

# Impact des mélanges sur l'évolution de *Zymoseptoria tritici*

Les mélanges variétaux influencent la dynamique épidémique et évolutive des populations pathogènes responsables de la septoriose du blé. Bien comprendre les mécanismes en jeu permettrait d'optimiser leur efficacité et de limiter les contournements de résistance variétale.

Frédéric Suffert<sup>1</sup>, Chloé Papin<sup>1,2</sup>, Thierry Marcel<sup>1</sup> et Romain Valade<sup>2</sup> <sup>1</sup>Inrae Bioger. <sup>2</sup>Arvalis

« **O**n ne voit bien qu'avec le cœur. L'essentiel est invisible pour les yeux. » Cette célèbre réflexion tirée du *Petit Prince*, d'Antoine de Saint-Exupéry, pourrait s'appliquer à l'adoption croissante des mélanges variétaux en France : si la pratique séduit à la fois les agriculteurs et les promoteurs de l'agroécologie, ses bénéfices les plus prometteurs ne sont pas nécessairement ceux qui sont les plus visibles et les plus documentés. Tirer parti de mélanges variétaux de blé pour contrôler la septoriose passe par une meilleure caractérisation des mécanismes épidémiologiques et évolutifs qui en déterminent l'efficacité.

## Parmi d'autres bénéfices, un effet sur les maladies

Résumer l'intérêt des associations variétales de blé à leur seule capacité à contrôler les maladies fongiques est réducteur. Cela conduit à négliger de



Inoculation d'un essai mélange variétal en micro-parcelles (Inrae Versailles).  
Photo : F. Suffert

nombreux autres bénéfices, au premier rang desquels la résilience globale d'un système de culture. Si les approches holistiques qui considèrent l'ensemble des avantages et inconvénients des mélanges variétaux sont séduisantes, se concentrer sur leurs impacts sur les populations d'agents phytopathogènes – en particulier de *Zymoseptoria tritici*, responsable de la septoriose du

blé – est indispensable pour optimiser cette pratique. Cette nécessité apparaît dans l'expertise Inrae « RegulNat », qui conclue que la diversification par les mélanges variétaux est un levier immédiatement actionnable pour réduire l'usage des pesticides (Tibi *et al.*, 2022<sup>(1)</sup>). Cependant, il ne suffit pas de se contenter de slogans comme « Diversifiez ! » ; il est crucial de caractériser les mécanismes épidémiologiques et évolutifs qui conditionnent l'efficacité réelle de cette stratégie, loin de tout dogmatisme.

La capacité des mélanges variétaux à limiter l'intensité de la septoriose du blé est largement documentée (Borg *et al.*, 2018 ; Cowger et Mundt, 2002 ; Finckh *et al.*, 2000 ; Kristoffersen *et al.*, 2020 ; Mundt, 2002 ; Mundt *et al.*, 1999 ; Wolfe, 1985). Leur efficacité dépend des caractéristiques du système de culture, des variétés utilisées et des conditions climatiques. Les mécanismes épidémiologiques génériques ont été décrits dans les articles précédents : effet densité-dilution et effet barrière (Gigot, 2013 ; Vidal, 2017), mais aussi effet prémunition (Pélissier *et al.*, 2012) encore peu décrit au champ. Leur impact dépend de la maladie considérée et du type d'interactions entre la plante-hôte et l'agent pathogène.

## Un effet sur les populations pathogènes : au-delà du quantitatif Visible, à bénéfice immédiat, enjeu d'efficacité

Plusieurs travaux conduits à Inrae ont quantifié la capacité des mélanges à réduire la sévérité de la maladie, en se concentrant sur les aspects « physiques » de l'interaction, en particulier la dynamique des contaminations plante à plante par splash (dispersion de pycnidiospores par rejaillissement des gouttes de pluie). La prise en compte de paramètres architectu-

## RÉSUMÉ

**CONTEXTE** De nombreuses études ont démontré que les mélanges variétaux limitent le développement des épidémies fongiques.

**IMPACT ET MÉCANISMES** Les mélanges ont un effet quantitatif sur la sévérité de septoriose du blé à l'échelle de la parcelle au cours d'une saison, et constituent une réponse efficace aux enjeux de performance agromonomique. Les mécanismes épidémiologiques impliqués sont bien documentés (voir article p. 20). Les mélanges variétaux induisent également des effets qualitatifs sur les populations pathogènes, moins visibles mais tout aussi cruciaux. Ces effets,

à bénéfice différé, contribuent à des objectifs de durabilité en influençant la composition génétique de la population pathogène. Ils pourraient jouer un rôle-clé dans la dynamique de contournement des résistances variétales, en modifiant notamment la fréquence des virulences *via* des mécanismes spécifiques, dont certains sont liés à la phase de reproduction sexuée.

**OPTIMISATION** À partir de résultats expérimentaux récents et de projets de recherche en cours, nous postulons qu'associer des variétés est d'autant plus intéressant que leurs sources de résistance sont complémentaires. Nous propo-

sons des pistes pour optimiser à la fois l'efficacité des mélanges à court terme et rendre plus durables les résistances des variétés qui les composent. Nous nous appuyons pour cela sur une compréhension fine des mécanismes épidémiologiques et des principes d'immunité végétale. L'objectif est de pouvoir accompagner, voire de piloter, l'évolution des populations pathogènes afin de renforcer la résilience des systèmes agricoles face aux maladies.

**MOTS-CLÉS** Épidémiologie végétale, mélange variétal, processus épidémique, résistance variétale, septoriose du blé, virulence, *Zymoseptoria tritici*.

raux du couvert a permis d'affiner la connaissance de certains mécanismes épidémiologiques, notamment les effets barrières, maximisés lorsqu'on associe une variété sensible à une variété plus résistante.

L'efficacité d'un mélange se mesure en comparant la sévérité de la maladie dans le couvert hétérogène, exprimée par exemple en pourcentage de surface foliaire touchée, avec la moyenne des sévérités dans les couverts mono-variétaux. Une sévérité inférieure est un indice que des mécanismes se sont exprimés et ont limité le développement de la maladie et, *in fine*, la taille de la population pathogène au sein du mélange (Figure 1A). Cette face visible de l'efficacité, accessible expérimentalement, a été analysée dans plusieurs méta-analyses : les mélanges conduisent en moyenne à une réduction de 10,6 % des attaques de septoriose (Kristofersen *et al.*, 2020) et un rendement supérieur de seulement 2-3 % (Kiaer *et al.*, 2009 ; Borg *et al.*, 2018), le réel point positif étant sa stabilité interannuelle (diminution de sa variabilité).

## Les mélanges conduisent en moyenne à une réduction de 10,6 % des attaques de septoriose.

### Une dimension essentielle invisible

L'essentiel de l'efficacité reste invisible, inaccessible par une simple mesure de sévérité. La modélisation permet,

certes, de formaliser les effets des mélanges sur la dynamique évolutive des populations pathogènes à des échelles d'espace et de temps au-delà de la parcelle et de l'année, mais les sorties de modèles dépendent des hypothèses mécanistiques introduites (mode de reproduction, efficacité d'infection, processus de dispersion, etc.), qui ne sont pas nécessairement validées ou exhaustives. La modélisation ne peut remplacer les approches expérimentales ciblées, qui donnent des indications sur la façon dont un mélange modifie à la fois la taille de la population pathogène et ses « propriétés ». Une population de *Z. tritici* étant constituée localement de milliards d'individus différents (McDonald *et al.*, 2022<sup>(2)</sup>), une de ces propriétés est par exemple la fréquence de souches qui possèdent un allèle de virulence permettant d'infecter une variété de blé portant le gène de résistance correspondant. Plus cette fréquence est grande, moins la résistance est efficace, et plus la sévérité de la maladie est importante. Il a été montré que des mélanges variétaux étaient capables de modifier cette fréquence au travers de différents mécanismes, autrement dit de faire « évoluer » la population pathogène.

Les travaux de recherche actuellement menés par Inrae et Arvalis sont basés sur le postulat qu'associer des variétés résistantes est d'autant plus intéressant que leurs sources de résistance sont « complémentaires » : telle est la face

cachée des mélanges que nous voulons ici rendre visible.

### Mélange de variétés résistantes et sensibles : un équilibre à trouver Des paramètres d'influence bien identifiés

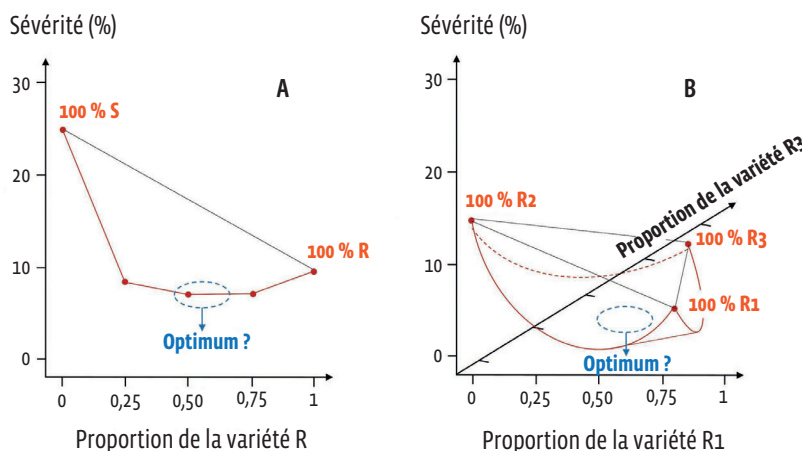
Un mélange de deux variétés, l'une considérée comme sensible (S), l'autre comme résistante (R) car porteuse d'un gène de résistance, conduit à faire cohabiter différentes sous-populations de *Z. tritici*, chacune sur une des composantes variétales du mélange. Après le démarrage de l'épidémie, initiée par les ascospores produites sur les résidus de culture avoisinants (Suffert et Sache, 2011<sup>(3)</sup>), un effet filtre s'exprime sur les plantes R, hôtes uniquement de souches « virulentes » (vir) capables de contourner la résistance variétale, les souches « avirulentes » (avr) n'ayant pas cette capacité (Figure 2). La sous-population présente sur la variété S est en revanche le reflet de la population pathogène locale. La différence de composition entre des deux sous-populations est d'autant plus grande que la fréquence de souches virulentes est faible.

Un premier paramètre susceptible de moduler l'impact des mélanges se distingue : la quantité ou fréquence de souches virulentes, indicateur du stade de contournement d'un gène, qui peut être spatialement hétérogène, avec des différences régionales liées à l'intensité du déploiement des variétés portant ce gène (Marliac *et al.*, in prep.). Les sous-populations sur chacune des composantes variétales du mélange se différencient au fur et à mesure que la maladie progresse dans le couvert, par contaminations croisées : sur les plantes R infectées uniquement par des souches virulentes, l'effet filtre joue à plein ; sur les plantes S, la fréquence de souches virulentes tend à augmen-

**FIG. 1 : Relation entre la sévérité d'attaque de septoriose dans un couvert en mélange et la proportion des variétés le composant**

**A. Représentation en deux dimensions** de résultats expérimentaux correspondant à un mélange de deux variétés (sensible S, résistante R), d'après Orellana-Torrejón *et al.* (2022a).

**B. Représentation théorique en trois dimensions** correspondant à un mélange de trois variétés modérément résistantes (R1, R2, R3) porteuses chacune d'un gène de résistance *Stb* différent.



(1) Tibi A. (coord.), Martinet V. (coord.), Vialatte A. (coord.), Alignier A., Angeon V., Bohan D. A., Bougherara D., Cordeau S., Courtois P., Deguine J.-P., Enjalbert J., Fabre F., Fréville H., Grateau R., Grimonprez B., Gross N., Hannachi M., Launay M., Lelièvre V., Lemarié S., Martel G., Navarrete M., Plantegenest M., Ravigné V., Rusch A., Suffert F., Thoyer S., 2022. *Protéger les cultures en augmentant la diversité végétale des espaces agricoles*. Rapport de l'expertise scientifique collective, Inrae (France), 954 p.

(2) McDonald B. A., Suffert F., Bernasconi A., Mikaberidze A., 2022. How large and diverse are field populations of fungal plant pathogens? The case of *Zymoseptoria tritici*. *Evolutionary Applications* n° 15, p. 1360-1373.

(3) Suffert F., Sache I., 2011. Relative importance of different types of inoculum to the establishment of *Mycosphaerella graminicola* in wheat crops in north-west Europe. *Plant Pathology* n° 60, p. 878-889.

ter d'autant plus rapidement qu'elle est entourée de plantes R, sources de souches virulentes.

Un deuxième paramètre se distingue : le nombre de cycles infectieux, d'autant plus grand (jusqu'à six ou sept) que le printemps est pluvieux, comme en 2024, année exceptionnellement favorable à la septoriose. Une analyse purement quantitative s'arrêterait au constat que les plantes R sont moins attaquées que les plantes S, sous l'effet de la combinaison d'un effet barrière partiel et d'un effet général dilution-densité (Borg *et al.*, 2018). Mais une analyse qualitative amène à faire le constat suivant : une augmentation de la proportion de plantes R, de par l'effet filtre (pression de sélection) qu'elle génère, conduit à une augmentation de la fréquence de souches virulentes dans le couvert. Un équilibre doit être recherché entre l'efficacité du mélange (capacité à réduire l'intensité de l'épidémie) et son impact sur les propriétés de la population pathogène (capacité à limiter durablement l'évolution défavorable de sa composition en virulences). Un troisième paramètre majeur influence ce point d'équilibre : la propor-

tion de chaque variété. Le principe d'un équilibre à atteindre (« Optimum » représenté sur la Figure 1) et l'impact de certains paramètres ont été validés expérimentalement dans le cas d'un mélange des variétés 'Apache' (S) et 'Cellule' (R) porteuse du gène de résistance majeur *Stb16q*, contourné depuis 2017. L'effet du mélange – testé avec trois proportions S/R – sur l'évolution de la fréquence de souches virulentes a été mis en évidence dans un essai en micro-parcelles couplé au phénotypage individuel de plusieurs milliers de souches de *Z. tritici* (Orellana Torrejon *et al.*, 2022a<sup>(4)</sup>).

### Effet sur les populations pathogènes : qualitatif et nuancé Invisible, à bénéfice différé, enjeu de durabilité

L'impact des mélanges variétaux doit être considéré à une échelle spatiotemporelle large, sur plusieurs parcelles, plusieurs années, avec un choix parmi l'ensemble des variétés inscrites dont

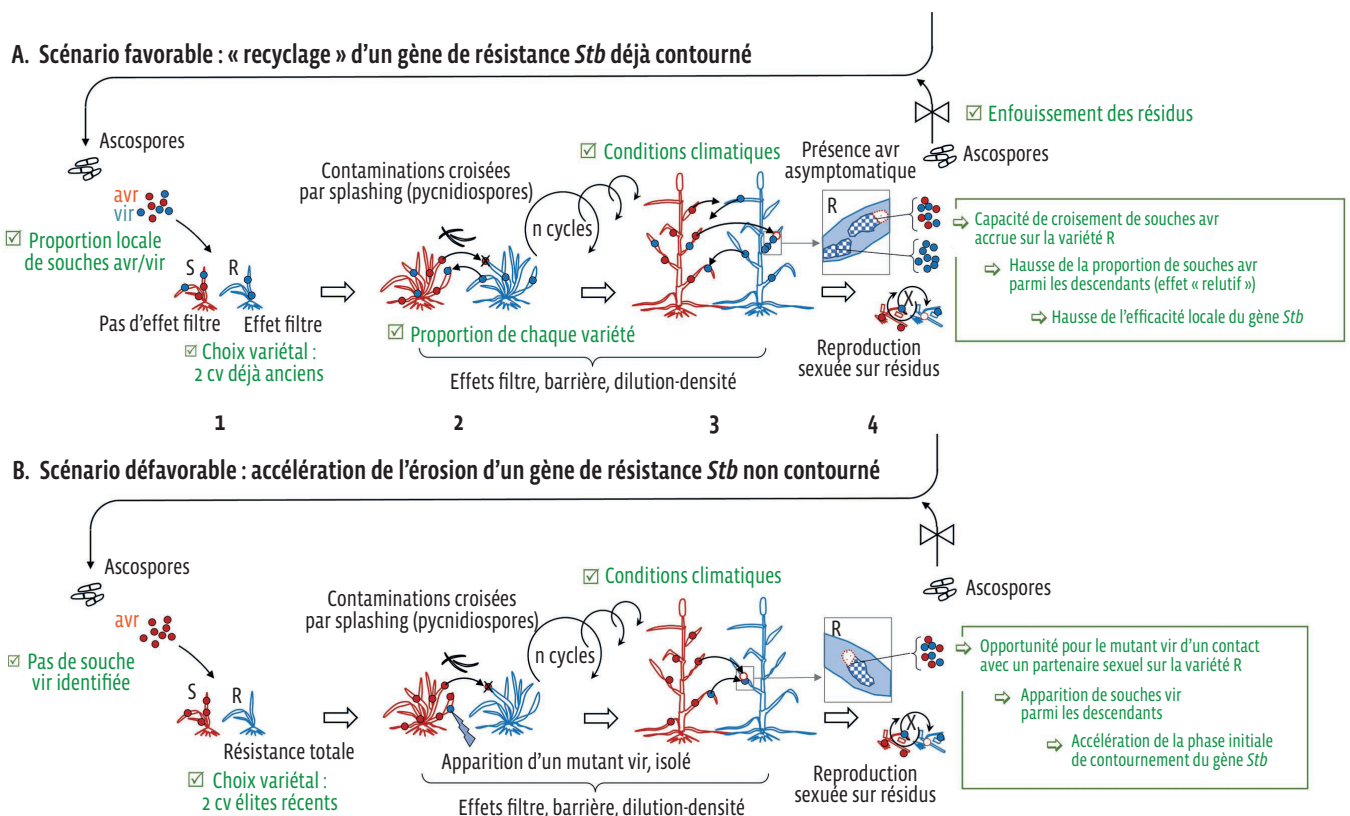
## L'impact des mélanges variétaux doit être considéré à une échelle spatiotemporelle large.

les sources de résistance gagneraient à être identifiées. Les résidus de culture issus d'un mélange, devenus source d'inoculum pour peu qu'ils n'aient pas été enfouis, alimentent la population pathogène locale. Ils contribuent à son évolution par les changements de composition, même minimes. L'enjeu de durabilité des résistances variétales, considérées comme un « bien commun » souvent invisibilisé, dépasse néanmoins les intérêts de l'agriculteur et de son cadre décisionnel.

### Reproduction sexuée

La compréhension fine des déterminants de la reproduction sexuée chez *Z. tritici* revêt une importance particulière dans le contexte des mélanges variétaux. La reproduction sexuée a lieu sur les résidus de culture de chaque composante du mélange, et implique donc les sous-populations associées à chaque variété. Orellana Torrejon *et al.* (2022b)<sup>(5)</sup> ont montré que la fréquence de descendants virulents issus de cette reproduction sexuée est équivalente à celle qui prévaut dans la population parentale, en cohérence avec les lois de la génétique. Même si attendue, il

**FIG. 2 : Deux scénarios d'effet des mélanges sur l'érosion de résistance majeure, selon que le gène déployé dans le mélange est (A) déjà contourné (variété assez « ancienne ») ou (B) non contourné (variété « élite » récente)**







s'agit d'une bonne nouvelle : l'impact bénéfique d'un mélange variétal sur la composition en virulences d'une population de *Z. tritici* devrait en effet se transmettre d'un cycle sexué à l'autre, c'est-à-dire d'année en année, via les ascospores qui peuvent atteindre des parcelles distantes, contrairement aux pycnidiospores issues de la reproduction asexuée et dispersées seulement sur de courtes distances. Fait particulièrement marquant, Orellana-Torrejón *et al.* (2022c)<sup>(4)</sup> ont montré qu'une souche avirulente de *Z. tritici* vis-à-vis de *Stb16q* pouvait se croiser sur une variété porteuse de ce gène, bien qu'elle ne réussisse pas à infecter cette variété (présence asymptomatique) pendant la saison de culture.

L'essentiel est décidément invisible pour les yeux. D'une part, l'effet filtre variétal exercé par un gène de résistance n'est pas total si on prend en compte la phase sexuée de l'agent pathogène. D'autre part, cette phase sexuée explique en partie le maintien d'allèles d'avirulence dans les populations de *Z. tritici* en dépit de la très forte pression de sélection exercée par certains gènes de résistance, comme *Stb6* (présent dans un très grand nombre de variétés de blé). L'impact de ce processus, déjà mis en évidence par Kema *et al.* (2018), est majeur dans le cas des mélanges. Comme explicité

plus bas, il vient nuancer le ratio bénéfice/risque que les mélanges peuvent avoir sur le contournement d'un gène de résistance.

### Vers un ratio bénéfice/risque plus nuancé

Les mécanismes épidémiologiques à l'œuvre dans les mélanges variétaux suggèrent que leurs effets, avant et après la phase de reproduction sexuée, pourraient aussi être défavorables. Tout dépend de la fréquence de virulence dans la population locale de *Z. tritici*, et donc du stade de contournement du gène de résistance introduit dans le mélange.

Considérons tout d'abord le scénario favorable, présenté à la Figure 2A : le « recyclage » d'un gène de résistance *Stb* déjà érodé sans être totalement contourné, signifiant que les virulences correspondantes sont déjà largement présentes dans la population pathogène. Une expérience de terrain récente a montré qu'un mélange pouvait augmenter significativement la fréquence de souches avirulentes sur les deux variétés S et R (portant *Stb16q*), comparativement aux couverts monovariétaux. Cet effet résulte des contaminations croisées entre les deux variétés, modulées par leurs proportions, pendant la phase asexuée (Orellana-Torrejón *et al.*, 2022a)<sup>(4)</sup>, et de la capacité qu'ont des

souches avirulentes qui atterrissent sur les variétés R à se croiser avec d'autres souches virulentes ou avirulentes, selon le mécanisme décrit précédemment (Orellana-Torrejón *et al.*, 2022c<sup>(5)</sup>). Cela aboutit à la persistance des allèles d'avirulence dans la descendance, et ainsi au maintien, voire à une légère augmentation de l'efficacité du gène de résistance (Orellana-Torrejón *et al.*, 2022b<sup>(6)</sup>).

Un second scénario, défavorable, pourrait conduire à l'accélération de l'érosion d'un gène de résistance encore non contourné (Figure 2A). Cela concerne un couvert de blé constitué d'un mélange d'une variété sensible S et d'une variété résistante R portant un gène *Stb* encore pleinement efficace, c'est-à-dire pour lequel aucune souche virulente n'a été détectée. Compte tenu de la très grande taille d'une population de *Z. tritici* (McDonald *et al.*, 2022<sup>(2)</sup>), il est probable qu'un mutant

2. Mélange en micro-parcelles au stade épiaison (Arvalis Boigneville).
3. Symptôme de septoriose.
4. Dispositif d'essai mélange variétal en micro-parcelles (Arvalis Boigneville).
5. Mélange en micro-parcelles juste avant récolte.

Photos : 2, 3, 5. F. Suffert  
4. Arvalis

(4) Orellana-Torrejón C, Vidal T, Saint-Jean S, Suffert F, 2022. The impact of wheat cultivar mixtures on virulence dynamics in *Zymoseptoria tritici* populations persist after interseason sexual reproduction. *Plant Pathology* n° 71, p. 1537-1549.

(5) Orellana-Torrejón C, Vidal T, Gazeau G, Boixel A-L, Gélisse S, Lageyre J, Saint-Jean S, Suffert F, 2022c. Multiple scenarios for sexual crosses in the fungal pathogen *Zymoseptoria tritici* on wheat residues: potential consequences for virulence gene transmission. *Fungal Genetics and Biology* n° 163: 103744.

(6) Orellana-Torrejón C, Vidal T, Boixel A-L, Gélisse S, Saint-Jean S, Suffert F, 2022b. Annual dynamics of *Zymoseptoria tritici* populations in wheat cultivar mixtures: a compromise between the efficiency and durability of a recently broken-down resistance gene? *Plant Pathology* n° 71, p. 289-303.

virulent apparaisse sur une plante S quelque part dans le couvert. Dans un couvert monovariétal S, un tel mutant, en compétition avec l'ensemble des souches avirulentes, aurait peu de chance d'émerger. En revanche, dans un mélange, la probabilité que des pycnidiospores issues de la lésion provoquée par ce mutant atterrisse sur une plante R est relativement élevée. Le mutant se retrouverait alors sans souche compétitrice sur la variété R, et pourrait ensuite se croiser et transmettre son allèle de virulence par le biais des mécanismes précédemment décrits. Dans ce scénario, le mélange variétal offre donc une probabilité plus forte à un mutant virulent d'émerger. En définitive, le ratio bénéfice/risque des mélanges variétaux, comparativement à des couverts monovariétaux, doit être nuancé. Il dépend du stade de contournement des gènes de résistance que l'on souhaite utiliser dans le mélange : il pourrait conduire à recycler un gène de résistance déjà contourné, ou *a contrario* accélérer le contournement d'un gène récemment déployé. S'appuyer sur les réflexions qui précèdent, même prospectives, peut aider à concevoir des mélanges optimaux, aux résultats encore incertains. On serait ainsi tenté de préconiser l'association de variétés portant des résistances quantitatives et de variétés portant une résistance qualitative contournée (pour qu'elle retrouve progressivement une meilleure efficacité), en évitant l'utilisation de variétés trop sensibles (pour contrôler toutefois la maladie à l'échelle annuelle). Dans le même temps, on serait tenté de proscrire les mélanges de variétés élites récemment inscrites portant une résistance qualitative (pour éviter d'accélérer son contournement).

### Émergence de souches multi-virulentes

Un mélange de deux variétés portant chacune un gène *Stb* favorise-t-il l'émergence de descendants multi-virulents, c'est-à-dire cumulant les deux virulences ? Cette question, ancienne et récurrente, a surtout été abordée pour des populations pathogènes à structure clonale, comme les rouilles (Groth, 1976 ; Lannou et Mundt, 1997). Cependant, elle prend une dimension différente lorsque l'on intègre à la réflexion les conséquences de la reproduction sexuée, majeures chez *Z. tritici*. Des résultats de modélisation suggèrent que les mélanges à l'origine d'une sélection disruptive favorisant la

sélection d'individus aux phénotypes « extrêmes » (c'est-à-dire capable de contourner l'un ou l'autre des gènes de résistance) entraînent une réduction de fitness/agressivité chez *Z. tritici* (Mundt *et al.* 1999, Cowger & Mundt 2002a, 2002b). Aucune conclusion tranchée n'a toutefois été tirée quant au risque d'apparition et de maintien de souches multi-virulentes dans les populations pathogènes. Dans une population passant tous les ans par une phase sexuée, il est raisonnable de penser que la fréquence de chaque virulence importe davantage que le nombre de souches les cumulant à un instant t. Il serait néanmoins intéressant de savoir si un mélange, par la combinaison des effets filtres et des contaminations croisées entre variétés, favorise ou défavorise les croisements entre des souches mono-virulentes. La réponse est loin d'être évidente.

### Perspectives de recherche

De ce qui précède, il faut retenir qu'un mélange est efficace pour réduire le développement de la septoriose et pourrait améliorer l'efficacité de résistances déjà érodées, dans une mesure qui reste à estimer.

Le projet de recherche PPR Mobidiv ANR Combine et la thèse de Chloé Papin (Arvalis-Inrae) visent à mieux caractériser l'impact des mélanges de blé sur l'évolution d'une population de *Z. tritici* afin d'identifier des règles d'association permettant d'améliorer cette efficacité à court et plus long terme. Pour cela, trois variétés de blé ont été choisies pour leur complémentarité, à savoir posséder chacune un gène *Stb* différent (*Stb6*, *Stb9* et *Stb16q*), et ont été cultivées en mélange dans un essai en micro-parcelles sur les sites Inrae de Versailles et Arvalis de Boigneville. Évaluer l'impact des différentes combinaisons (un mélange ternaire et trois mélanges binaires) implique de pouvoir caractériser des fréquences de virulence sur les populations de chaque modalité. Deux méthodes complémentaires ont été développées à cette intention. L'une s'appuie sur du phénotypage en bulk (Suffert *et al.*, 2024<sup>(7)</sup>) et l'autre sur du séquençage (Bellah *et al.*, 2023<sup>(8)</sup>) permettant de suivre l'évolution des allèles vir et avr dans les populations. Le dispositif en micro-parcelles a été dupliqué, avec une partie contaminée

## Un mélange pourrait améliorer l'efficacité de résistances déjà érodées.

naturellement et une autre inoculée avec des couples de souches vir/avr vis-à-vis de chacun des trois gènes *Stb*, en équiproportion. Le postulat est que des proportions équilibrées – tant côté population hôte que côté population pathogène – permettent de maximiser l'effet des mélanges. Les couples de *Z. tritici* ont été choisis pour être « sexuellement compatibles », avec pour perspective ultime un suivi de l'impact des mélanges sur la composition des populations pathogènes (fréquence des virulences et éventuellement des multi-virulences) à l'issue de la reproduction sexuée. Une version simplifiée de l'essai a été implantée dans dix stations Arvalis en France pour mettre en évidence un éventuel effet local, potentiellement lié aux différences de pression de maladie et de composition en virulences. Un tel effet a été mis en évidence dans un premier essai multisite conduit à l'échelle européenne (Vidal *et al.*, 2023<sup>(9)</sup>). Comment l'association de différents gènes de résistance à l'échelle d'un couvert affecte-t-elle la fréquence et la combinaison des virulences d'une population pathogène ? Comment exploiter les conséquences de ces interactions résistance/virulence (adaptation locale et sélection disruptive) pour élaborer des couverts hétérogènes dont les sources de résistance seraient à la fois plus efficaces et plus durables ? Adapter les associations variétales à la situation épidémiologique locale fait-il sens ? Quels outils pour permettre de mieux caractériser cette situation (du phénotypage à l'analyse génomique) et comment les valoriser au mieux sur le terrain ? Autant de questions auxquelles nous espérons être en mesure d'apporter des éléments de réponse d'ici quelques années. ▶

(7) Suffert F, Le Prieur S, Gélisse S, Dzialo E, Saintenac C, Marcel T. C., 2024. Estimating the frequency of virulence against an *Stb* gene in *Zymoseptoria tritici* populations by bulk phenotyping on checkerboard microcanopies of wheat NILs. *Plant Pathology* n° 73, p. 1573-1585.

(8) Bellah H, Gazeau G, Gélisse S, Amezcrou R, Marcel T. C., Croll D., 2023. A highly multiplexed assay to monitor virulence, fungicide resistance and gene flow in the fungal wheat pathogen *Zymoseptoria tritici*. *PLoS One* n° 18: e0281181.

(9) Vidal T, Duvivier M, Gaubrie S, Heick T. M., Hellin P, Kildea S, Suffert F., 2023. Contrasted effects of wheat cultivar mixture on *Septoria tritici* blotch between European sites: investigating key factors involved in mixture effect variation. International Congress of Plant Pathology (ICPP2023), 21-25 août 2023, Lyon, France.



### POUR EN SAVOIR PLUS



**CONTACT :** frederic.suffert@inrae.fr ; chloe.papin@inrae.fr ; thierry.marcel@inrae.fr ; R.valade@arvalis.fr



**BIBLIOGRAPHIE :** voir notes. Les autres références bibliographiques citées dans l'article sont disponibles sur demande aux auteurs.