

Note commune 2021

INRAE, Anses, ARVALIS - Institut du Végétal

Observer la résistance et formuler des recommandations adaptées pour en retarder l'émergence et la progression contribue positivement à une agriculture durable et moins dépendante des produits phytopharmaceutiques.

Cette note, corédigée par des représentants d'INRAE, de l'Anses et d'ARVALIS - Institut du végétal, dresse l'état des lieux, par maladie et par mode d'action, des résistances aux fongicides utilisés pour lutter contre les maladies des céréales à paille et formule des recommandations pour limiter les risques d'évolution de résistance et maintenir une efficacité satisfaisante. Elles se basent d'une part sur la connaissance du statut des résistances dans les populations (occurrences et fréquences des résistances, régions concernées, pertes d'efficacité éventuelles observées dans les essais), et d'autre part sur la connaissance des mécanismes de résistance et les caractéristiques des souches résistantes (niveau de résistance, spectre de résistance croisée notamment). Ces différentes informations sont issues :

- du plan de surveillance nationale de la résistance aux produits phytopharmaceutiques piloté par la DGAL. Les analyses sont réalisées par l'unité CASPER de l'Anses (laboratoire de Lyon)
- des projets de recherche d'INRAE,
- d'autres plans de surveillance comme celui du Réseau Performance animé par ARVALIS, ou du groupe de travail de Végéphyll,
- des données de terrain, notamment issues d'essais d'efficacité en situation de résistance,
- des communications de professionnels et des sociétés phytopharmaceutiques auprès des experts du groupe de travail.
- de la littérature scientifique.

A retenir

Du côté du blé :

- En 2020, les souches résistantes de *Zymoseptoria tritici* aux SDHI (CarR) poursuivent leur progression et atteignent une fréquence moyenne de 18 %. Au vu des mutations concernées, cette fréquence encore faible ne semble pas impacter l'efficacité des traitements qui contiennent des SDHI. Cependant, la prévention de cette résistance reste plus que jamais de rigueur.
- Depuis 2019 un peu plus d'une souche sur quatre de *Z. tritici* est désormais de phénotype MDR (résistance multi-drogues).
- Dans un contexte d'érosion de plus en plus prononcée de l'activité au champ des triazoles d'ancienne génération, l'efficacité relative des IDM s'avère dépendante de la structure des populations de *Z. tritici* présentes localement.

Du côté de l'orge :

- La proportion de souches d'*Helminthosporium teres* résistantes aux SDHI reste très élevée (80 %) et affecte sévèrement l'efficacité des SDHI.
- Les souches d'*H. teres* aux QoI progressent fortement pour atteindre une fréquence moyenne d'environ 70 % (contre 30 % environ les années précédentes).

Recommandations :

- Sur blé comme sur orge, limiter l'utilisation des SDHI à une seule application par saison.
- Sur blé face à la progression des résistances multiples, n'intervenir que si strictement nécessaire et maintenir si possible un fongicide multisite dans le programme (soufre, folpel).
- Sur orge, pour éviter de sélectionner davantage des souches présentant une résistance multiple, le recours à l'utilisation d'un mélange trois voies QoI+SDHI+IDM doit être rigoureusement limité aux situations où l'helminthosporiose est très difficile à contrôler.

RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES POUR 2021

Nos recommandations visent en première intention à limiter la pression de maladie en encourageant le recours à la prophylaxie, aux variétés résistantes et aux outils d'aide à la décision, pour limiter le recours aux traitements et leurs effets non-intentionnels.

- **Préférer des variétés peu sensibles** aux maladies, en priorisant la résistance aux maladies ayant le plus d'impact sur le rendement, ou sur la qualité sanitaire et/ou permettant de réduire l'usage des fongicides. Le recours à des variétés résistantes à la fois à la rouille jaune et à la septoriose, permet par exemple de supprimer systématiquement le premier traitement des blés et ainsi de limiter la pression de sélection exercée par les fongicides.
- **Diversifier les variétés** à l'échelle de l'exploitation, de la microrégion et d'une année sur l'autre pour favoriser la durabilité des résistances génétiques et opposer des barrières à la dispersion des résistances aux fongicides.
- **Privilégier les pratiques culturales** permettant de réduire le risque parasitaire, notamment en **limitant** l'inoculum primaire (ex : rotation, labour, date de semis, gestion des repousses de céréales notamment dans l'interculture ...) ou la progression de la maladie (densité, azote).
- **Ne traiter que si nécessaire**, en fonction du climat, des conditions de culture, des prédictions des modèles et des observations au champ.

Lorsque traiter est nécessaire :

- **Raisonner le positionnement** des interventions en fonction du développement des maladies grâce à des méthodes fiables d'observation et/ou de prévision du développement de l'épidémie.
- **Limitier le nombre d'applications avec des substances actives de la même famille** (caractérisées généralement par une résistance croisée positive) au cours de la même campagne. De même, dans le cas où une même substance active peut être utilisée en traitement de l'épi et en traitement des semences, éviter si possible de cumuler deux traitements avec la même molécule.
- **Diversifier les modes d'action en alternant ou en associant les substances actives dans les programmes de traitements**, pour minimiser le risque de développement de résistance.
- **Recourir lorsque cela est possible et utile aux fongicides multisites**, moins susceptibles de sélectionner des populations résistantes, en particulier sur septoriose.
- **Limitier de préférence l'utilisation des SDHI, des Qil et des Qol à une seule application** par campagne.
- **Eviter de recourir au même IDM, plus d'une fois par campagne pour prévenir la résistance** et en leur associant des molécules à mode d'action différent.
- **S'agissant des traitements de semences avec un SDHI**, dès lors qu'il est revendiqué pour leur usage une activité sur les maladies foliaires, ils ne doivent pas être suivis d'une application foliaire fongicide contenant également un SDHI.

SEPTORIOSE (*Zymoseptoria tritici*)

Qol

La résistance aux **Qol** (strobilurines) concerne l'ensemble des régions céréalières françaises. Son implantation est généralisée sur tout le territoire et l'efficacité de tous les Qol est fortement affectée.

Qil

Le fepicoxamide est une substance active qui appartient à la famille des picolinamides. Ce fongicide inhibe le cytochrome b (tout comme les strobilurines) mais au site de fixation interne de l'ubiquinone (d'où l'acronyme Quinone inside Inhibitors : Qil). Les sites de fixation sur le cytochrome b étant différents, il n'y a pas de résistance croisée entre Qol et Qil (ni d'ailleurs avec aucun des modes d'action actuellement homologués sur céréales). Ce mode d'action original va être utilisé pour la première fois en 2021.

Cependant, la résistance aux Qil étant observée chez des pathogènes d'autres cultures et dans le milieu médical, il est primordial d'anticiper la gestion de la résistance à cet unisite. Ainsi, pour réduire ce risque, il est conseillé d'alterner ou d'associer ce Qil avec des substances actives de modes d'action différents, tant au cours d'une saison culturale que dans la rotation. Il est également recommandé de ne pas appliquer le fepicoxamide seul et de toujours l'associer avec un produit partenaire ayant une efficacité sur la (les) maladie(s) ciblée(s).



IDM

Les souches de *Z. tritici* moyennement résistantes (TriMR) aux triazoles (principale classe d'**IDM**¹) régressent fortement et représentent désormais moins d'une souche sur cinq parmi les populations analysées. Pour mémoire, ces souches sont pour une part, entièrement sensibles au prochloraze en particulier dans les régions de la façade atlantique.

Corrélativement à la régression des souches les moins résistantes, les fréquences moyennes des souches de type **TriHR**² et **MDR**³ atteignent respectivement 55 % et 23 % sur l'ensemble du territoire en 2020, tandis que leur occurrence dans les populations est respectivement de 97 % et 81 % (en progression).

Les travaux en cours⁴ montrent de plus en plus clairement que les génotypes résistants (correspondants à des combinaisons de mutations affectant le gène codant pour la cible des IDM) sont associés à des spectres de résistance croisée affectant différemment les triazoles, permettant de constituer trois groupes. Un premier groupe de résistance croisée rassemble le prothioconazole, mais aussi le cyproconazole, l'époxiconazole, le tétraconazole et le bromuconazole. Un deuxième contient le difénoconazole, le tébuconazole mais aussi le méfentrifluconazole. Le metconazole et le prochloraze constituent un troisième groupe. La fréquence des génotypes résistants diffèrent d'un lieu à l'autre, comme confirmé par plusieurs suivis inter-régionaux en France, la structure locale de la population affecte ainsi différemment l'efficacité des triazoles. Ceci est décrit également à l'échelle européenne⁵.

En pratique, on a pu observer pour certains triazoles comme l'époxiconazole ou le tébuconazole, des efficacités relatives variables d'un site d'essai à l'autre, le premier étant plus efficace que le second dans le Sud et vice-versa dans le Nord. Le difénoconazole (125 g/ha) se distingue également par sa bonne efficacité générale dans le Nord. Comme les années précédentes, dans les parcelles présentant des fréquences élevées de souches TriHR et/ou MDR, l'efficacité de tous les triazoles est altérée, à l'exception du méfentrifluconazole pour l'instant non affecté par la résistance généralisée des populations.

SDHI

La résistance aux SDHI est principalement associée à une, plus rarement à deux, mutations affectant la sous-unité B, C ou D de la succinate déshydrogénase⁶. En France, cette résistance a été détectée pour la première fois en 2012 chez un isolat du nord de la France portant le changement C-T79N, associé à des facteurs de résistance faibles pour les SDHI de la classe des pyrazoles. La fréquence de cette substitution, quasiment généralisée en Irlande, augmente lentement mais régulièrement en France. D'autres substitutions associées à des facteurs de résistance faibles à moyens (B-N225I, C-W80S, D-D129G...) sont détectées à faible fréquence. La substitution C-N86S est moyennement résistante. Elle est associée aux phénotypes résistants les plus fréquemment retrouvés en France (stabilisation depuis 2019) même si sa fréquence est actuellement faible à modérée, selon les régions concernées. Détectée depuis 2014 en Europe, actuellement bien implantée au Royaume Uni et en Irlande, la substitution C-H152R (associée aux facteurs de résistance les plus élevés pour la majorité des SDHI) est régulièrement identifiée dans l'Ouest et le Nord de la France depuis 2018 mais reste rare. Exceptionnellement, plusieurs de ces substitutions peuvent être combinées dans le même isolat, contribuant à augmenter les facteurs de résistance. Enfin, des souches associant plusieurs mécanismes de résistance (mutation du gène codant pour la cible et efflux accru (MDR)) sont régulièrement détectées.

Un test phénotypique de routine basé sur des doses discriminantes de boscalide et de bixafène optimisées pour autoriser les croissances de l'ensemble des génotypes résistants permet de quantifier leur progression depuis 2015. En 2020, 51 % des populations analysées sont concernées par la présence de souches résistantes CarR, contre 36 % en 2019 et seulement 5 % en 2018. A l'échelle nationale, la fréquence moyenne de souches résistantes dans les populations était de 18 % en 2020, tous génotypes confondus.

Pour l'instant, étant donné la structure des populations, il n'y a pas lieu de craindre de perte d'efficacité majeure des SDHI pour 2021 mais la prévention de cette résistance reste une priorité.

Recommandations

Rappel : la lutte contre la septoriose doit d'abord s'envisager *via* l'agronomie (date de semis, densité, azote) et la génétique, en préférant des variétés résistantes. Les variétés avec des notes de sensibilité GEVES, notées 6.5 et au-delà, ne justifient pas de traitement précoce (T1) contre cette maladie quelles que soient la région et l'année.

Dans un contexte d'érosion de plus en plus prononcée de l'activité au champ des triazoles d'ancienne génération, leur efficacité relative s'avère dépendante des populations de *Z. tritici* présentes localement. S'agissant des principaux IDM, le prothioconazole d'une part, le difénoconazole et le tébuconazole d'autre part, et le metconazole enfin, peuvent donner des résultats différents selon les sites d'essais en fonction de la fréquence des différents génotypes présents dans la population. Le recours régulier à des essais locaux pour évaluer l'activité relative des IDM entre eux est préférable à toute approche globale basée uniquement sur des caractérisations de souches. Toutefois, l'efficacité de ces IDM d'ancienne génération reste régulièrement (mais pas systématiquement) insuffisante, y compris lorsque plusieurs triazoles sont associés entre eux. L'activité du méfentrifluconazole⁷, triazole de nouvelle génération, semble à ce jour peu affectée par la nature des populations de *Z. tritici* présentes mais doit être préservée en maintenant autant que possible une diversité dans l'utilisation des substances actives IDM.

Les triazoles sur septoriose, pour des raisons d'efficacité et de gestion de la résistance, méritent d'être complétées avec un fongicide multisite (soufre, folpel) un SDHI ou un Qil, voire du prochloraze dans les régions au sud de la Loire où ce dernier est le mieux valorisé. Pour limiter et diversifier la pression de sélection fongicide, en particulier sur les souches TriHR, on alternera les modes d'action, ainsi que les molécules au sein d'un même mode d'action, en particulier parmi les IDM.

Compte tenu de la progression rapide de la résistance aux SDHI dans l'ouest européen (dont l'Irlande et le Royaume Uni où l'efficacité des SDHI est affectée), il est fortement recommandé de limiter la pression de sélection vis-à-vis de ce mode d'action à un niveau aussi faible que possible, en limitant l'utilisation des SDHI, quelle que soit la dose, à une seule application par saison et en les associant à des partenaires efficaces. On veillera si possible à diversifier les substances actives SDHI dans l'espace et dans le temps. Cette recommandation vise à limiter la sélection de souches MDR, en même temps que la sélection de souches spécifiquement résistantes aux SDHI (CarR), voire de souches présentant une résistance multiple (MDR + CarR).

Par ailleurs, l'association de deux SDHI, même appartenant à deux groupes chimiques différents, est comptabilisée comme une seule application de SDHI. Ce type de mélange vise principalement à accroître l'efficacité de l'association mais n'améliore pas en pratique la gestion des résistances, étant donné les génotypes en présence dans les populations.

Attention : le recours à des associations fortement dosées en SDHI (contenant notamment plusieurs SDHI), et peu dosées en IDM, risque de favoriser la sélection de souches spécifiquement résistantes aux SDHI et/ou MDR ; l'utilisation en mélange d'un IDM à faible dose ne permettant plus de contrôler les souches sélectionnées par les SDHI (résistance multiple).

Enfin, la pratique du fractionnement⁸ s'accompagne d'une meilleure efficacité dans les situations où la pression de la maladie est à la fois forte et continue. Mais, elle s'accompagne potentiellement pour les fongicides concernés par la résistance, d'une plus forte sélection des souches les plus résistantes (notamment TriHR et MDR), du fait de l'exposition accrue des populations. Il est recommandé de ne pas multiplier inutilement le nombre de traitements de fongicides unisites et de s'en tenir (sauf exception justifiée) aux pratiques actuelles.

¹ IDM : Inhibiteur de la 14 α -Déméthylation des stérols

² TriHR = TriMR évoluées, i.e. très résistantes à au moins un triazole. Voir description : Garnault, M., et al. (2019). "Spatiotemporal dynamics of fungicide resistance contrast quantitatively in the pathogenic fungus *Zymoseptoria tritici*". *Pest Management Science*. **75**(7) : 1794-1807. DOI:10.1002/ps.5360.

³ MDR = Résistance multidrogues. Voir description : Leroux P, Walker AS, Multiple mechanisms account for resistance to sterol 14 α -demethylation inhibitors in field isolates of *Mycosphaerella graminicola*. (2011). *Pest Management Science* **67**(1), 47-59, Doi:10.1002/ps.2028.

⁴ Par exemple : Heick, T. M., et al. (2020). "Reduced field efficacy and sensitivity of demethylation inhibitors in the Danish and Swedish *Zymoseptoria tritici* populations." *European Journal of Plant Pathology* **157**(3): 625-636.

⁵ Jørgensen, L.N., Matzen, N., Heick, T.M. et al. Decreasing azole sensitivity of *Z. tritici* in Europe contributes to reduced and varying field efficacy. *J Plant Dis Prot* (2020). <https://doi.org/10.1007/s41348-020-00372-4>.

⁶ Liste non exhaustive des mutations identifiées pouvant être combinées au sein d'un même génotype. SdhB : N225T/I, R265P, H267L, T268I/A ; SdhC : T79N/I, W80S/A, A84F, **N86S/A**, P127A, R151S/M/T/G, R151S/T, **H152R/Y**, V166M, T168R ; SdhD : I50F, M114V, D129G. Les mutations ayant le plus d'impact sur l'efficacité sont listées en gras.

⁷ L'utilisation des produits à base de méfentrifluconazole est règlementairement limitée à une seule application par saison.

⁸ Le fractionnement d'une dose pleine en deux applications pour les produits pour lesquels cette pratique est autorisée, doit être comptabilisé comme deux applications indépendantes

OÏDIUM DU BLE, DU TRITICALE ET DE L'ORGE

(*Blumeria graminis* f. sp. *tritici*, *B. graminis* f. sp. *triticales* et *B. graminis* f. sp. *hordei*)

Cette maladie est peu préjudiciable aux céréales ces dernières années, sauf sur triticales. En l'absence de nouvelles données depuis 2007, l'oïdium du triticales⁹ est toujours considéré comme sensible à l'ensemble des anti-oïdiums utilisés sur blé.

Qol

La résistance aux **Qol** chez l'oïdium du blé et de l'orge est, probablement, toujours fortement implantée en France mais reste peu fréquente dans le Sud.

IDM et amines

Bien que la résistance aux deux classes d'**IBS** (IDM et amines) soit largement installée en France sur oïdium du blé et de l'orge, et que plusieurs mutations affectent la cible des IDM, plusieurs molécules conservent une activité intéressante.

Aza-naphthalènes

Des souches d'**oïdium du blé** résistantes au proquinazide et au quinoxifène (actuellement retiré du marché), présentant des facteurs de résistance variables, ont été décelées en France dans les années 2000 (surtout localisées en Champagne) et dans d'autres pays européens. En 2013, tous les isolats collectés en France étaient sensibles au proquinazide. Par ailleurs, si l'activité du quinoxifène a pu être affectée par des souches résistantes, le proquinazide, bien que présentant une résistance croisée avec le quinoxifène, reste efficace à sa dose d'emploi en toutes situations.

Autres anti-oïdiums spécifiques

A ce jour, aucune résistance spécifique au cyflufénamide (phényl-acétamides) chez l'oïdium du blé n'a été portée à notre connaissance. Depuis 2009, des souches d'oïdium du blé moyennement résistantes à la métrafénone (phénylcétones) sont observées en France à faible fréquence. Plus récemment, des souches fortement résistantes à la métrafénone ont été détectées à très faible fréquence, en France comme dans le reste de l'Europe (Royaume-Uni et Danemark), en 2013 et 2014. En 2015, dans certains essais de Champagne, des résultats décevants ont été obtenus avec la métrafénone sur oïdium du blé (analyses de résistance non disponibles). La pyriofénone, autorisée mais non disponible sur le marché actuellement, partage le même mode d'action que la métrafénone et devrait également être concernée (caractérisation des souches non disponible).



⁹ L'analyse de génomes des différentes formes spéciales d'oïdium a permis de démontrer que l'oïdium du triticales résulte de l'hybridation naturelle entre l'oïdium du blé et du seigle. Menardo, F., et al. (2016). "Hybridization of powdery mildew strains gives rise to pathogens on novel agricultural crop species." *Nature Genetics* 48(2): 201-205.

Recommandations

Rappel : la lutte contre l'oïdium doit être envisagée en priorité *via* l'agronomie et l'utilisation de variétés résistantes. Le recours à des fongicides spécifiques n'est justifié que dans des situations ou des contextes climatiques tout à fait exceptionnels. Rappelons qu'il existe un fongicide multisite de biocontrôle, le soufre, efficace et autorisé pour cet usage.

Sur blé, les efficacités en essai des IBS, de la métrafénone et du proquinazide sont variables. A l'exception du cyflufénamide, les substances actives et les modes d'action vis-à-vis desquels des souches résistantes ont été identifiées (métrafénone, proquinazide, fenpropidine et spiroxamine), devront être utilisés de préférence associés à une autre molécule active sur oïdium. Enfin, la métrafénone étant active sur oïdium et sur piétin verse, il est recommandé de limiter son utilisation à une application par saison, ciblant l'un ou l'autre de ces pathogènes. Une alternance annuelle des modes d'action entre maladies du pied et du feuillage est en effet préférable pour limiter le risque d'évolution de la résistance.

Par ailleurs, la famille des QoI ne doit plus être considérée comme efficace sur oïdium dans la plupart des régions françaises.

Sur oïdium du triticale, par précaution, il est recommandé de modérer si possible les utilisations pour tenter de préserver la situation favorable initiale observée en 2007.

Concernant l'oïdium de l'orge, les triazoles demeurent une solution efficace.

PIETIN-VERSE (*Oculimacula spp.*)¹⁰

IDM

L'espèce dominante en France est *Oculimacula yallundae* (type rapide) et les souches rencontrées actuellement sont plus fréquemment résistantes à la plupart des IDM, notamment au **prochloraze** mais pas au **prothioconazole**.

Anilinopyrimidines

Des souches d'*Oculimacula yallundae* résistant spécifiquement au **cyprodinil** continuent d'être détectées en France à une fréquence parfois non négligeable (de 6 à 14 % dans 6 essais sur 7 en 2016 et 2017), mais sans incidence pratique démontrée sur son efficacité. Néanmoins, son efficacité moyenne décroît régulièrement depuis une dizaine d'années.



MDR

Des souches présentant des niveaux de résistance faibles vis-à-vis du prothioconazole, du boscalide et du cyprodinil (résistance multidrogues ou MDR) sont observées à des fréquences non négligeables (3 à 41 % sur les deux années 2016 et 2017), sans que leur présence n'affecte sensiblement l'efficacité de ces spécialités.

Phénylcétones

La métrafénone ne semble pas concernée par la MDR, ni par une résistance spécifique.

Recommandations

Rappel : la lutte contre le piétin doit d'abord s'envisager *via* l'agronomie et la génétique avec des variétés résistantes au champignon ou à la verse. Les variétés avec des notes de sensibilité GEVES, notées 5 et au-delà, ne justifient pas de traitement. La lutte chimique présente des niveaux d'efficacité généralement faibles et le plus souvent économiquement non rentables.

Le cumul de plusieurs substances actives (cyprodinil, métrafénone...) est souvent nécessaire pour obtenir une efficacité satisfaisante. Le prochloraze n'est plus efficace contre le piétin-verse et est à réserver à la lutte contre la septoriose, dans les régions où il est encore efficace. La métrafénone étant active sur piétin-verse et sur oïdium, il est recommandé de limiter son utilisation à une application par saison, ciblant l'un ou l'autre de ces pathogènes. Une alternance annuelle des modes d'action entre maladies du pied et du feuillage est préférable pour limiter le risque d'évolution de la résistance.

¹⁰ Leroux P, Gredt M, Remuson F, Micoud A, Walker AS, Fungicide resistance status in French populations of the wheat eyespot fungi *Oculimacula acuformis* and *Oculimacula yallundae* (2013). *Pest Management Science* 69 (1):15-26.

HELMINTHOSPORIOSE DU BLE

(*Pyrenophora tritici-repentis*)

Qol

En Europe du Nord, certaines souches de *Pyrenophora tritici-repentis* présentent des mutations dans le gène codant pour le cytochrome *b* (cible des **Qol**), soit en position 129 (F129L / faible niveau de résistance), soit en position 143 (G143A / fort niveau de résistance) ou encore en position 137 (G137R / faible niveau de résistance). Ces trois mutations peuvent être retrouvées dans une même population. En 2014, la fréquence d'isolats résistants, toutes mutations confondues, collectés dans l'Est de l'Europe, dépasse le plus souvent 30 %, et depuis 2015 la mutation devenue dominante est G143A. En France, ces mutations sont détectées régulièrement sur les très rares échantillons ayant fait l'objet d'analyses. Aucune baisse d'efficacité n'a cependant été observée au champ.



SDHI

L'utilisation des SDHI présents sur le marché n'est pas déterminante pour lutter contre cette maladie. Ils présentent un intérêt relatif, leur activité étant plus limitée que celle des Qol contre ce pathogène.

IDM

La sensibilité de *P. tritici-repentis* a fait l'objet d'un monitoring depuis 2016 sans variation notable.

Recommandations

Rappel : la lutte agronomique est à privilégier. La solution la plus efficace et la plus économique pour limiter le développement de l'helminthosporiose reste de cultiver une variété résistante. En cas de précédent blé, l'enfouissement des résidus pailleux réduit l'inoculum disponible et l'importance des infections primaires. Il permet d'éviter de recourir à un traitement spécifique.

Utiliser les Qol en association avec un triazole efficace sur helminthosporiose du blé (notamment prothioconazole, tébuconazole) dans les situations agronomiques favorables et là où la maladie est formellement identifiée.

HELMINTHOSPORIOSE DE L'ORGE (*Helminthosporium teres*)

QoI

La résistance aux **QoI** est déterminée par une mutation affectant le gène codant pour cytochrome *b* (F129L). Cette substitution induit des niveaux de résistance faibles à modérés selon la substance active. En France, la résistance d'*Helminthosporium teres* aux QoI est bien implantée avec des fréquences très variables selon les parcelles étudiées (de 0 % à 100 %). Tous échantillons confondus, la fréquence moyenne était relativement stable ces dernières années de l'ordre de 30 %, mais semble avoir brutalement augmenté en 2020 (jusqu'à 70 %).

En situation de résistance, l'efficacité au champ de tous les QoI est affectée. L'azoxystrobine reste la molécule la plus affectée par la résistance, alors que la pyraclostrobine est la molécule la moins impactée. La trifloxystrobine et la fluoxystrobine présentent toutes les deux des efficacités intermédiaires en situation de résistance.

Inversement lorsque la fréquence de la résistance est faible, l'efficacité des QoI est tout à fait significative et leur intérêt en mélange avec des IDM l'emporte parfois sur celui des SDHI affectés lourdement par la résistance.



IDM

Une dérive de sensibilité des **IDM** a été observée, associée à une perte de l'efficacité des fongicides en contenant. Le prothioconazole, bien qu'affecté depuis 2017, reste le triazole parmi l'ensemble des triazoles (y compris les plus récents) le plus efficace sur cette maladie.

SDHI

La résistance spécifique aux **SDHI** est déterminée par une grande diversité de substitutions affectant les sous unités B, C et D de la succinate déshydrogénase¹¹. Celles ayant les facteurs de résistance les plus forts pour la plupart des SDHI sont C-G79R et C-H134R

La résistance aux SDHI a été détectée dans les populations européennes depuis 2012 et a constamment progressé en France et en Allemagne. Actuellement la fréquence de la résistance, toutes mutations confondues, aurait dépassé 80 % en 2020 (environ 70 % entre 2019). Qualitativement, en France, la fréquence de la mutation B-H277Y, à l'origine sélectionnée par le boscalide, diminuerait au profit de la mutation C-G79R à impact potentiellement plus fort. Cette substitution reste dominante dans les populations françaises et induit des niveaux de résistance différenciés selon les substances actives. La fréquence des souches portant la mutation C-H134R reste faible en France mais est significativement plus fréquente en Allemagne. Les substitutions C-N75S et C-S135R progressent en 2020.

Au champ, l'impact de ces souches résistantes sur l'efficacité des SDHI est certain et fonction de leur fréquence. La perte d'efficacité est désormais clairement perceptible malgré l'utilisation systématique des SDHI en mélange. En présence d'une fréquence élevée de souches résistantes, leur apport en association devient très limité.

Concernant la question des SDHI en traitement de semence, on distingue deux groupes selon leur mode d'utilisation :

- Ceux sans activité revendiquée sur les maladies foliaires, utilisés à faible dose et donc peu susceptibles d'exercer une pression de sélection sur celles-ci (sédaxane 5 à 10 g/q, fluopyrame 1 g/q et fluxapyroxade 5 g/q).
- Ceux ayant une activité revendiquée sur les maladies foliaires. Il convient dans ce cas de les comptabiliser comme une application à part entière dans la gestion du risque de résistance associé aux maladies foliaires (fluxapyroxade 50 g/q).

Anilinopyrimidines

Le cyprodinil est le seul mode d'action homologué présentant depuis 2007 une efficacité stable bien que modeste. Des souches résistantes sont détectées à fréquence modérée dans le Nord et l'Est de la France.

Recommandations

Diversifier les modes d'action en pratiquant l'alternance. Toujours associer les SDHI avec des fongicides efficaces présentant d'autres modes d'action (en particulier prothioconazole ou cyprodinil).

Limiter l'utilisation des SDHI, mais aussi des QoI, des IDM et du cyprodinil, à une seule application par saison toutes maladies confondues.

Par ailleurs, l'intérêt des QoI, confirmé dans le cas de mélanges triples IDM + SDHI + QoI, l'est également pour des mélanges doubles IDM + QoI qui surpassent parfois les associations IDM + SDHI. Le recours systématique à des mélanges triples a probablement accéléré la sélection des souches portant la résistance multiple aux QoI et SDHI, déjà identifiées à fréquence non négligeable en France dès 2018 (presque 40 %) et dans de nombreuses régions européennes. Nous recommandons d'éviter le recours à ces mélanges trois voies et de les réserver uniquement aux variétés sensibles à l'helminthosporiose¹² et en cas d'attaque sévère.

Enfin, l'association de deux SDHI, même appartenant à deux groupes chimiques différents, n'est comptabilisée que comme une seule application de SDHI. Ce type de mélange vise principalement à accroître l'efficacité et n'améliore pas en pratique la gestion de la résistance, étant donné les géotypes présents dans les populations.

¹¹ Mutations détectées en Europe chez les gènes codants pour les sous-unités de la succinate deshydrogénase d'H. teres : SdhB : D31N, S66P, N235I, H277Y/R/L ; SdhC : K49E, R64K, N75S, **G79R**, **H134R**, S135R ; SdhD : D124N/E, H134R, G138V, D145G, E178K, R604K. Les mutations ayant le plus d'impact sur l'efficacité sont listées en gras.

¹² La variété Etincel, première variété cultivée, jusqu'en 2016 peu sensible à l'helminthosporiose, a vu sa sensibilité considérablement évoluer depuis 2016 et elle est désormais considérée comme sensible.

RAMULARIOSE DE L'ORGE

(*Ramularia collo-cygni*)

Observée pour la première fois en France en 2002, la ramulariose s'est rapidement étendue dans toutes les zones de culture des orges et escourgeons. Elle n'est pas présente partout chaque année avec la même intensité, et son développement reste le plus souvent tardif. Il n'existe pas de résistance variétale connue pour lutter contre cette maladie.



QoI

Cette résistance est déterminée par la substitution G143A affectant le cytochrome *b* et est caractérisée par de forts niveaux de résistance.

Les analyses réalisées depuis 2008 révèlent des fréquences élevées de souches de *Ramularia collo-cygni* résistantes aux **QoI** en France et dans la plupart des pays européens. L'efficacité de cette classe de fongicides est en pratique, fortement affectée.

SDHI

En 2015, des isolats portant une résistance très élevée aux **SDHI** et associés aux substitutions C-H146R (majoritaire) et C-H153R (minoritaire) de la succinate déshydrogénase (SDH) ont été détectés en Allemagne à une fréquence parfois élevée. Une troisième substitution C-N83S, associée à un plus faible facteur de résistance a également été détectée ailleurs en Europe en 2016. Actuellement 16 mutations au total ont été identifiées (dont 2 mutations et une délétion sans effet) sur les gènes codant pour les sous-unités B et C¹³ de la SDH.

Les données des plans de surveillance indiquent que la substitution la plus fréquente C-H146R est présente en France depuis 2016. La présence de souches résistantes aux SDHI a depuis été confirmée en France avec une fréquence moyenne d'individus faiblement à moyennement résistants d'environ 20 % pour les 2 allèles majoritaires.

Dans les situations où la résistance est très fréquente, les efficacités des SDHI sont très affectées et les meilleurs résultats étaient jusqu'en 2020 obtenus uniquement avec les mélanges contenant du chlorothalonil. Parmi les solutions restantes, les solutions triples à base de SDHI+QoI+IDM sont encore très largement utilisées. L'intérêt des QoI sur cette cible apparaît incertain dans un contexte où la résistance pourrait être généralisée. Les moins mauvaises solutions à base d'IDM contiennent du prothioconazole ou du méfentrifluconazole.

IDM

Des isolats fortement résistants aux triazoles ont été identifiés dès 2015 à l'issue d'un monitoring conduit en Allemagne exclusivement. Les souches les plus résistantes au prothioconazole présentent des CI50 très élevées, associées à une combinaison de mutations affectant *cyp51* (I381T + I384L +Y459C ou Y460H). Ces mutations sont corrélées à des baisses d'efficacité en conditions contrôlées. D'autres mutations (affectant les codons 136, 459, 460 ou 461) sont également détectées mais ont un impact faible.

La résistance aux IDM, détectée en France dès 2016, est confirmée en 2020 à des fréquences faibles à très élevées selon les échantillons, et en moyenne modérées à élevées. Dans des essais du Sud de l'Allemagne, de faibles efficacités ont été rapportées pour des modalités associant SDHI+IDM depuis 2015. En France, depuis 2016, de faibles efficacités de ces mélanges ont été également signalées ponctuellement, sans que l'on puisse formellement les associer à la résistance. S'agissant du méfentrifluconazole, il dispose d'une activité modérée. Les tests *in vitro* indiquent une résistance croisée entre le méfentrifluconazole et le prothioconazole.

Recommandations

La ramulariose, difficile à distinguer du reste du complexe, est prise en compte avec le risque de grillures. Les substances actives unisites les plus efficaces sur le complexe grillures/ramulariose sont le prothioconazole ou le méfentrifluconazole et les SDHI, en l'absence de résistance.

¹³ Une baisse significative de sensibilité est principalement associée aux mutations sur la sous unité C, SdhC : G91R, H146R/L, G171D, H153R et G171D. Les mutations B-N224T, B-R264P, B-H266R/Y/L, B-T267I, B-I268V, C-N83S, C-N87S, C-R152M sont liées à un facteur de résistance plus faible. Rehfus, A., et al. (2019). "Mutations in target genes of succinate dehydrogenase inhibitors and demethylation inhibitors in *Ramularia collo-cygni* in Europe". *Journal of Plant Diseases and Protection* **126**(5): 447-459.

RHYNCHOSPORIOSE DE L'ORGE (*Rhynchosporium commune*)

QoI

Deux isolats résistants fortement aux QoI et présentant la substitution G143A (cytochrome *b*) ont été décelés une première fois en France en 2008, puis à nouveau en 2012 à 200 km de distance. Cette substitution n'a pas été retrouvée lors des plans de surveillance menés en 2013 et 2014 en France. En 2014 au Royaume Uni, et en 2015 en Espagne, quelques rares isolats présentant cette mutation ont été isolés.

SDHI

Vis-à-vis des SDHI, les plans de surveillance conduits en 2013 et actualisés en 2018, n'ont pas permis de détecter de souches résistantes.

IDM

Pas d'informations récentes en France mais une résistance aux IDM a été identifiée.



Recommandations

En absence d'informations récentes, les recommandations restent identiques à celles des années précédentes : associer les triazoles à un autre mode d'action efficace.

ROUILLES DES CÉREALES

(*Puccinia recondita*, *P. striiformis*, *P. hordei*)

Rappel : la lutte contre les rouilles doit être envisagée en priorité via l'utilisation de variétés résistantes. Le recours à des variétés résistantes à la fois à la rouille jaune et à la septoriose, permet de supprimer le premier traitement des blés et de limiter la pression de sélection sur l'ensemble des maladies.

Dans l'état actuel des connaissances, ni la rouille brune, ni la rouille jaune, ni la rouille naine ne sont concernées par des phénomènes de résistance en pratique vis-à-vis des QoI ou des triazoles. Quelques isolats de rouille brune portant des mutations liées à de faibles niveaux de résistance (substitution Y134F de CYP51 ou à la surexpression de ce gène) sont très ponctuellement détectés dans les populations européennes¹⁴.



Recommandations

Tenir compte des potentialités intrinsèques sur rouilles des substances actives entrant dans les programmes. Actuellement, les associations de triazoles et de QoI continuent de procurer les meilleures solutions contre ces agents pathogènes. Les SDHI, à l'exception du benzovindiflupyr, sont d'un intérêt secondaire pour lutter contre les rouilles. Éviter d'y recourir lorsque leur contribution n'est pas décisive.

En absence d'informations récentes, les recommandations restent identiques à celles des années précédentes : associer les triazoles à un autre mode d'action efficace.

¹⁴ Stammler, G., et al. (2009). "Role of the Y134F mutation in *cyp51* and overexpression of *cyp51* in the sensitivity response of *Puccinia triticina* to epoxiconazole". *Crop Protection* 28(10): 891-897. Doi:10.1016/j.cropro.2009.05.007

FUSARIOSES DES CEREALES

(*Microdochium majus*, *M. nivale*, *Fusarium graminearum*, *F. culmorum*,
F. avenaceum, *F. tricinctum*, *F. poae* et *F. langsethiae*)

Rappel : la lutte contre les fusarioses doit être envisagée en priorité *via* l'utilisation de variétés résistantes, aujourd'hui bien caractérisées vis-à-vis de *F. graminearum*. Le recours au labour ou à des techniques culturales qui favorisent la décomposition des résidus, en particulier de maïs, s'avèrent plus efficaces qu'un traitement fongicide. Des outils d'évaluation des risques agronomiques et climatiques doivent faciliter la prise de décision. Les années 2007, 2008, 2012, 2013 puis 2016 ont été marquées par des attaques de *Microdochium spp.* (agent d'une fusariose des épis) parfois extrêmement sévères en terme de rendement.



QoI

La plupart des **QoI** ont naturellement peu ou pas d'efficacité contre *Fusarium spp.*

Chez *Microdochium spp.*, la résistance aux QoI est généralement déterminée par la substitution G143A portée par le cytochrome *b*, mais d'autres mécanismes plus rares pourraient être impliqués. Les niveaux de résistance sont forts pour toutes les molécules.

Depuis 2007, la résistance de *Microdochium spp.* aux QoI est très largement implantée sur le territoire, en particulier pour *M. majus* (analyses de 2008, actualisées en 2018).

Cette résistance entraîne des baisses d'efficacité en pratique des QoI.

Benzimidazoles

La résistance au thiophanate-méthyl (benzimidazoles) est déterminée par la substitution E198A affectant la β -tubuline et est associée à de forts niveaux de résistance.

Cette résistance, sélectionnée chez *Microdochium spp.* dans les années 70, était toujours détectée dans le dernier suivi réalisé entre 2008 et 2012. Les souches concernées cumulent fréquemment, mais pas systématiquement, les résistances au thiophanate-méthyl et aux QoI (résistance multiple). Ces résistances sont implantées chez *M. majus* et *M. nivale*.

Au champ, le thiophanate-méthyl semble plus efficace que par le passé sur les souches de *Microdochium spp.*, en particulier sur *M. nivale*.

Les isolats de *Fusarium culmorum*, *F. graminearum* et *F. langsethiae* restent pratiquement tous sensibles au thiophanate-méthyl.

IDM

La sensibilité de *Fusarium spp.* et de *Microdochium spp.* aux **IDM** est encore mal appréciée. Des analyses conduites en 2019 puis en 2020 sur un nombre limité d'échantillons révèlent l'existence de souches de *F. graminearum* moins sensibles au tébuconazole. Par ailleurs, les analyses de résistance au prothioconazole des souches de *F. graminearum* et *Microdochium spp.* collectées en 2020, montrent une forte variabilité entre souches et suggèrent une dérive de sensibilité par rapport aux souches de référence. Ces résultats préliminaires doivent être validés, mais sont cohérents avec la forte dégradation de l'efficacité au champ des triazoles observée depuis 10 ans.

Recommandations

Fusarium graminearum : Bien que l'efficacité des principales molécules ciblant la fusariose (en particulier tébuconazole, et prothioconazole) soit beaucoup plus variable qu'auparavant, leur utilisation reste possible. Le metconazole ou le bromuconazole possèdent également une activité.

Microdochium spp. : parmi les IDM, seul le prothioconazole présente une efficacité en pratique sur ces espèces. Le prochloraze possède des potentialités intéressantes. Les QoI ne présentent plus d'intérêt sur *M. majus* et *M. nivale* depuis la généralisation de la résistance.

CHARBON NU de l'ORGE (*Ustilago nuda*)

SDHI

Quatre phénotypes d'*Ustilago nuda* résistants spécifiquement aux **SDHI** ont été identifiés (CarR1 à CarR4). Ils se distinguent entre eux par leur niveau de résistance aux différents fongicides SDHI, ainsi que par leur spectre de résistance croisée. Les niveaux de résistance sont en général faibles à moyens pour la plupart des SDHI. Ces quatre phénotypes sont associés à quatre mutations uniques affectant les sous-unités B, C ou D de la succinate deshydrogénase (SDH), cible des SDHI.

La résistance d'*U. nuda* à la carboxine (SDHI) a été identifiée au champ à la fin des années 80¹⁵. Depuis d'autres SDHI (sedaxane, fluopyram) sur le charbon ont été développés sur cette cible. En 2016, une collecte de 302 épis charbonnés, a été analysée, majoritairement en provenance de parcelles agricoles, sur 20 sites correspondant à 13 départements.

43 % des épis étaient résistants aux SDHI et le phénotype CarR2 était majoritairement représenté, y compris dans les parcelles sans traitement de semence SDHI. Quelques échantillons analysés en 2018 confirment cette observation. A noter que les phénotypes CarR1 et CarR2 ont été caractérisés à la fin des années 80, suite à leur sélection par l'utilisation de la carboxine. La résistance aux SDHI (en particulier les phénotypes CarR3 et CarR4) était significativement plus fréquente dans les parcelles ayant reçu un traitement de semences SDHI. Cette sélection a également été observée dans des essais.



Autres molécules

Il n'a pas été observé de variabilité de la sensibilité d'*U. nuda* aux autres modes d'action (fludioxonil, triazoles).

Recommandations

Il est difficile à ce stade de conclure quant aux conséquences pratiques du développement de cette résistance. La présence du charbon nu de l'orge est souvent faible dans les parcelles du fait de l'association de plusieurs modes d'action dans les traitements de semences. Par prudence nous recommandons de sélectionner des traitements de semences hautement efficaces en filière de production de semences, de manière à éradiquer totalement la maladie et éviter la diffusion de ces résistances en parcelles de production.

¹⁵ Leroux, P. (1986). "Characteristics of strains of *Ustilago nuda*, causal agent of barley loose smut, resistant to carboxin". *Agronomie* 6(2): 225-226.

Leroux, P. and G. Berthier (1988). "Resistance to carboxin and fenfuram in *Ustilago nuda* (Jens.) Rostr., the causal agent of barley loose smut". *Crop Protection* 7(1): 16-19. Doi.org/10.1016/0261-2194(88)90031-2.

Annexe : Classification abrégée des fongicides céréales

MODE D'ACTION	CIBLE	NOM DU GROUPE	FAMILLE CHIMIQUE	Substances actives sans AMM ou non commercialisées	Substances actives utilisables sur céréales en 2021	
Mitose et division cellulaire	β -tubuline	BMC (Méthyl Benzimidazoles Carbamates)	benzimidazoles	<i>thiophanate-éthyl</i>	thiophanate-méthyl	
	Inconnue, impliquée dans la disruption de l'actine	Phénylcétones	benzophénones		métrafénone	
			benzopyridines	<i>pyriofénone</i>		
	Complexe mitochondrial II : succinate-déshydrogénase	SDHI (Succinate Dehydrogenase Inhibitors)	pyridinyl-ethyl-benzamides			fluopyrame*
			oxathiine-carboxamides	<i>carboxine</i>		
				<i>oxycarboxine</i>		
			thiazole-carboxamides	<i>thifluzamide</i>		
			pyrazole-carboxamides	<i>furametpyr isopyrazam</i>	bixafène	
				<i>penthiopyrade</i>	fluxapyroxade*	
	pyridine-carboxamides	<i>boscalide</i>	sédaxane*			
	Complexe mitochondrial III : cytochrome b, site Qo, fixation proche de l'hème bl	QoI-P (Quinone Outside Inhibitors)	méthoxy-acrylates		azoxystrobine	
			méthoxy-carbamates		pyraclostrobine	
			oximino-acetates	<i>krésoxime-méthyle</i>		
				<i>picoxystrobine</i>	trifloxystrobine	
oximino-acetamides	<i>dimoxystrobine</i>	fluoxastrobine*				
Production ou libération de l'ATP. Cible inconnue		thiophène-carboxamides		silthiofame *		
Complexe III cytochrome bc1 (ubiquinone réductase)	Qil (Quinone inside Inhibitors)	picolinamides		fenpicoxamide		
Signalisation cellulaire	Inconnue. Régulant des processus mitochondriaux impliquant notamment une kinase	AP (Anilinopyrimidines)	anilinopyrimidines		cyprodinil*	
	Inconnue, impliquée dans l'osmorégulation	Phénylpyrroles	phénylpyrroles		fludioxonil*	
	Inconnue, régulant une voie de signalisation impliquant notamment une protéine kinase C et une cutinase	Azanaphthalènes	quinolines	<i>quinoxifène</i>		
quinazolinones				proquinazide		

➤ Résistances aux fongicides Céréales à paille

MODE D'ACTION	CIBLE	NOM DU GROUPE	FAMILLE CHIMIQUE	Substances actives sans AMM ou non commercialisées	Substances actives utilisables sur céréales en 2021
Métabolisme des lipides stéroliques	C14-déméthylation des stérols	IDM (Demethylation Inhibitors)	imidazoles		prochloraze* imazalil*
			triazoles	<i>fluquinconazole</i> <i>époiconazole</i>	bromuconazole cyproconazole difénoconazole*
				<i>flutriafol</i>	ipconazole* méfentrifluconazole metconazole
				<i>myclobutanil</i>	tébuconazole*
				<i>propiconazole</i>	tétraconazole*
					triticonazole*
	triazolinethiones		prothioconazole*		
	Δ ¹⁴ réductase et Δ ⁸ -Δ ⁷ isomérase des stérols	Amines	morpholines	<i>fenpropimorphe</i>	
			pipéridines		fenpropidine
			spirokétalamines		spiroxamine
Mode d'action inconnu	Inconnue	Phénylacétamides	phénylacétamides		cyflufénamide
Stimulateurs des défenses des plantes	Inconnue	Polysaccharides naturels	glucanes d'algues		laminarine
Multisites	Plusieurs cibles	Dithiocarbamates	dithiocarbamates	<i>thirame</i>	mancozèbe*
		Chloronitriles	chloronitriles	<i>chlorothalonil</i>	
		Phthalimides	phthalimides		folpel
		Substances minérales	substances minérales		soufre hydrogénocarbonate de potassium sulfate de cuivre tribasique*
Biopesticides microbiens	Inconnue	Préparations bactériennes	Pseudomonas		<i>Pseudomonas chlororaphis</i> MA342* <i>Pseudomonas sp.</i> DSMZ 13134*
		Préparations fongiques	Oomycètes		<i>Pythium oligandrum</i> souche M1

Légende :

Substances actives ou **microorganismes** contenus dans des fongicides commercialisés en traitement foliaire sur céréales,

Substances actives non autorisées sur céréales ou non commercialisées,

*Substances actives** ou *microorganismes** que l'on retrouve uniquement en traitement des semences ou traitement de sol,

Substances actives* que l'on retrouve en foliaire et en traitement des semences.