



HAL
open science

Concevoir des associations variétales de blé pour réduire la progression épidémique de la septoriose : approche théorique et expérimentations au champ

Claude C. Pope de Vallavieille, Sébastien Saint-Jean, Christophe Gigot, Laurent Huber, M. Leconte, C Maumené, Philippe Du Cheyron, Gilles Couleaud, B. Kerhornou

► To cite this version:

Claude C. Pope de Vallavieille, Sébastien Saint-Jean, Christophe Gigot, Laurent Huber, M. Leconte, et al.. Concevoir des associations variétales de blé pour réduire la progression épidémique de la septoriose : approche théorique et expérimentations au champ. *Innovations Agronomiques*, 2016, 50, pp.157-170. 10.15454/1.4721162285051362E12. hal-01564560

HAL Id: hal-01564560

<https://hal.science/hal-01564560>

Submitted on 19 Jul 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Concevoir des associations variétales de blé pour réduire la progression épidémique de la septoriose : approche théorique et expérimentations au champ

**de Vallavieille-Pope C.¹, Saint-Jean S.², Gigot C.^{2,3}, Huber L.², Leconte M.¹, Maumené C.⁴,
du Cheyron P.⁴, Couleaud G.⁴, Kerhornou B.⁵**

¹ UMR BIOGER, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 78850 Thiverval-Grignon, France

² UMR ECOSYS, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 78850 Thiverval-Grignon, France

³ Quantitative Biology and Epidemiology Lab, Plant Pathology Department, University of California, Davis CA 95616, États-Unis

⁴ Arvalis Institut du Végétal, Station Expérimentale, 91720 Boigneville, France

⁵ Chambre d'agriculture de Lisieux, 70 rue Joseph Guilloneau, 14100 Lisieux, France

Correspondance : claud.pope@versailles.inra.fr, Sebastien.Saint-Jean@grignon.inra.fr

Résumé

L'intérêt des associations variétales de blé pour freiner la propagation des maladies dispersées à longue distance par le vent est bien démontré, mais les références sont très limitées concernant les maladies dispersées à courte distance par la pluie. Des essais de recherche en épidémiologie réalisés au champ sur 5 ans montrent qu'une association de deux variétés de blé, l'une sensible et l'autre résistante à la septoriose, peut réduire de plus de moitié la sévérité de la maladie, mais de façon variable selon la pression de maladie de l'année. Les essais en vue de l'application agronomique réalisés de 2010 à 2012 sous des conditions de pression épidémique variables montrent que des associations de quatre variétés permettent de réduire les applications de fongicides d'environ 5 % tout en maintenant les rendements. Dans des essais menés sans protection fongicide, durant trois années et sur deux sites, le bénéfice d'une association de quatre variétés par rapport à la moyenne des rendements des variétés en culture monovariétale est estimé à 2,3 q/ha. Un modèle de simulation basé sur la dispersion de spores par éclaboussement de gouttes de pluie dans un couvert végétal hétérogène permet de déterminer les proportions optimales de variétés à associer en fonction de leur niveau de résistance partielle. Cette pratique culturale établie au semis, peut procurer un avantage en présence de maladies foliaires et n'est pas pénalisante en absence de maladie.

Mots-clés : Gestion des variétés résistantes, blé, *Zymoseptoria tritici*, modèle épidémique

Abstract: Conception of wheat variety mixtures to reduce epidemics of septoria leaf blotch: theoretical approach and field experiments

The potential of wheat cultivar mixtures for reducing the spread of diseases by long-distance wind-dispersal is well documented, but the references are very limited for diseases spread by short-distance splash dispersal. Field epidemiological experimentations carried out over a 5-year period showed that a combination of a susceptible and a partially resistant wheat cultivar can reduce up to 40% the severity of septoria leaf blotch, which however depended on each year's disease pressure. Extension services showed that the yield of mixtures of four wheat cultivars tested between 2010 and 2012 under different disease pressures had a 5% reduction of fungicide applications on average with the mean yield of the pure stands. In field trials without fungicide application over the 3-year period at two locations, the benefit of 4-cultivar mixtures compared to the mean of the pure stands was assessed to be 0.23 t/ha. A simulation model based on spore splash dispersal by raindrops in a heterogeneous canopy determined the optimal proportions of varieties in a two-way mixture as a function of the partial resistance level of the two varieties. This cropping system provided an advantage when foliar diseases were present and

was not disadvantageous when diseases were not present.

Keywords: Management of resistant cultivars, wheat, *Zymoseptoria tritici*, epidemic modelling
Introduction

Le gain de productivité de ces dernières décennies résulte du progrès génétique, de l'homogénéisation des cultures et d'un usage intensif d'intrants. Ce modèle doit être revu compte tenu de la variabilité environnementale grandissante et de la nécessité de rechercher une agriculture plus durable. En conséquence, des approches qui visent à stabiliser les performances des cultures et à tamponner les fluctuations de l'environnement sont explorées. La diversité génétique est l'un des leviers à mettre en œuvre pour augmenter la stabilité des récoltes dans des conditions environnementales changeantes, concernant le sol, le climat et les maladies fongiques (Justes et al., 2014). Parmi les méthodes pour augmenter la diversité génétique des cultures, il est possible d'associer des variétés différentes pour les gènes de résistance aux maladies au sein d'une même parcelle (de Vallavieille-Pope et al., 2006). Pour les céréales, les associations de variétés freinent efficacement la progression des maladies à dispersion éolienne sur de longues distances comme les rouilles et l'oïdium (Mundt, 2002 ; de Vallavieille-Pope, 2004), mais peu d'information est disponible sur les maladies, comme la septoriose, dont la dispersion des spores s'opère sur de courtes distances par l'intermédiaire de la pluie durant sa phase épidémique, au printemps (Suffert et al., 2011 ; Vidal et al., 2015). La réduction de la propagation de l'agent pathogène dans des associations variétales s'expliquent essentiellement par deux effets physiques qui sont (i) la dilution des plantes sensibles au sein de la parcelle qui accroît la distance moyenne que doivent parcourir les spores et (ii) la barrière que présente la variété résistante faisant obstacle aux spores entre les plantes sensibles. Ces effets sont opérants quel que soit le mode de dispersion, mais leur efficacité reste à être mieux caractérisée dans le cas de maladies à dispersion pluviale. De plus, beaucoup d'études de diversification de variétés résistantes reposent sur l'emploi de résistances à effet majeur, la plante étant saine ou malade. La prise en compte de résistances partielles, avec des plantes plus ou moins malades, couramment sélectionnées dans les variétés de céréales, est nécessaire (Sapoukhina et al., 2013). Comblent en partie ces lacunes est l'objectif de notre étude, en ayant recours conjointement à des expérimentations au champ et à des expérimentations numériques. Nous nous intéressons à la culture du blé tendre et à une maladie foliaire prédominante à dispersion pluviale, la septoriose, causée par le champignon pathogène *Zymoseptoria tritici* à l'origine de pertes économiques importantes. Actuellement, aucune variété cultivée n'est totalement résistante et la lutte chimique connaît quelques limitations suite à l'apparition, ces dernières années, de souches résistantes à différentes familles de matières actives, strobilurines et triazoles notamment. Les connaissances sur la propagation de la septoriose au sein d'associations variétales de blé contribuent à la mise au point de stratégies de gestion de variétés différentes par leur niveau de résistance partielle, à l'échelle de la parcelle. Nous étudions l'efficacité d'une association variétale pour freiner une épidémie en fonction de la proportion des variétés et de leur niveau de résistance quantitative par modélisation. Les modèles utilisés pour étudier la progression de la septoriose du blé dans des cultures monovariétales (Casadebaig et al., 2012 ; Robert et al., 2008) ne sont pas adaptés à l'hétérogénéité spatiale des associations variétales. Gigot et al. (2014) ont développé un modèle pour simuler la propagation de la septoriose dans des associations variétales au cours de plusieurs cycles épidémiques. Le modèle évalue le potentiel de dispersion de spores de *Z. tritici* par l'éclaboussement des gouttes de pluie durant la phase épidémique de la maladie (Huber et al., 2006 ; Madden, 1992 ; Saint-Jean et al., 2004), sur des cultures monovariétales et des cultures en association variétale.

L'étude est structurée en trois parties : (i) le suivi de la progression de la septoriose au cours de plusieurs saisons culturales à l'échelle de la parcelle, pour quantifier l'effet barrière procuré par les plantes résistantes sur la propagation de la maladie sur une association bivariétale d'une variété

sensible avec une variété ayant une résistance partielle ; (ii) l'étude par modélisation de la dispersion des spores dans un couvert de culture de blé pour définir des caractéristiques des variétés à associer pour créer une diversité fonctionnelle en faisant varier le niveau de résistance des variétés, leur proportion et leur agencement spatial ; les paramètres de dispersion de l'agent pathogène et des mesures d'architecture des plantes cultivées au champ sont utilisés pour l'étude par modélisation ; (iii) l'évaluation de la faisabilité et de l'intérêt de cette pratique culturale dans le contexte agricole à l'aide d'un réseau d'essais de cultures monovariétales et d'associations de quatre variétés dans plusieurs stations expérimentales, avec différents programmes de traitements fongicides. Pour ce dernier point, nous cherchons à quantifier la contribution des associations variétales dans la réduction de l'emploi des produits phytosanitaires.

1- Progression de la septoriose dans une association bivariétale et une culture monovariétale

Pour évaluer l'intérêt des associations variétales vis-à-vis d'un agent pathogène propagé essentiellement par la pluie dans sa phase épidémique, des expérimentations au champ sont menées sur le site INRA de Grignon (48.9° N, 1.95° E, Yvelines) de 2008 à 2012. Une variété sensible à la septoriose (note 4/9 sur une échelle de 0 à 9, avec 9 pour la résistance totale), Sogood (S) et une variété moyennement résistante (note 7/9), Koreli (R) en 2008 et Maxwell (R) de 2009 à 2012, sont cultivées en culture monovariétale et en association bivariétale. Les proportions de l'association sont d'une plante sensible pour trois résistantes, d'après l'optimum évalué pour réduire la progression des maladies à dispersion éolienne (de Vallavieille-Pope et al., 2006). L'essai est randomisé avec 4 répétitions de parcelles de 35 m² constituée de deux trains de semis. Les micro-parcelles sont séparées par une barrière de triticales (au moins 3,5 m de large) pour réduire les échanges d'inoculum entre parcelles. L'essai est conduit sans traitement fongicide.

La progression de la sévérité de maladie est comparée d'une part entre la variété sensible en culture monovariétale et en association et d'autre part entre l'association variétale et la moyenne pondérée des variétés en culture monovariétale. Des observations visuelles hebdomadaires du nombre de lésions sporulantes, du pourcentage de surface malade portant des pycnides (fructifications du champignon pathogène) et du pourcentage de surface foliaire sénescence sont réalisées sur les deux variétés en culture monovariétale et en association au cours des trois mois épidémiques d'avril à juin. Les comparaisons portent sur l'aire sous la courbe de progression des différents indicateurs. L'effet association E_a (%) est calculé comme la différence relative de la moyenne d'un indicateur évalué dans l'association (I_a) et de la moyenne pondérée de l'indicateur évalué dans les différentes cultures monovariétales (I_m).

$$E_a = \frac{I_a - I_m}{I_m} \quad I_m = \sum_{i=1}^n \omega_i I_i$$

où I_m est pondéré avec ω_i , la proportion de la variété i dans l'association (comprise entre 0 et 1). I_i est la moyenne de l'indicateur évalué dans la culture monovariétale de la variété i et n le nombre de variétés associées.

L'occurrence d'un événement pluvieux majeur qui correspond à un événement de dispersion de spores, est repérée sur les enregistrements de pluviométrie des épisodes pluvieux bien délimités dans le temps, au cours d'une période sans pluie importante (Gigot et al., 2013a). Après un laps de temps correspondant à la durée moyenne d'une période de latence (deux à trois semaines), nous observons en moyenne 45 % de moins de nouvelles lésions sporulantes sur la variété sensible au sein de l'association que dans la culture monovariétale pour les 4 années (2008-2011) (Gigot et al., 2013a). Cette réduction du nombre de lésions pour la variété la plus sensible, dans l'association par rapport à la culture monovariétale est assimilée à une réduction du nombre d'infections due à l'effet protecteur de l'association suite à un seul événement de dispersion. De tels effets protecteurs pourront se cumuler

au cours de l'épidémie qui est la succession de plusieurs cycles infectieux déclenchés par des événements pluvieux, responsables de la dispersion de spores.

La sévérité de maladie est réduite sur la variété sensible quand elle est cultivée en association au cours des années 2008 et 2009 assez favorables aux épidémies de septoriose, avec 42 % de réduction de surface foliaire couverte de pycnides en 2008 et 41 % en 2009 (Gigot et al., 2013a). En 2010 et 2011, les niveaux de maladie sont restés très bas, et la réduction de sévérité de septoriose n'est pas significative ou correspond à des niveaux de sévérité très faibles. De plus, dans les conditions de très forte épidémie de 2012, nous n'observons pas de protection de la variété sensible dans l'association 1S:3R (Lebon, 2012 ; Gigot et al., 2003b). Par ailleurs, le gain de la surface foliaire verte de la variété sensible dans l'association par rapport à la culture monovariétale équivaut à une feuille verte pendant 1 à 2 semaines en fin d'épidémie en 2008 et 2009. Sous les conditions de très faible pression de maladie de 2010 et 2011, aucune différence significative n'est observée pour les surfaces foliaires vertes.

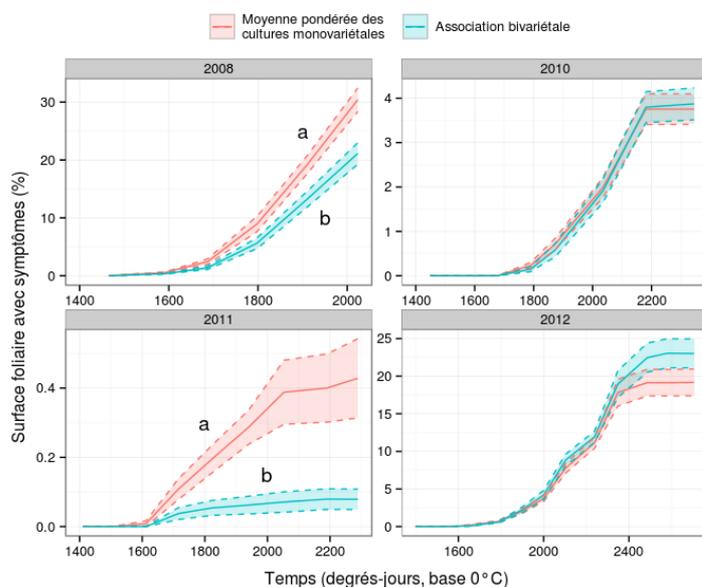


Figure 1 : Progression de la sévérité de la septoriose du blé (moyenne \pm erreur standard) pour l'association bivariétale (une plante moyennement sensible pour trois plantes moyennement résistantes) et pour la moyenne pondérée des cultures monovariétales. La sévérité de la maladie correspond au pourcentage de surface foliaire couverte par des pycnides de *Zymoseptoria tritici*, sur les trois derniers étages foliaires. Différentes lettres à proximité des courbes pour la même année indiquent que les aires sous les courbes (AUPC) sont significativement différentes au seuil de 5 %.

La progression de la sévérité de la septoriose dans l'association bivariétale est significativement retardée par rapport à la moyenne des cultures monovariétales pendant deux des quatre années testées, les années 2008 et 2011 (Figure 1). L'année 2009 est éliminée de l'analyse par manque de données sur la monoculture résistante. Les années 2008 et 2011 correspondent à des pressions de maladie différentes, élevée en 2008 et faible en 2011. La réduction de sévérité de septoriose en 2011 est significative mais correspond à un faible niveau de maladie. De plus, dans les conditions de très forte épidémie de l'année pluvieuse 2012 où la pluviométrie printanière était exceptionnelle (la deuxième plus forte observée depuis 20 ans), l'association variétale n'assure pas de protection. à cause de la saturation des surfaces foliaires disponibles. L'association testée est efficace pour ralentir les épidémies dans des conditions de pression de maladie moyenne correspondant à 90 % des pluviométries printanières observées ces 20 dernières années (Figure 2).

Nous avons récapitulé les effets association observés pour le nombre de lésions sporulantes, le pourcentage de surface foliaire malade et le pourcentage de surface foliaire verte sur les trois dernières feuilles pendant la période post-épiaison, et le rendement (Figure 3). Les valeurs de l'effet association variétale pour les indicateurs de sévérité de maladie sont favorables à l'association et significatives sous deux conditions épidémiologiques de faible pression parasitaire en 2011 et moyenne en 2008, mais l'effet en valeur absolue n'est élevé que dans le cas de niveau épidémique intermédiaire. Sous ces conditions, une association variétale sans recours à une protection fongicide permettrait d'obtenir

une protection intermédiaire entre une protection fongicide totale (données non montrées) et aucun traitement en culture monovariétale dans des conditions épidémiques moyennes.

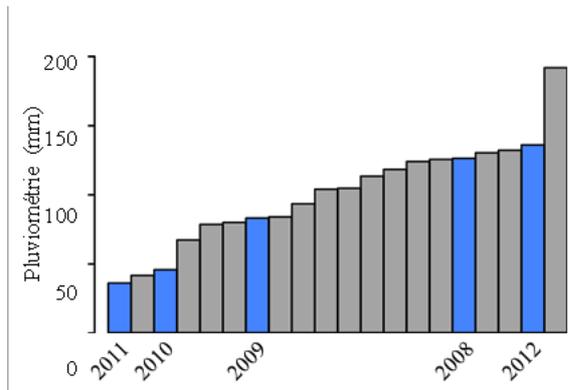


Figure 2 : Pluviométrie cumulative d'avril et mai pendant la période de 1992 à 2012 à Grignon (78850)

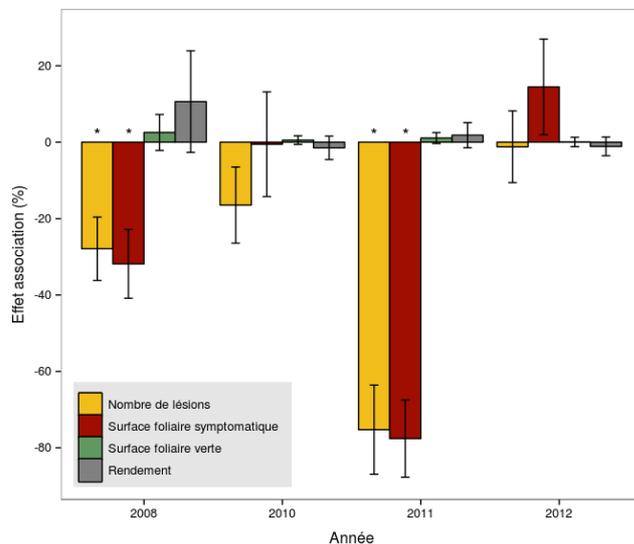


Figure 3 : Effet association (moyenne \pm erreur standard) évalué avec différents indicateurs : le nombre de lésions sporulantes, la surface foliaire portant des lésions sporulantes, la surface foliaire verte et le rendement pour l'association d'une variété de blé sensible avec une variété résistante dans les proportions 1S:3R pendant 4 ans. Les trois premiers indicateurs, sont comparés pour les aires sous les courbes de progression pour les trois derniers étages foliaires qui contribuent le plus à l'élaboration du rendement.

* valeurs significativement différentes de zéro, au seuil de 5 %.

Pour le rendement, la différence relative entre l'association et la moyenne pondérée des cultures monovariétales sur l'ensemble des quatre années présentées est positive mais faible et non significative : + 2,5 % (Figure 3). En conclusion, sous des conditions de forte pluviométrie et d'attaques de septoriose très fortes mais tardives en 2012, la septoriose s'est davantage développée sur la variété résistante dans l'association variétale qu'en culture monovariétale, mais la différence reste néanmoins non significative (données non présentées), ce qui peut expliquer en partie l'absence d'effet protecteur de l'association. Pour la variété résistante, l'inoculum est plus important dans l'association que dans la culture monovariétale du fait de la présence de la variété sensible et d'un nombre élevé de cycles infectieux dans des conditions de forte pluviométrie. Dans le cas d'années à pluviométrie printanière plus typique, comme 2008 et 2009 qui encadrent 50 % des taux de pluviométrie printanière observés entre 1992 et 2012, l'association a permis d'abaisser la surface malade sur la variété sensible de 40 % en moyenne, sans être significativement préjudiciable pour la variété résistante. Il est à noter qu'en 2008, la variété la plus résistante Koreli est, comme la variété sensible Sogood, significativement moins malade en association variétale qu'en culture monovariétale (données non présentées). Ces dégâts moindres se sont traduits par des gains en surface foliaire verte. Ces observations montrent que sous pression de maladie intermédiaire, l'association variétale conduit à une amélioration globale de l'état sanitaire de la culture.

2- Modélisation de la dispersion par éclaboussement dans une association variétale

Nous étudions comment l'efficacité d'une association variétale pour freiner une épidémie varie en fonction de la proportion des variétés, de leur niveau de résistance quantitative et de leur organisation spatiale. Le modèle choisi comme point de départ (Saint-Jean et al., 2004 & 2008) est mécaniste. Il a été développé pour évaluer le transfert d'eau par éclaboussement au sein d'une structure complexe en 3D avec la description explicite du transport des gouttes et gouttelettes d'eau. Gigot et al. (2014) ont développé et ajouté les éléments suivants au modèle initial pour répondre à notre problématique : (1) une représentation d'un couvert de blé dont chaque organe de chaque plante est localisé et identifié très précisément ; (2) la possibilité de transport des spores de l'agent pathogène par les gouttelettes d'eau ; (3) la prise en compte des différents niveaux de résistance quantitative des variétés et (4) du caractère polycyclique de l'épidémie. Les données architecturales mesurées au champ dans les essais conduits à l'INRA de Grignon de 2008 à 2012 (Gigot et al., 2013a) ont servi à paramétrer le modèle. Chaque plante est constituée de plusieurs tiges et feuilles, en cohérence avec les valeurs du LAI (Leaf Area Index) mesurées au champ au stade de post-épiaison (Gigot, 2013). Nous localisons précisément les organes impactés par les gouttes de pluie sur les plantes virtuelles et calculons la trajectoire de chaque gouttelette produite, suite à l'impact des gouttes de pluie sur le couvert végétal virtuel, jusqu'à ce qu'elle rencontre soit un autre organe végétal, soit le sol (Gigot, 2013 ; Saint-Jean et al., 2004 & 2008). Nous affectons aux plantes virtuelles des notes de résistance à *Z. tritici*, cohérentes avec les notations du CTPS (Comité technique permanent de la sélection) et d'Arvalis-Institut du Végétal. Nous visualisons la micro-parcelle en deux ou trois dimensions par un code de couleur suivant le niveau de résistance de chaque variété pour faciliter l'interprétation et le paramétrage du code informatique, et communiquer plus aisément sur le modèle (Figure 4). Le modèle basé sur les trajectoires des gouttelettes d'eau contaminatrices, considérées comme des unités de dispersion, dans un couvert 3D hétérogène permet de comparer des progressions de l'intensité de maladie sous différentes conditions. Pour comparer les différentes modalités entre elles, nous avons utilisé les effets associations, E_a (cf. équations précédentes), les plus forts rencontrés au cours des cycles épidémiques successifs. Par ailleurs, les effets associations sont évalués selon deux indicateurs : $\Delta R_{S,R}$ la différence entre le niveau de résistance de la variété la plus sensible S et de la variété la plus résistante R (avec une échelle de 0 à 100 % de résistance) et P_{SR} les proportions de la variété la plus sensible S et de la variété la plus résistante R. Par exemple P_{SR} de 1/9 correspond à une association d'une variété sensible S avec 9 variétés résistantes R.

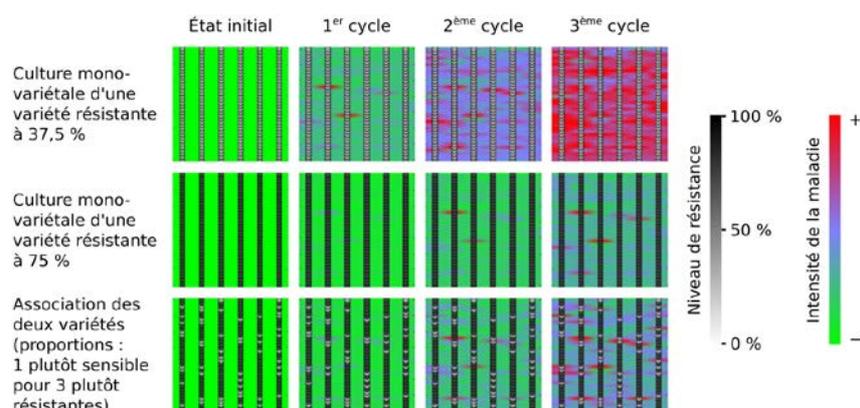


Figure 4 : Progression de la sévérité de la maladie au cours de trois cycles épidémiques successifs par simulation pour une culture monovariétale d'une variété moyennement sensible et d'une variété moyennement résistante et la culture d'une association de ces deux variétés en proportion d'une moyennement sensible pour trois moyennement résistantes (1S:3R). L'échelle de gris représente le niveau de résistance, de très sensible (blanc) à très résistant (noir). L'échelle des couleurs représente le niveau de la sévérité de maladie, de sain (vert) à très malade (rouge).

La simulation d'une situation très tranchée de l'association de trois variétés, une variété très sensible avec une variété moyennement résistante et une variété immune, obtient un effet association de 35 % de sévérité dans l'association par rapport à la moyenne pondérée des cultures monovariétales, au bout de 3 cycles épidémiques (Gigot et al., 2013c ; Saint-Jean et al., 2008). Dans le cas plus proche de nos expérimentations au champ, avec l'association de deux variétés possédant des résistances partielles dans les proportions 1S:3R, on obtient une réduction de 6 % de sévérité dans l'association par rapport à la moyenne pondérée des cultures monovariétales (Figure 4).

L'influence de l'organisation spatiale des variétés est étudiée pour deux variétés en équiproportion avec des niveaux de résistance de 25 % et 75 % (Gigot et al., 2014). Les associations sont plus efficaces dans le cas des semences organisées en damiers (A) que celles disposées en rangs alternés (B) ou en blocs (C) (Figure 5). L'organisation en damiers correspond à l'association variétale avec la plus petite aire d'unité génotypique, le motif en rangs alternés procure une réduction de sévérité de la maladie de l'ordre de 90 % de celle observée pour le motif en damiers. Dans le cas de l'organisation en blocs, cette réduction équivaut à environ 58 % de sévérité de maladie. L'effet association augmente avec la diminution de l'aire de l'unité génotypique, en accord avec les observations de Garrett et Mundt (1999).

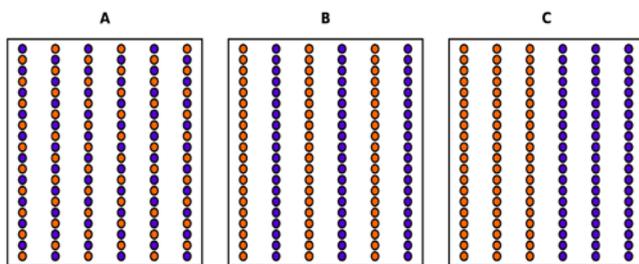


Figure 5 : Différentes organisations spatiales de deux variétés en équi-proportion représentées par des cercles de couleurs différentes. Chaque figure correspond à une parcelle simulée (1,05 m × 0,52 m) de 120 plantes. L'aire d'unité génotypique de chaque organisation spatiale est donnée entre parenthèses : A en damier ($4,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$) ; B en rangs alternés ($9,1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$) et C en deux blocs ($2,7 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2$).

L'effet association (E_a) le plus fort observé au cours des cycles épidémiologiques successifs est évalué en fonction des proportions P_{SR} de la variété la plus sensible et de celle de la plus résistante, et de la différence de niveau de résistance entre les deux variétés ($\Delta R_{S;R}$) (Figure 6). Les valeurs de l'effet association s'échelonnent entre 0 % et - 100 % correspondant à la diminution de sévérité dans l'association par rapport à la moyenne pondérée des cultures monovariétales. E_a augmente lorsque la proportion de la variété sensible diminue, quelle que soit la différence de niveau de résistance entre les variétés. E_a augmente également avec l'amplitude de l'écart du niveau de résistance des variétés. Cependant, contrairement aux descriptions précédentes qui peuvent sembler évidentes, pour des différences de résistance $\Delta R_{S;R}$ comprises entre 50 % et 30 % et pour des proportions P_{SR} comprises entre 2/8 et 4/6, l'évolution de E_a est relativement stable (Figure 6). Cette stabilité de l'effet protecteur ouvre de possibles marges d'optimisation dans la conception des associations.

Les résultats de simulation concordent avec les résultats expérimentaux, à savoir qu'un $\Delta R_{S;R}$ important et des proportions proches de la proportion 1S:3R utilisée dans l'étude expérimentale permettent d'optimiser la composition d'une association variétale pour contrôler un agent pathogène à dispersion pluviale tel que *Z. tritici*. Les proportions entre 1S:9R et 1S:1R procurent les effets d'association dont l'optimum varie en fonction de $\Delta R_{S;R}$ (Figure 6). Une association 1S/9R par exemple peut être meilleure qu'une association en équiproportion 1S/1R pour les niveaux de résistance relatifs des variétés de 0/100 à 25/75 mais pire pour $\Delta R_{S;R}$ de 25/75 à 45/65. D'après ces modélisations, les proportions optimales entre deux variétés partiellement résistantes à associer doivent être raisonnées en prenant en compte les niveaux de résistance de ces variétés pour en déterminer les proportions optimales. En d'autres termes, il n'existe pas un ratio unique quels que soient les niveaux de résistance des variétés à associer.

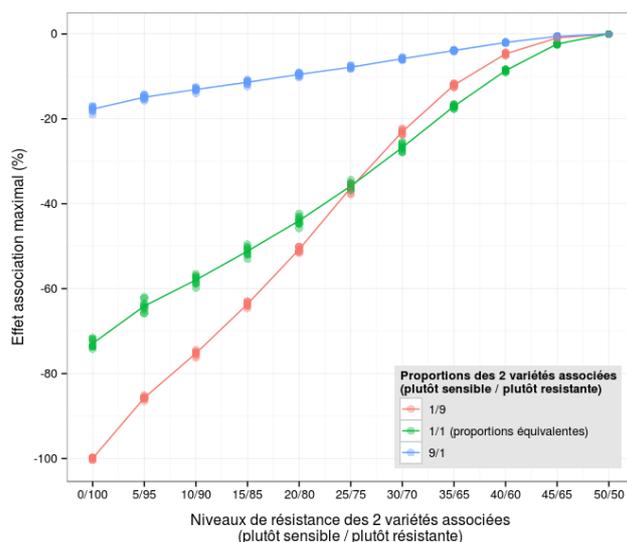


Figure 6 : Effet association maximal évalué à l'aide d'un modèle numérique en fonction du niveau de résistance de deux variétés associées et de leurs proportions au sein de l'association. Pour chaque cas correspondant à un couple de niveaux de résistance et un couple de proportions, 10 répétitions des simulations numériques sont réalisées. Trois jeux de proportions sont représentés sur ce graphique. L'échelle des niveaux de résistance varie de 0 % à 100 % pour chaque couple de variétés ; par exemple une valeur de 15 % de résistance signifie que pour 100 événements potentiellement contaminants, c'est-à-dire des gouttelettes d'eau dispersées contenant des spores, qui impactent des surfaces foliaires saines, 85 (100 - 15) d'entre eux en moyenne sont contaminants.

3- Evaluation d'associations variétales dans la pratique dans des réseaux d'essais d'instituts

Des associations variétales sont évaluées pour contrôler la septoriose dans des situations proches de celles généralement pratiquées par les agriculteurs. Des associations de quatre variétés (au lieu de deux testées précédemment pour les études de mécanisme d'action des associations variétales) sont comparées à leurs composantes monovariétales dans des expérimentations menées sur quatre sites d'instituts techniques au cours de trois saisons culturales (années de récolte 2010, 2011 et 2012). Les associations quaternaires testées sont choisies pour l'homogénéité des caractères agronomiques et la complémentarité des résistances aux principales maladies foliaires selon les critères définis comme étant opérationnels (Mille et al., 2006). En 2010 et 2011, les trois sites d'Arvalis-Institut du végétal sont situés en Bretagne (Bignan, 56) et en Normandie (Écardenville, 27, et Rots, 14) et celui de la chambre d'agriculture du Calvados à Frénoville (14). En 2012, l'expérimentation est conduite à Bignan, Rots et Frénoville, ainsi qu'à l'INRA de Ploudaniel (29, Bretagne).

La progression de la sévérité de la septoriose est suivie sur des plantes de chacune des quatre variétés composant l'association qui sont identifiées à l'aide de marqueurs microsatellites. Durant 2010, deux associations variétales sont étudiées sur le réseau : les variétés Barok, Boregar, Oxebo et Trapez sur les trois sites d'Arvalis-Institut du végétal et les variétés Bermude, Expert, Koreli et Sophytra sur le site de la Chambre d'agriculture du Calvados. Durant 2011 et 2012, l'association variétale Barok, Boregar, Oxebo et Sogood est testée, afin d'avoir la même variété sensible à la septoriose, Sogood, que dans les expérimentations menées pour le suivi épidémique sur le site de Grignon avec des associations bivariétales.

Les conditions climatiques des années 2010 et 2011 sont défavorables au développement épidémique de la septoriose et le réseau n'a pas permis de comparer les associations variétales aux cultures monovariétales sous des pressions substantielles de septoriose (Figure 7). Seul sur le site de Bignan en 2010, l'association réduit significativement la sévérité de maladie par rapport à la moyenne des cultures monovariétales.

Le nombre de grains par épi et le poids sec moyen des grains par épi n'ont montré aucune différence significative pour une variété donnée entre la culture monovariétale et l'association. Le rendement de l'association variétale ne diffère pas significativement de celui de la moyenne aux cultures

monovariétales, sous ces conditions de faible pression de septoriose du printemps 2010 et 2011. De plus, la très forte pression de maladie de 2012 n'a pas non plus permis de déceler d'effet association vis-à-vis de la sévérité de septoriose. Toutefois, les associations étudiées n'ont pas été pénalisantes pour le rendement par rapport aux cultures monovariétales.

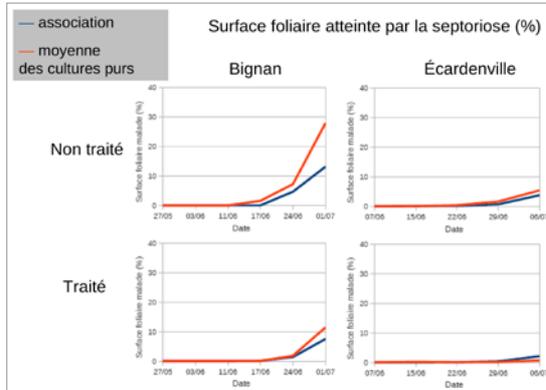


Figure 7 : Progression de la surface malade sur la feuille drapeau pour les associations quaternaires et la moyenne de 4 cultures monovariétales dans les stations expérimentales de Bignan (56) et Écardenville (27). Pour les sites de Frénoville (14) et Rots (14), les tendances étaient similaires à celles observées à Écardenville. L'effet protecteur de l'association sur la maladie (site de Bignan) ne s'est manifesté qu'en fin de période de notation suite à une période pluvieuse intervenue début juin. Essai 2010.

Les économies potentielles de fongicides liées aux associations variétales sont étudiées par Arvalis-Institut du Végétal au cours de trois années et dans deux localités. De 2010 à 2012, deux essais sont mis en place pour comparer les gains de rendement bruts et nets permis par les fongicides entre moyenne pondérée des cultures monovariétales et une association variétale quaternaire : Aramis, Goncourt, Arezzo et Premio pour le site de Sainte Apollinaire (21) et de Lissy (77). En 2012, les variétés Barok, Boregar, Oxebo et Sogood sont implantées au site de Rosel (14), sous une forte pression de septoriose. Des parcelles de 25 m² sont disposées split-plot avec 3 ou 4 répétitions selon les lieux. Chaque variété en culture monovariétale et l'association quaternaire reçoivent une protection fongicide standard appliquée à des doses croissantes (20 %, 40 %, 60 %, 80 % de la dose du programme), et donc à des coûts croissants. L'augmentation de rendement brut (Y) est représentée en fonction du coût en € de la protection fongicide (X) (modèle : $Y = aX/(b+X)$) d'après Maumené et al. (2013). Après déduction du coût de la protection fongicide, la même méthode conduit à l'obtention de courbes de réponse en rendement net. Les dépenses optimales sont calculées pour comparer les cultures monovariétales et l'association quaternaire.

Le rendement moyen de l'association variétale permet de gagner significativement en productivité par rapport à la moyenne des rendements des quatre variétés pures uniquement en l'absence de traitement fongicide (+ 2,3 q/ha). A la faible dose de 20 % du programme de référence, le gain de + 1,1 q/ha n'est pas significatif (Figure 8).

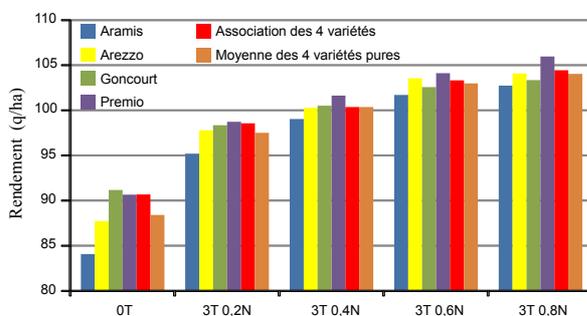


Figure 8 : Rendement moyen de trois essais de 2010 à 2012 de l'association des variétés Aramis, Arezzo, Goncourt, Premio et des cultures monovariétales avec différents programmes de traitements fongicides (OT : témoin non traité, 3T xN : trois traitements fongicides avec 20 %, 40 %, 60 %, 80 % de la dose du programme de référence) (Arvalis-Institut du Végétal).

Les dépenses optimales sont calculées pour différents prix du blé au cours des années. En 2010, pour l'essai de Sainte Apollinaire, la réponse maximale à l'utilisation des fongicides correspond à une

augmentation du rendement qui varie selon les variétés de 11,3 à 17,7 q/ha. La dépense fongicide optimale pour un prix du blé à 15 €/q varie de 52 €/ha pour Goncourt, la variété la moins sensible à 64 €/ha pour Aramis, la variété la plus sensible. L'association quaternaire permet une économie limitée de 5 €/ha et une réduction potentielle des quantités de fongicides de 8 % par comparaison à la quantité moyenne devant être utilisée sur les variétés en culture monovariétale.

En 2011, pour l'essai de Lissy, l'augmentation maximale de rendement est observée sur la variété Arrezzo avec + 11,7 q/ha. La réponse à l'utilisation des fongicides est en moyenne de 6,8 q/ha pour les quatre variétés pures et de 7,2 q/ha pour l'association quaternaire. La dépense fongicide optimale calculée pour un prix du blé de 18 €/q est de 17 €/ha pour Goncourt (note 6/9 de résistance à la septoriose) et 49 €/ha pour Arezzo, la plus sensible. L'association variétale étudiée dans un contexte de faible pression de maladie présente un optimum de dépense fongicide quasi-identique à la moyenne des dépenses optimales des variétés en culture monovariétale. L'association variétale dans cet essai ne génère aucune économie.

Pour 2012, dans l'essai de Lissy, l'augmentation maximale de rendement est observée sur la variété Aramis (+ 34,2 q/ha). La réponse à l'utilisation des fongicides est en moyenne de 26,9 q/ha sur les quatre variétés pures et de 22,9 q/ha pour l'association quaternaire. La dépense fongicide optimale pour un prix du blé de 20 €/q varie sur cet essai de 98 à 125 €/ha respectivement, pour Goncourt (note 6/9 de résistance à la septoriose) et Aramis (note 4/9) (Figure 9). L'association variétale, dans un contexte de pression de maladie moyenne à forte, conduit à une dépense fongicide optimale plus faible d'environ 8 €/ha et une réduction des quantités de fongicides de 7 % par comparaison à la quantité devant être utilisée en moyenne sur les variétés pures.

Pour l'essai de Rosel en 2012, l'augmentation maximale de rendement est observée sur la variété Sogood avec + 35,8 q/ha. La réponse à l'utilisation des fongicides est en moyenne de 23,8 q/ha sur les quatre variétés pures et de 19,5 q/ha pour l'association quaternaire. La dépense fongicide optimale pour un prix du blé à 20 €/q varie de 58 à 120 €/ha respectivement pour Barok (note de résistance 7/9) et Sogood (note 4/9). L'association variétale avec une nuisibilité moyenne de 23,8 q/ha présente un optimum de dépense plus faible d'environ 4 €/ha et une réduction potentielle des quantités de fongicides de 4,5 % par comparaison à la quantité moyenne devant être utilisée sur les variétés pures.

Une moyenne des résultats acquis sur les trois essais réalisés pendant trois ans avec les mêmes variétés Aramis, Goncourt, Arezzo et Premio montre que le bénéfice de l'association variétale est plus marqué en l'absence de protection fongicide avec + 2,3 q/ha (NS) (Figure 9). L'écart de rendement Traité – Non Traité est plus faible pour l'association variétale (13,8 q/ha) que pour la moyenne des quatre variétés pures (16 q/ha), ce qui illustre la moindre sensibilité des associations variétales aux maladies. Cette différence en faveur des associations variétales représente une économie potentielle fongicide estimée à 4 €/ha en moyenne (0 €/ha en 2011 à 8 €/ha en 2012) soit une réduction potentielle des quantités de fongicides utilisées de 5 % par comparaison à la quantité moyenne devant théoriquement être utilisée sur des cultures monovariétales.

Dans le réseau d'étude des variétés en post-inscription mené par Arvalis-Institut du Végétal en 2010 et 2011 et un essai en 2012, le rendement de trois associations variétales quaternaires est comparé à celui de leurs composantes monovariétales. Les associations sont constituées comme précédemment de variétés homogènes pour la précocité à la montaison et la hauteur de tige, présentent de bons potentiels de rendement, et des résistances aux maladies foliaires complémentaires en particulier à la septoriose, avec une seule variété sensible par association. Différentes associations sont implantées selon les régions : dans le sud, des variétés précoces (Aerobic, Aubusson, Nogal, Solehio), dans le Centre des variétés demi-précoces (Aramis, Arezzo, Goncourt, Premio) et dans le Nord des variétés demi-tardives (Barok, Boregar, Oxebo, Trapez). La quasi-totalité des essais est semée en quatre blocs, trois conduits avec des traitements fongicides (T) et un bloc n'est pas traité (NT). Compte tenu de cette spécificité, l'estimation des rendements pour la modalité traitée est plus précise

que celle de la modalité sans traitement fongicide, mais utilisés à l'échelle du réseau d'essais, ces tests deviennent plus puissants.

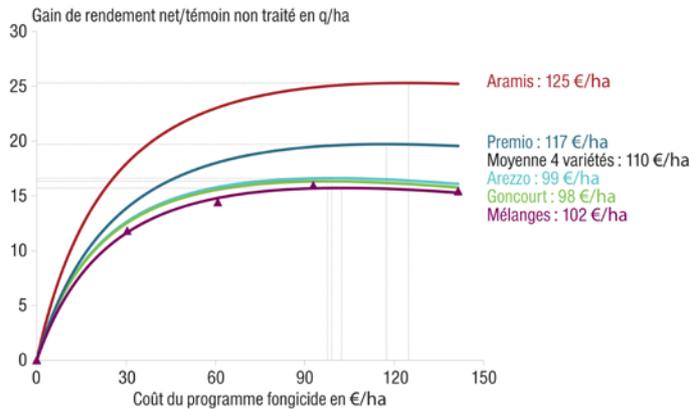


Figure 9 : Courbes de réponse de gain de rendement net. En abscisse, coût du traitement fongicide en €/ha en fonction de la dose utilisée sur une association de quatre variétés et sur les quatre cultures monovariétales. L'association des variétés Aramis, Arezzo, Goncourt, et Premio dans un contexte de forte pression de septoriose permet une économie fongicide estimée à 7 % (Maumené et al., 2013).

Le gain de rendement des essais traités de 1 % pour les associations variétales du Sud et du Nord en 2010 et 2011 est faible mais statistiquement significatif. En revanche les 64 essais en 2010, 2011 et 2012 de la région Centre n'ont pas révélé de différence entre le rendement de l'association variétale et de la moyenne des cultures monovariétales (Figure 10A).

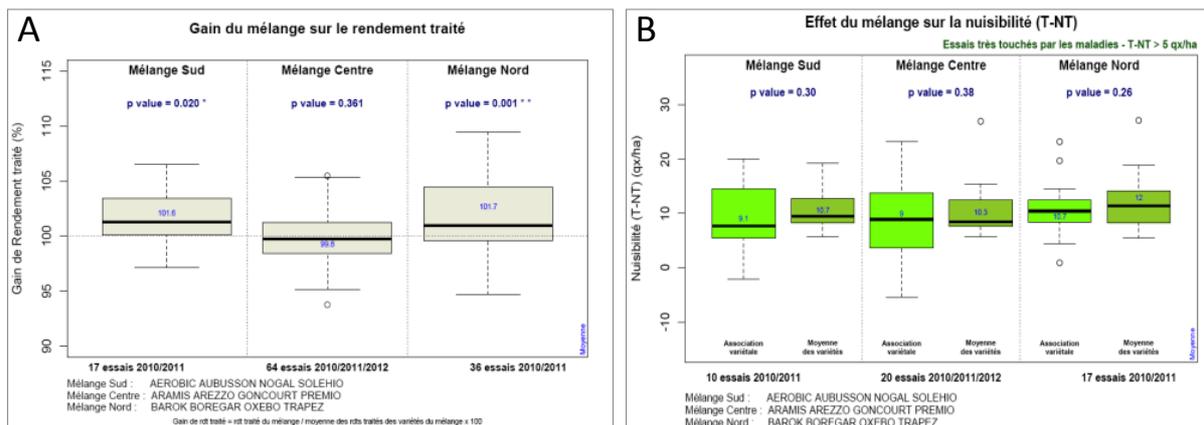


Figure 10 : Gain de rendement de parcelles traitées par des fongicides (A) et effet sur la nuisibilité sur des parcelles traitées (T) et non traitées (NT) par des fongicides (B) de l'association de quatre variétés de blé par rapport à la moyenne des quatre cultures monovariétales sur un réseau de parcelles dans trois régions (S. Wieruszkeski, Arvalis-Institut du Végétal).

La nuisibilité des maladies est évaluée par les écarts de rendement entre les parcelles traitées et non traitées aux fongicides, T-NT, afin de distinguer le potentiel de rendement du niveau de résistance aux maladies ; en effet les rendements des essais non traités dépendent à la fois du potentiel de rendement de la variété et de son niveau de résistance aux maladies. Pour caractériser les niveaux de résistance globale des variétés, le modèle du CTPS est respecté, seuls les essais ayant des écarts T-NT moyens supérieurs à 5 q/ha sont utilisés. Les années 2010 et 2011 avec des pressions de maladies particulièrement faibles, ne permettent pas de mettre en évidence de différences entre la nuisibilité sur l'association et la moyenne des cultures monovariétales (Figure 10B). Mais en effectuant l'analyse sur l'ensemble des données de 2010 à 2012, sur les trois associations du Nord, du Centre et du Sud, l'effet de l'association sur l'écart T-NT par rapport à la moyenne des variétés en culture monovariétale est significatif avec un risque d'erreur de 8 % ; la nuisibilité des associations variétales est inférieure

d'environ 1,5 q/ha à la moyenne des nuisibilités observées sur les cultures monovariétales. La nuisibilité de la septoriose dans l'association variétale est en moyenne pour les trois associations inférieure d'environ 1,5 q/ha à la moyenne des nuisibilités observées sur les cultures monovariétales.

En conclusion des essais réalisés de 2010 à 2012 par Arvalis-Institut du Végétal, les associations de variétés de blé tendre résistantes et sensibles à la septoriose ne diminuent pas les rendements et permettent de réduire les applications de fongicides de 5 % par comparaison au besoin de protection moyen des cultures monovariétales.

Conclusion

La transition vers une agriculture durable nécessite le recours à différentes approches fonctionnelles utilisées conjointement reposant sur des concepts agro-écologiques, notamment dans le domaine de la gestion des maladies des cultures (Newton, 2009). La diversification des résistances variétales, à des échelles spatiales cohérentes avec les caractéristiques de dispersion des pathogènes fongiques considérés, est prometteuse pour limiter la progression épidémique de ces organismes (Lannou et al., 2013).

Bien que les associations variétales soient habituellement considérées comme ayant un intérêt limité pour lutter contre la septoriose du blé (Garrett et Mundt, 1999), nous montrons dans nos essais sur 5 années à l'INRA qu'une variété très sensible est partiellement protégée par la variété plus résistante dans une association bivariétale, la réduction de la sévérité de la maladie propagée par la pluie allant jusqu'à 40 % sur la variété sensible. La diminution de l'impact de la septoriose est plus marquée les années avec une pression modérée de la maladie (correspondant à plus de 50 % de taux de pluviométrie printanière observés ces 20 dernières années). Toutefois, cet effet ne s'est jamais avéré négatif dans les expérimentations conduites à l'INRA de Grignon et sur le réseau d'Arvalis-Institut du végétal. De plus, les essais d'associations quaternaires menés par Arvalis-Institut du végétal montrent que l'utilisation d'associations variétales comparativement à la moyenne de cultures monovariétales présente une augmentation modérée du rendement en l'absence de traitement fongicide. L'élaboration de courbes de réponse du rendement net en fonction de l'utilisation d'une protection fongicide et les mesures de nuisibilité, permettent d'estimer une réduction des applications de fongicides de 5 % par comparaison au besoin de protection moyen des variétés utilisées en culture monovariétale.

Pour raisonner la construction des associations variétales, nous avons développé un modèle mécaniste et stochastique prenant en compte la dispersion des gouttelettes d'éclaboussement et des résistances hôtes quantitatives au sein d'un couvert décrit en trois dimensions. Nous montrons que les proportions optimales des variétés à associer dépendent des différences de niveau de résistance entre les variétés. La détermination des proportions des variétés est à moduler en fonction de la connaissance des niveaux de résistance variétale. Nous montrons que l'association de variétés présentant différents niveaux de résistance partielle peut contribuer à la gestion de maladie à dispersion pluviale telle que la septoriose. Cette contribution si elle est bien réelle, est restée modeste dans le cas de la septoriose (sur nos essais menés sur plusieurs sites, et sur un total de 5 années). Par ailleurs, la mise en œuvre de cette pratique culturale nécessite une prise en compte de nombreux facteurs, tels que la présence de plusieurs agents pathogènes en interaction, la concurrence entre variétés ; elle doit être raisonnée, notamment en termes de proportions des variétés et de complémentarité entre résistances variétales. Les rendements des associations variétales sont le plus souvent évalués sous couverture fongicide. Or, nous confirmons que c'est en l'absence de traitements fongicides ou utilisés à de faible dose, que les associations expriment leurs avantages par rapport aux cultures monovariétales. Si l'utilisation des associations variétales est encore réduite, elles peuvent trouver leur place dans un contexte de réduction sévère des produits phytosanitaires et de système de cultures plus résilient, comme montré avec des grandes parcelles agricoles (de Vallavieille-Pope et al., 2006). De plus, les associations variétales présentent une grande flexibilité, puisque l'on peut modifier leur composition au fil des années.

Si par exemple, une variété présente une trop forte sensibilité à une nouvelle souche du pathogène, il suffira de remplacer la variété qui pose problème pour la prochaine saison culturale, ce qui préserve la productivité. La question de leur valorisation par l'aval et en particulier par la meunerie reste néanmoins posée et des initiatives dans ce sens se développent

Remerciements

Ce travail a été financé par le Ministère de l'Agriculture (CTPS C-03-2010).

Références bibliographiques

- Casadebaig P., Quesnel G., Langlais M., Faivre R., 2012. A Generic Model to Simulate Air-Borne Diseases as a Function of Crop Architecture. *PLoS ONE* 7, e49406.
- Garrett K.A., Mundt C.C., 1999. Epidemiology in mixed host populations. *Phytopathology* 89, 984-990.
- Gigot C., 2013. Potentialités des associations de variétés pour limiter la progression épidémique de la septoriose du blé : rôle des mécanismes de dispersion des spores par la pluie dans un couvert végétal hétérogène (Thèse de doctorat). L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech) ED ABIES, Paris, France.
- Gigot C., Saint-Jean S., Huber L., Maumené C., Leconte M., Kerhornou B., de Vallavieille-Pope C., 2013a. Protective effects of a wheat cultivar mixture against splash-dispersed septoria tritici blotch epidemics. *Plant Pathology* 62, 1011-1019.
- Gigot C., de Vallavieille-Pope C., Leconte M., Saint-Jean S., 2013b. Associations de blé tendres : Mélanger les variétés pour limiter les attaques de septoriose. *Perspectives Agricoles* 401-Juin 2013, 70-74.
- Gigot C., de Vallavieille-Pope C., Leconte M., Maumené C., Huber L., Saint-Jean S., 2013c. Using 3D virtual plants to evaluate the canopy role in the progression of a splash-dispersed crop disease: a case study based on wheat cultivar mixtures. In: *FSPM2013 Proceedings of the 7th International Conference on Functional-Structural Plant Models*, Saariselkä, Finland, pp. 342-344.
- Gigot C., de Vallavieille-Pope C., Huber L., Saint-Jean S., 2014. Using virtual 3-D plant architecture to assess fungal pathogen splash dispersal in heterogeneous canopies: a case study with cultivar mixtures and a non-specialized disease causal agent. *Annals of Botany* 114 (4), 863-876. doi:10.1093/aob/mcu098
- Huber L., Madden L.V., Fitt B.D.L., 2006. Environmental biophysics applied to the dispersal of fungal spores by rain-splash. In: *Cooke, B.M., Gareth, D.G., Kaye, B. (Éds.), The epidemiology of plant diseases*. Springer, pp. 348-370.
- Justes É., Bedoussac L., Corre-Hellou G., Fustec J., Hinsinger P., Journet E.-P., Louarn G., Naudin C., Pelzer É., 2014. Les processus de complémentarité de niche et de facilitation déterminent le fonctionnement des associations végétales et leur efficacité pour l'acquisition des ressources abiotiques. *Innovations Agronomiques* 40, 1-24.
- Lannou C., Papaïx J., Monod H., Raboin L.-M., Goyeau H., 2013. Gestion de la résistance aux maladies à l'échelle des territoires cultivés. *Innovations Agronomiques* 29, 33-44.
- Lebon V., 2012. Étude de la progression de la septoriose au sein d'associations variétales de blé (Rapport de stage d'ingénieur). AgroCampus.
- Madden L.V., 1992. Rainfall and the dispersal of fungal spores. *Advances in Plant Pathology* 8, 40-79.
- Maumené C., Couleaud G., du Cheyron P., 2013. Associations de blés tendres, effet réduit mais réel sur les rendements et les fongicides. *Perspectives Agricoles* 401, 76-79.
- Mille B., Belhaj Fraj B., Monod H., de Vallavieille-Pope C., 2006. Assessing four-way mixtures of winter wheat cultivars from the performances of their two-way and individual components. *European Journal of Plant Pathology* 114, 163-173.
- Mundt C.C., 2002. Performance of wheat cultivars and cultivar mixtures in the presence of

Cephalosporium stripe. Crop Protection 21, 93-99.

Newton A., 2009. Plant Disease Control through the use of Variety Mixtures. In: Walters, D. (Éd.), Disease Control in Crops: Biological and Environmentally Friendly Approaches. Wiley-Blackwell, Oxford, UK, pp. 162-171.

Robert C., Fournier C., Andrieu B., Ney B., 2008. Coupling a 3D virtual wheat (*Triticum aestivum*) plant model with a *Septoria tritici* epidemic model (Septo3D): a new approach to investigate plant-pathogen interactions linked to canopy architecture. Functional Plant Biology 35, 997-1013.

Saint-Jean S., Chelle M., Huber L., 2004. Modelling water transfer by rain-splash in a 3D canopy using Monte Carlo integration. Agricultural and Forest Meteorology 121, 183-196.

Saint-Jean S., Kerhornou B., Derbali F., Leconte M., de Vallavieille-Pope C., Huber L., 2008. Role of rain-splash in the progress of *Septoria* leaf blotch within a winter wheat variety mixture. Aspects of Applied Biology 89, 49-54.

Sapoukhina N., Paillard S., Dedryver F., de Vallavieille-Pope C., 2013. Quantitative plant resistance in cultivar mixtures: wheat yellow rust as a modeling case study. New Phytologist, (UK) 200, 3, 888-897.

Suffert F., Sache I., Lannou C., 2011. Early stages of *septoria tritici* blotch epidemics of winter wheat: build-up, overseasoning, and release of primary inoculum. Plant Pathology 60, 166-177.

de Vallavieille-Pope C., 2004. Management of disease resistance diversity of cultivars of a species in single fields: controlling epidemics. Comptes Rendus Biologies 327, 611-620.

de Vallavieille-Pope C., Belhaj Fraj M., Mille B., Meynard J.-M., 2006. Les associations de variétés: accroître la biodiversité pour mieux maîtriser les maladies. Dossier de l'environnement, INRA 30, 101-109.

Vidal T., Gigot C., Belhaj Fraj M., Leconte M., Huber L., Saint-Jean S., de Vallavieille-Pope C., 2015. Associer des variétés pour maîtriser les maladies et stabiliser la production. Agronomie Environnement & Sociétés 4 (2), 103-111.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL)