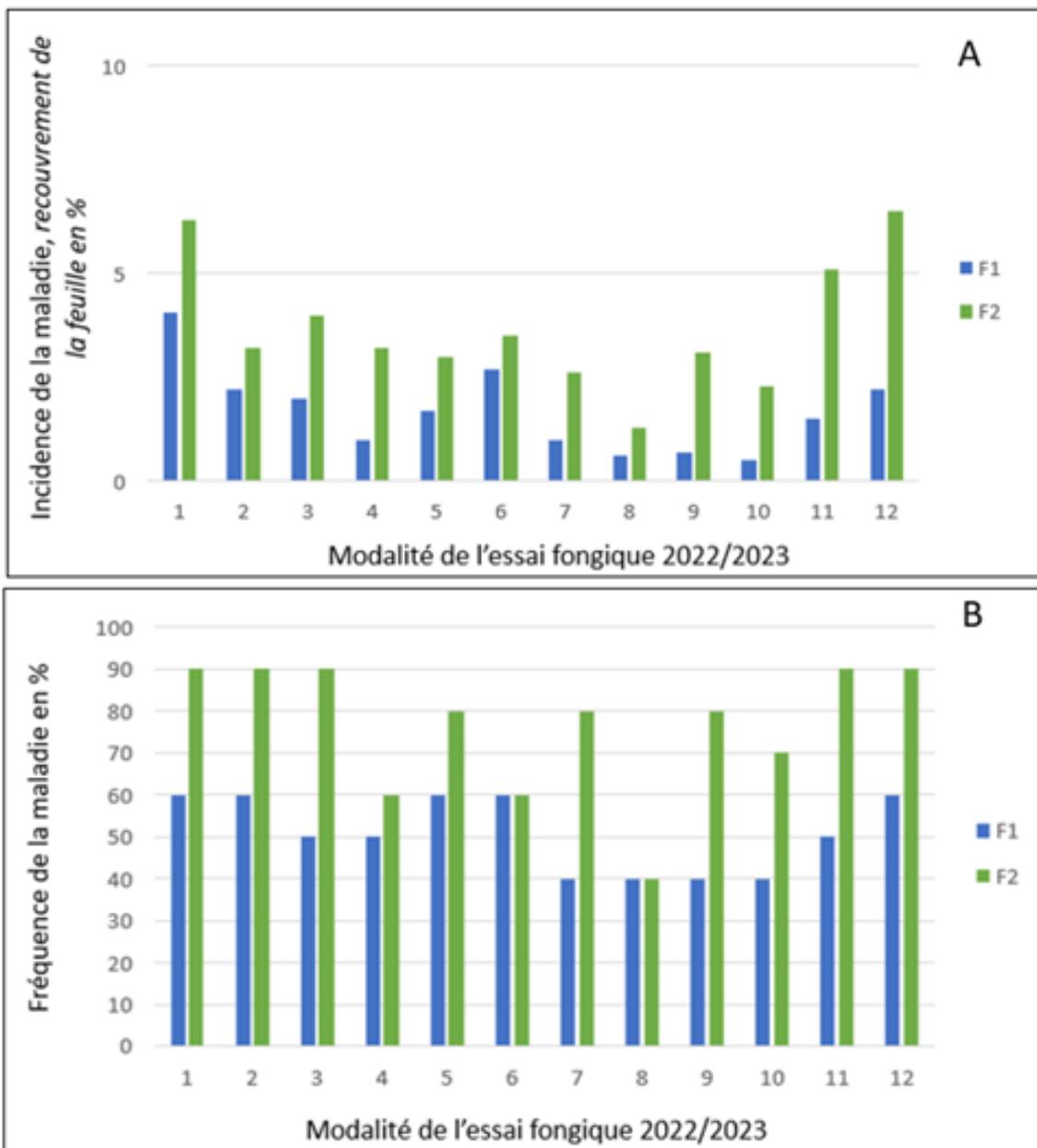


Figure 14. Intensité et fréquence de la septoriose en fonction des modalités sur l'essai fongicide 2022/2023 (CAPDL, 2023) (F1 : dernière feuille étalée, F2 : avant dernière feuille étalée)

2. Évaluation des rendements en fonction des modalités

2.1. Évaluation de l'intensité et de la fréquence de la septoriose

Les mesures réalisées sur les modalités ont lieu en grande partie à la suite de la récolte de l'essai qui a eu lieu le 15 juin 2023 (rendement, taux de protéine, PMG). Néanmoins, une notation maladie a été réalisée le 24 mai 2023. Cette notation permet d'évaluer l'intensité et la fréquence des maladies : ici, la septoriose pendant le cycle de culture. La maladie a une intensité maximum de 5% (figure 14 A). Les modalités qui atteignent voire dépassent ce seuil de 5 % sont le témoin et la modalité 11 et 12 qui sont les modalités de biocontrôle (figure 14 A). La fréquence de la septoriose dans la parcelle est en moyenne pour l'ensemble des modalités de 58% sur la F1 et 82% sur la F2 (figure 14 B). Ainsi, il est possible de mettre en évidence qu'il y a une présence de septoriose dans la parcelle. La maladie est plus facilement retrouvée sur la F2 que sur la F1. En effet, la dispersion de la maladie se fait grâce un effet de splashing, les spores présentent sur les F2 contaminent les F1 en étant projetées par des gouttes d'eau. Cependant, la maladie a une intensité qui ne dépasse pas les 5% dans cet essai, cela signifie qu'il n'y a pas beaucoup de symptômes sur les feuilles (surface de la feuille recouverte à moins de 5%). En effet, lorsque la maladie est bien développée sur la plante, il est possible de retrouver une forte intensité qui se traduit par une couverture de la feuille d'au moins 80-90% pour la F1. Le plus souvent la F2 est déjà complètement recouverte soit une intensité de 100 % (agriculture.gouv.fr). La comparaison statistique de l'intensité de la septoriose entre le témoin (modalité 1) et les autres conditions permettent de dire qu'il n'y a aucune différence significative. Il faut noter également qu'il y avait la présence de rouille jaune sur une ou deux plantes de la modalité 10 lors de la mesure (trop faible pour faire des statistiques). De plus, lors de la récolte, il y avait la présence de fusariose de l'épi sur quelques plants. Il arrive qu'en fin de cycle cette maladie apparaisse à faible dose, n'impactant pas la qualité de la récolte. Mais à forte dose, le champignon peut ensuite sécréter des mycotoxines notamment du DON qui rend la récolte invendable en raison des risques sanitaires (cf partie I : 2.2). La teneur maximale autorisée en déoxynivalénol (DON) selon le règlement européen (CE) est de 1 000 µg/kg pour le blé tendre et 1 750 µg/kg pour le blé dur (Réussir.fr). Au-delà de cette concentration, les lots de blé sont refusés à la vente.

Dans le cas de cette parcelle, l'observation et la notation maladie a permis de montrer la présence de septoriose, mais à une intensité faible. Cette infime présence pourrait n'avoir aucun impact ni sur le blé, ni sur le rendement.

Tableau XI . Tableau récapitulatif de l'analyse statistique des données de l'essai fongicide 2022/2023 (CAPDL, 2023)

MODALITE AJUST	MOY RDT BRUTE	MOY RDT	ETR	GH	ECART MG	PCT MG	PMG	PROTEINE
7	75,15	75,30	1,48	a.	3,27	104,55	40,70	12,27
3	73,77	72,76	3,12	ab	1,88	102,62	39,80	12,47
5	73,62	73,81	2,12	ab	1,74	102,42	41,60	12,33
9	73,32	74,02	1,66	ab	1,44	102,00	39,10	12,23
8	73,30	73,44	1,22	ab	1,42	101,97	41,00	12,33
6	72,73	73,65	1,20	ab	0,85	101,18	40,70	11,97
10	71,55	72,24	1,52	ab	- 0,34	99,53	40,60	12,23
4	71,27	70,21	1,24	ab	- 0,62	99,14	39,30	12,47
12	71,00	70,67	1,53	ab	- 0,88	98,77	39,20	12,20
11	70,26	69,93	1,83	ab	- 1,62	97,75	38,70	12,53
2	69,21	69,53	1,06	ab	- 2,68	96,27	39,70	12,47
1	67,43	67,07	0,37	.b	- 4,45	93,80	38,90	12,10

Bleu : biocontrôle, saumon : témoin

(MOY RDT : moyenne rendement en q/ha, ETR : écart type par modalité, GH : groupe homogénéité = taille de l'effet, PCT MG : variation en % de l'écart type moyen groupe par modalité, PROTEINE : moyenne du taux de protéine dans les grains par modalité, PMG : poids de mille grains en g

2.2. Évaluation des rendements par rapport aux modalités

Le rendement moyen de cette année sur le blé tendre atteindrait 75 q/ha, soit 5 % de plus que la moyenne des 10 dernières années. La teneur moyenne en protéines est quant à elle estimée à 11,4 % pour la récolte nationale 2023 (Agreste 2023).

Au sein de l'essai, le rendement fluctue entre 67 et 75 q/ha en fonction des modalités. La notation maladie a permis de mettre en évidence la présence de septoriose dans la parcelle, il est finalement important de voir si les traitements fongiques ont un impact sur le rendement. Comme énoncé dans le matériel et méthode après une ANOVA qui a fait ressortir deux facteurs qui influencent le rendement (l'effet modalité et l'effet bloc). Sur ces deux facteurs, l'effet bloc est statistiquement plus important que l'effet modalité. Le test de Tukey permet de faire ressortir des comparaisons significatives. Dans un premier temps, le test fait ressortir qu'il y a une différence significative sur les trois blocs. La différence avec la plus grande significativité statistique est celle retrouvée entre le bloc I et le Bloc III. Le bloc II a également une différence significative quand il est comparé au bloc I et au bloc II. L'effet bloc implique que la modalité a un rendement différent si elle est présente sur le bloc I ou sur le bloc III. Par exemple, le rendement de la modalité 10 sur le bloc I est de 66,7 q/ha alors que le rendement sur le bloc III est de 74,3 q/ha, cela représente un écart de 10q/ha (Annexe II, résultat détaillé de l'essai 2022/2023). Une même tendance est discernable sur les rendements entre le bloc I et le bloc III. Les modalités du bloc III ont des rendements plus importants que le bloc I, l'écart de rendement entre les deux blocs pour toutes les modalités est d'environ 8 q/ha.

Dans un second temps, les tests statistiques mettent en évidence qu'il n'existe pas de différence significative entre le témoin et les modalités de 1 à 6 et de 8 à 12. Pour la modalité 7, il y a une différence avec le témoin lorsque l'on réalise les groupes d'homogénéité avec le test de Tukey (tableau XI). La modalité 7 résulte d'un seul traitement et d'un seul passage (application de Revystar, au stade dernière feuille étalée (DFE), tableau VIII). Finalement, en fonction de la présence ou non de produits fongicides, il y a une différence dans les performances du blé. En effet, le témoin non traité a un rendement qui est plus faible que les autres modalités. La maladie impacte le rendement en limitant l'efficacité de la plante notamment lorsque l'intensité et la fréquence de la maladie sont élevées. La différence entre les blocs peut être due à des types de sol différents par exemple.

En plus du rendement, le taux de protéine ainsi que le poids de mille grains (PMG) ont été analysés. Le taux de protéine est un gage de meilleure qualité, plus il est élevé, plus il a de valeur nutritionnelle. Le taux de protéine des modalités de l'essai oscille entre 11,97 et 12,53 % (tableau XI). Comme cité précédemment, la teneur moyenne en protéines est quant à elle estimée à 11,4 % (Agreste, 2023). En se basant sur ce seuil, le taux relevé dans l'essai est important, le blé est de bonne qualité.

De même pour le PMG (poids de mille grains) égale à plus ou moins 40 g (tableau XI). Les tests statistiques montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre les modalités. Pour le taux de protéine ou le PMG, le traitement fongique n'influence pas ces paramètres à la différence du rendement.

En conclusion, ces résultats ne permettent pas de mettre en évidence la meilleure combinaison de traitement pour un cycle de culture sur le blé tendre. Il n'est pas possible de faire un classement des produits les plus efficaces que ce soit en biocontrôle ou en conventionnel. Néanmoins, cet essai illustre l'importance que peut avoir une maladie fongique sur le rendement et l'importance de limiter les infections fongiques.

3. Comparaison Biocontrôle et conventionnel

Les résultats sur l'essai fongicide implanté sur l'année 2022/2023 ne permettent pas de dire s'il y a une différence entre les traitements conventionnels et le biocontrôle car il n'y a pas eu assez de maladies dans la parcelle. Pour illustrer cette différence, il est possible d'utiliser un autre essai mis en place par la Chambre. Comme cité précédemment, chaque année, un essai fongicide est implanté pour le blé tendre en Maine et Loire. En 2021/2022, l'essai a été implanté dans une voisine de la commune de l'essai 2022/2023. De plus, certains des traitements sont en commun notamment les traitements de biocontrôle.

Ainsi, pour pouvoir apporter des réponses quant à la comparaison biocontrôle/conventionnel, il est possible d'étudier l'essai fongicide 2021/2022 en prenant en compte qu'il diffère de l'essai fongicide 2022/2023. En effet, plusieurs paramètres sont différents : le climat (température, pluviométrie...), du type de sol, des variétés utilisées, voire les agriculteurs qui n'ont pas toujours les mêmes pratiques. D'autres facteurs encore peuvent accentuer cette différence comme la machinerie utilisée ou même les produits utilisés.

Tableau XII. Caractéristiques des variétés de l'essai fongicide 2021/2022 (Arvalis 2023)

	Lignée / hybride	Précocité épiaison	Verse ①	Piétin Verse ①	Rouille jaune ①	Seporiose ①	Rouille brune ①	Fusariose (DON) ①	Chlortoluron ①	Classe qualité ①	Poids spécifique ①	Protéines ①	Rendement ①
Désélectionner	Variété	Critères physio	Tolérances et résistances							Critères qualité	Productivité		
<u>LG ABSALON</u>	Lignée	6.5	5.5	6	6	7.5	7	5	T	BP	7	5	99
<u>RGT SACRAMENTO</u>	Lignée	6.5	6.5	2	4	5.5	7	4.5	S	BPS	7	6	106

Paramètre : 49000, type de sol argilo calcaire moyen et date de semis entre 21 et 30 septembre), notation maladie 1 sensible/9 résistante, rendement : % de la moyenne

Tableau XIII. Composition des traitements et fréquence effectués sur l'essai fongicide 2021/2022 (DFE : dernière feuille étalée) (CAPDL, 2022).

	T1			T2			T3			
	2 Nœuds			DFE			Floraison			
Fongicide classique	1			REVYSTAR XL	0,6	l/ha	PROSARO	0,4	l/ha	
	2	MAYANDRA	0,25	l/ha	REVYSTAR XL	0,6	l/ha	PROSARO	0,4	l/ha
	3	AMISTAR	0,25	l/ha	REVYSTAR XL	0,6	l/ha			
	4	MAYANDRA	0,25	l/ha	REVYSTAR XL	0,6	l/ha			
	5	AMISTAR	0,25	l/ha	KARDIX	0,9	l/ha			
	6			ELATUS ERA	0,6	l/ha				
	7			LIBRAX	1	l/ha				
	8			LIBRAX	0,6	l/ha				
	9			ELATUS PLUS	0,5	l/ha				
	10			QUESTAR	1	l/ha				
Biocontrôle	11	-		ELATUS ERA	0,6	l/ha				
	12	PYGMALION	2	l/ha	PYGMALION	2	l/ha			
	13	PYGMALION	2	l/ha	PYGMALION	2	l/ha			
		Heliosoufre	3,4	l/ha	Heliosoufre	3,4	l/ha			
	14	PYGMALION	2	l/ha	PYGMALION	2	l/ha	ECHIQUIER	5,0	kg/ha
		Heliosoufre	3,4	l/ha	Heliosoufre	3,4	l/ha			

Tout cela permet de dire qu'il n'est pas possible d'établir une comparaison entre les deux essais (2021/2021 et 2022 /2023). Les conclusions de l'essai 2021/2022 sont indépendantes et l'analyse qui en découlera ne pourra pas être extrapolée à l'essai fongicide 2022 /2023

3.1. Comparaison en fonction des rendements

En 2021, un essai fongicide de la Chambre sur deux variétés différentes (Lg Absalon et Rgt Sacramento) a permis d'obtenir des résultats sur la comparaison entre les traitements de biocontrôle et les traitements conventionnels. Cet essai, en plus de tester l'effet des différents traitements fongiques et donc l'influence des maladies, teste également leur effet sur des variétés différentes. Les variétés utilisées possèdent des résistances différentes face aux maladies, Lg Absalon est plus tolérante que RGT Sacramento contre la septoriose (7,5 contre 5,5 pour la note de sensibilité, tableau XII) mais également contre la fusariose (note de 5 contre 4.5, tableau XII). Ces variétés n'ont pas la même productivité, RGT Sacramento doit produire plus que LG absalon, c'est-à-dire que le rendement peut être plus important. Les produits de biocontrôle utilisés dans l'essai fongicide 2021/2022 sont : Pygmalion et Heliosoufre® qui sont des traitements de référence contre la septoriose et Échiquier le dernier traitement fongique de biocontrôle qui lutte contre la fusariose (tableau XIII). Cette maladie est souvent retrouvée en fin de cycle et peut impacter la qualité du grain à cause des mycotoxines qu'elle peut secréter (cf partie I : 2.1.3).

Les résultats après les analyses statistiques (mêmes tests que ceux énoncés dans le matériels et méthodes) permettent de hiérarchiser les traitements en fonction des rendements. En fonction de la variété utilisée, le classement des modalités n'est pas le même. Par exemple, pour la variété Lg Absalon, la meilleure modalité est la n°2 alors que pour Rgt Sacramento c'est la n°3 (tableau XIV). Néanmoins, un schéma se dessine et sépare distinctement les traitements conventionnels des traitements de biocontrôle. Dans l'ensemble, en comparant le biocontrôle et les traitements conventionnels, il est possible de dire que pour une variété plus sensible, le biocontrôle est moins efficace et le rendement est plus faible (RGT Sacramento, tableau XIV) Pour la variété plus tolérante, Lg Absalon, les modalités de biocontrôle ont des rendements plus faible que les modalités conventionnelles. Cependant, il est possible de dire que le biocontrôle a un impact sur la maladie. Il est efficace puisqu'il y a une différence entre les rendements des modalités biocontrôle et le témoin qui lui n'est pas traité.

Tableau XIV. Tableaux récapitulatifs de l'analyse statistique des données de l'essai fongicide 2021/2022 (CAPDL, 2022)

MODALITE	variété : LG absalon						
	MOY AJUST	MOY BRUTE	AJUST	GH	ETR	ECART MG	PCT MG
2	97,98	97,98	0,00	a.....	0,18	5,06	105,44
3	97,27	97,27	0,00	.b.....	0,10	4,35	104,68
9	96,70	96,70	0,00	..c.....	0,15	3,77	104,06
4	96,27	96,25	- 0,03	..cd.....	0,06	3,34	103,60
7	96,08	96,08	0,00	...d.....	0,08	3,15	103,39
5	96,01	96,01	0,00	...d.....	0,16	3,08	103,31
1	94,68	94,68	0,00	....e....	0,07	1,75	101,89
10	92,81	92,81	0,00	.....f....	0,15	- 0,12	99,87
14	91,42	91,42	0,00	.....g...	0,29	- 1,51	98,38
8	91,15	91,15	0,00	.....gh..	0,23	- 1,78	98,08
13	90,60	90,61	0,01	.....hi.	0,11	- 2,33	97,50
6	90,12	90,12	0,00	.....i.	0,04	- 2,80	96,98
11	84,97	84,97	0,00	.....j	0,26	- 7,96	91,44
12	84,93	84,94	0,01	.....j	0,35	- 8,00	91,39
variété : RGT sacramento							
MODALITE	MOY AJUST	MOY BRUTE	AJUST	GH	ETR	ECART MG	PCT MG
3	110,35	110,33	- 0,02	a.....	0,33	8,39	108,23
2	108,88	108,88	0,00	a.....	0,14	6,91	106,78
9	105,26	105,26	0,00	.b....	0,30	3,30	103,24
10	104,97	104,97	0,00	.b....	0,50	3,00	102,95
7	104,68	104,68	0,00	.b....	0,40	2,72	102,67
6	102,44	102,44	0,00	..c...	0,25	0,47	100,46
1	102,32	102,32	0,00	..c...	0,74	0,36	100,35
4	102,16	102,16	0,00	..c...	0,53	0,20	100,20
8	101,30	101,30	0,00	..cd..	0,21	- 0,66	99,35
14	100,79	100,79	0,00	...d..	0,56	- 1,17	98,85
5	100,73	100,73	0,00	...d..	0,23	- 1,23	98,80
13	100,11	100,11	0,00	...d..	0,36	- 1,85	98,19
12	97,71	97,71	0,00	....e.	0,49	- 4,25	95,83
11	85,77	85,77	0,00	.....f	0,40	- 16,19	84,12

Bleu : biocontrôle, saumon : témoin

(Statistique : test Shapiro-Wilk, test de Bartlette, Anova à 1 facteur et test Tukey ; MOY RDT : moyenne rendement en q/ha, ETR : écart type par modalité, GH : groupe homogénéité = taille de l'effet, PCT MG : variation en % de l'écart type moyen groupe par modalité, PROTEINE : moyenne du taux de protéine dans les grains par modalité, PMG : poids de mille grains en g.)

Il est possible de mettre en évidence que dans cet essai les modalités biocontrôles ont des rendements plus faibles que les conventionnels (sauf exception : modalité 5 pour Rgt Sacramento et modalité 8 et 6 pour Lg Absalon) (tableau XIV). De plus, au sein des trois modalités de biocontrôle testées, la modalité 14 possède de meilleurs résultats pour les deux variétés différentes. A la différence des deux autres, la modalité 14 a eu une application Échiquier en troisième passage pour limiter le développement de la fusariose. Cette dernière application a pu limiter la perte de rendement. La modulation du rendement est due en grande partie à l'intensité de la maladie.

3.2. Comparaison en fonction de l'intensité et de la fréquence des maladies

En effet, il y a une différence pour les rendements entre les modalités biocontrôle et le témoin non traité. Il est possible de mettre en évidence que dans cet essai les modalités biocontrôles ont des rendements plus faibles que les modalités conventionnelles (sauf exception : modalité 5 pour Rgt Sacramento et modalité 8 et 6 pour Lg Absalon, tableau XIV). De plus, au sein des trois modalités de biocontrôle testées, la modalité 14 possède de meilleurs rendements que les deux autres pour les deux variétés testées. En effet, la modalité 14 en plus a eu une application Échiquier® en troisième passage pour limiter le développement de la fusariose (tableau XIII). Cette dernière application a pu limiter la perte de rendement.

La modulation du rendement est due en grande partie à l'intensité de la maladie. Une notation maladie a été effectuée au cours du cycle, le 3 juin 2022 avant la récolte qui a eu lieu en juillet 2022. Les résultats indiquent dans l'ensemble que la F2 est plus touchée que la F1, il y a également une distinction entre les variétés RGT Sacramento possède plus de symptômes sur les feuilles. Dans le cas de la fréquence de la maladie retrouvée dans la parcelle, il y a en moyenne :

- Lg Absalon : 47 % pour la F1 et 86 % pour la F2
- Rgt Sacramento : 80 % pour la F1 et 100 % pour la F2

De plus dans ces résultats de fréquence de maladie, la présence de rouille jaune est aussi à prendre en compte avec une fréquence de moins de 50 % pour Lg Absalon. Pour la variété Rgt Sacramento la fréquence de rouille jaune est estimée entre 60% et 80 %. La rouille jaune est une maladie qui se transmet facilement car le champignon peut produire une grande quantité de spores qui vont être portées par le vent. Cela va faciliter la dispersion et accroître la présence de maladie. Ainsi la fréquence dans cet essai est étonnamment faible puisqu'on s'attendrait à observer 100% de fréquence dans la parcelle.

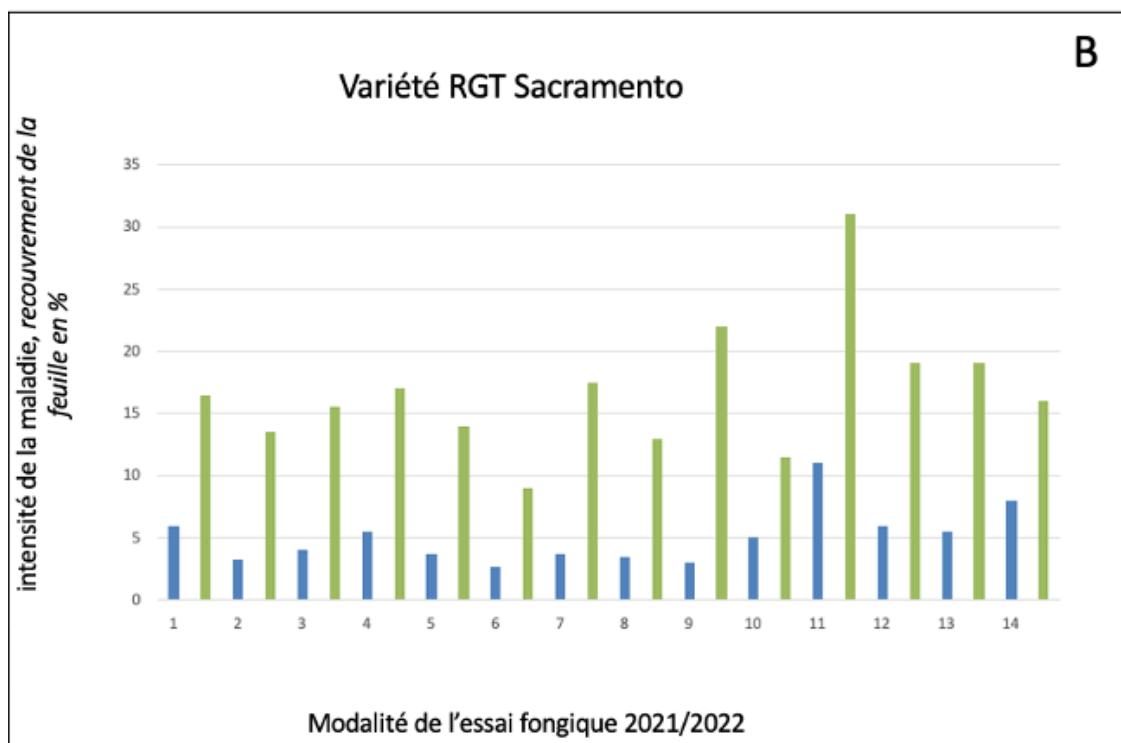
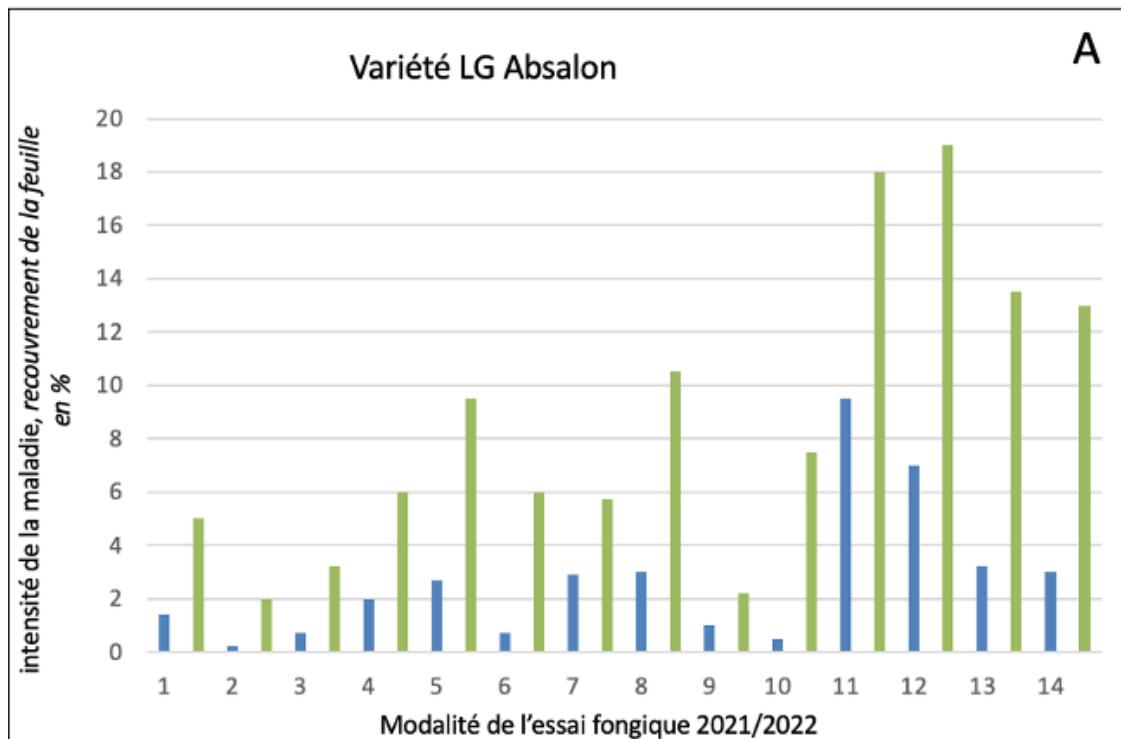


Figure 15. (A)Intensité de la septoriose pour la variété Lg Absalon et (B) Intensité de la septoriose pour la variété Rgt Sacramento en fonction des modalités sur l'essai 2021/2022 (CAPDL, 2022)

En comparant les résultats des deux variétés, il est possible de dire que la variété plus tolérante possède une fréquence de la maladie plus faible notamment sur la dernière feuille étalée (F1). En s'intéressant à la fréquence de la maladie, il est possible de dire que Rgt Sacramento est plus impacté par la présence de la maladie.

De même pour l'intensité, il y a une disparité entre les deux variétés, Rgt Sacramento a des intensités septoriose plus importantes (figure 15B) que Lg Absalon (figure 15A). En revanche, pour la variété Rgt Sacramento, la différence entre les modalités notamment biocontrôle et conventionnelle n'est pas significative. Pour Lg Absalon, les modalités 9, 4, 3 et 2 possèdent moins d'intensité de la maladie comparé au témoin et aux conditions de biocontrôle (figure 15A). Ces traitements conventionnels font apparaître moins de symptômes sur la feuille, cela signifie que la maladie se développe moins sur ces modalités donc que la combinaison de produits est plus efficace. De plus, il est à noter que dans l'essai l'intensité de la rouille jaune chez les deux variétés ne dépasse pas 5 %. Cela indique que la rouille jaune n'a pas d'intensité sur la plante et donc que la maladie peut être considérée comme négligeable.

En définitive, la différence biocontrôle et conventionnel se marquent par le rendement qui est plus important pour les fongicides conventionnels et la présence de maladie. En effet, les modalités avec du biocontrôle ont montré la présence de plus de maladies (fréquence et intensité plus élevée). Le biocontrôle est un traitement qui reste efficace dans le cadre de cet essai puisque les résultats sur le rendement sont plus importants que le témoin non traité. De plus, l'impact des maladies sur la variété a pu être observé, cela montre l'intérêt d'utiliser des variétés plus tolérantes même si elles sont moins productives

4. Étude économique en fonction des modalités

En plus de l'utilité des traitements dans la lutte contre les maladies, le coût économique est important. Il est possible de l'estimer en soustrayant le coût de l'itinéraire cultural à la valeur de la récolte et déterminer les bénéfices réels de la culture. Dans les dépenses, on peut compter :

- Le semis (semences, machinerie)
- Les apports minéraux (fertilisation, épandage, déchaumage*)
- Les traitements (désherbage, fongicides, insecticides)
- La récolte (machinerie, transport grain et stockage)

Le coût des semis (entre 60 et 80 €/ha selon entraid.com) et de la récolte reste le même pour les agriculteurs en termes d'euro par hectare.

En 2020 nombre d'exploitations

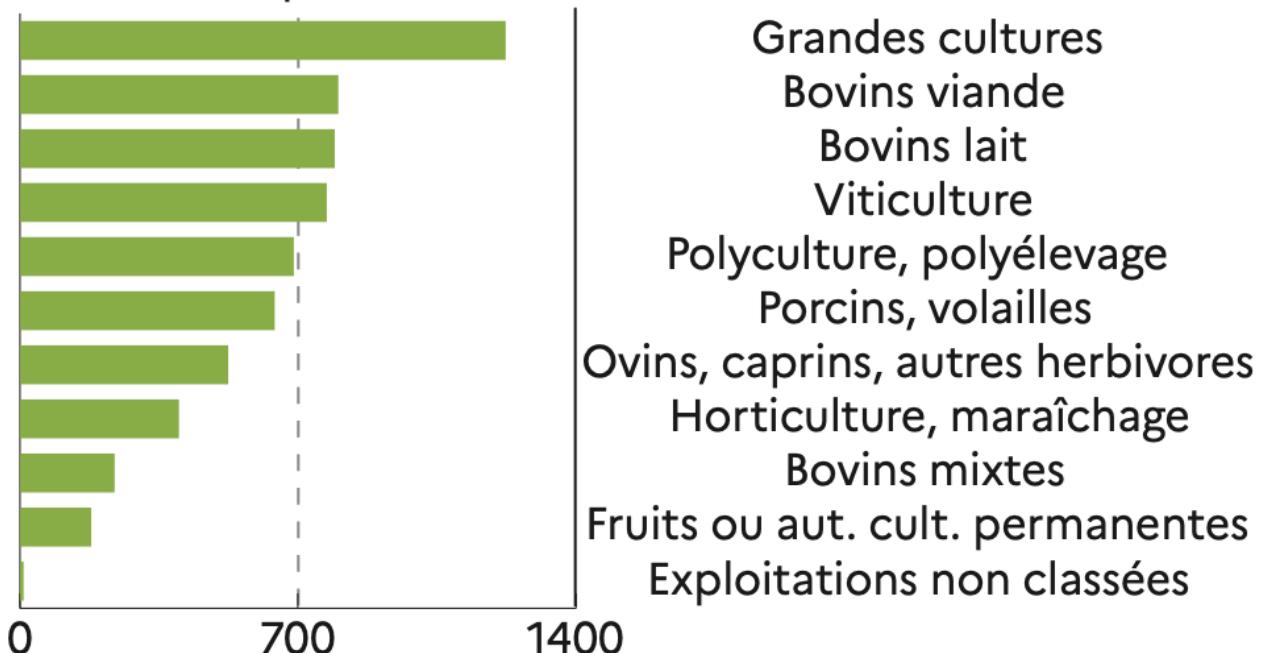


Figure 16. Répartition des activités des exploitations en Maine et Loire en 2020 (Agreste, 2020)

Tableau XV. Tableau comparatif des coûts des traitements et des coûts réels (CAPDL, 2023)

	T1			T2			T3			€/ha	Cout réel
	2 Nœuds			DFE			Floraison				
1	TNT										
2	MAYANDRA	0,25	l/ha	REVYSTAR XL	0,6	l/ha	PROSARO	0,4	l/ha	0,40	49,90
	AMISTAR	0,25	l/ha								
3	MAYANDRA	0,25	l/ha	REVYSTAR XL	0,6	l/ha				0,28	33,28
	AMISTAR	0,25	l/ha								
4	JUVENTUS	0,55	l/ha	REVYSTAR XL	0,6	l/ha				0,36	33,36
	AMISTAR	0,25	l/ha								
5				REVYSTAR XL	0,6	l/ha	PROSARO	0,4	l/ha	0,32	33,32
6				REVYSTAR XL	0,6	l/ha	FANDANGOS	0,7	l/ha	0,29	33,29
7				REVYSTAR XL	0,6	l/ha					
8				KARDIX	0,9	l/ha				0,25	16,75
9				LIBRAX	1	l/ha				0,27	16,77
10				ELATUS PLUS	0,5	l/ha				0,29	16,79
				QUESTAR	1	l/ha					
11	PYGMALION	2	l/ha	PYGMALION	2	l/ha				0,38	33,38
	HELIOSOUFRES	3	l/ha	HELIOSOUFRES	3	l/ha					
12	PYGMALION	2	l/ha	PYGMALION	2	l/ha	ECHIQUIER	5,0	kg/ha	0,88	50
	HELIOSOUFRES	3	l/ha	HELIOSOUFRES	3	l/ha					

Les variables qui vont influencer la rentabilité de la culture sont les traitements et les apports minéraux. Pour les apports minéraux, le type de culture, les activités de l'exploitant, la disponibilité des engrais vont être des facteurs importants. Par exemple, en Maine et Loire, l'activité principale des agriculteurs est l'élevage en comprenant les bovins viandes et bovins lait (figure 16). De ce fait, les exploitants sont capables de récupérer de la matière organique restituée par les animaux (fumier et lisier) et vont les apporter à leur culture. Le lisier correspond aux déjections des animaux qui sont récupérées sous forme liquide. À la différence du fumier composé de paille en plus des déjections et correspond à une forme pâteuse. L'action de répandre le fumier ou le lisier sur la culture s'appelle l'épandage. Il est difficile d'estimer exactement et de prévoir le coût de la fertilisation à cause de la pléthora de technique et de produit utilisés. Le coût des traitements est plus facile à calculer et c'est le paramètre de l'essai qui varié.

Dans l'essai fongicide 2022/2023, le coût des traitements peut être évalué en calculant le prix de chaque modalité en €/ha. Pour cela, on additionne le prix de chaque produit de la modalité en fonction de la quantité et de la surface traitée et du coût du produit de départ (annexe II). Une fois cette valeur obtenue, il est possible de calculer le coût réel des traitements en ajoutant à cette valeur, le coût d'application des produits c'est-à-dire le prix pour l'utilisation d'un pulvérisateur. L'estimation du coût d'application est d'environ 16,5 €/ha et par passage, il comprend l'utilisation de la machine et du carburant.

En moyenne, le coût des produits par hectare oscille entre 20 et 40 centimes. Les modalités conventionnelles ont un prix qui variait entre 21 et 40 centimes, la différence entre le prix des produits n'est pas toujours très importante. Par exemple, la modalité 7 qui n'utilise que Revystar à un prix de 0,21 €/ha tandis que la modalité 8 utilisant seulement Kardix coûte 0,25 €/ha soit 4 centimes de plus (tableau XV). Cependant les coûts par hectare des produits de biocontrôle sont un peu plus chers que les produits conventionnels. Les produits de biocontrôle tels que Heliosoufre ou Pygmalion ne sont pas plus chers mais la dose par hectare est plus importante donc l'agriculteur doit en acheter plus. Cela augmente le coût par hectare des produits. Dans l'ensemble, les modalités de l'essai onéreuses sont celles qui nécessitent trois passages (la modalité 2 avec 0,40 € et la modalité 12 avec 0,88 €, tableau XV). En effet, en ajoutant le coût d'application qui est de 16,5 par passage, les prix par modalités changent. Par exemple, pour la modalité 2 le coût des produits est de 40 centimes soit 4 centimes de plus que la modalité 4. Mais en regardant le coût réel d'application, la modalité 2 se chiffre à environ 50 € alors que la 4 est à 33 €. Ce qui vient également faire gonfler les coûts est l'utilisation de la machinerie pour appliquer les produits. Dans ce coût est compris : l'essence, l'utilisation de la machine et le salaire du conducteur.

Concernant les résultats de l'essai 2022/2023, il a pu être mis en évidence précédemment que l'utilisation de trois applications n'étaient pas nécessaire puisque cette année qu'il n'y a pas eu de maladie. Ainsi, les applications supplémentaires de traitements ont été superflues. Pour l'agriculteur le meilleur scénario est d'être en gain positif en faisant le rapport entre ce qu'il a dépensé pour sa culture et ce que ça lui a rapporté. L'intérêt de calculer les coûts liés aux traitements est de mettre en évidence le coût de l'utilisation des traitements. Cela vient ajouter une dimension économique très forte a ce pourquoi l'agriculteur doit faire usage des traitements avec parcimonie et raison. Lorsque l'agriculteur applique un traitement supplémentaire qui est inutile, il perd juste de l'argent sans gagner des performances de rendement, c'est le cas des modalités à trois passages dans l'essai.

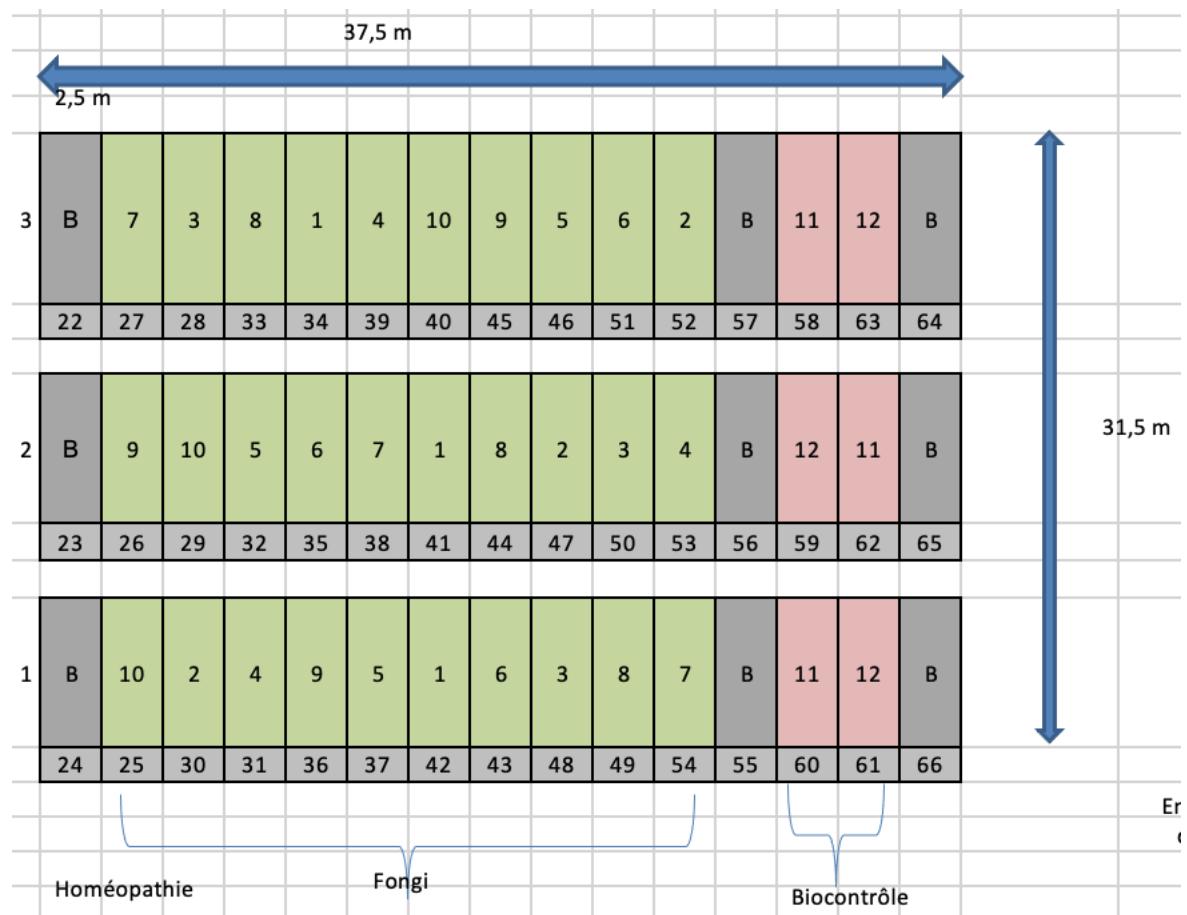


Figure 17. Plan de l'essai fongicide 2022/2023 (CAPDL,2023)

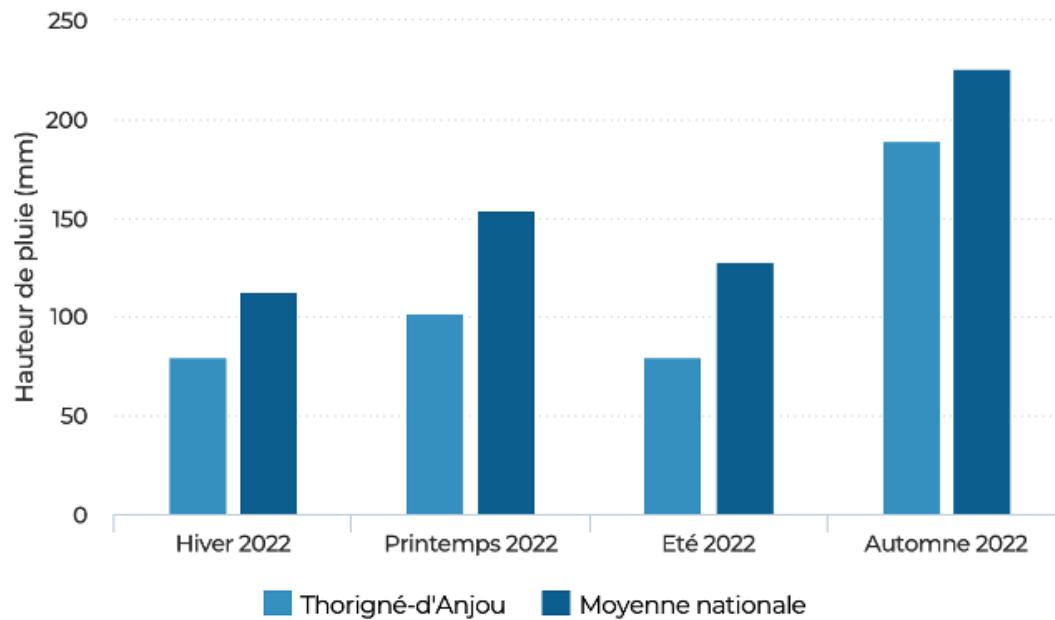
Discussion

Le travail de ce rapport consistant à analyser les résultats d'un essai implanté par la Chambre d'Agriculture des Pays de la Loire en 2022/2023. Cette expérimentation au champ teste l'impact de différents traitements fongiques sur les rendements d'un mélange variétal de blé tendre. Dans un premier temps, une des idées principales était de pourvoir déterminer la meilleure combinaison de produits fongicides pour lutter contre la septoriose et la rouille. Le deuxième objectif était d'observer la différence entre les produits de biocontrôle et les fongicides conventionnels. Ce travail a pour but final d'apporter des réponses et des conseils aux agriculteurs rattachés à la Chambre pour les aider dans la mise en place de leur culture, le tout en réduisant leur utilisation de produits phytopharmaceutiques si possible.

1. Le rendement influencé par le traitement et un effet bloc

L'essai fongicide 2022/2023 n'a pas permis d'obtenir des résultats permettant de hiérarchiser les traitements fongiques et de sortir la meilleure combinaison de produits. Sur les résultats des modalités, seule la modalité 7 s'est différenciée du témoin à la suite des tests statistiques. Cette mise en défaut est due à l'absence de maladie sur la parcelle. En effet, l'intensité de la septoriose ne dépasse pas les 5% et en comparaison aux performances que peut fournir cette maladie (80/90% intensité sur la F1), ce seuil de 5% permet de dire que la septoriose n'impacte pas la plante. Ici l'impact de la rouille n'est pas évoqué car l'intensité et la présence sont très faible donc cette maladie est négligeable. Lorsqu'il n'y a pas de maladie, l'application de traitement ne va pas influencer la parcelle et on ne pourra pas observer de différence au niveau des rendements, c'est le cas de cet essai. En effet, toutes les modalités peuvent être confondues parce qu'il n'y a pas de différence significative avec le témoin. Il y a seulement la modalité 7 qui possède une interaction significative entre le rendement et le traitement, puisqu'il y a une différence significative avec le témoin non traité. Avant de parler des causes de l'absence de maladie, un effet bloc a été relevé lors de l'analyse statistique. L'absence de maladie et le manque d'effet liés aux traitements a permis de détecter un autre effet sur le rendement, un effet de bloc. C'est-à-dire que le rendement va changer que la modalité soit sur le bloc I ou sur un autre bloc (figure 17). En temps normal la réalisation d'essai en bloc permet d'avoir plus de répétition (ici trois) pour l'analyse statistique. Le plus souvent les résultats d'un bloc à l'autre sont identiques et donc l'effet est absent ou négligeable. Cet effet peut être lié à une hétérogénéité du sol. Cependant dans le cas de l'essai, l'effet est très marqué entre le bloc I et le bloc III (figure 17). Les hétérogénéités de sol sont souvent présentes par zone dans la parcelle, il est peu probable que le sol soit la cause de l'effet bloc

Précipitation Thorigné 2022



Précipitation Thorigné 2021

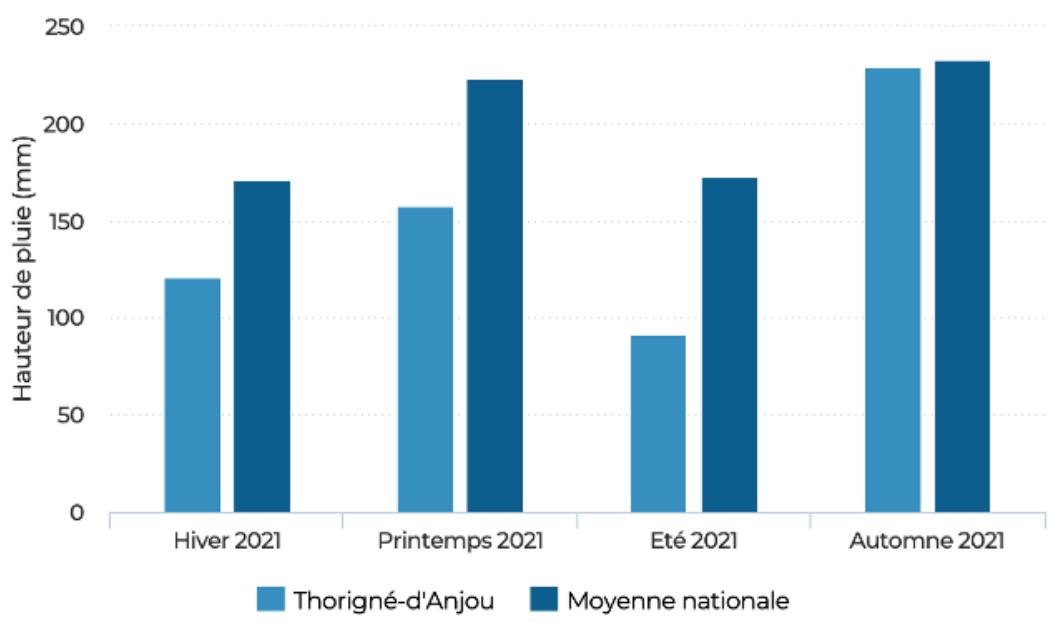


Figure 18. Précipitation en 2022 et 2023 à Thorigné (49220) (L'internaute/météo France)

Cependant, un défaut lors d'un apport ou d'un traitement est plus probable. En effet, les traitements fongiques étaient réalisés modalité par modalité, ce mode d'application n'explique pas l'effet bloc. En revanche, le passage d'un pulvérisateur de l'agriculteur pourrait expliquer cette différence entre les blocs. Par exemple, il est possible d'imaginer que lors d'un apport de fertilisant ou d'un traitement, une des buses du pulvérisateur se soient bouchées et que l'apport n'a pas été homogène, expliquant ainsi la différence marquée entre le bloc I et III. Finalement, l'absence de maladie a permis d'identifier un effet bloc qui a plus impacté le rendement que les traitements.

Il est possible d'apporter plusieurs explications pour ce manque de contamination. L'absence de maladie sur la parcelle peut être liée aux conditions climatiques. En effet, en hiver 2022/2023 il y a eu moins de précipitations qu'en hiver 2021/2022 (figure 18). La septoriose a un fonctionnement de dispersion liée au splashing. Pour faciliter la dispersion du champignon, les précipitations sont leur meilleur allié. Le manque de pluie en début d'année 2023 (fin 2022) à limiter la propagation de la maladie, cela peut expliquer le manque d'intensité de la maladie en mai., la propagation du champignon est ralentie voire stoppée. Une autre cause d'absence de la maladie peut être l'influence du mélange variétal, quatre variétés ont été utilisées par l'agriculteur dans sa parcelle, parmi ces variétés plusieurs sont tolérantes à la septoriose. En effet, dans l'essai fongicide de 2021/2022, la différence entre les variétés notamment face à la maladie est remarquable. Rgt Sacramento et Lg Absalon sont deux des quatre variétés utilisées dans l'essai 2022/2023, l'utilisation de ces deux variétés ensemble peut permettre de maximiser le rendement et de minimiser l'impact de la maladie. La combinaison de variété tolérante et sensible permet le plus souvent de limiter la maladie. En effet, l'utilisation de plusieurs variétés amène une diversité génétique dans le champ, les pathogènes sont spécifiques et impactent le plus souvent un type génétique en particulier. Ainsi en diversifiant la parcelle la contamination a pu être minimisée.

Cette méthode alternative est souvent la solution préconisée par les conseillers Chambre pour limiter l'utilisation de traitement et ainsi réduire les IFT des agriculteurs comme le mandaté le plan ECOPHYTO. En plus des conseils prodigués par la Chambre, depuis un an, une nouvelle prestation a vu le jour, le conseil stratégique phytosanitaire (CSP*). Ce CSP est obligatoire depuis 2023 pour les agriculteurs qui souhaitent renouveler leur Certiphyto pour acheter et appliquer des produits phytosanitaires (CAPDL 2023). Lors de ce conseil, le conseiller Chambre passe en revue les traitements utilisés par l'agriculteur et calcule les IFT. A l'issu de cela, il propose des méthodes alternatives pour limiter l'utilisation des pesticides comme le mélange variétal, les désherbages mécaniques ou le biocontrôle.

2. La comparaison biocontrôle/conventionnelle

L'essai fongicide 2022/2023 n'a pas permis d'obtenir des résultats sur la comparaison des traitements. En revanche, l'essai 2021/2022 est plus concluant sur la disparité conventionnelle/biocontrôle. En effet, la comparaison entre les produits de biocontrôle de l'essai 2021/2022 a permis de mettre en évidence que les produits utilisés ont un effet sur la septoriose car les modalités avec du biocontrôle possède plus de rendement que les témoins non traités. Cependant, les modalités avec des produits conventionnels ont de meilleurs résultats que le biocontrôle. Dans le cadre de cet essai, les traitements avec des pesticides sont plus efficaces que le biocontrôle. Une des explications possibles est que dans le cadre de l'essai, les modalités biocontrôle ont été appliquées une voire deux fois pendant le cycle de culture, certaines notices d'utilisations peuvent préconiser plus de passages de 2 à 5 passages sur la culture par produit.

Finalement, les produits de biocontrôle seuls ne suffisent pas à égaler les performances des fongicides classiques. Certains agriculteurs en plus de l'utilisation de traitements fongiques réalisent des désherbages mécaniques, ils peuvent également mettre en place des faux semis. La méthode du faux-semis est une technique agronomique simple. Elle consiste à préparer le sol mécaniquement pour faire germer les mauvaises herbes et les détruire dès qu'elles ont germé (Chambre Gers.fr). D'autres méthodes alternatives comme le biocontrôle sont testées pour montrer leur efficacité. Par exemple, la Chambre depuis 2020 teste des traitements homéopathiques sur les cultures comme le blé tendre. Ces traitements sont le résultat de broyats de matière issus des plantes et/ou des animaux. Ces décoctions diluées puis filtrées sont ensuite fixées sur des billes de lactose. Ces dernières sont appliquées comme les produits fongiques puisque les billes de lactose sont diluées dans de l'eau puis pulvérisées sur la culture. Une partie de l'essai fongicide 2022/2023 testait des produits homéopathiques, les résultats ont montré que dans le cas de l'absence de maladie de cette année, les rendements étaient plus importants que ceux avec les modalités conventionnelles ou biocontrôle. La partie homéopathique de l'essai a eu de meilleure performance que la partie biocontrôle. Certaines substances homéopathiques sont directement achetées en pharmacie comme les huiles essentielles. Certains résultats de l'utilisation de produits homéopathiques contre des maladies fongiques peuvent être efficaces. Il y a peut-être un intérêt d'utiliser des substances homéopathiques qui ont des effets proches de certains produits conventionnels ou de biocontrôle. Certaines substances pourraient avoir des effets directs sur les pathogènes ou activer les défenses des plantes en stimulant le système immunitaire des plantes (SAR*).

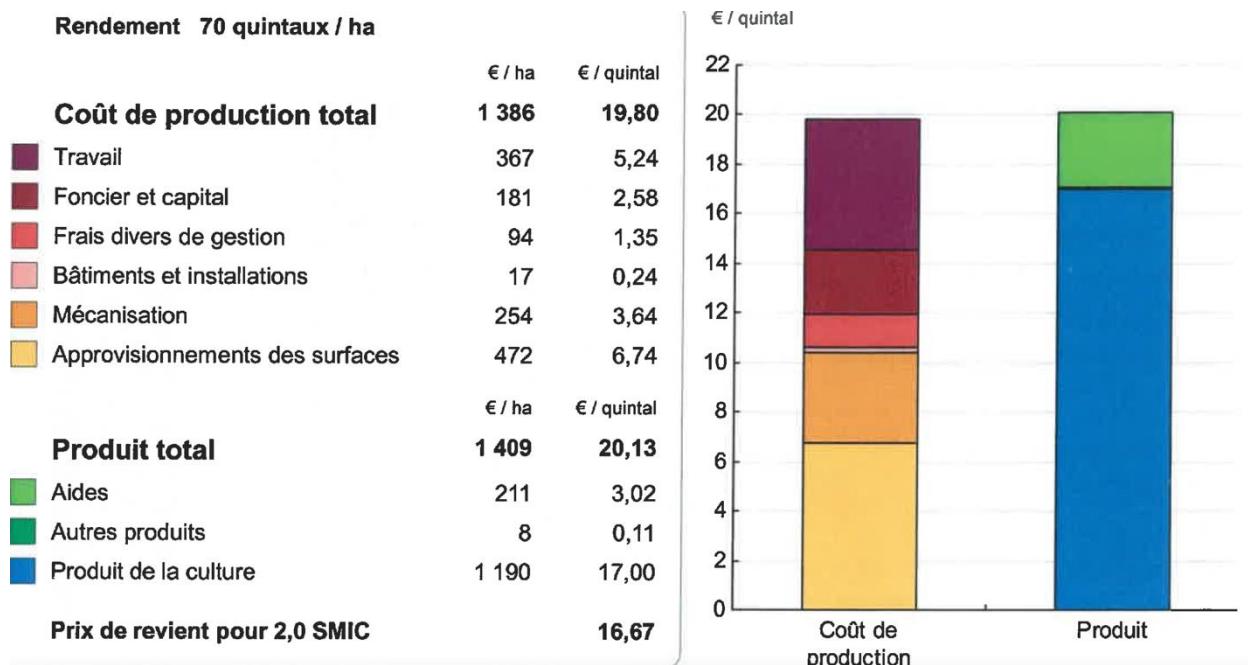


Figure 19. Simulation des coût de production pour un blé tendre à 70 q/ha (

En définitive, l'efficacité de ces traitements pour contrôler les maladies fongiques ne peut être sous-estimée, car elle joue un rôle crucial dans la préservation des rendements et de la qualité des cultures. Cependant, il est impératif de trouver un équilibre entre la nécessité de traiter et le coût associé à ces pratiques. Les observations et la connaissances des maladies permettent d'anticiper et de traiter à temps. Il arrive que les parcelles soient dépourvues de maladie ce qui est le cas de l'essai fongicide 2022/2023. Ainsi, traiter plus que nécessaire n'apporte pas de protection accrue de la plante notamment lorsqu'il n'y a pas de maladie, mais cela entraîne incontestablement des coûts supplémentaires. C'est le cas des modalités avec trois applications de produits alors qu'une seule était suffisante. La réduction des coûts pour les agriculteurs tout en maintenant des rendements de qualité est un objectif atteignable grâce à une gestion efficace des traitements fongiques. Les exploitations agricoles en plus des traitements ont d'autres coûts. Par exemple, pour une récolte de blé tendre à environ 70 q/ha, en plus des coûts de cultures, il y a des frais de gestions, de mécanisations et de man d'œuvre (figure 19). La bonne gestion d'un budget d'une exploitation passe par tout d'abord par la bonne gestion des cultures, bonnes utilisations des traitements L'éducation et la sensibilisation des agriculteurs à ces questions sont essentielles pour garantir la durabilité économique de leurs pratiques tout en minimisant l'impact environnemental lié à une utilisation excessive de produits chimiques par exemple.

En conclusion, les résultats de chaque essai sont consignés chaque année dans un recueil d'expérimentation à destination des agriculteurs pour les informer, des meilleures pratiques et des nouveautés testées dans les essais. Même si cet essai n'a pas permis de répondre aux problématiques liés aux manque de maladie qui a empêché de constater l'effet des traitements pour trouver la meilleure combinaison ou pour évaluer les performances du biocontrôle. L'idée d'avoir une parcelle sans maladie est l'espérance de chaque agriculteur, pouvoir avoir une bonne récolte sans avancer des coûts pour les traitements permettrait de faire une marge impressionnante. Le réflexe de traiter même en préventif mène à des dépenses qui pourraient être évitées. En définitive, tout au long de ce mémoire, beaucoup d'alternatives ou de compléments pour lutter contre les maladies ont été mis en évidence comme le mélange variétal. L'idée est d'informer et d'éduquer l'agriculteur à ne pas faire de raccourci vers les fongicides conventionnels quand d'autres produits plus respectueux existent. Une collaboration entre les agriculteurs, les chercheurs et les conseillers agricoles comme les conseillers Chambre est essentielle pour développer des pratiques agricoles plus durables et économiquement viables.

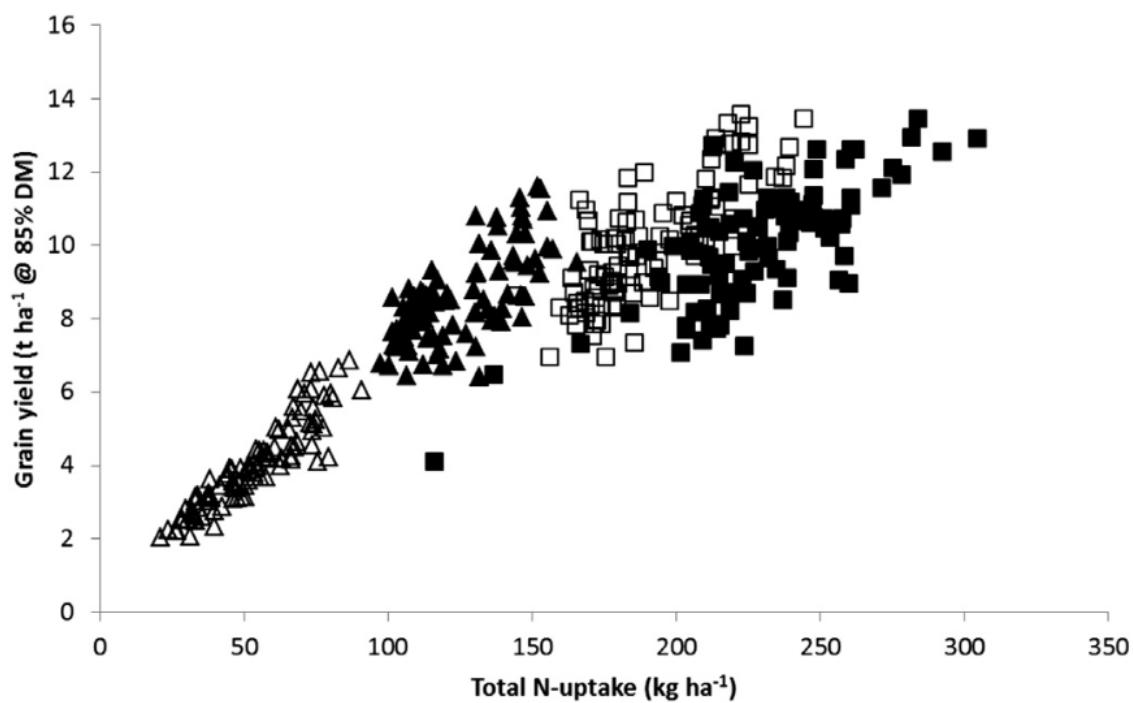


Figure 20. Impact de l'application d'engrais azotés sur le rendement en grains et l'azote total absorbé par la culture à maturité. (Barraclough *et al.* ,2010)

(Les taux d'application de N sont de 0 (triangles ouverts), 100 (triangles fermés), 200 (carrés ouverts) et 350 (carrés fermés) kg N ha⁻¹)

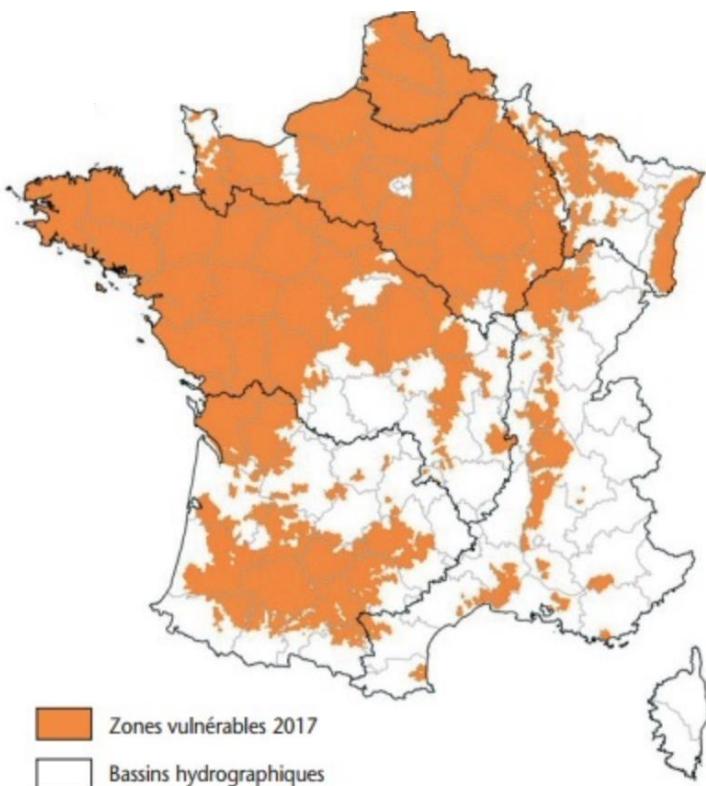


Figure 21. Cartes des zones vulnérables aux pollutions par les nitrates d'origine agricole (vaucluse.gouv.fr, 2017)

3. Les perspectives de ce travail

Ce travail sur les fongicides a permis de montrer qu'ils possèdent un effet direct sur le rendement des modalités mais il n'y a pas d'effet sur le taux de protéine et le PMG. Des articles étudiant l'effet de la fertilisation comme la revue Reducing the reliance on nitrogen fertilizer for wheat production publié dans le Journal of Cereal Science en 2014 et des autres essais menés par la Chambre sur le blé permettent de dire que le taux de protéine interagit directement avec la quantité de fertilisant apporté à la culture. C'est-à-dire que la culture de blé tendre a besoin d'un apport d'azote entre 2,8 et 3,2 kg d'azote par quintal en fonction des variétés (arvalis.fr). Plus il y a d'azote apporté à la culture plus le rendement est important (figure 20). En plus de cela, les résultats des essais de fertilisation menés sur le blé ont permis d'établir un lien entre le taux de protéine et la fertilisation. Si le blé n'a pas assez d'azote pendant son cycle alors le taux de protéine diminue et la qualité de la récolte en sera impactée. L'azote ajouté peut être apporté à différents moments du cycle et sous différentes formes : engrains liquides, micro-granulés, fumier ou lisier. L'apport trop grand d'azote sur les cultures va amener des problématiques sur l'environnement. En effet, une partie des engrains qui ne sont pas assimilés par la plante sont lessivés par la pluie et finissent dans les cours d'eau ou les nappes phréatiques. Cette pollution des eaux est due aux formes dérivées de l'azote à la production des particules fines et à l'acidification des eaux (ammoniac), à leur eutrophisation (nitrates), au réchauffement climatique et à la destruction de la couche d'ozone (protoxyde d'azote) (infometha.org). La pollution des eaux par les nitrates est due en grande partie à l'agriculture. En effet, en France, la présence de nitrates (dérivé de l'azote) dans les eaux continentales provient à 66 % de l'agriculture, à la suite de l'épandage de doses massives d'engrais azotés et de lisier les zones les plus atteintes étant les plaines alluviales qui récoltent les eaux des grands bassins versants et sont des lieux privilégiés d'agriculture intensive (figure 21). Le reste est issu des rejets des collectivités locales (22 %) et de l'industrie (12 %) (cnrs.fr).

Comme pour l'utilisation des fongicides, les apports de fertilisant doivent être raisonnés et pour cela le suivi des agriculteurs par des professionnels est primordial. Il existe des alternatives aux fongicides conventionnels moins nocives pour l'environnement. En s'intéressant à la fertilisation, il est probable de trouver des solutions ou des nouveaux produits pour apporter de l'azote aux cultures sans participer à la pollution des sols et des eaux.

Bibliographie & sitographie

- Brown J.K.M., Chartrain L., Lasserre-Zuber P., and Saintenac C. (2015). *Genetics of resistance to Zymoseptoria tritici and applications to wheat breeding*. Fungal Genet. Biol. n°79, 33–41
- Gilbert J. and Haber S. (2013). *Overview of some recent research developments in fusarium head blight of wheat*. Can. J. Plant Pathology. n°35, 149–174
- Guillemette T. (2021). *Fungal and fungal-like diseases of plant*, n°1, 16
- Hawkesford M. J. (2014). *Reducing the reliance on nitrogen fertilizer for wheat production*. Journal of Cereal Science. n° 59, 276-283
- Francki, M.G. (2013) *Improving Stagonospora nodorum resistance in wheat: a review*. Crop Sci. n°53, 355-365
- Figueroa M., Hammond-Kosack K. E., Solomon P. S. (2018). *A review of wheat diseases—a field perspective*. Molecular plant pathology GY. n°19, 1523–1536
- Milus E.A., Hershman D., and McMullen M. (2001). *Analysis of the 2001 uniform wheat fungicide and biocontrol trials across locations*. National Fusarium Head Blight Forum, 75-79
- Milus E.A., Rohman P.C., and Weight C.T. (2001). *Efficacy of fungicides and biocontrols against fusarium head blight in arkansas*. National Fusarium Head Blight Forum, 80-81
- Park R., Fetch T., Hodson D., Jin Y., Nazari K., Prashar M., and Pretorius Z. (2011). *International surveillance of wheat rust pathogens: progress and challenges*. Euphytica, n°179, 109–1
- Schumann G.L., D'Arcy C.J. (2009). *Essential Plant Pathology*. St. Paul, MN: APS Press
- Torriani S.F.F., Melichar J.P.E., Mills C., Pain N., Sierotzki H. and Courbot M. (2015). *Zymoseptoria tritici: a major threat to wheat production, integrated approaches to control*. Fungal Genet. Biol. n° 79, 8–1
- Barracough P. B., Howarth J. R., Jones J., Lopez-Bellido R., Parmar S., Shepherd C. E., Hawkesford M. J. (2010). *Nitrogen efficiency of wheat: Genotypic and environmental variation and prospects for improvement*. Europ. J. Agronomy. n°33, 1–11
-

- Arvalis (2023). *Outils d'aide à la décision - Choix variétale* [en ligne] (consulté le 28/07/2033). Disponible sur : <https://choix-des-varietes.arvalis-infos.fr/bletendre/criteres>
- Agreste (2021). *Recensements agricoles 2020-2010* [en ligne] (consulté le 13/07/2033). Disponible sur https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/RA2020_001/detail
- Agroecologie-rhin (2019) *Biocontrôle et maladies du blé* [en ligne] (consulté le 20/08/2033). Disponible sur :

<https://agroecologie-rhin.eu/wp-content/uploads/2021/04/Innov.AR-Biocontrôle-des-maladies-du-blé-2018-2020.pdf>
- France AgriMer (2020). *Blé tendre, fiche filière* [en ligne] (consulté le 15/07/2033). Disponible sur <https://www.franceagrimer.fr/fam/content/download/63215/document/FICHE%20FILIE%20BLE%20TENDRE.pdf?version=1>
- Entraide (2020) *Quel coût de chantier pour semer en combiné*. [en ligne] (consulté le 22/08/2033). Disponible sur : <https://www.entraind.com/articles/quel-cout-de-chantier-pour-semer-en-combine-tracteur-main-d-oeuvre#:~:text=Le%20coût%20total%20d%27un,60%20à%2088%20€%2Fha>
- Inosys (2017). *Coûts de production en grandes cultures : Synthèse départementale Vienne 2017* (consulté le 22/08/2033). Disponible sur : https://vienne.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Nouvelle-Aquitaine/104_Inst-Vienne/Documents/mes_productions/production_vegetale/Couts-de-production-en-grandes-cultures/Couts-de-production-en-grandes-cultures-Synthese-departementale-Vienne-2017.pdf
- Ministère de l'agriculture (2022). *Indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires* [en ligne] (consulté le 05/07/2033). Disponible sur <https://agriculture.gouv.fr/indicateur-de-frequence-de-traitements-phytosanitaires-if>
- Ministère de l'agriculture (2022). *Le plan ECOPHYTO, qu'est-ce-que c'est ?* [en ligne] (consulté le 14/07/2033). Disponible sur : <https://agriculture.gouv.fr/le-plan-ecophyto-quest-ce-que-cest>

PARTIE ANNEXES

1. Annexe I

Liste des 11 sites ayant réalisés les expérimentations comparant les produits de biocontrôle et des produits conventionnels (Milus et al., 2001)

Location (#)	Location (state and city or variety)	Field severity ¹ (%)	FDK ¹ (%)	DON ¹ (ppm)
1	Ohio	33.0a	33.2b	13.8b
2	Michigan (Freedom)	32.4a		1.0c
3	Michigan (Harus)	22.1b		1.7c
4	Minnesota	19.2b	10.5cd	2.0c
5	Michigan (Frankenmuth)	18.6bc		0.7c
6	Kentucky	17.3bc	21.0c	3.9c
7	North Dakota (Carrington)	17.2bc		
8	North Dakota (Langdon durum)	16.7bc		
9	Arkansas	12.8cd	52.8a	29.2a
10	Missouri	10.1de		1.6c
11	Virginia	5.1ef		
12	North Dakota (Fargo)	3.8f	2.8d	1.2c
13	North Dakota (Langdon)	3.2f		
14	North Dakota (Minot)	2.7f		
15	New York	1.6f	6.2d	
16	Iowa	1.6f		
17	Indiana			0.8c

2. Annexe II

Résultats brutes de l'essai fongicides 2022/2023 implanté par la Chambre d'Agriculture des Pays de la Loire (CAPDL, 2023)

BLOC	MODA	Ordre de récolte	Surface parcelle	Rdt brut microparcelle	Humidité	PS	Rendement brut q/ha	Rendement à la norme
I	TNT	42	12,6	8,09	14,8	75,9	64,2	64,4
I	2	30	12,6	8,36	14,7	77,3	66,3	66,6
I	3	48	12,6	8,95	14,8	76,4	71,0	71,2
I	4	31	12,6	8,32	14,8	75,8	66,0	66,2
I	5	37	12,6	9	14,8	76,6	71,4	71,6
I	6	43	12,6	8,94	14,7	73,7	71,0	71,2
I	7	54	12,6	8,9	14,7	76,7	70,6	70,9
I	8	49	12,6	8,99	14,6	77,2	71,3	71,7
I	9	36	12,6	8,51	14,9	76,7	67,5	67,6
I	10	25	12,6	8,38	14,8	77,1	66,5	66,7
II	TNT	41	12,4	8,25	14,7	76,4	66,7	66,9
II	2	47	12,4	8,59	14,8	76,2	69,4	69,6
II	3	50	12,4	8,37	14,8	76,7	67,6	67,8
II	4	53	12,4	8,64	14,9	76,8	69,8	69,9
II	5	32	12,4	9,34	14,8	76,7	75,5	75,7
II	6	35	12,4	9,39	14,9	76,6	75,9	76,0
II	7	38	12,4	9,22	14,9	76,5	74,5	74,6
II	8	44	12,4	8,78	14,8	76	70,9	71,1
II	9	26	12,4	9,33	15,1	76,8	75,4	75,3
II	10	29	12,4	9,36	14,9	76,6	75,6	75,7
II	TNT	34	14,7	10,26	14,8	76,2	69,8	70,0
II	2	52	14,7	10,61	14,7	76,7	72,2	72,4
II	3	28	14,7	11,64	14,9	75,7	79,2	79,3
II	4	39	14,7	10,93	14,8	76,2	74,4	74,5
II	5	46	14,7	10,88	14,8	76,6	74,0	74,2
II	6	51	14,7	10,82	14,8	76,5	73,6	73,8
II	7	27	14,7	11,82	15	76,6	80,4	80,4
II	8	33	14,7	11,37	14,8	75,1	77,3	77,5
II	9	45	14,7	11,59	14,7	76,5	78,8	79,1
II	10	40	14,7	10,9	14,8	75,3	74,1	74,3
I	11	60	12,6	8,63	14,6	75,2	68,5	68,8
I	12	61	12,6	8,67	14,4	75,8	68,8	69,3
II	11	62	12,4	8,48	14,6	76,1	68,5	68,8
II	12	59	12,4	8,2	14,7	76,2	66,3	66,5
III	11	58	14,7	10,59	14,9	75,1	72,0	72,1
III	12	63	14,7	11,15	14,6	76	75,9	76,2

Fongi

Bio

3. Annexe III

Tableau des prix de chaque produits fongicides utilisés dans l'essai fongicide 2022/2023
(CAPDL,2023)

Nom commercial	Prix (€/L ou €/Kg)
LIBRAX	46
REVYSTAR XL	59
ELATUS ERA	66
ELATUS PLUS	46
AMISTAR	37
MIRROR	15
KARDIX	48
PROSARO	49
MAYANDRA	12
HELIOSOUFRE	5
PYGMALION	8,5
ECHIQUIER	17
QUESTAR	26
JUVENTUS	30
FANDANGO	20

 université angers	<p>Diplôme : Master 2 Mention : Biologie Végétale (BV) Parcours : Gestion de la Santé des plantes</p>
Auteur : Eden CADUC Date de naissance* : 19/04/2000	<u>Organisme d'accueil</u> : Chambre d'Agriculture des Pays de la Loire <u>Adresse</u> : 14 avenue Jean Joxé, 49105 Angers
Nb pages : 27 Annexe(s) : 3	
Année de soutenance : 2023	<u>Maître de stage</u> : Alexandre GOURVENNEC
<p><u>Titre français</u> : Evaluation de l'efficacité du biocontrôle par rapport aux fongicides dans la gestion des maladies fongiques : une étude des essais implantés par la Chambre d'agriculture des Pays de la Loire</p> <p><u>Titre anglais</u>: Evaluation of the effectiveness of biopesticide compared with fungicides in the management of fungal diseases: study of trials set up by the Agricultural council of the Pays de la Loire</p>	
<p>Face aux maladies fongiques qui pénalisent la production française de blé, la première solution est le traitement fongique. Cependant, depuis 2018, la France s'engage dans une politique de réduction des phytosanitaires et d'utilisation de méthodes alternatives comme le biocontrôle. Dans cette optique, la Chambre d'Agriculture des Pays de la Loire mène des expérimentations au champ sur le blé pour tester l'efficacité des traitements fongiques, notamment les performances du biocontrôle. Ainsi, dans cet essai fongicide, l'intérêt est porté sur l'identification de la meilleure combinaison de produits pour obtenir le meilleur traitement et comparer les performances des traitements biocontrôle/conventionnel. Dans les résultats de cet essai, il n'est pas possible de fournir une réponse pour le meilleur traitement en raison de l'absence de maladie. Dans ce cas, il n'y avait pas de différence entre les traitements. Finalement, seul l'impact économique lié au coût de chaque traitement est visible en examinant la perte ou le gain financier en fonction des traitements utilisés. L'absence de maladie peut être due aux conditions climatiques ou à l'utilisation d'un mélange variétal qui limiterait la contamination dans la parcelle. Pour la comparaison biocontrôle/conventionnel, un autre essai fongique permet de conclure que les traitements conventionnels semblent plus efficaces que les traitements de biocontrôle. Les produits de biocontrôle sont l'avenir, les comprendre, les tester sont essentielles pour favoriser une agriculture durable et écologique.</p>	
<p>Faced with fungal diseases that harm French wheat production, the first solution is fungicide treatment. However, since 2018, France has been committed to a policy of reducing pesticides and using alternative methods like biocontrol. In this regard, the Agriculture Council of the Pays de la Loire conducts field experiments on wheat to test the effectiveness of fungicidal treatments, especially biopesticide's performance. Therefore, in this fungicide trial, the focus is on identifying the best combination of products to achieve the optimal treatment and compare the performance of biopesticide and conventional treatments. In the results of this trial, it's not possible to determine the best treatment due to the absence of disease. In this case, there was no difference between the treatments. Ultimately, only the economic impact related to the cost of each treatment is evident by examining the financial loss or gain based on the treatments used. The absence of disease may be due to weather conditions or the use of a mixed variety that limits contamination in the field. For the biopesticide vs conventional, another fungicide trial suggests that conventional treatments appear to be more effective than biopesticide. Biopesticides are the future; understanding and testing them are essential to promote sustainable and ecological agriculture.</p>	
<p>Mots-clés : fongicides – essai – absence maladie – rendement – biocontrôle Key Words: fungicides - trial - absence of disease - yield - biocontrol</p>	

