

UN NOUVEAU MODULE DE RENOUVELLEMENT DU TRAITEMENT CONTRE LA SEPTORIOSE DU BLÉ DANS LES OAD ARVALIS

D. HAMERNIG⁽¹⁾, G. COULEAUD⁽¹⁾ et E. GOURDAIN⁽¹⁾

⁽¹⁾ ARVALIS Institut du Végétal, Station expérimentale 91720 Boigneville, FRANCE,
d.hamernig@arvalis.fr
g.couleaud@arvalis.fr
e.gourdain@arvalis.fr

RÉSUMÉ

Le positionnement des traitements fongicides en fonction du développement des maladies est un élément clé pour optimiser leur efficacité et réduire le nombre d'interventions. C'est pourquoi, ARVALIS Institut du végétal a développé le modèle agro-climatique Septo-LIS® qui fournit un conseil sur le positionnement du 1^{er} traitement du blé tendre (T1) pour lutter contre *Zymoseptoria tritici*. Un nouveau module vient récemment d'être intégré à ce modèle pour piloter efficacement la réintervention contre la septoriose (T2). Ce module se base sur l'accumulation de contaminations foliaires depuis le T1 modélisé par Septo-LIS® pour préconiser, le cas échéant, une date de déclenchement du T2. Il a été mis au point à partir de résultats d'expérimentation en petites parcelles réalisés entre 2008 et 2017. L'évaluation conduite sur ces essais révèle que le module permet un gain moyen brut de 2.3 q/ha par rapport à un autre positionnement de T2.

Mots-clés : blé (*Triticum aestivum*), septoriose (*Zymoseptoria tritici*), renouvellement du traitement fongicide, pilotage des traitements fongicides, outil d'aide à la décision.

ABSTRACT

Timing of fungicide application according to disease development is a key element to optimize their efficacy and to reduce the number of treatments. Therefore, ARVALIS Institut du vegetal developed the agro-climatic model Septo-LIS® which provides advices for timing application of the first treatment on wheat (T1) against *Zymoseptoria tritici*. A new module has recently been integrated to this model in order to efficiently control the optimal renewal date for treatment against Septoria tritici blotch (T2). This module is based on the accumulation of foliar infections since the first treatment to recommend, if appropriate, the best date for the second treatment. It has been developed from plot field trials results carried out from 2008 to 2017. The evaluation conducted from these trials shows that this module allows an average gross yield of 2.3 q/ha compared to another T2 timing.

Keywords: wheat (*Triticum aestivum*), septoria tritici blotch (*Zymoseptoria tritici*), fungicide treatment renewal, management of fungicide treatments, decision support system.

INTRODUCTION

Le blé tendre d'hiver est soumis en France à de nombreuses pressions de maladies au cours de son cycle. En particulier, la septoriose foliaire du blé, par sa forte fréquence et l'importance de ses dégâts potentiels est la maladie foliaire principale des blés français. Cette maladie est causée par un champignon de la famille des ascomycètes : *Zymoseptoria tritici*. Elle est présente sur l'ensemble du territoire français et sa nuisibilité peut atteindre 50% dans les situations les plus exposées (Maufras *et al.*, 2016). Différents moyens de lutte existent pour combattre cette maladie. La lutte agronomique se résume essentiellement à l'utilisation de variétés de blé possédant un niveau de résistance variétale élevé contre la septoriose. La lutte chimique repose sur l'application de produits phytosanitaires au cours du développement de la culture. Cependant, cette dernière est actuellement remise en cause par la prise de conscience sociétale des impacts négatifs des produits phytosanitaires sur l'environnement et la santé humaine. Dans ce contexte, la recherche de solutions pour une réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires repose sur l'augmentation de l'efficacité des traitements, la recherche de moyens de lutte alternatifs et la reconception de systèmes de cultures limitant le développement des maladies. Une voie possible d'augmentation de l'efficacité des traitements réside notamment dans l'optimisation du positionnement des interventions phytosanitaires via l'utilisation d'Outils d'Aide à la Décision (OAD). C'est pourquoi, ARVALIS - Institut du Végétal a développé Septo-LIS® (Gouache et Couleaud, 2009), OAD qui permet d'optimiser le positionnement de la 1^{ère} intervention fongicide contre la septoriose (T1). Cet OAD repose sur l'utilisation couplée d'un modèle épidémiologique de développement de la maladie et d'un modèle de développement du blé. La dynamique journalière de contamination des six derniers étages foliaires du blé par des pycniospores de *Zymoseptoria tritici* est modélisée en fonction des conditions climatiques. Un module décisionnel permet ensuite de déterminer la date optimale du 1^{er} traitement au moyen de seuils de risques associés aux contaminations foliaires modélisées et à la sensibilité variétale. Cependant, ce premier traitement ne suffit pas toujours à protéger efficacement la culture contre la septoriose jusqu'à la fin de la période de risque. En effet, le mode d'action des fongicides ne permet pas de protéger contre de nouvelles attaques les feuilles qui ne sont pas complètement dégagées au moment du traitement. Or les nuisibilités les plus importantes sont observées lorsque les deux dernières feuilles du blé (F1 et F2) sont infectées par la septoriose (Thomas *et al.*, 1989). De plus, la persistance dans le temps des produits appliqués lors du 1^{er} traitement fongicide est limitée. Une réintervention contre la septoriose s'avère ainsi parfois nécessaire si la pression maladie reste élevée après le T1. En outre, Gouache et Couleaud (2009) ont mis en évidence l'enjeu du positionnement du renouvellement du traitement contre la septoriose (T2).

L'objectif de cet article est donc d'intégrer dans Septo-LIS® un module permettant de raisonner le positionnement d'une éventuelle réintervention contre la septoriose lorsqu'elle est nécessaire. Dans un premier temps nous avons mis en place des règles de décision de réintervention en fonction des nouvelles contaminations cumulées depuis l'application du 1^{er} traitement simulées par le modèle. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur des résultats d'essais de comparaison de positionnements de traitements fongicides du réseau Arvalis réalisés entre 2008 et 2017. Dans un deuxième temps nous avons évalué les performances de ce module sur ces essais en comparant les préconisations du modèle avec les autres modalités de positionnement des traitements testées dans les essais.

MATERIEL ET MÉTHODES

RAISONNEMENT ET FONCTIONNEMENT DU MODULE DE RENOUVELLEMENT

Le modèle épidémiologique à la base de Septo-LIS® permet de simuler dans le temps la dynamique de contamination journalière par les spores de *Septoria tritici* des 6 derniers étages foliaires en fonction des conditions climatiques. Ce modèle décrit dans Gouache *et al.* (2013) est en réalité composé de trois modèles qui interagissent : un modèle qui décrit l'évolution de l'inoculum du sol pendant l'hiver, un modèle qui décrit l'évolution de l'inoculum sur les feuilles (apparition de symptômes qui produisent des spores qui, après une période de latence, sont dispersées sur la plante sous l'effet de la pluie) et un modèle phénologique qui décrit l'apparition des feuilles (Gouache *et al.*, 2012). Le module décisionnel actuel de Septo-LIS® définit des seuils associés aux cumuls de ces infections sur chaque étage foliaire en fonction de la sensibilité variétale et dont le

dépassement permet de définir une date pour le déclenchement du T1. Les modèles utilisent des données climatiques spatialisées au point géographique souhaité (Deudon *et al.*, 2017)

Afin de proposer un module de renouvellement du traitement contre la septoriose, nous avons donc cherché similairement à déterminer des seuils de contaminations associés au cumul de contaminations survenant après le T1 qui justifieraient de déclencher une réintervention. Toutefois, le positionnement optimal du renouvellement d'un traitement contre la septoriose dépend de l'efficacité du premier traitement et donc en particulier du positionnement de ce dernier. Pour cette raison, le cadre d'utilisation du module de réintervention contre la septoriose se limitera aux cas où le 1^{er} traitement a été effectué à une date proche de la date préconisée par le module de T1 de Septo-LIS®.

Dans le module de renouvellement mis en place, les contaminations survenant après le T1 sont simulées par le modèle épidémiologique de Septo-LIS®. Afin de tenir compte de l'efficacité du 1^{er} traitement sur la dynamique de l'épidémie, ce cumul est pénalisé dans le temps et un nombre de contaminations réellement efficaces calculées par l'équation suivante :

$$Contaminations_{efficaces}(j) = Contaminations_{septolis}(j) * (1 - Efficacité_{t1}(j))$$

Avec j, le nombre de jours depuis le T1.

En plus de cela, un délai minimal de 12 jours entre la date de 1^{er} traitement préconisé par Septo-LIS® et la date de renouvellement est également fixé. En effet, on considère qu'un fongicide appliqué à une dose raisonnable dans de bonnes conditions et au bon moment est censé contenir l'épidémie pendant cette période pour la plupart des produits fongicides. Ainsi, dans le cas où, malgré la pénalisation des contaminations efficaces cumulées, le seuil de déclenchement d'une réintervention serait dépassé avant ce délai de 12 jours la préconisation de traitement sera fixée au 12^{ème} jour après le T1.

L'application d'un traitement avant que le blé ait atteint le stade « dernière feuille étalée » (DFE) ne permet pas de protéger la totalité de la surface des feuilles. En effet, les feuilles qui n'étaient pas entièrement déployées lors du traitement ne seront pas protégées à leur base malgré l'application de produits systémiques car ces produits se diffusent principalement vers la pointe des feuilles. Pour tenir compte de cela et de la dégradation des matières actives des produits fongicides au cours du temps, on suppose une diminution linéaire de l'efficacité du T1 après son application jusqu'à atteindre une efficacité nulle :

$$Efficacité_{t1}(j) = \max(a * j + 1 ; 0)$$

Avec a=-1/10 : le taux de décroissance journalier de l'efficacité du fongicide.

Cette valeur a été fixée arbitrairement avec l'aide de l'expertise du pôle de protection intégrée des cultures d'ARVALIS Institut du Végétal. Cette hypothèse est néanmoins discutable car cette équation ne tient pas compte des spécificités des matières actives utilisées pour le T1 ni de la dose initialement apportée.

Le calage des seuils décisionnels pour la réintervention a été réalisé grâce au regroupement de résultats d'essais de comparaison de positionnement de traitements fongicides (cf section ci-après : « Détermination des seuils de réintervention »). Ces seuils n'intègrent volontairement pas l'effet de la sensibilité variétale du blé à la septoriose. En effet, le module décisionnel de Septo-LIS® pour le calcul de la date optimale du T1 intègre déjà un effet de sensibilité variétale (plus les variétés sont résistantes, plus les seuils de déclenchement du T1 sont élevés). Ainsi, la sensibilité variétale du blé se répercute indirectement dans le positionnement du T2 : toutes choses égales par ailleurs, plus une variété de blé tendre est résistante à la septoriose, plus sa date de T1 optimale sera décalée, ce qui conduira également à retarder la date du T2 préconisée par le module, pouvant éventuellement même conduire à des impasses de traitement dans certaines situations.

Finalement le principe de fonctionnement du module de renouvellement repose sur le calcul journalier du cumul de contaminations efficaces depuis le T1 préconisé par Septo-LIS®. Le déclenchement de la réintervention est conseillé le jour où ce cumul dépasse les seuils de décision définis (à condition qu'un délai minimum de 12 jours soit dépassé). La période de traitement conseillé pour la septoriose se situe entre le stade 2 nœuds et le stade floraison. Une fois le stade floraison passé, il est souvent déjà trop tard pour réintervenir contre cette maladie. Par conséquent, on considère que le renouvellement du traitement n'est pas nécessaire si les seuils ne

sont pas dépassés lorsque le stade mi-floraison est atteint. Le module décisionnel préconisera donc une impasse de T2 dans les cas où les seuils ne seraient pas dépassés à ce stade.

DETERMINATION DES SEUILS DE REINTERVENTION :

Les niveaux des seuils de cumul de contaminations pour le déclenchement d'une réintervention ont été optimisés à partir du regroupement de résultats d'essais de positionnement de traitements contre la septoriose. Il s'agit de différents protocoles réalisés en 2008, 2009, 2014, 2015, 2016 et 2017 au sein du réseau Arvalis et dans lesquels sont comparés différents programmes fongicides sur blé tendre d'hiver dont les modalités diffèrent (nombre de traitements appliqués, produits utilisés, doses appliquées et positionnement des traitements). Chaque essai comportait également une modalité non-traitée. Les produits fongicides testés dans les essais correspondent à des produits efficaces couramment utilisés dans les programmes fongicides contre la septoriose. Les essais ont été conduits avec 3 ou 4 répétitions selon les protocoles et les rendements (en q/ha) associés à chaque modalité dans les essais ont été mesurés. Chaque essai a été analysé individuellement au préalable par analyse de variance.

Sélection des données d'essais

Parmi ces essais, seuls ceux où la septoriose était la maladie prépondérante ont été conservés. De même, au sein de ces essais, seuls les programmes fongicides pour lesquels la date du T1 est positionnée autour de la date préconisée par Septo-LIS® ont été retenus pour cette étude. Comme indiqué précédemment, on suppose que l'efficacité d'un traitement fongicide n'est pas la même lorsque ce traitement est appliqué avant ou après le stade dernière feuille étalée. En effet, avant DFE, l'efficacité du T1 est limitée par la persistance de ce traitement mais également par le fait que l'épidémie peut se développer sur les surfaces des feuilles non protégées par le T1. Après DFE par contre, le renouvellement du traitement ne dépend plus que de la persistance d'action du 1^{er} traitement. Il a donc été décidé de définir des seuils de réintervention différents dans les cas où le T1 était réalisé avant DFE et dans les cas où il était réalisé une fois ce stade dépassé. Cependant, étant donné que les essais disponibles portent majoritairement sur l'étude de variétés très sensibles à la septoriose, très peu de cas où Septo-LIS® préconisait d'effectuer le T1 après le stade DFE ont été dénombrés. Il n'a donc pas été possible de traiter ces cas dans le cadre de cet article.

Afin de focaliser uniquement sur l'impact du positionnement du T2 sur la nuisibilité associée à la septoriose, des ensembles de programmes fongicides comparables pour le positionnement du T2 ont été sélectionnés au sein de chaque essai : il s'agit de programmes fongicides dont les modalités (produit/dose/positionnement du T1, produit/dose du T2 et éventuellement produit/dose/positionnement du T3 s'il existe) sont toutes identiques à l'exception de la date de positionnement du T2. En pratique, les essais disponibles ne permettent de comparer que deux modalités différentes de positionnement du T2. Les analyses ont donc été réalisées sur des couples de programmes fongicides. Les rendements bruts associés aux deux modalités de positionnement du T2 au sein d'un couple ont été comparés entre eux par le test de la plus petite différence significative (PPDS). Seuls les couples pour lesquels la différence de rendement est significative entre les 2 modalités de positionnement ont été conservés dans cette étude. On considère alors que la meilleure modalité de positionnement du T2 au sein d'un couple est celle qui conduit au rendement brut le plus élevé.

Au final, le regroupement des données d'essais a permis de sélectionner 33 couples de comparaisons pour lesquels le T1 Septo-LIS® était situé avant le stade DFE.

Méthodologie d'analyse des données des essais :

Nous avons analysé les couples de programmes fongicides sélectionnés pour déterminer si le cumul des contaminations efficaces depuis le T1 pouvait être un bon indicateur pour estimer la date optimale du T2 dans le cas où le T1 Septo-LIS® intervient avant le stade DFE. Nous avons ainsi cherché à identifier une valeur seuil optimale de cumul pour la réintervention. L'objectif du renouvellement du traitement contre la septoriose étant de protéger les feuilles qui contribuent le

plus au rendement (F1 et F2), des seuils de cumul de contaminations ont été testés sur ces 2 feuilles.

Les essais dont nous disposons ne permettent de comparer que 2 modalités différentes de positionnement de T2 parmi toutes les modalités possibles. Or, en théorie, il faudrait mettre en œuvre un bien plus grand nombre de modalités avec des positionnements séquentiels beaucoup plus rapprochés pour pouvoir juger de la date de positionnement optimale. Nous ne pouvons donc pas déterminer directement à partir des couples de comparaison le nombre de contaminations cumulées depuis le T1 conduisant au positionnement optimal absolu du T2. Cependant, chaque couple peut tout de même nous permettre de tirer certaines conclusions pour définir ce seuil.

Soient :

-S : le seuil de contaminations efficaces cumulées depuis le T1 justifiant une réintervention.

-C(T₂₁) : le cumul de contaminations efficaces entre le T1 et la date de réintervention la plus précoce testée au sein d'un couple de comparaison.

-C(T₂₂) : le cumul de contaminations efficaces entre le T1 et la date de réintervention la plus tardive testée au sein d'un couple de comparaison.

-rdt(T₂₁) : le rendement moyen associé à la modalité de réintervention la plus précoce au sein d'un couple de comparaison.

-rdt(T₂₂) : le rendement associé à la modalité de réintervention la plus tardive au sein d'un couple de comparaison.

Si $rdt(T_{2_1}) > rdt(T_{2_2})$, on fait l'hypothèse que le positionnement optimal de réintervention est située avant le T₂₂. Ainsi on peut conclure qu'à la date T₂₂ le nombre de contaminations cumulées aura forcément dépassé le seuil optimal pour la réintervention donc $S < C(T_{2_2})$.

-Si $rdt(T_{2_2}) > rdt(T_{2_1})$, on fait l'hypothèse que le positionnement optimal de réintervention se situe après le T₂₁. Ainsi on peut conclure qu'à la date T₂₁ le nombre de contaminations cumulées n'a pas dépassé le seuil optimal pour la réintervention et donc $S > C(T_{2_1})$.

Ainsi, en se basant sur ces hypothèses, les déductions concernant le seuil optimal de réintervention de chaque couple sont regroupées et analysées afin de déterminer si elles permettent d'estimer un seuil optimal unique cohérent pour la réintervention.

EVALUATION DU MODULE DE RENOUVELLEMENT

Une première évaluation du module a été réalisée sur les données d'essais qui ont été utilisées pour mettre en place le module de renouvellement. La méthodologie employée est la suivante :

-Pour chaque couple de comparaison sélectionné dans les essais, le nombre de contaminations efficaces cumulées entre le T1 et la date de T2 associée à chaque modalité est calculé selon les règles définies dans la section « raisonnement et fonctionnement du module de renouvellement ».

-Parmi ces couples, sont ensuite sélectionnés uniquement ceux dont le cumul de contaminations efficaces entre le T1 et une des 2 modalités de T2 est proche à +/- 8 contaminations près du seuil de réintervention. On considère alors dans chaque couple que cette modalité correspond à la modalité préconisée par le module de renouvellement.

-L'évaluation est ensuite conduite en comparant le rendement brut obtenu avec la modalité de T2 préconisée par le module de renouvellement à l'autre modalité de T2 testée dans chaque couple.

Cette procédure de sélection des couples de programmes pour l'évaluation du module de renouvellement a conduit à retenir 17 couples pour lesquels le T1 Septo-LIS® était situé avant le stade DFE (Tableau I).

Tableau I : Programmes fongicides réalisés pour les couples retenus dans l'évaluation du module-
Table I: Fungicide programs conducted with couples selected for module evaluation

n° de couple	lieu année (variété)	Stade des traitements				
		Z32	Z37	Z39	Z55	Z65
1	SAINT-HILAIRE 2008 (Dinosor)	MENARA 0.3l/ha + Chlorothalonil 1l/ha		OPUS 0.4l/ha+ Prochloraze 0.7l/ha		
		MENARA 0.3l/ha + Chlorothalonil 1l/ha			OPUS 0.4l/ha+ Prochloraze 0.7l/ha	
2	LE SUBDRAY 2014 (Pakito)		CHEROKEE 0.8l/ha	ADEXAR 1l/ha		
			CHEROKEE 0.8l/ha		ADEXAR 1l/ha	
3	LE SUBDRAY 2014 (Pakito)		CHEROKEE 0.8l/ha	ADEXAR 0.8l/ha		
			CHEROKEE 0.8l/ha		ADEXAR 0.8l/ha	
4	BOIGNEVILLE 2014 (Garcia)		CHEROKEE 0.8l/ha	ADEXAR 1l/ha		
			CHEROKEE 0.8l/ha		ADEXAR 1l/ha	
5	BOIGNEVILLE 2014 (Garcia)		CHEROKEE 0.8l/ha	ADEXAR 0.8l/ha		
			CHEROKEE 0.8l/ha		ADEXAR 1l/ha	
6	LYON 2015 (Exelcior)		CHEROKEE 1l/ha	LIBRAX 0.6l/ha		
			CHEROKEE 1l/ha		LIBRAX 0.6l/ha	
7	LYON 2016 (Apache)		CHEROKEE 1l/ha	CERIAx 1.2 l/ha		
			CHEROKEE 1l/ha		CERIAx 1.2 l/ha	
8	LYON 2016 (Apache)		CHEROKEE 1l/ha	CERIAx 0.6l/ha		
			CHEROKEE 1l/ha		CERIAx 0.6l/ha	
9	BUNO 2016 (Pakito)		CHEROKEE 1l/ha	LIBRAX 1l/ha		
			CHEROKEE 1l/ha		LIBRAX 1l/ha	
10	BUNO 2016 (Pakito)		CHEROKEE 1l/ha	LIBRAX 0.4l/ha		
			CHEROKEE 1l/ha		LIBRAX 0.4l/ha	
11	ROTS 2016 (Fructidor)	CHEROKEE 1.33 l/ha		LIBRAX 0.6 l/ha		EPOPEE 0.7 l/ha
		CHEROKEE 1.33 l/ha			LIBRAX 0.6 l/ha	EPOPEE 0.7 l/ha
12	BIGNAN 2016 (Fructidor)		CHEROKEE 1.33 l/ha	LIBRAX 0.6 l/ha		EPOPEE 0.7 l/ha
			CHEROKEE 1.33 l/ha		LIBRAX 0.6 l/ha	EPOPEE 0.7 l/ha
13	BIGNAN 2016 (Bermude)		CHEROKEE 1.33 l/ha	LIBRAX 0.6 l/ha		EPOPEE 0.7 l/ha
			CHEROKEE 1.33 l/ha		LIBRAX 0.6 l/ha	EPOPEE 0.7 l/ha
14	GILLY 2016 (Alixan)	CHEROKEE 1.33 l/ha		LIBRAX 1l/ha		
		CHEROKEE 1.33 l/ha			LIBRAX 1l/ha	
15	GILLY 2016 (Alixan)	CHEROKEE 1.33 l/ha		LIBRAX 0.4l/ha		
		CHEROKEE 1.33 l/ha			LIBRAX 0.4l/ha	
16	CUPERLY 2016 (Trapez)	CHEROKEE 1.33 l/ha		LIBRAX 0.9 l/ha		
		CHEROKEE 1.33 l/ha			LIBRAX 0.9 l/ha	
17	CUPERLY 2016 (Trapz)	CHEROKEE 1.33 l/ha		LIBRAX 0.6 l/ha		EPOPEE 0.7 l/ha
		CHEROKEE 1.33 l/ha			LIBRAX 0.6 l/ha	EPOPEE 0.7 l/ha

Les programmes dont la modalité de positionnement du T2 correspond au positionnement préconisé par le module de renouvellement sont surlignés en jaune (Programs whose T2 positioning modality corresponds to the positioning recommended by the renewal module are highlighted in yellow)

MENARA (Syngenta) : cyproconazole 160 g/l + propiconazole 250 g/l ; OPUS (BASF) : epoxiconazole 125 g/l ; CHEROKEE (Syngenta): chlorothalonil 375 g/l+ cyproconazole 50 g/l+ propiconazole 62.5 g/l ; ADEXAR (BASF) : 62,5 g/l fluxapyroxad+ 62,5 g/l époxiconazole ; LIBRAX : fluxapyroxad 62.5 g/l + metconazole 45 g/l ; CERiAX: pyraclostrobine 66.6g/l+ fuxapyroxad 41.6 g/l+époxiconazole 41.6 g/l ; EPOPEE: prochloraze 267.1 g/l+ tēbuconazole 132.5 g/l.

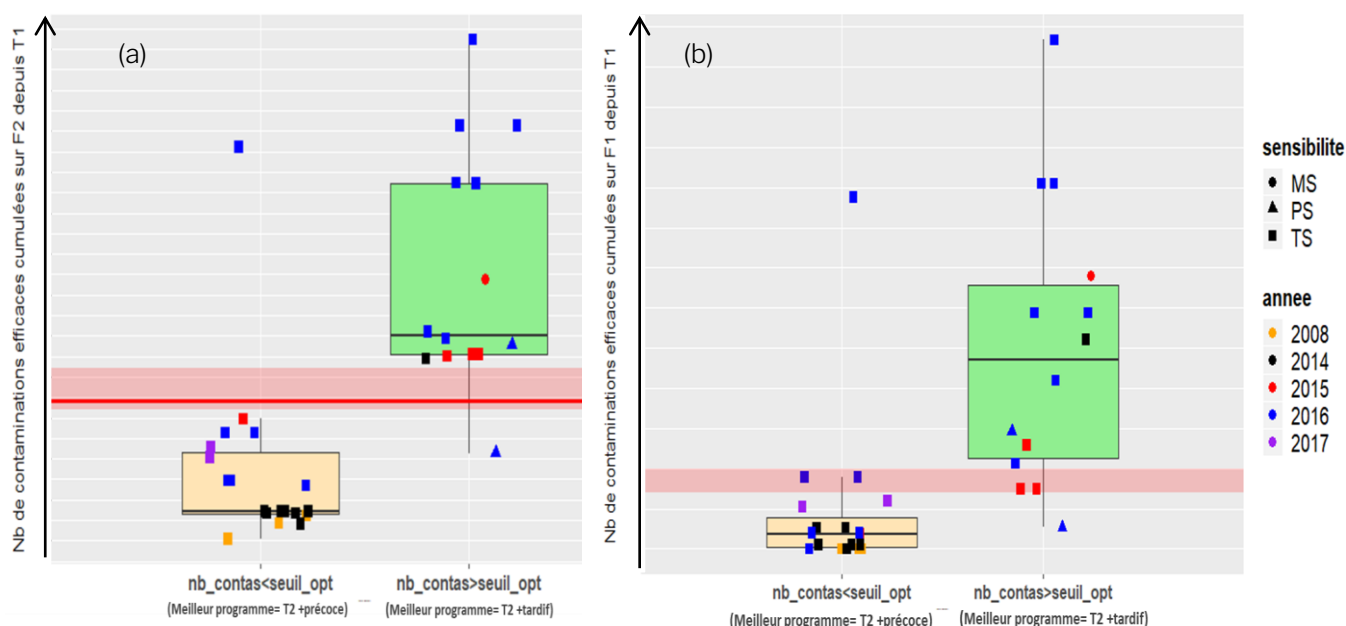
RESULTATS

DEFINITION DES SEUILS DECISIONNELS DU MODULE DE RENOUVELLEMENT

Nous avons cherché à déterminer des seuils en suivant la méthodologie décrite précédemment pour deux indicateurs distincts : le nombre cumulé de contaminations efficaces depuis le T1 sur F2 et le nombre cumulé de contaminations efficaces depuis le T1 sur F1. Les résultats concernant la définition graphique de ces seuils sont présentés dans la Figure 1.

Figure 1 : Estimation du seuil optimal de cumul de contaminations efficaces sur F2 depuis le T1 pour déclencher le renouvellement du traitement. (a) Estimation du cumul optimal de contaminations sur la F2. (b) Estimation du cumul optimal de contaminations sur la F1.

(Estimation of the threshold of optimal accumulation of effective infections since T1 for the recommendation of the 2nd treatment date. (a) Estimation of optimal infections accumulation on leaf F2. (b) Estimation of optimal infections accumulation on leaf F1).



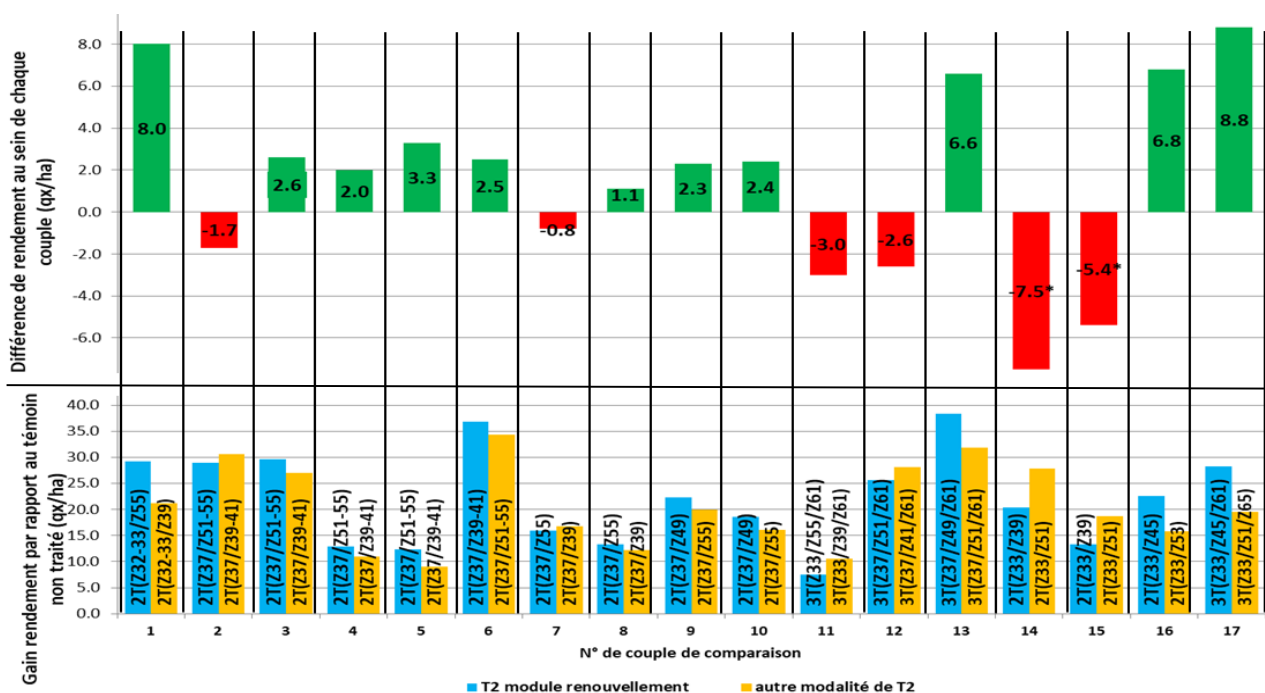
La figure 1a corrobore les hypothèses qui avaient été émises concernant les seuils de cumul de contaminations puisqu'elle montre que l'on peut ajuster un seuil sur F2 qui concorde dans 94% des cas avec nos observations. Sur cette figure, on peut observer que ce seuil optimal de contaminations efficaces pour la réintervention se situe dans un intervalle restreint. Nous choisissons donc de fixer arbitrairement ce seuil dans cet intervalle et nous évaluons le module de renouvellement sur la base de ce seuil. La figure 1b montre par contre qu'il est moins aisé de trouver un seuil sur F1 qui concorde avec nos hypothèses. Sur la base de ces résultats, la valeur du seuil optimisée serait située entre 3.5 et 5 contaminations efficaces depuis le T1 sur F1 mais ne concorde pas avec nos hypothèses dans 12% des cas. Par conséquent, c'est le seuil de cumul de contaminations efficaces sur F2 depuis le T1 qui a été retenu pour déterminer la date optimale du renouvellement du traitement contre la septoriose.

EVALUATION DU MODULE DE RENOUVELLEMENT

Les résultats de l'évaluation du module de renouvellement dans le cas où le T1 Septo-LIS® était situé avant le stade DFE sont présentés dans la Figure 2 ci-dessous. Les résultats montrent que, dans la plupart des couples analysés, le positionnement du renouvellement du traitement à la date préconisée par le module de renouvellement conduit à un meilleur rendement brut que l'autre modalité testée.

Figure 2 : Evaluation du module de renouvellement dans les essais où le T1 est situé avant le stade dernière feuille étalée- Partie inférieure : Gains de rendement par rapport au témoin non traité de chaque couple de comparaison. Les informations contenues dans chaque barre d'histogramme correspondent au nombre de traitements réalisés dans chaque programme et au positionnement de ces traitements sur l'échelle de Zadoks *et al* (1974). Partie supérieure : différence de rendement entre le T2 préconisé par le module de renouvellement et l'autre modalité testée au sein de chaque couple.

(Evaluation of the treatment renewal module for trials where the 1st treatment is positioned before « fully extended leaf » stage is reached)- Lower part: Yield gains of each comparison couple compared to untreated sample. Information contained in bin categories is the number of treatments of each fungicide program and the timing of these treatments on Zadoks scale (Zadoks *et al* 1974). Upper part: Yield differences between modality recommended by the renewal module and the other modality tested in each couple.)



*Dans l'essai dont font partie ces couples, un T3 était nécessaire en pratique

*In the trial of which these couples are part, a T3 was necessary in practice

Cependant quelques couples montrent tout de même un écart négatif de rendement pour la modalité de T2 correspondant au module de renouvellement dont en particulier les couples n°14 et n°15 appartenant à l'essai de Gilly en 2016. Pour ces deux couples le module de renouvellement préconisait une réintervention autour du stade DFE alors que l'autre modalité de T2 testée était un renouvellement autour de l'épiaison. L'analyse globale de l'essai dont font partie ces couples a montré qu'un T3 était en pratique nécessaire dans ces essais du fait de l'importance du développement de la septoriose en fin de cycle du blé. Ainsi le positionnement optimal du T2 pour ces couples est donc biaisé par le poids important du T3. Par conséquent, ces couples ont été retirés des analyses par la suite. Finalement, en moyennant les résultats des autres couples appartenant à un même essai et concernant une même variété de blé, on observe tout de même un gain moyen de rendement brut de positionnement par le module de renouvellement d'environ 2.3q/ha.

La comparaison des couples appartenant à un même essai mais qui diffèrent par les doses de produits appliquées (couples n°2 vs n°3, n°4 vs n°5, n°7 vs n°8, n°9 vs n°10 et n°14 vs n°15) révèle que l'enjeu du positionnement du T2 pour ces couples varie en fonction de la dose de traitement appliquée en T2. L'enjeu du positionnement semble plus important lorsque la dose de produit appliquée en T2 est faible. Il pourrait même exister une interaction entre cette dose et le positionnement optimal de ce T2 puisque nous observons dans deux cas une modification de la

date du positionnement optimal du T2 en fonction de la dose de traitement appliquée en T2 (essais du Subdray 2014 et Buno 2014). Cependant certains de ces couples ne correspondent pas à des programmes conseillés en pratique (programmes sous-dosés trop peu efficaces). Il s'agit des couples 6, 8, 10 et 15. De plus, la comparaison des couples testés dans l'essai de Cuperly en 2016 montre que le fractionnement du T2 en deux interventions successives à dose réduite par rapport à la réalisation d'un T2 unique à dose pleine pourrait également influencer sur l'enjeu du positionnement du T2 (couples 16 et 17).

DISCUSSION

Les résultats de l'évaluation du module de renouvellement conduite sur les 15 couples retenus sont encourageants. Dans le cadre de travail étudié, le module de renouvellement semble donc permettre d'ajuster efficacement le positionnement du T2 pour raisonner les traitements au regard du contexte climatique de l'année et ainsi optimiser leur efficacité. Ces résultats contredisent ainsi l'hypothèse de Paveley *et al.* (2000) selon laquelle l'efficacité optimum d'un traitement sur un étage foliaire s'obtient toujours au moment de l'émergence totale de l'étage en question. Selon cette hypothèse, le positionnement optimal du T2 (dont l'objectif est de protéger les étages foliaires F1 et F2) serait systématiquement obtenu au stade « dernière feuille étalée ».

Cependant, en termes méthodologiques et afin de valider ces premiers résultats, l'évaluation nécessite encore d'être conduite sur un plus grand nombre d'essais. L'idéal serait de disposer d'essais indépendants des données ayant servi à ajuster les seuils de positionnement du T2 qui comparerait plusieurs modalités différentes de positionnement du T2 avec la date préconisée par le module de renouvellement.

De plus, il reste encore à intégrer dans le module les cas pour lesquels le T1 Septo-LIS® est réalisé après le stade DFE. La considération de ces cas devra se faire à partir d'essais spécifiques réalisés sur des variétés résistantes à la septoriose pour nous assurer des déclenchements tardifs. L'enjeu du module de renouvellement pour ces cas résidera surtout dans une bonne discrimination de la nécessité ou non d'une réintervention.

Sur le plan de la construction du module de renouvellement en lui-même, la modélisation de l'effet du T1 sur la dynamique de l'épidémie a été volontairement très simplifiée.

Tout d'abord, l'efficacité du 1^{er} traitement fongicide est modélisée par une réduction du nombre de contaminations efficaces qui dépend du temps écoulé depuis l'application de ce traitement. Ainsi, le module simule l'effet préventif d'un fongicide mais ne simule pas d'effet curatif. Or la plupart des fongicides utilisés contre la septoriose sont des produits systémiques ayant à la fois un effet protecteur et curatif. Les traitements curatifs réduisent la croissance des infections pré-symptomatiques et donc le taux de formation de nouvelles spores. Cet effet pourrait éventuellement être modélisé par une augmentation de la période de latence du champignon sous l'effet du traitement à la manière de Milne *et al.* 2007 ou F. van den Berg 2013.

Ensuite, l'effet de la dose ou de la composition en matières actives des produits appliqués n'est pas pris en compte. Son cadre d'utilisation actuel suppose que le T1 est réalisé au sein d'un programme efficace : avec un produit efficace contre la septoriose, convenablement dosé et bien positionné. En effet l'implémentation dans l'OAD d'informations sur les doses ou les produits utilisés complexifierait sa mise en œuvre. Cela nécessiterait notamment une interaction avec des bases de données pour analyser la composition en matière active de tous les produits fongicides du marché potentiellement utilisables et de paramétrer les efficacités contre la septoriose de chaque matière active en fonction de la dose appliquée. De telles considérations sont pourtant parfois prises en compte dans la littérature pour modéliser l'effet d'un traitement fongicide. Milne *et al.*, (2007) modélisent ainsi l'efficacité d'un traitement en simulant l'effet des doses de chaque matière active qui le compose. Dans ce modèle, l'effet du traitement interagit avec le modèle épidémiologique de la septoriose par l'intermédiaire d'un coefficient de réduction de la croissance des infections et/ou du nombre d'infections selon les matières actives. Ces coefficients dépendent de la combinaison des effets des doses effectives de chaque matière active dont la dégradation dans le temps est modalisée individuellement.

Enfin, l'utilisation du module de renouvellement est pertinente pour optimiser le positionnement des traitements dans le cas où la septoriose est la maladie dominante. Cependant,

en pratique, la présence d'autres maladies fongiques du blé et en particulier la fusariose en fin de cycle, pourrait affecter la pertinence du positionnement préconisé par l'OAD.

CONCLUSION

L'optimisation du positionnement des traitements fongicides contre la septoriose est un levier d'action qui pourrait contribuer à répondre aux enjeux économiques et environnementaux autour des applications phytosanitaires. Le positionnement permet en effet d'améliorer, à dose équivalente, l'efficacité d'un programme fongicide. On pourrait donc espérer maintenir un niveau d'efficacité satisfaisant même avec des doses de produits réduites. L'intégration du module de renouvellement mis en place au sein d'un outil d'aide à la décision comme Septo-LIS® devrait ainsi permettre d'optimiser ce positionnement et ainsi de maximiser l'efficacité de la réintervention contre la septoriose (si elle est nécessaire) et d'éviter des réinterventions non justifiées ou peu efficaces.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ensemble des équipes techniques qui ont permis d'obtenir les données. Par ailleurs, ils remercient la Direction Générale de l'Environnement et la Recherche pour leur contribution financière à ces travaux dans le cadre du projet de recherche SMARTPIC.

BIBLIOGRAPHIE

Deudon O., Le Bris X., Piroux F., 2017. Interest and implementation of a spatialization method of meteorological data used for in Agricultural Decision Support Tools. *Proc. 2017 EFITA CONGRESS – Montpellier, France*.

Gouache D., Couleaud G., 2009 – Le positionnement des traitements fongicides : enjeu pour la septoriose et intérêt du modèle « Septolis ». *AFPP. 9ème conférence Internationale sur les maladies et les plantes – Tours*.

Gouache, D., Le Bris X., Bogard M., Deudon O., Pagé C. and Gate P., 2012. Evaluating agronomic adaptation options to increasing heat stress under climate change during wheat grain filling in France. *European Journal of Agronomy*, 39, 62–70.

Gouache, D., Bensadounb A., Brun F., Pagé C., Makowskie D., Wallach D., 2013. Modelling climate change impact on Septoria tritici blotch (STB) in France: accounting for climate model and disease model uncertainty. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 242–252.

Maufras J-Y, 2016- La septoriose, une maladie propagée par les éclaboussures de pluie [en ligne] Disponible sur :< <http://www.arvalisinstitutduvegetal.fr/la-septoriose-une-maladie-propagee-par-les-eclaboussures-de-pluie-@/view-9994-arvarticle.html?servername=www.arvalis-infos.fr>> .

Milne A., Paveley N., Audsley E., Parsons D., 2007 - A model of the effect of fungicides on disease-induced yield loss, for use in wheat disease management decision support systems. *Annals of applied Biology*, 151, 1, 113-125.

Paveley, N. D., Lockley, D., Vaughan, T. B., Thomas, J., Schmidt, K., 2000. Predicting effective fungicide doses through observation of leaf emergence. *Plant Pathology* 49, 748-766.

Thomas M.R., Cook R.J., King J.E., 1989 -Factors affecting development of *Septoria tritici* in winter wheat and its effect on yield. *Plant Pathology* 38, 2, 246-257.

Van den Berg F., Van den Bosch F., Paveley N., 2013 – Optimal fungicide application for disease control are also an effective anti-resistance strategy: a case study for Zymoseptoria Tritici (*Mycosphaerella Graminicola*) on wheat. *Phytopathology*, 103, 12, 1209-1219

Zadoks, J. C., T. T. Chang, et C. F. Konzak. « A Decimal Code for the Growth Stages of Cereals ». *Weed Research* 14, n° 6 (décembre 1974): 415-21.