

Végéphy – 12^e CONFÉRENCE INTERNATIONALE SUR LES MALADIES DES PLANTES
TOURS – 11 ET 12 DÉCEMBRE 2018

RECHERCHE RETROSPECTIVE DE VARIETES DE BLE TENDRE DU BASSIN PARISIEN
CARACTERISEES PAR DES RESISTANCES DURABLES A LA ROUILLE JAUNE

R. PERRONNE^(1,2,*), E. GIRARD^(1,*), C. DE VALLAVIEILLE-POPE⁽³⁾, M. LECONTE⁽³⁾, P. DU CHEYRON⁽⁴⁾ et
J. ENJALBERT⁽¹⁾

⁽¹⁾GQE – Le Moulon, INRA, Univ. Paris-Sud, CNRS, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 91190,
Gif-sur-Yvette, France

⁽²⁾UCA, INRA, VetAgro Sup, UMR Ecosystème Prairial, 63000 Clermont-Ferrand, France

⁽³⁾UMR BIOGER, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 78850 Thiverval-Grignon, France

⁽⁴⁾Arvalis-Institut du Végétal, route de Châteaufort, ZA des gravières, 91190 Villiers-le-Bâcle, France

*Les deux auteurs ont également contribué à la rédaction de cet article

remi.perronne@inra.fr
jerome.enjalbert@inra.fr

RÉSUMÉ

La longévité commerciale de certaines variétés de blé tendre pourrait partiellement s'expliquer par la présence de résistances durables à la rouille jaune, une maladie importante en France. Pour tester cette hypothèse et identifier des résistances durables, nous nous sommes focalisés sur les épidémies des dernières décennies dans le Bassin Parisien, dans deux zones homogènes en termes de pression pathogène et de composition variétale. Des informations décrivant le cycle de vie commercial des variétés, les postulations de gènes *Yr* et le niveau de résistance au champ ont été croisées aux gènes de virulences des pathotypes présents. Des analyses statistiques ont permis d'identifier plusieurs variétés déjà connues pour présenter des résistances durables, ainsi que d'autres dont la généalogie suggère des sources de résistance durable.

Mots-clés: *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* (*Pst*), *Triticum aestivum*, analyse multivariée, gène de résistance, gène de virulence.

ABSTRACT

RETROSPECTIVE RESEARCH OF BREAD WHEAT VARIETIES SOWN IN THE PARIS BASIN AREA CHARACTERIZED BY DURABLE RESISTANCE TO YELLOW RUST

Yellow rust pressure might partly explain the commercial longevity of some bread wheat varieties with long-term durable resistance. To test this hypothesis and identify durable resistances, we focused on the epidemics over the last decades in the Paris Basin, in two homogeneous geographical areas in terms of pathogen pressure and varietal composition. Information describing the commercial life cycle of the varieties, the *Yr* race-specific gene postulations and field adult-plant resistance level were considered in relation to the virulence genes of the pathotypes of *Pst*. Multivariate statistical analyses have highlighted several varieties already known to possess sources of durable resistance, as well as others characterized by pedigrees suggesting some sources of durable resistance.

Keywords: *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*, *Triticum aestivum*, multivariate analysis, race-specific resistance gene, virulence gene.

INTRODUCTION

La rouille jaune causée par *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* (*Pst*), un champignon biotrophe obligatoire, est considérée comme l'une des principales maladies du blé tendre au niveau mondial (Wellings, 2011 ; Dean et al, 2012). Le développement épidémique de cette maladie sur une céréale est le résultat d'une succession de cycles infectieux, la vitesse de progression dépendant des conditions environnementales. La rouille jaune présente une dispersion aérienne à longue distance (Hovmøller et al, 2002).

Plusieurs méthodes de lutte sont employées contre la rouille jaune. En Europe, différents fongicides sont appliqués afin de contrer le développement épidémique sur la plante, mais d'autres leviers de contrôle, tels que le choix de variétés résistantes et l'usage de mélanges variétaux, sont également employés (Rosewarne et al, 2013 ; Sapoukhina et al, 2013).

La résistance d'une variété à la rouille jaune peut être basée sur la présence de gènes causant soit une résistance qualitative spécifique, soit une résistance partielle. La résistance spécifique, généralement liée à un gène exprimé à tous les stades de la plante, est évaluée au stade plantule. Elle empêche le développement de la maladie du fait d'une réaction d'incomptabilité entre le gène de résistance de la plante (noté *Yr*) et le gène d'avirulence du pathotype de *Pst* (noté *Avr* ; Flor, 1956). Les gènes *Yr* confèrent une résistance de courte durée, la résistance induisant une forte pression de sélection au sein des populations de *Pst*, favorisant ainsi son contournement (Bayles et al, 2000 ; de Vallavieille-Pope et al, 2012). Au contraire, la résistance partielle, généralement basée sur l'expression de plusieurs gènes à effets quantitatifs (QTLs), restreint fortement le développement de la maladie, mais ne l'empêche pas totalement (Singh et al, 2011). Ces gènes à effets quantitatifs confèrent une résistance de plus longue durée, peu influencée par les phénomènes de contournement des gènes *Yr*, les modes d'actions impliqués dans la résistance à *Pst* étant différents.

En Europe du Nord et du Nord-Ouest, depuis les années 1950, la rouille jaune se caractérisait par une récurrence d'épidémies liées aux contournements successifs de gènes de résistance *Yr* par différents pathotypes (de Vallavieille-Pope et al, 2012). Cependant, depuis moins d'une décennie, l'apparition de nouveaux pathotypes provenant de la région Himalayenne a conduit à un remplacement presque total des pathotypes de *Pst* (Hovmøller et al, 2016), associé au contournement de nombreuses résistances spécifiques présentes dans les variétés européennes. Dans ce contexte, inclure de multiples sources de résistance partielle dans les programmes d'amélioration variétale pourrait permettre d'accroître la durabilité du contrôle de *Pst* pour les futures décennies. Bien que de nombreux QTLs conférant des résistances partielles soient déjà identifiés (Rosewarne et al, 2013), le choix de cette orientation économiquement et environnementalement pertinente nécessite cependant d'identifier des variétés cumulant dès à présent ces multiples sources de résistances pour faciliter leur accumulation lors de futurs croisements. Selon la définition proposée par Johnson (1984), ces variétés peuvent être considérées comme présentant une résistance durable, c.à.d. une résistance efficace depuis au moins dix ans dans un contexte épidémique marqué. Ces variétés à résistance durable cumulent souvent des gènes *Yr* et des gènes à effets quantitatifs. En France, plusieurs variétés ayant connu un succès commercial durant ces dernières décennies présentaient une résistance durable à la rouille jaune, telles qu'Apache (Paillard et al, 2012) ou Camp Rémy (Mallard et al, 2005), ainsi que Renan en agriculture biologique (Dedryver et al, 2009).

La procédure d'identification des différents gènes conférant une résistance durable à une variété donnée nécessite un investissement conséquent (croisements, cartographie génétique, ...), rendant toute étude sur un large panel inenvisageable. Dans le cadre d'une précédente étude se focalisant sur une période épidémique, en nous basant sur un ensemble d'informations, nous avons pu mettre en évidence plusieurs variétés déjà connues comme présentant des résistances durables, mais également une variété encore non étudiée, la variété Scipion (Perronne et al, 2017).

Dans la suite de cette étude, en nous appuyant sur une procédure similaire, notre objectif sera d'identifier les variétés de blé tendre à succès du Bassin Parisien connues ou susceptibles de présenter des sources de résistance durables à la rouille jaune.

MATERIEL ET MÉTHODES

La procédure présentée succinctement ci-dessous a été détaillée dans une précédente étude à laquelle il est possible de se référer pour davantage d'informations (Perronne et al, 2017).

ORIGINE DES DONNEES

Cette étude s'est focalisée sur le territoire français métropolitain au cours de la période 1985-2015, rendant compte des principales épidémies de rouille jaune des trois dernières décennies.

Les surfaces des variétés de blé tendre assolées se basent sur les enquêtes réalisées annuellement par FranceAgriMer auprès d'un panel de 500 agriculteurs par département. Du fait de différences au cours des enquêtes, les données obtenues en 1984 et 1997 n'ont pas été retenues. De plus, les variétés étant cultivées sur une proportion inférieure à 0,5 % de la surface totale cultivée en blé tendre dans un département n'ont pas été retenues, cette valeur correspondant au niveau de précision de l'enquête.

Le niveau de résistance au champ des variétés a été quantifié sur la base d'observations réalisées annuellement par le GEVES au cours de la période d'homologation de la variété, puis par Arvalis-Institut du végétal au cours des années de post-homologation. Ce niveau de résistance au champ suit une échelle de notation variant de très sensible (1) à très résistant (9). La résistance d'une variété peut être modifiée annuellement par Arvalis-Institut du végétal suite à une sensibilité accrue observée notamment du fait d'un contournement d'un gène de résistance *Yr*. Cette notation, réalisée à un stade de développement avancé de la plante, permet d'inclure l'influence des résistances partielles et de certaines résistances spécifiques s'exprimant au stade adulte, complétant l'information portant sur les seuls gènes *Yr*.

La postulation de gènes de résistance *Yr* au stade plantule repose sur l'étude de la réponse des variétés à une gamme de pathotypes de *Pst* caractérisés par différentes combinaisons de gènes de virulence (de Vallavieille-Pope et al, 1990). Par ailleurs, l'évolution des pathotypes de *Pst* et la caractérisation des gènes de virulence de ces pathotypes se base sur l'analyse des isolats reçus par l'équipe de Claude de Vallavieille-Pope (UMR Bioger, INRA Grignon) au cours de la période 1985-2015, représentant environ 1800 isolats analysés portant sur environ 250 variétés de blé tendre. La détermination des virulences des pathotypes a été réalisée par inoculation d'une gamme différentielle de variétés généralement caractérisées par un unique gène *Yr*, et a permis l'identification de 19 virulences distinctes. Dans la suite de cette étude, les différents pathotypes présentant la virulence spécifique ayant permis le contournement d'un gène de résistance *Yr* à l'origine d'une épidémie ont été regroupés, certains pathotypes de *Pst* pouvant varier sur d'autres gènes non impliqués dans le contournement (voir de Vallavieille-Pope et al, 2012). L'année de pic épidémique a été définie comme l'année durant laquelle le nombre d'envois d'isolats pour une virulence particulière était le plus élevé. Au cours de la période 1985-2015, cinq pics associés à différents contournements ont été identifiés en 1989 (Vr6-Vr9), 1999 (Vr17), 2007 (Vr32), 2012 (Warrior1) et 2014 (Warrior-).

DEFINITION DE REGIONS AGRICOLES HOMOGENES

La définition d'une zone de production de blé tendre homogène constitue une première étape indispensable à l'étude de la réponse du cycle de vie commercial d'une variété à la pression de rouille jaune. Un niveau de pression pathogène élevé doit être confirmé dans l'ensemble des départements retenus, l'année du pic épidémique doit être la même, et les fréquences des virulences comparables, suggérant un même contexte épidémique. Par ailleurs, la composition variétale au pic épidémique doit être comparable dans l'ensemble des départements retenus au sein d'une zone de production homogène. La comparaison des compositions variétales entre départements de la moitié nord de la France s'est basée sur une analyse statistique combinant une analyse en composantes principales (ACP) et une méthode de groupement (clustering des K-means ; voir Perronne et al, 2017 pour plus de détails).

Dans cette étude, afin d'éviter des regroupements trop imprécis pouvant inclure des départements peu affectés par la rouille jaune, nous avons limité le nombre de départements par région agricole homogène. Nous avons défini deux zones distinctes dans le Bassin Parisien (BP): (1) la zone sud BP incluant la Seine-et-Marne, les Yvelines et l'Eure-et-Loir, et (2) la zone nord BP incluant l'Oise, la Somme, la Seine-Maritime, le Nord et le Pas-de-Calais. Dans chaque zone, les surfaces assolées de chaque variété dans les différents départements constitutifs de la zone ont été cumulées.

DESCRIPTION DU CYCLE DE VIE COMMERCIAL D'UNE VARIETE

La description du cycle de vie commercial d'une variété nécessite la caractérisation des proportions de surfaces assolées chaque année. Les années 1984 et 1997 n'ayant pas été retenues, nous avons réalisé une réestimation des données manquantes basée sur la procédure LOWESS (Cleveland, 1979) suivant les choix méthodologiques retenus dans une précédente étude (Perronne et

al, 2017). Une inspection visuelle a été conduite et les variétés pour lesquelles l'année manquante pouvait correspondre à celle d'adoption maximale de la variété ont été exclues de l'analyse afin d'éviter toute sur-interprétation.

Un ensemble d'indicateurs a été proposé pour caractériser le cycle de vie commercial d'une variété, notamment dans le but de distinguer les variétés affectées par un retrait rapide du marché des variétés pouvant présenter une résistance durable (Perronne et al, 2017). Les indicateurs fortement corrélés (c.à.d. $> |0,7|$) ont été exclus sur la base d'un test de corrélation de rang de Kendall. Quatre indicateurs ont été retenus: CPgp, DaucP95, Dgp et Pmao. CPgp correspond à la proportion de la surface assolée par la variété lors de la phase de croissance, c.à.d. la phase d'adoption croissante de cette variété dans la zone. DaucP95 correspond au nombre minimal d'années nécessaires pour atteindre 95% de la surface totale assolée par cette variété, et a été considéré comme un substitut de la durée totale du cycle de vie commercial d'une variété, la durée totale pouvant être sujette à des biais liés au caractère non exhaustif des enquêtes menées par FranceAgriMer. Dgp correspond à la durée de la phase de croissance. Pmao correspond à la proportion de la surface assolée lors de l'année d'adoption maximale de la variété.

Une ACP standardisée a été réalisée sur les indicateurs retenus par zone afin de distinguer des groupes de variétés présentant des profils distincts. Seules les variétés caractérisées par une surface de plus de 50000 ha au cours de leur cycle de vie commercial ont été conservées. De plus, les variétés étant en fin de phase de déclin avant 1989 ont été retirées, l'influence de l'épidémie de rouille jaune ne pouvant être interprétée dans ce contexte.

CARACTERISATION DU NIVEAU DE RESISTANCE D'UNE VARIETE

L'identification d'un groupe restreint de variétés pouvant présenter une résistance durable sur la base de la seule observation de leur cycle de vie commercial nécessite une validation basée sur la présence de gènes *Yr* connus, ainsi que sur l'évolution du niveau de résistance au champ. Les informations concernant les gènes de résistance spécifique *Yr* ont été confrontées aux informations concernant la présence des pathotypes de *Pst* chaque année afin de connaître l'efficacité ou l'éventuel contournement des gènes *Yr* de chaque variété en tenant compte du contexte épidémique.

RESULTATS

DEFINITION DE REGIONS AGRICOLES HOMOGENES

Concernant le contexte épidémique, les zones nord et sud BP présentaient une même année de pic épidémique pour les cinq épidémies considérées. Cependant, les deux zones différaient partiellement concernant les fréquences des virulences lors de l'épidémie Vr6-Vr9. Concernant les autres épidémies, la virulence dominante était similaire dans les deux zones. Par ailleurs, un niveau de pression de rouille jaune élevé lors des différentes épidémies a été confirmé dans les zones sur la base des bilans de campagne des Avertissements Agricoles.

Concernant la composition variétale des assolements, les deux zones se distinguaient pour chaque année de pic épidémique tandis que les départements retenus dans chaque zone étaient conservés, à l'exception de l'Eure-et-Loir en 2007 (Figure 1). Ces différences de composition variétale suggèrent qu'une variété à succès dans la zone sud BP pourrait ne pas avoir été importante dans la zone nord BP et inversement, le succès commercial d'une variété dépendant de nombreux critères, parmi lesquels le gain de rendement, la qualité et les débouchés visés. A titre d'exemple, la variété Scipion a connu un succès plus important dans la zone sud BP (800000 vs 170000 ha) tandis que la variété Sponsor a connu un succès uniquement dans la zone nord BP (460000 vs 12000 ha). Ces éléments justifient la définition de deux zones distinctes dont les résultats doivent être considérés séparément.

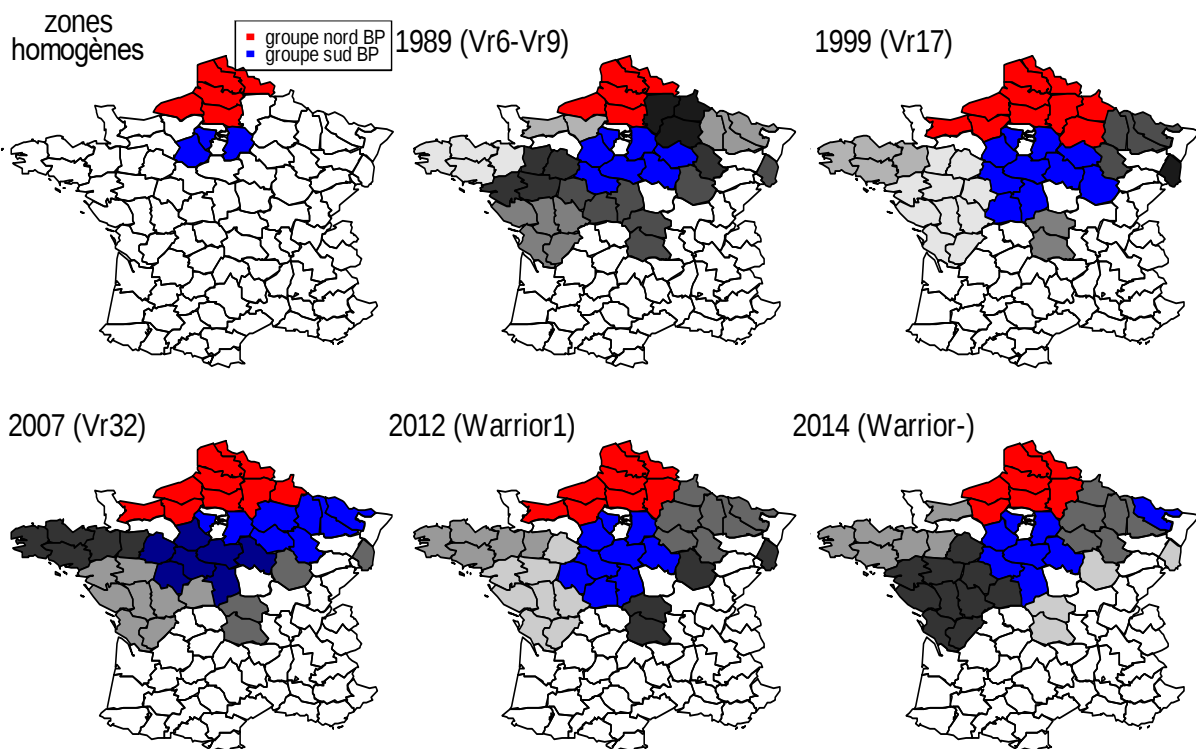


Figure 1: Groupes de départements présentant une composition variétale similaire aux différents pics épidémiques. Les couleurs définissent les zones nord et sud BP, les niveaux de gris distinguent les autres groupes de départements.

Figure 1: Groups of districts characterized by a similar varietal composition at each epidemic peak. The red and blue colors delimit the north and south Paris Basin areas respectively, the gray levels distinguish the other groups of districts.

CARACTERISATION DU CYCLE DE VIE COMMERCIAL ET DU NIVEAU DE RESISTANCE D'UNE VARIETE

Dans la zone nord BP, 47 variétés assolées sur plus de 50000 ha ont été retenues. La variance expliquée par les deux premiers axes de l'ACP représentait 89,9% de la variance totale (Figure 2). Dans la zone sud BP, 29 variétés assolées sur plus de 50000 ha ont été retenues. La variance expliquée par les deux premiers axes de l'ACP représentait 90,0% de la variance totale (Figure 2). Dans chaque zone, un ensemble de variétés présentaient une longue durée de leur cycle de vie commercial ($\text{DaucP95} \geq 10$ ans) et, comparativement, une plus faible proportion de surface assolée lors de l'année d'assolement maximum (Pmao faible). De plus, un ensemble de variétés présentaient une faible proportion de surface assolée durant la phase de croissance (CPgp faible), suggérant une longévité importante après l'année d'assolement maximum de cette variété, liée à un succès commercial. Nous avons considéré que ce type de profil constituait un préalable à la recherche de variétés présentant des résistances durables. Les caractéristiques de ces variétés ont été détaillées ci-dessous (Tableau I).

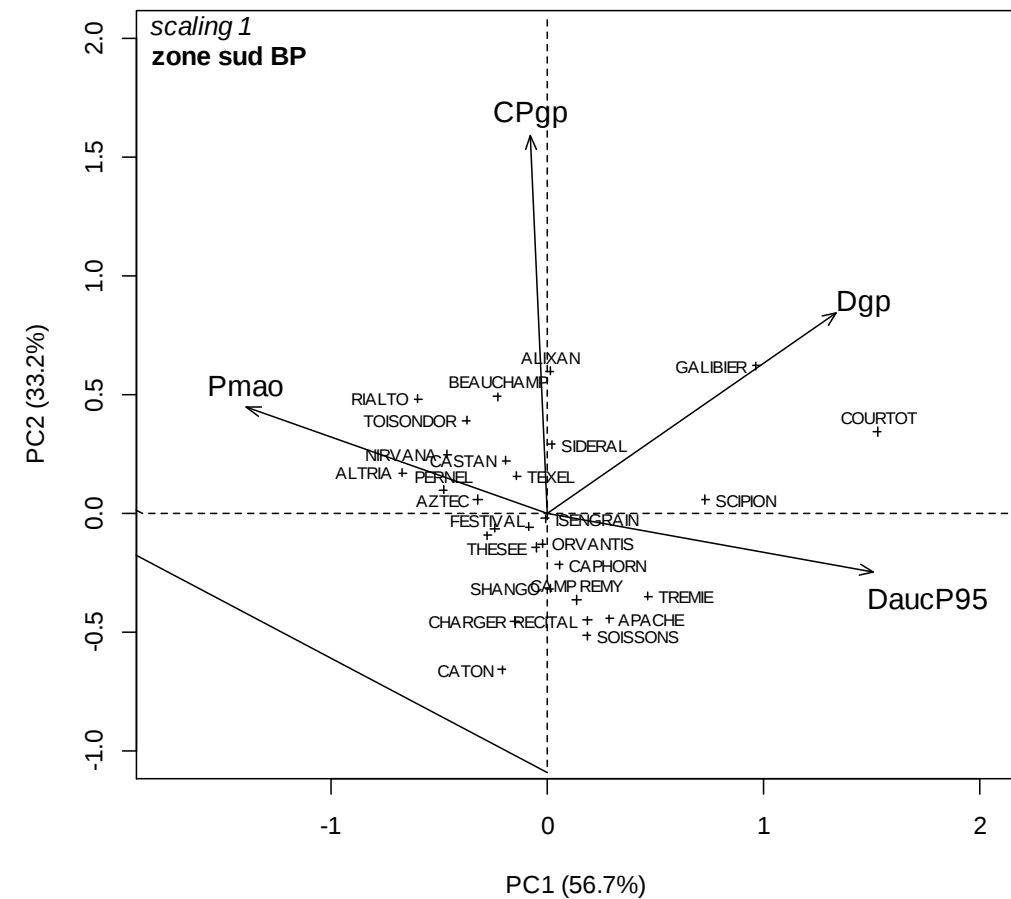
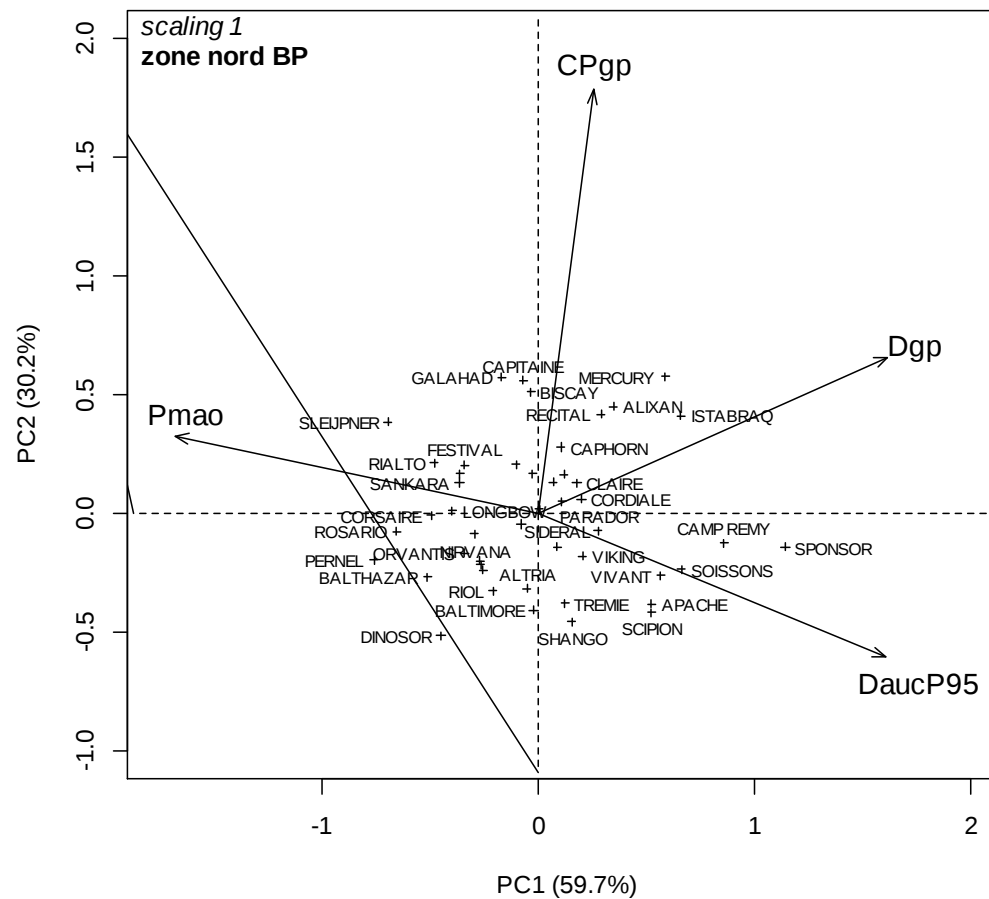


Figure 2: ACP standardisée appliquée, par zone d'étude, sur les indicateurs décrivant le cycle de vie commercial d'une variété. Se référer à la section Matériel et méthodes pour la définition des abréviations des indicateurs.

Figure 2: Standardized Principal Component Analysis based on four indicators of the commercial life cycles of bread wheat varieties applied separately in the north and south Paris Basin areas, respectively. CPgp corresponds to the cumulative percentages of acreage during growth phase. DaucP95 corresponds to the minimum number of years required to reach a total cumulative percentage of acreage occupancy of 95%. Dgp corresponds to the growth phase duration. Pmao corresponds to the percentage of acreage at maximum acreage occupancy. See Perronne et al, (2017) for more details.

Tableau I: Synthèse des informations caractérisant les variétés identifiées comme présentant une résistance durable potentielle sur la base des seuls indicateurs décrivant leur cycle de vie.

Table I: Summary of information characterizing the bread wheat varieties with potential durable resistance based on the sole indicators describing their commercial life cycles.

variété	année d'homologation	année de dernière évaluation	Yr gene	résistance au champ	zone	indicateurs du cycle de vie commercial des variétés				surface totale (ha)
						CPgp	DaucP95	Dgp	Pmao	
APACHE	1998	2016	7 + 17	8 (1998-2015)	nord	43	13	6	15	412000
					sud	32	14	5	15	660000
CAMP REMY	1980	1996	7 + 17	7 (1986-1996)	nord	60	17	7	16	642000
					sud	35	16	4	22	229000
CAPHORN	2001	2010	6 + 17	8 (2001-2010)	sud	43	10	5	17	467000
CLAIRE	1997	2004	/	/	nord	67	10	5	19	272000
COURTOT	1974	2002	2	2 (1986-2002)	sud	59	24	24	9	131000
ISENGRAIN	1997	2009	7	7 (1997-2009)	sud	55	10	5	19	365000
RECITAL	1986	2003	6	3 (1986-1991), 1 (1992-2003)	sud	32	13	4	16	298000
SCIPION	1981	1996	3	8 (1986-1996)	nord	36	12	7	16	173000
					sud	60	17	11	10	800000
SOISSONS	1988	2010	2 + 3	5 (1988-1998), 7 (1999), 6 (2000-2010)	nord	54	15	6	15	1087000
					sud	28	12	4	14	850000
SPONSOR	1995	2007	2 + 4	7 (1995-1998), 6 (2000-2007)	nord	54	16	9	10	463000
TREMIE	1992	2004	25	4 (1992-1994), 5 (1995-2004)	nord	45	11	4	18	701000
					sud	39	16	6	13	347000
VIKING	1986	1993	2	4 (1986-1993)	nord	47	10	6	20	225800
VIVANT	1992	2006	32	8 (1992-2006)	nord	45	12	7	15	486000

Dans la zone nord BP, parmi les variétés identifiées comme pouvant présenter une résistance durable sur la base de leur cycle de vie commercial, trois étaient déjà connues pour présenter une résistance durable, à savoir les variétés Apache, Camp Rémy et Claire (Tableau I). Dans la zone sud BP, Apache et Camp Rémy ont également connu un succès commercial important. L'évolution du niveau de résistance au champ confirme, pour ces variétés, un niveau de résistance élevé (≥ 7) pendant plus de dix ans. Par ailleurs, dans les zones nord et sud BP, plusieurs variétés ont présenté un profil similaire à ces variétés. La variété Vivant, homologuée en 1992, se caractérisait ainsi par un niveau élevé et constant de résistance au champ entre 1992 et 2006, tandis que la variété Scipion, homologuée en 1981 a conservé un niveau élevé de résistance durant plus de dix ans. Les variétés Sponsor, Caphorn et Isengrain, suivies également pendant au moins dix ans en post-homologation par Arvalis-Institut du végétal, présentaient un profil similaire. Cependant, plusieurs variétés ayant connu un succès commercial se caractérisaient par une forte sensibilité à la rouille jaune au champ, telles que les variétés Courtot et Récital (Tableau I).

DISCUSSION

Cette étude portant sur les variétés de blé tendre du Bassin Parisien au cours de la période 1985-2015 a permis d'identifier une liste de variétés dont la résistance durable à la rouille jaune est connue ou présumée. Compte tenu de la définition de résistance durable (Johnson, 1984), ces variétés ont toutes été homologuées entre les années 1980 et 2000 et ont été confrontées à plusieurs épidémies au cours de leur cycle de vie commercial. Le nombre de variétés retenues a été volontairement limité afin d'éviter toute sur-interprétation des résultats.

Les gènes de résistance impliqués dans la résistance durable ont déjà été identifiés pour trois variétés mises en évidence, à savoir pour les variétés Apache (Paillard et al, 2012), Camp Rémy (Mallard et al, 2005 ; Sørensen et al, 2014) et Claire (Powell et al, 2013). De plus, la variété Soissons est considérée comme présentant des sources de résistance durable au stade adulte (de Vallavieille-Pope et al, 1990). Pour quatre autres variétés, la longévité du cycle de vie commercial, le niveau élevé et constant de résistance au champ, ainsi que l'absence de gènes *Yr* efficaces connus au cours de la période d'assolement, suggèrent la présence de sources de résistance durable. Pour la variété Scipion, la variété Cappelle-Desprez, intervenant plusieurs fois lors du plan de croisement, est connue pour présenter une résistance durable (Agenbag et al, 2012). Pour la variété Isengrain, les sources de résistance pourraient provenir principalement de la variété Soissons, et également potentiellement de la variété Cappelle-Desprez. Pour les variétés Caphorn et Sponsor, les sources directes de résistance ne sont pas identifiables, bien que pour la variété Caphorn, la résistance durable puisse provenir des variétés Cappelle-Desprez et Vilmorin-27 (Law et Worland, 1997). La variété Vivant, homologuée en 1992, présentait le gène *Yr32*, contourné uniquement en 2007. La présence de ce gène *Yr* pourrait expliquer le niveau élevé et constant de résistance observé au champ entre 1992 et 2006.

L'utilisation des indicateurs de cycle de vie commercial ne permet pas de différencier les variétés présentant une résistance durable des autres variétés ayant connu un succès commercial pour d'autres caractéristiques reconnues, notamment en panification. Dans ce contexte, malgré une forte sensibilité, l'utilisation de pesticide permet d'expliquer la longévité accrue de ces variétés. Une combinaison des différentes informations de résistance des variétés et de virulence des pathotypes de *Pst* apparaît indispensable pour identifier des variétés pouvant présenter des sources de résistance partielle non spécifiques d'un pathotype et exclure les autres variétés présentant un profil similaire lié à leur succès commercial pour d'autres causes.

Il est à noter que les principales variétés connues pour présenter une résistance durable à la rouille jaune depuis les années 1980 combinaient un ou plusieurs gènes *Yr* et au moins une source de résistance au stade adulte (Mallard et al, 2005 ; Paillard et al, 2012). Pour les variétés listées ci-dessus dont les sources de résistance partielle basée sur l'expression de QTLs n'ont pas encore été caractérisées, un travail de génotypage pourrait être conduit pour valider les hypothèses proposées, en tenant compte des QTLs déjà identifiés dans leur généalogie (Rosewarne et al, 2013).

A l'exception de la variété Apache, aucune autre variété identifiée n'a été suivie par Arvalis-Institut du végétal dans le contexte épidémique récent marqué par les pics épidémiques de 2012 (Warrior1) et 2014 (Warrior-). Cependant, les variétés Apache et Soissons sont confirmées comme n'étant pas contournées par les pathotypes Warrior1 et Warrior-.

Un travail similaire à celui présenté dans cette étude devra être réalisé au cours des prochaines années, permettant avec un recul suffisant d'identifier des variétés ayant présenté des résistances durables durant cette période.

CONCLUSION

Dans le contexte d'un remplacement presque complet des pathotypes de *Pst* en moins d'une décennie (du Cheyron et al, 2016 ; Hovmøller et al, 2016), promouvoir une diversité de sources de résistance variétale pourrait s'avérer opportun afin d'améliorer la durabilité du contrôle de la rouille jaune. En particulier, combiner de multiples sources de résistance partielle et un ou plusieurs gènes *Yr* pourrait limiter l'importance des épisodes épidémiques et le recours accru aux fongicides. Cependant, l'amélioration du niveau de résistance aux maladies apparaît complexe car cette amélioration entre parfois en opposition avec d'autres objectifs, en induisant potentiellement des réductions de

rendement (Summers et Brown, 2013), et elle nécessite une collaboration entre l'ensemble des sélectionneurs de variétés afin de maintenir la durabilité des résistances, via par exemple, l'accumulation de gènes Yr dans l'ensemble des variétés proposées à l'homologation (Lof et al, 2017). La réutilisation des variétés ayant connu un succès commercial au sein d'une zone de production comme géniteurs pour de futurs croisements est une pratique courante en sélection. Toutefois, une analyse plus systématique des résistances variétales pourrait mettre l'accent sur une plus large gamme de génotypes à considérer comme géniteurs, autorisant une amélioration variétale du niveau de résistance à la rouille jaune à moindre coût tout en minimisant le risque de contournement en cas de stratégie de contrôle basée sur les seuls gènes de résistance spécifique Yr.

REMERCIEMENTS

Nous remercions FranceAgriMer pour la mise à disposition des données de surface des variétés de blé tendre et le GEVES pour la mise à disposition des notes de résistance au champ des variétés au cours de la période d'homologation. Ce projet a été financé par une bourse postdoctorale supervisée par l'ANR dans le cadre du programme "Investissements d'Avenir" (LabEx BASC; ANR-11-LABX-0034) et par le programme H2020 (projet RustWatch; No 773311).

BIBLIOGRAPHIE

- Agenbag G.M., Pretorius Z.A., Boyd L.A., Bender C.M., Prins R., 2012 - Identification of adult plant resistance to stripe rust in the wheat cultivar Cappelle-Desprez. *Theoretical and Applied Genetics*, 125, 1, 109-120.
- Bayles R., Flath K., Hovmøller M., de Vallavieille-Pope C., 2000 - Breakdown of the Yr17 resistance to yellow rust of wheat in northern Europe. *Agronomie*, 20, 7, 805-811.
- Cleveland W.S., 1979 - Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*, 74, 368, 829-836.
- de Vallavieille-Pope C., Picard-Formery H., Radulovic S., Johnson R., 1990 - Specific resistance factors to yellow rust in seedlings of some French wheat varieties and races of *Puccinia striiformis* Westend in France. *Agronomie*, 10, 2, 103-113.
- de Vallavieille-Pope C., Ali S., Leconte M., Enjalbert J., Delos M., Rouzet J., 2012 - Virulence dynamics and regional structuring of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in France between 1984 and 2009. *Plant Disease*, 96, 1, 131-140.
- Dean R., Van Kan J.A., Pretorius Z.A., Hammond-Kosack K.E., Di Pietro A., Spanu P.D., Rudd J.J., Dickman M., Kahmann R., Ellis J., Foster G.D., 2012 - The Top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology*, 13, 4, 414-430.
- Dedryver F., Paillard S., Mallard S., Robert O., Trottet M., Nègre S., Verplancke G., Jahier J., 2009 - Characterization of genetic components involved in durable resistance to stripe rust in the bread wheat 'Renan'. *Phytopathology*, 99, 968-973.
- Du Cheyron P., de Vallavieille-Pope C., Leconte M., 2016 - Rouille jaune sur blé tendre, les résistances dépendent aussi du stade. *Perspectives Agricoles*, 434, 8-11.
- Flor H.H., 1956 - The complementary genic systems in flax and flax rust. *Advances in Genetics*, 8, 29-54.
- Hovmøller M.S., Justesen A.F., Brown J.K.M., 2002 - Clonality and long-distance migration of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in north-west Europe. *Plant Pathology*, 51, 1, 24-32.
- Hovmøller M.S., Walter S., Bayles R.A., Hubbard A., Flath K., Sommerfeldt N., Leconte M., Czembol P., Rodriguez-Algaba J., Thach T., Hansen J.G., Lassen P., Justesen A.F., Ali S., de Vallavieille-Pope C., 2016 - Replacement of the European wheat yellow rust population by new races from the centre of diversity in the near-Himalayan region. *Plant Pathology*, 65, 3, 402-411.
- Johnson R. 1984 - A critical analysis of durable resistance. *Annual Review of Phytopathology*, 22, 1, 309-330.
- Law C.N., Worland A.J., 1997 - The control of adult-plant resistance to yellow rust by the translocated chromosome 5BS-7BS of bread wheat. *Plant Breeding*, 116, 1, 59-63.
- Lof E.M., de Vallavieille-Pope C., Van Der Werf W., 2017 - Achieving durable resistance against plant diseases: scenario analyses with a national-scale spatially explicit model for a wind-dispersed plant pathogen. *Phytopathology*, 107, 5, 580-589.
- Mallard S., Gaudet D., Aldeia A., Abelard C., Besnard A.L., Sourdille P., Dedryver F., 2005 - Genetic analysis of durable resistance to yellow rust in bread wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 110, 8, 1401-1409.

- Paillard S., Trotoux-Verplancke G., Perretant M.R., Mohamadi F., Leconte M., Coedel S., de Vallavieille-Pope C., Dedryver F., 2012 - Durable resistance to stripe rust is due to three specific resistance genes in French bread wheat cultivar Apache. *Theoretical and Applied Genetics*, 125, 5, 955-965.
- Perronne R., Diguët S., de Vallavieille-Pope C., Leconte M., Enjalbert J., 2017 - A framework to characterize the commercial life cycle of crop varieties: Application to the case study of the influence of yellow rust epidemics on French bread wheat varieties. *Field Crops Research*, 209, 159-167.
- Powell N.M., Lewis C.M., Berry S.T., MacCormack R., Boyd L.A., 2013 - Stripe rust resistance genes in the UK winter wheat cultivar Claire. *Theoretical and Applied Genetics*, 126, 6, 1599-1612.
- Rosewarne G.M., Herrera-Foessel S.A., Singh R.P., Huerta-Espino J., Lan C.X., He Z.H., 2013 - Quantitative trait loci of stripe rust resistance in wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 126, 10, 2427-2449.
- 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*, 200, 3, 888-897.
- Singh R.P., Huerta-Espino J., Bhavani S., Herrera-Foessel S.A., Singh D., Singh P.K., Velu G., Mason R.E., Jin Y., Njau P., Crossa J., 2011 - Race non-specific resistance to rust diseases in CIMMYT spring wheats. *Euphytica*, 179, 1, 175-186.
- Sørensen C.K., Hovmøller M.S., Leconte M., Dedryver F., de Vallavieille-Pope C., 2014 - New races of *Puccinia striiformis* found in Europe reveal race specificity of long-term effective adult plant resistance in wheat. *Phytopathology*, 104, 10, 1042-1051.
- Summers R.W., Brown J.K.M., 2013 - Constraints on breeding for disease resistance in commercially competitive wheat cultivars. *Plant Pathology*, 62, 115-121.
- Wellings C.R., 2011 - Global status of stripe rust: a review of historical and current threats. *Euphytica*, 179, 1, 129-141.