

WDV : Résistance/tolérance contre la maladie des pieds chétifs sur blé et sur orge

Robin Comte¹, Thomas Armand², Marlène Souquet², Elodie Pichon², Patrice Senellart^{3*}, Romain Valade⁴, Cindy Vitry⁴, Emmanuel Jacquot²

1 - ARVALIS Institut du végétal, 21 Chemin de Pau, 64121 Montardon, France

2 - PHIM, INRAE, CIRAD, Institut Agro, Univ. Montpellier, Cirad TA A-120/K, Campus international de Baillarguet, 34398, Montpellier, France

3 - Cetac, Centre Technique pour l'Amélioration des Céréales, 7 rue Coq-Héron, 75030 Paris Cédex 01

4 - ARVALIS Institut du Végétal, 91720 Boigneville, France

*Coordinateur du projet : Patrice.Senellart@kws.com

INTRODUCTION

Les céréales, comme la majorité des cultures, sont exposées à plusieurs maladies virales, dont la maladie des pieds chétifs (MPC) est l'une des plus importantes. La MPC a été signalée dans la plupart des régions céréalières du monde (Abt et Jacquot, 2015) et peut entraîner des pertes de rendement allant jusqu'à 90 % en cas de forte pression (Lindblad et Waern, 2002). Les virus inclus dans l'espèce *Mastrevirus Hordei* (Wheat Dwarf Virus (WDV) ou virus des pieds chétifs du blé ; famille : *Geminiviridae* ; genre : *Mastrevirus*) sont les agents étiologiques de cette maladie (Vacke, 1961). Les premières analyses de la diversité génomique du WDV ont permis de décrire des souches virales sur blé (WDV-w) et sur orge (WDV-b) partageant 83-84 % d'identité nucléotidique (Köklü *et al.*, 2007). Les isolats de WDV-w et WDV-b ont des propriétés biologiques différentes, notamment la capacité d'infecter leur hôte préféré (le blé et l'orge pour WDV-w et WDV-b, respectivement), mais pas l'hôte préféré de l'autre souche (Abt *et al.*, 2020). Le WDV est transmis de manière persistante et non propagative par la cicadelle *Psammotettix alienus* (Brault *et al.*, 2010 ; Wang *et al.*, 2014). Cette espèce d'insecte holarctique accomplit son cycle de vie sur les poacées, sur lesquelles *P. alienus* produit des descendants par reproduction sexée (Derlink *et al.*, 2018). Les cicadelles femelles gravides pondent des œufs dans le mésophylle des feuilles de Poacées. Quelques jours plus tard, les larves éclosent, puis se développent à travers 5 stades avant de devenir des adultes (mâles ou femelles) (Manurung *et al.*, 2005). Les larves et les adultes peuvent transmettre le WDV avec une efficacité similaire (Abt *et al.*, 2020). Dans les climats tempérés, les cicadelles virulifères introduisent le WDV dans les champs de céréales d'hiver nouvellement semés de début octobre jusqu'à la mort de ces vecteurs pendant la période froide de l'hiver (Abt et Jacquot, 2015). Au début du printemps, les larves issues des œufs d'hiver ont la possibilité de propager la maladie dans les champs jusqu'à ce que les plantes atteignent une résistance de maturité au virus ((stade DC 31) ; Lindblad et Sigvald, 2004). Les méthodes de lutte contre la MPC en parcelles de céréales sont principalement basées sur des pratiques agricoles. La gestion des repousses et des semis tardifs limiterait i) la présence de réservoirs pour le WDV et pour *P. alienus* et ii) l'exposition des jeunes plantes à l'activité vectorielle de la cicadelle (Lindblad et Waern,

2002). Enfin, des produits insecticides peuvent être utilisés pour réduire les populations de cicadelles. Cependant, leur efficacité contre *P. alienus* reste limitée (Vacke *et al.*, 2004).

Dans le but d'améliorer la durabilité et la productivité des systèmes agricoles, la culture de variétés résistantes (taux d'infection réduit et/ou moindre accumulation de virus dans la plante ; (Cooper et Jones, 1983)) et/ou tolérantes (réduction de l'expression de symptômes de la maladie ; (Cooper et Jones, 1983)) doit être envisagée pour protéger les céréales contre la maladie des pieds chétifs. Cependant, les travaux réalisés au cours des trois dernières décennies ont montré que la plupart des variétés de blé et d'orge testées pour leur comportement face à cette maladie sont sensibles au WDV (Sirlova *et al.*, 2005 ; Pfrieme *et al.*, 2022). En effet, seuls quelques cultivars de blé (par exemple les cvs. Tarso, Pagode, Banquet, MV Delma, MV Vekni et Svitava) ont montré une diminution i) du taux d'infection, ii) de l'accumulation du virus et/ou iii) de l'intensité des symptômes (Lindblad et Waern, 2002 ; Sirlova *et al.*, 2005 ; Benkovics *et al.*, 2010 ; Ripl *et al.*, 2020)). Cependant, la plupart de ce matériel partiellement résistants/tolérants a montré, en réponse à l'infection par le WDV, des pertes de rendement similaires à celles constatées pour des variétés de référence sensibles (par exemple, Sirlova *et al.*, 2005 ; Ripl *et al.*, 2020). Récemment, de faibles taux d'infection par le WDV (4,6 % à 5,7 %) et une réduction modérée du rendement (46,2 % à 76,8 %) ont été décrits pour 4 accessions de *Triticum* ssp. (Pfrieme *et al.*, 2022). Parmi ces ressources génétiques, le blé d'hiver var. Fisht a été utilisé pour la cartographie de QTL. Ce travail a permis d'identifier plusieurs QTLs de résistance à la MPC associés à une faible perte de rendement et à un faible titre viral. De même, deux QTL de tolérance, associés à une plus faible intensité des symptômes, ont été identifiés dans une lignée recombinante de blé d'hiver (Buerstmayr et Buerstmayr, 2023). Pour ce qui concerne les données relatives au pathosystème orge/WDV, peu d'informations sont présentes dans la littérature. Ainsi, seule la variété Post, par ailleurs présentant un QTL de résistance au virus de la Jaunisse Nanisante de l'Orge (JNO) sur le chromosome 2HL, est décrite pour sa tolérance face au WDV (Habekuß *et al.*, 2009). Ces résultats et le matériel végétal associé représentent de grandes opportunités pour la gestion future de la maladie des pieds chétifs. Cependant, comme les accessions résistantes/tolérantes au WDV mentionnées ci-dessus sont inadaptées aux exigences du marché national et/ou indisponibles pour

les céréaliers français (GEVES, 2023), les agriculteurs continuent de cultiver des variétés sensibles au WDV. Il n'est toutefois pas exclu que certaines variétés de blés et d'orges actuellement cultivées puissent disposer d'éléments génétiques présentant des caractéristiques intéressantes pour l'amélioration des futures stratégies de gestion contre la MPC. C'est donc spécifiquement ce point qui a été traité dans le cadre du projet « Résistance/tolérance contre la maladie des pieds chétifs sur blé et sur orge » en réalisant i) des expérimentations de terrain visant à identifier d'éventuelles ressources génétiques ayant un comportement significativement différents de référents sensibles lors de leur exposition à une pression virale (cicadelles virulifères) et ii) des travaux en conditions contrôlées de laboratoire pour caractériser des paramètres épidémiologiques impliqués dans l'introduction et la propagation du WDV sur une gamme de variétés de blé et d'orge supposées sensibles à la MPC.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

► Essais en laboratoire

Plantes, vecteur et virus

Douze cultivars de blé (Rubisko [RAGT Semences, Rodez, France] utilisé comme cultivar de référence, Boregar [RAGT Semences], Chevignon [Saaten Union], Complice [Florimond Desprez], KWS Extase [KWS Momont], Némio [Secobra Recherches], LG Absalon [Limagrain Europe], Hyking [Saaten Union], Filon [Florimond Desprez], RGT Libravo [RAGT], RGT Sacramento [RAGT] et Solindo CS [Caussade Semences]), et 12 variétés d'orge (Spazio [Apsov sementi SRL], Amistar, KWS Cassia, KWS Faro et KWS Joyau [KWS Momont], Hirondella [Saaten Union], Etincel, Coccinel, Idilic, Memento, SC1 et Visuel [Secobra Recherche]), tous disponibles pour les agriculteurs français, ont été utilisés dans cette étude.

Les graines ont été semées dans des tubes (diamètre : 2 cm ; hauteur : 10 cm ; 1 graine par tube) ou dans des pots (7 × 7 × 7 cm ; environ 30 graines par pot pour cv. Rubisko et cv. Etincel utilisés pour l'élevage des insectes) contenant un terreau Neuhaus® Huminsubstrat (N2, Klasmann Deilmann). Les plantules ont été maintenues pendant sept jours en chambre de culture (16 h/8 h ; 24 °C/20 °C).

La cicadelle *Psammotettix alienus* (collectée en Côte-d'Or en 2012 ; Abt *et al.*, 2020) a été élevée en chambre climatique (16 h/8 h ; 24 °C/20 °C ; 40 % HR) sur blé sain ou orge saine (insectes non virulifères) ou blé infecté ou orge infectée (insectes virulifères). Les virus utilisés sont les isolats WDV-w1 et WDV-b1 (Abt *et al.*, 2020). Le plasmide pBL-WDV-[Enk1] (GenBank AJ311031) a été utilisé comme standard ADN pour les analyses moléculaires.

Performances des cicadelles

Pour mesurer la qualité d'hôte des cultivars, la survie et la fécondité des femelles de *P. alienus* ont été suivies. Des femelles gravides non virulifères ont été déposées individuellement sur des plantules âgées de 7 jours (1 insecte/plante). Chaque plante a été confinée sous un sachet microperforé durant une semaine, période pendant laquelle les femelles pouvaient se nourrir et pondre. Après une semaine, l'état (vivant/

mort) des femelles a été enregistré puis les insectes retirés manuellement. Les plantes ont ensuite été maintenues quatre semaines supplémentaires sous sachet microperforé. Le nombre de nymphes écloses sur chaque plante a été compté. L'expérience a été répétée trois fois avec 4 à 10 plantes par cultivar.

Taux d'infection par le WDV

L'inoculation des plantules (âgées de 7 jours) a été réalisée en exposant chaque plante à deux cicadelles virulifères pendant 6 h (IAP). Après l'IAP, les insectes ont été retirés et les plantes maintenues trois semaines en chambre climatique. La présence du WDV a été testée par DAS-ELISA. L'expérience a été répétée trois fois avec 10 plantes par cultivar.

Période de latence et accumulation virale

Des cicadelles virulifères (10 insectes/plante) ont été déposées sur des plantes de cvs. Rubisko et Filon pendant 24 h (IAP). Toutes les plantes ont été infectées. Ces plantes sources ont ensuite été utilisées pour des tests de transmission à 2, 7, 14 et 21 jours après inoculation (DAI). À chaque DAI, environ 25 cicadelles saines ont été déposées sur une plante source pendant 24 h (AAP), puis transférées sur des plantules saines (2 insectes/plante test) pour un IAP d'une semaine. La présence du virus a été testée trois semaines plus tard par DAS-ELISA. Au total, 8 à 10 plantes sources par DAI ont été utilisées selon le cultivar, et 10 plantes tests par source. L'expérience a été répétée trois fois.

Sélection des cultivars par *P. alienus*

Des groupes de 5 plantes représentant 12 cultivars de blé ont été placés aléatoirement pour former une mosaïque dans une cage en plexiglas (50 × 50 × 80 cm). Douze femelles virulifères ont été relâchées au centre de cette arène. Après 14 jours, les insectes ont été retirés. Chaque plante a été isolée sous sachet microperforé et, 4 semaines plus tard, les nymphes présentes sur chaque plante ont été comptées, et la présence du WDV a été testée par DAS-ELISA. Cette expérience a été répétée trois fois avec deux cages par répétition.

Diagnostic sérologique (DAS-ELISA)

La partie aérienne de chaque plante a été broyée individuellement. Le test DAS-ELISA spécifique WDV (anticorps Loewe® 1:200) a été réalisé selon les recommandations du fournisseur. La densité optique à 405 nm (OD405) a été mesurée à 30 min, 1 h et 2 h. Le seuil de détection a été fixé à deux fois la moyenne des plantes saines, avec un minimum de 0,1.

Purification de l'ADN

Les 5 premiers centimètres des feuilles d'extrémité (plantes sources) ont été broyés avec des billes puis extraits avec le kit NucleoSpin RNA/DNA. L'ADN total a été élué dans 100 µL.

Standards ADN et quantification du WDV par qPCR

La charge virale a été mesurée via qPCR avec une gamme standard (10⁸ à 10⁴ copies/µL) du plasmide pBL-WDV-[Enk1]. Les amorces et sondes TaqMan utilisées sont celles de Gadiou *et al.* (2012). Les conditions d'amplification ont été de 95 °C 10 min ; 40 cycles 95 °C 15 s / 60 °C 1 min. Le signal fluorescent de la sonde FAM a été suivi et les Ct calculés avec le logiciel associé au LightCycler 480.

Analyses statistiques

Les analyses ont été réalisées sous R 4.1.3. Les variables binaires (infection, transmission, colonisation et survie) ont été analysées par GLM binomial ou quasi-binomial. Les effectifs de nymphes ont été analysés par GLM quasi-Poisson. Les effets des cultivars ont été testés par comparaison de modèles (tests de Student). Les effets du DAI ont été testés à l'aide d'un test de Tukey. Les charges virales ont été transformées (log10) et analysées par ANOVA suivie de tests post-hoc EMM. Une analyse en composantes principales (PCA) suivie d'une classification hiérarchique ascendante (méthode de Ward) a permis de regrouper les cultivars selon leurs interactions plante-virus-vecteur.

► Réseau d'essais au champ

Matériel végétal utilisé

La liste des génotypes implantés a été progressivement réduite au fur et à mesure de l'avancement du projet, en prenant en compte les résultats obtenus au fil des années. Initialement, cette liste comprenait 76 variétés d'orge d'hiver (OH), à l'exception d'un site où 344 variétés étaient présentes, ainsi que 346 variétés de blé tendre d'hiver (BTH). Elle a ensuite été réduite au cours du projet, pour aboutir à une sélection finale de 14 génotypes d'orge d'hiver et de 24 génotypes de blé tendre lors de la dernière année du projet. En conditions de culture en cage insect-proof, en raison de l'espace limité disponible, la liste variétale était déjà considérablement restreinte dès le début, avec 14 à 26 variétés par espèce (Tableau 1).

		2020/2021	2021/2022	2022/2023	2023/2024
En plein champ	OH	344 var. sur 1 site + 76 var. sur les 5 autres	58 var. sur 6 sites	53 var. sur 6 sites + 14 var. sur site Arvalis	14 var. sur 1 site + 15 var. sur site Arvalis
	BTH	346 var. avec quelques variations suivant les sites (6 sites)	179 var. sur 6 sites	67 var. sur 6 sites + 13 var. sur site Arvalis	24 var. sur 1 site + 10 var. sur site Arvalis
En cage insect-proof	OH	/	15/20 variétés sur 2 sites	15/20 variétés sur 3 sites	15/20 variétés sur 4 sites
	BTH	/	14/20 variétés sur 2 sites	14/20 variétés sur 4 sites	14/26 variétés sur 6 sites

Tableau 1 : Essais « au champ » et « sous cage » mis en place lors des campagnes agricoles de 2021 à 2024. « var. » signifie « variétés ».

Essais au champ

Les essais ont été mis en place sur plusieurs sites expérimentaux (Fig. 1), incluant des micro-parcelles (2 m²) implantées sur des sites d'obtenteurs et des parcelles plus grandes (20 m²) sur le site Arvalis du Subdray (Fig. 2).

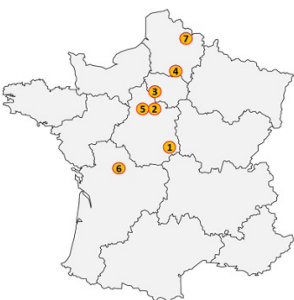


Figure 1 : Carte de France présentant les sites ayant accueilli des essais au champ.

Número	Département	Nom du site	Partenaire
1	18	Le Subdray	Arvalis
2	28	Réclainville	Lidea
3	78	Maule	Secobra
4	60	Aiguisy	Asur Plantbreeding
5	28	Allones	KWS Momont
6	86	Brux	DSV
7	59	Auchy-lez-Orchies	Lemaire Deffontaine



Figure 2 : Dispositifs d'essais au champ : en micro-parcelles de 2m² (gauche) et en petites parcelles de 20m² (droite).

Des témoins sensibles de référence (var. Etincel pour l'orge et var. Rubisko pour le blé) et des référents supposés tolérants (var. Fisht, var. MV Vekni pour le blé ; var. Post pour l'orge) ont été intégrés aux dispositifs expérimentaux afin de comparer leur réponse face à la MPC avec celle des autres génotypes étudiés. Les parcelles ont été semées précocement (fin septembre/début octobre) afin de maximiser les infections naturelles par les cicadelles vectrices du WDV. Cette approche a permis d'évaluer la réponse des génotypes dans des conditions représentatives des pratiques culturales à risque, où les transmissions naturelles du virus sont les plus élevées.

Essais en cages insect-proof

Les essais en cages insect-proof (dimension : environ 3 × 3 m) ont été menés sur certains de ces sites (Fig. 3). Ces essais ont bénéficié d'apports de cicadelles virulifères issues d'élevages produits au laboratoire (Abt *et al.*, 2020).



Figure 3 : Dispositif d'essai au champ en cage insect-proof vu de l'extérieur (gauche) et vu de l'intérieur (droite).

Suivi des vecteurs de virus

Afin d'évaluer la pression exercée par la cicadelle *P. alienus* et par les pucerons ailés sur les essais conduits au champ, des pièges englués et des cuvettes jaunes ont été installés sur les parcelles expérimentales. Ces dispositifs ont permis de capturer les insectes depuis la levée des cultures jusqu'aux premières gelées. Les pièges ont fait l'objet de relevés bimensuels, comprenant l'identification et le dénombrement des cicadelles, ainsi que le dénombrement des pucerons ailés. Le statut sanitaire d'une partie des individus capturés a également été analysé.

Analyse du statut virulifère des cicadelles piégées

Les acides nucléiques ont été extraits à partir des cicadelles selon le protocole d'extraction d'ADN au TNES de l'UMR PHIM (Abt *et al.*, 2020), permettant la conservation des individus. Après dosage par spectrophotométrie et dilution à 2 ng/μL, la détection du Wheat dwarf virus a été réalisée par qPCR SYBR Green. Les souches WDV-Barley et WDV-Wheat ont été

discriminées par analyse des courbes de dissociation, sur la base de leurs températures de fusion distinctes (79–80 °C et 81–82 °C, respectivement). Les co-infections ont été confirmées par qPCR avec sondes spécifiques.

Analyses statistiques

Les analyses ont été réalisées sous R 4.1.2. Les tests statistiques utilisés sont décrits en légende des figures.

RÉSULTATS

► Évaluation des interactions plante-virus-vecteur à l'échelle de la plante de blé

L'objectif de ce travail a été de caractériser, pour 12 variétés de blé et 12 variétés d'orge connues pour être sensibles à la MPC, les paramètres épidémiologiques impliqués dans l'introduction et la propagation du WDV. Les interactions plante-virus (taux d'infection, accumulation du virus et efficacité de la transmission) et plante-vecteur (survie et fécondité des cicadelles, et sélection de l'hôte) ont été suivies dans des environnements correspondant à une plante isolée et dans des environnements correspondant à une mosaïque de plantes combinant plusieurs variétés. Ces travaux ont permis i) de définir la qualité d'hôte de chaque variété pour le WDV et *P. alienus* et ii) d'évaluer l'impact du génotype de l'hôte sur l'épidémiologie de la maladie des pieds chétifs sur blé et sur orge.

Interactions plante-vecteur : survie des cicadelles et production de larves

Afin de caractériser la qualité d'hôte intrinsèque des 12 génotypes de blé pour *P. alienus*, la survie et la fécondité des cicadelles femelles ont été contrôlées. Des insectes fondateurs sains ont été transférés sur des plantes de blé et maintenus pendant une semaine. A la fin de cette période d'élevage, les taux de survie (S_w = nombre de cicadelles vivantes / nombre de cicadelles utilisées dans l'expérience) ont été calculés pour chaque cultivar. Dans nos

conditions expérimentales, les taux de survie de *P. alienus* sur les cultivars de blé allaient de 96,7 % $\pm$ 3,3 % (cv. Rubisko) à 66,7 % $\pm$ 6,7 % (cv. Complice) (Fig. 4A). L'analyse statistique de ces données indique que la survie de *P. alienus* est significativement réduite sur les cvs. Complice (66,7 % $\pm$ 6,7 % ; $P_{\text{Complice}} = 0,013$), Filon (73,3 % $\pm$ 16,67 % ; $P_{\text{Filon}} = 0,031$), Hyking (66,7 % $\pm$ 14,5 % ; $P_{\text{Hyking}} = 0,013$) et Nemo (73,3 % $\pm$ 3,3 % ; $P_{\text{Nemo}} = 0,031$) par rapport aux données obtenues sur le cv. Rubisko. Ces données ont été complétées par l'évaluation du nombre de larves produites par une seule cicadelle fondatrice sur des plantes de blé (Lw). Ainsi, quatre semaines après l'élimination des femelles fondatrices de *P. alienus*, des populations de 23,2 $\pm$ 3,9 larves/plante ont été observées sur le référent blé cv. Rubisko (Fig. 4B). Les valeurs moyennes de Lw obtenues sur les cvs. Complice (13,5 $\pm$ 2,7) et Filon (11,5 $\pm$ 3,6) (test t, $P_{\text{Complice}} = 0,046$; $P_{\text{Filon}} = 0,014$) sont significativement inférieures à la population produite sur cv. Rubisko (Fig. 4B). La taille des populations de cicadelles produites sur les autres cultivars de blé est similaire à celle observée sur Rubisko. L'ensemble de ces résultats montre que i) les cvs. Complice et Filon ont un impact négatif sur la survie et la reproduction de *P. alienus* et ii) la survie (mais pas la fécondité) de la cicadelle est modifiée sur les variétés Hyking et Nemo.

Interactions plantes-virus : taux d'infection, latence et accumulation du virus

La sensibilité d'une plante peut être déterminée par l'efficacité de l'introduction d'un pathogène dans un hôte sain. Pour évaluer l'impact des cultivars de blé sur l'inoculation du WDV, le taux d'infection (I_w = nombre de plantes infectées / nombre de plantes inoculées) a été déterminé pour chaque cultivar. Les taux d'infection ont ensuite été comparés aux valeurs obtenues pour la référence Rubisko. Les inoculations du blé cv. Rubisko (2 cicadelles virulifères ; WDV-w ; période d'inoculation (IAP) : 6 h) ont conduit à un I_w de 47,7 % $\pm$ 14,5 % (Fig. 5). Les valeurs de I_w obtenues pour les autres blés varient de 13,3 % $\pm$ 6,7 % (cv. Filon) à 50,0 % $\pm$ 5,77 %

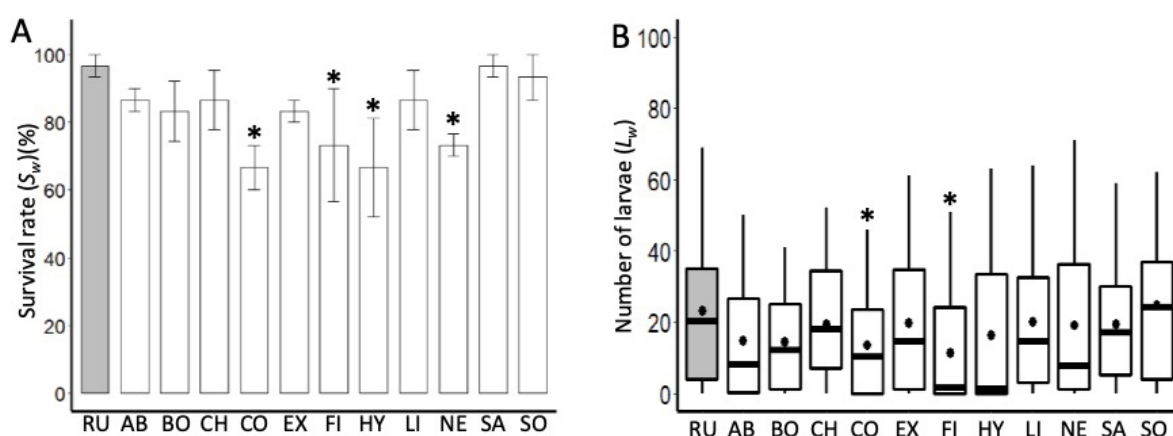
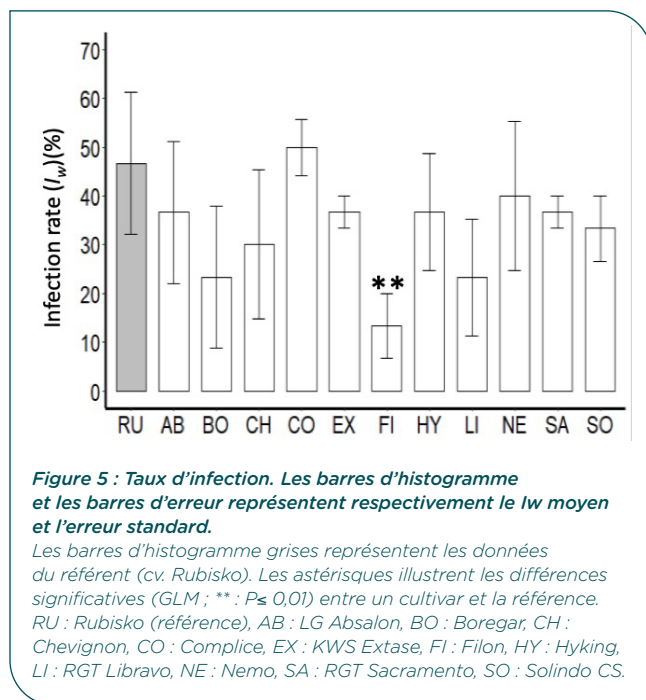


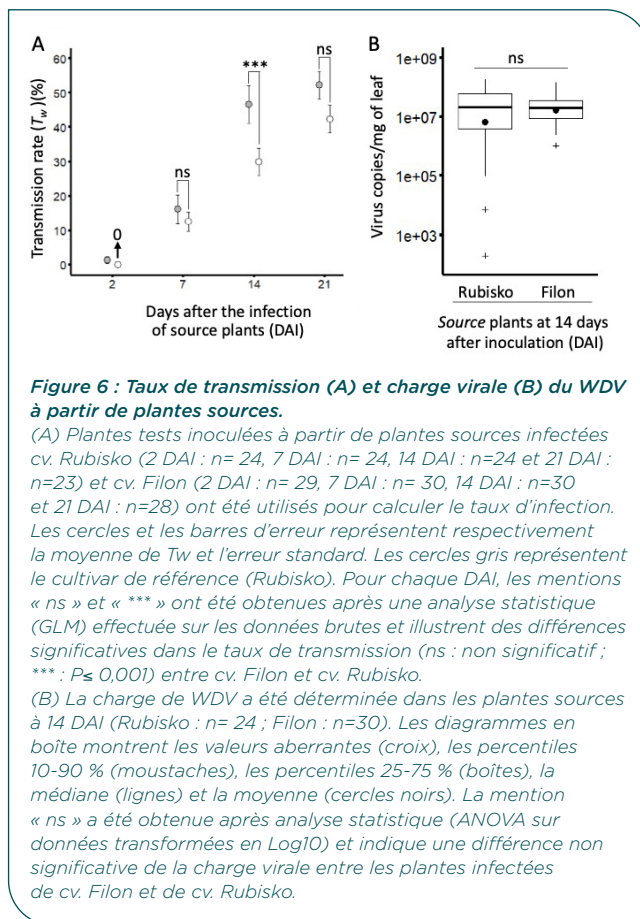
Figure 4 : Taux de survie (A) de *P. alienus* et nombre de nymphes (B) produites par chaque cicadelle sur blé.

(A) Les barres de l'histogramme et les barres d'erreur représentent la moyenne de S_w et l'erreur standard, respectivement. (B) Pour Lw, les diagrammes en boîte montrent les valeurs aberrantes (croix), les percentiles 10-90 % (moustaches), les percentiles 25-75 % (boîtes), la médiane (lignes) et la moyenne (point noir). Les barres grises de l'histogramme et les diagrammes en boîte représentent les données de la référence cv. Rubisko. Les astérisques illustrent les différences significatives (GLM ; * : $P \leq 0,05$) entre un cultivar et la référence. RU : Rubisko (référence), AB : LG Absalon, BO : Boregar, CH : Cheyignon, CO : Complice, EX : KWS Extase, FI : Filon, HY : Hyking, LI : RGT Libravo, NE : Nemo, SA : RGT Sacramento, SO : Solindo CS.

(cv. Complice). Seul le lw obtenu pour la variété Filon est significativement plus faible (3,5 fois) que celle obtenue pour var. Rubisko (test t ; $P = 0.007$, Fig. 5).



Les expériences menées à l'échelle de la plante ont montré que le blé cv. Filon modifie les paramètres associés au vecteur et au virus. Pour mieux caractériser l'impact de cv. Filon sur les paramètres épidémiologiques impliqués dans la propagation du WDV, la période de latence du WDV dans ce blé a été étudiée. Des plantes (cvs. Filon et Rubisko) ont été inoculées avec le WDV-w1 (10 cicadelles virulifères/plante ; IAP= 24h), ce qui permet d'obtenir des plantes infectées. Ces plantes ont servi de source de virus dans les expériences de transmission réalisées à différents jours après l'inoculation des plantes sources (2, 7, 14 et 21 jours après inoculation (DAI)). Des taux de transmission de 1,4% ($\pm 1,0\%$; $n=24$), 16,2% ($\pm 4,1\%$; $n=24$), 46,7% ($\pm 5,5\%$, $n=24$) et 52,2% ($\pm 4,1\%$, $n=23$) ont été obtenus avec les plantes sources du cultivar Rubisko infectées pendant 2, 7, 14 et 21 jours, respectivement (Fig. 6A). Une tendance similaire a été observée pour le cv. Filon (2 DAI : 0% $\pm 0\%$, $n=29$; 7 DAI : 12,5% $\pm 2,8\%$, $n=30$; 14 DAI : 29,8% $\pm 4,0\%$; $n=30$; et 21 DAI : 42,4% $\pm 4,0\%$, $n=28$). Les taux de transmission du WDV varient de manière significative en fonction du DAI (GLM ; $P = 2,2 \times 10^{-16}$) et des cultivars de blé des plantes sources (GLM ; $P = 0,001$), mais sans mettre en évidence d'interactions entre ces facteurs (GLM ; $P = 0,29$). En outre, l'effet du cultivar blé sur les taux de transmission du WDV a été analysé à chaque DAI. Cette analyse a montré qu'aucune différence significative n'a été observée à 7 (test t ; $P = 0,64$) et 21 (test t ; $P = 0,11$) DAI. Toutefois, un taux de transmission réduit a été observé pour le cv. Filon à 14 DAI (test t ; $P = 0,003$). Il est important de noter que cette diminution de l'efficacité de transmission à 14 DAI n'est pas associée à une réduction de la charge virale du WDV dans les plantes sources du cv. Filon (ANOVA ; $P = 0,12$; Fig. 6B) ce qui suggère que le WDV s'accumule de manière similaire dans les plantes des cvs. Rubisko et Filon 14 jours après leur inoculation.



Sélection de blé par *P. alienus*

Les insectes sont couramment exposés à une mosaïque de plantes, dont les caractéristiques (phénologie, phénotype, production de substances volatiles, ...) varient. Parmi ces plantes, les insectes doivent sélectionner un hôte pour accomplir leur cycle biologique. À l'aide d'approches indirectes, les plantes visitées par *P. alienus* ont été identifiées pour évaluer la préférence de cet insecte pour les 12 cultivars de blé intégrées à cette étude. Le taux de colonisation (C_w = nombre de plantes avec au moins une larve/nombre de plantes du cultivar utilisé dans l'expérience) associé à chaque blé i) a été déterminé à la fin de l'expérience en fonction de la présence de larves sur chaque plante individuelle et ii) a été utilisé comme un indicateur de la sélection de l'hôte. Selon C_w , 50,0 % $\pm 3,9$ % des plantules de cv. Rubisko ont été utilisées par les cicadelles pour pondre des œufs pendant la période d'exposition de deux semaines (Fig. 7A). Les valeurs de C_w calculées pour les blés testés varient de 48,3 % $\pm 8,3$ % (cv. Hyking) à 75,0 % $\pm 6,7$ % (cv. Solindo CS) et sont similaires à C_w de cv. Rubisko (GLM ; $P = 0,36$). Cela suggère que dans nos conditions expérimentales, *P. alienus* visite les 12 blés testés avec une fréquence similaire pour l'oviposition. Cependant, les analyses de la descendance des cicadelles (N_w = total des larves sur chaque plante d'un cultivar) ont montré que les N_w moyens observés sur les plantes de KWS Extase (18,8 $\pm 4,7$ larves ; t-test ; $P_{KWS\ Extase} = 0,002$) et Solindo CS (15,7 $\pm 3,1$ larves ; t-test ; $P_{Solindo\ CS} = 0,011$) sont significativement plus élevés que la population produite sur la référence Rubisko (9,2 $\pm 2,6$ individus) (Fig. 7B). Les N_w produites sur les autres blés (de 10,2 $\pm 4,3$ larves

(cv. Hyking) à $15,7 \pm 4,7$ larves (cv. RGT Sacramento)) ne sont pas significativement différentes de la taille de la population de cicadelles obtenue sur Rubisko (test t ; $P > 0,05$).

L'utilisation de cicadelles fondatrices virulifères dans l'expérience a permis de compléter l'analyse des préférences de *P. alienus* par le suivi de la prévalence du

WDV dans les plantes. Les conditions expérimentales ont conduit à un taux moyen d'infection par le WDV de $21,9 \% \pm 4,1 \%$ (données non illustrées). Si l'on se concentre sur la prévalence de la maladie (Pw = nombre de plantes infectées/nombre de plantes utilisées dans l'expérience) pour les différents cultivars, le référent sensible à la maladie (cv. Rubisko) a été infecté à un taux de $25,0 \% \pm 10,6 \%$. Les autres cultivars ont été infectés à un taux moyen compris entre $8,3 \% \pm 6,5$ (cv. Filon) et $30,0 \% \pm 10,3 \%$ (cv. Hyking). Les analyses statistiques ont montré des Pw similaires pour les 12 variétés (GLM ; $P > 0,69$) (Fig. 7C).

Impact des cultivars de blé sur l'épidémiologie du WDV

L'impact d'une variété sur l'épidémiologie d'une maladie virale transmise par un insecte repose sur les effets potentiels des plantes sur les paramètres associés au vecteur et au virus. Pour décrire comment les 12 cultivars de blé sélectionnés pourraient modifier l'épidémiologie de la maladie des pieds chétifs du blé, une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée à partir des données relatives au taux de survie (Sw), à la taille de la population (Lw) et au taux d'infection (Iw) recueillies à l'échelle de la plante, ainsi qu'au taux de colonisation (Cw), à la taille de la population (Nw) et à la prévalence du virus (Pw)

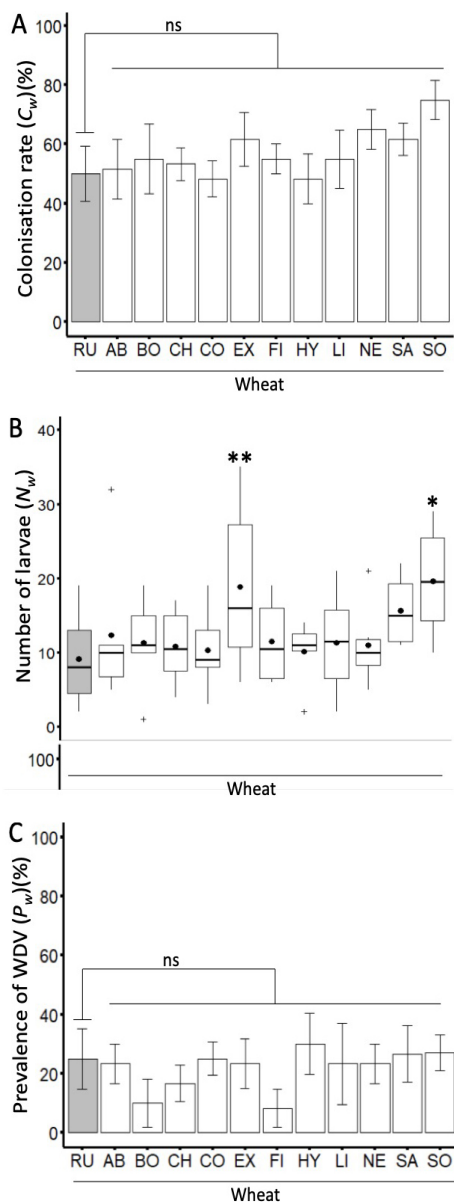


Figure 7 : Taux de colonisation (A), nombre de nymphes (B) et prévalence du WDV (C) dans une mosaïque de blé. Les barres de l'histogramme et les barres d'erreur représentent la moyenne et l'erreur standard, respectivement, pour C_w (A) et P_w (C). Pour N_w (B), les diagrammes en boîte montrent les valeurs aberrantes (croix), les percentiles 10-90 % (moustaches), les percentiles 25-75 % (boîtes), la médiane (lignes) et la moyenne (cercles noirs). Les barres grises de l'histogramme et les diagrammes en boîte représentent la variété de blé de référence Rubisko. Les mentions « ns » et « * » ont été obtenues après une analyse statistique (GLM (famille binomiale (A et C) ou quasi-poisson (B)) effectuée sur les données brutes. Les astérisques illustrent les différences significatives (* : $P \leq 0,05$ et ** : $P \leq 0,01$) entre une variété et Rubisko. ns : non significatif. RU : Rubisko (référence), AB : LG Absalon, BO : Boregar, CH : Chevignon, CO : Complice, EX : KWS Extase, FI : Filon, HY : Hyking, LI : RGT Libravo, NE : Nemo, SA : RGT Sacramento, SO : Solindo CS.

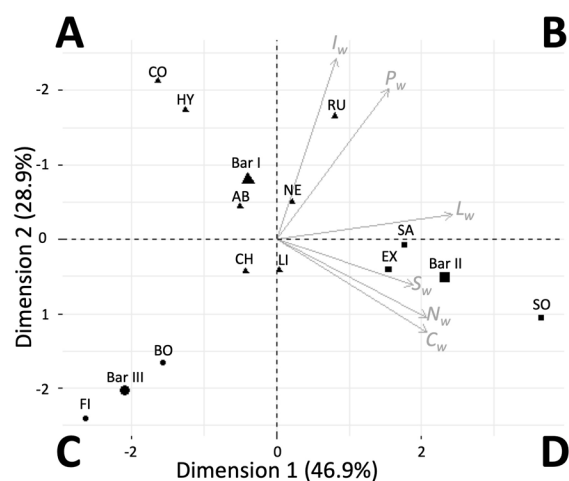


Figure 8 : Biplot des paramètres associés aux virus et aux vecteurs dans 12 cultivars de blé sur la base des deux premières dimensions.

Les deux axes représentent les dimensions 1 et 2 d'une analyse en composantes principales (ACP) qui explique respectivement 46,9 % et 28,9 % de la variance de l'ensemble des données. Les flèches grises représentent les paramètres associés au virus (i.e. I_w et P_w) et à la cicadelle (i.e. C_w, S_w, L_w et N_w). L'orientation de ces paramètres a permis de définir 4 panneaux (A-D). Dans les panneaux A et B, les blés sont associés à des valeurs élevées pour les taux d'infection et la prévalence du virus. Les panneaux B et D comprennent des variétés présentant des valeurs élevées pour les paramètres associés aux vecteurs. Le panneau C est associé à des valeurs faibles pour les paramètres relatifs aux virus et aux vecteurs. Les blés (RU : Rubisko (référence), AB : LG Absalon, BO : Boregar, CH : Chevignon, CO : Complice, EX : KWS Extase, FI : Filon, HY : Hyking, LI : RGT Libravo, NE : Nemo, SA : RGT Sacramento, SO : Solindo CS) ont été regroupés en trois groupe (groupe I (triangles), groupe II (carré, Bar II) (cercle)) à la suite d'une analyse de regroupement hiérarchique (méthode de Ward). Le barycentre de chaque groupe est représenté (groupe I (triangle, Bar I), groupe II (carré, Bar II) et groupe III (cercle, Bar III)).

recueillies dans le cadre d'une expérience menée avec une mosaïque de plantes. Les deux premières dimensions de l'analyse ACP expliquent 75,8 % de la variance globale (46,9 % et 28,9 % pour les dimensions 1 et 2, respectivement). La dimension 1 explique la majeure partie de la variance du taux de colonisation (Cw, $\cos^2 = 0,58$), du nombre de larves (Lw, $\cos^2 = 0,78$ et Nw ; $\cos^2 = 0,57$). De plus, une grande partie de la variance du taux de survie (Sw ; $\cos^2 = 0,47$) et de la prévalence virale (Pw ; $\cos^2 = 0,32$) a également été expliquée par la dimension 1. La dimension 2 a permis d'identifier la majeure partie de la variation du taux d'infection (Iw ; $\cos^2 = 0,78$) et de la prévalence virale (Pw ; $\cos^2 = 0,54$). Les paramètres associés au choix des vecteurs et aux performances (à savoir Cw, Sw, Lw et Nw) ont contribué à la majeure partie de la dimension 1 (85,42%), tandis que les paramètres associés aux virus (à savoir Iw et Pw) ont expliqué la majeure partie de la dimension 2 (75,99%). La représentation des dimensions ACP 1 et 2 a permis de diviser le graphique en 4 panneaux (Fig. 8 ; panneaux A à D). Selon l'orientation des variables associées aux paramètres du virus, les cultivars présents dans les panneaux A et B sont associés à des taux d'infection et à une prévalence du virus élevés. De même, les cultivars présents dans les panneaux B et D présentent des valeurs élevées pour les paramètres associés au vecteur. Enfin, les cultivars du groupe C présentent de faibles valeurs pour les paramètres de surveillance du virus et des vecteurs. L'analyse ACP a placé la référence sensible Rubisko dans le panel B, ce qui indique que ce cultivar est très sensible au WDV et qu'il est un bon hôte pour *P. alienus*. Les autres cultivars testés se retrouvent dans les quatre panels (cvs. Complice, Hyking et LG Absalon dans le panel A ; cv. Némio dans le panel B ; cvs. Chevignon, Filon et Boregar dans le panel C ; cvs. KWS Extase, RGT Libravo, RGT Sacramento et Solindo CS dans le panneau D) mettant en évidence la variabilité de ces 12 blé pour les paramètres surveillés. Pour identifier les cultivars présentant des caractéristiques similaires en tant qu'hôtes du WDV et de *P. alienus*, des analyses de regroupement ont été effectuées. Cela a permis de définir 3 groupes. Le groupe I (Fig. 8 ; Bar I) comprend Rubisko et 6 cultivars (LG Absalon, Complice, Chevignon, Hyking, Libravo et Nemo), et présente un barycentre dans le panneau A, indiquant que ces blés présentent une qualité d'hôte élevée pour le WDV mais pas pour *P. alienus*. Le barycentre du groupe II (Fig. 8 ; Bar II) (Extase, Solindo CS et RGT Sacramento) se trouve dans le panneau D (hôtes de haute qualité pour *P. alienus* mais pas pour le WDV). Enfin, le groupe III regroupe les cultivars Filon et Boregar et présente un barycentre (Fig. 8 ; Bar III) dans le panneau C, suggérant que ces blés présentent une faible qualité d'hôte pour le WDV et pour *P. alienus*.

Caractérisation des cultivars d'orge

En parallèle des travaux conduits sur blé, des actions de recherches ont été réalisées pour évaluer l'impact de variétés d'orge sur les performances de *P. alienus* et le taux d'infection du WDV. Des cicadelles femelles et saines (i.e. fondatrices) ont été déposées sur des plantes d'orge de manière à évaluer le taux de survie de *P. alienus* sur cette espèce végétale. Dans les conditions expérimentales utilisées, 63,3 % ($\pm 16,7$) des cicadelles fondatrices ont survécu sur le cultivar

sensible de référence (cv. Etincel). Lorsque cette valeur est comparée au taux de survie de *P. alienus* sur les cultivars testés (taux de survie de 46,67 % $\pm 13,33$ % (cv. Visuel) à 83,33 % $\pm 12,02$ % (cv. Spazio)), aucune différence significative n'est observée ($P \geq 0,05$) (Fig. 9A). En complément, la fécondité de *P. alienus* a été évaluée. Sur cv. Etincel, les femelles *P. alienus* ont produit en moyenne 13,33 nymphes ($\pm 2,64$), une valeur similaire aux autres orges testées (de 7,27 nymphes $\pm 2,49$ (cv. Visuel) à 20,66 nymphes $\pm 3,36$ (cv. Hironde)) ; $P \geq 0,05$; Fig. 9B). La sensibilité au WDV des cultivars d'orge inclus dans l'étude a été évaluée.

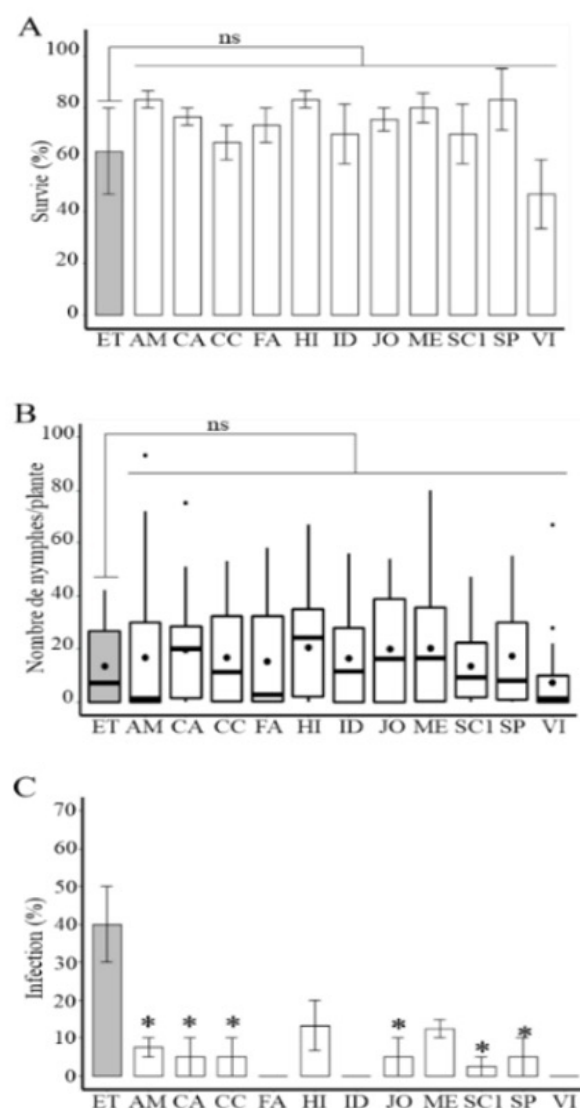


Figure 9 : Performances de *P. alienus* (A et B) et taux d'infection du WDV-b1 (C) pour différents cultivars d'orge.

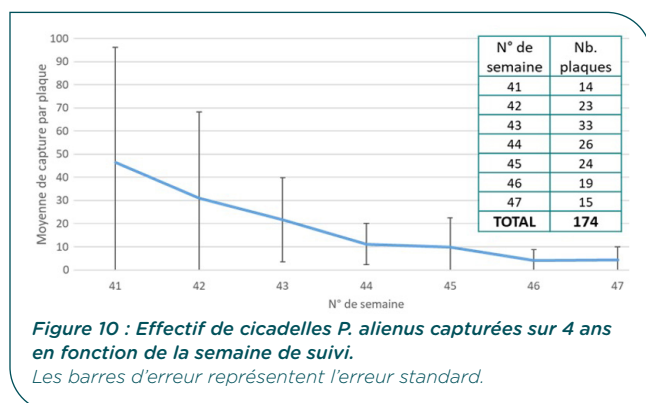
(A-C) Les barres d'histogrammes et les barres d'erreurs représentent respectivement la moyenne et l'erreur standard. (B) Les diagrammes en boîtes indiquent la médiane (ligne noire), la moyenne (ronds noirs), le 1er et le 3ème quartile (boîte), les 10 et 90 centiles (moustaches) et les données aberrantes (petits ronds noirs). Les barres et les boîtes grises correspondent aux données obtenues pour la référence (cv. Etincel). Les astérisques indiquent une différence significative entre la référence sensible et un cultivar testé. ns : non significatif ; * : $P \leq 0,05$. ET : Etincel, AM : Amistar, CA : KWS Cassia, CC : Coccinel, FA : KWS Faro, HI : Hironde, ID : Idilic, JO : KWS Joyau, ME : Memento, SCI : SCI, SP : Spazio et VI : Visuel.

Pour cela, une procédure d'inoculation légèrement différente à celle utilisée dans les travaux conduits sur blé (basée sur l'utilisation de 3 insectes/plante et d'une durée d'inoculation de 24 h ; 20 plantes/cultivar ; 2 répétitions). Comparé au cv. Etincel ($40,0\% \pm 10,0\%$), le taux d'infection du WDV-b1 est significativement réduit sur les cultivars d'orge testés (taux d'infection inférieurs à $7,5 \pm 2,5$ (cv. Amistar) ; $P < 0,05$), à l'exception des cvs. Hironde ($13,3\% \pm 6,7\%$; $P = 0,06$) et Memento ($12,5\% \pm 2,5\%$; $P = 0,08$) (Fig. 9.C). Aucune plante infectée par le WDV-b1 n'a été diagnostiquée pour les cvs. KWS Faro, Idilic et Visuel (Fig. 9.C).

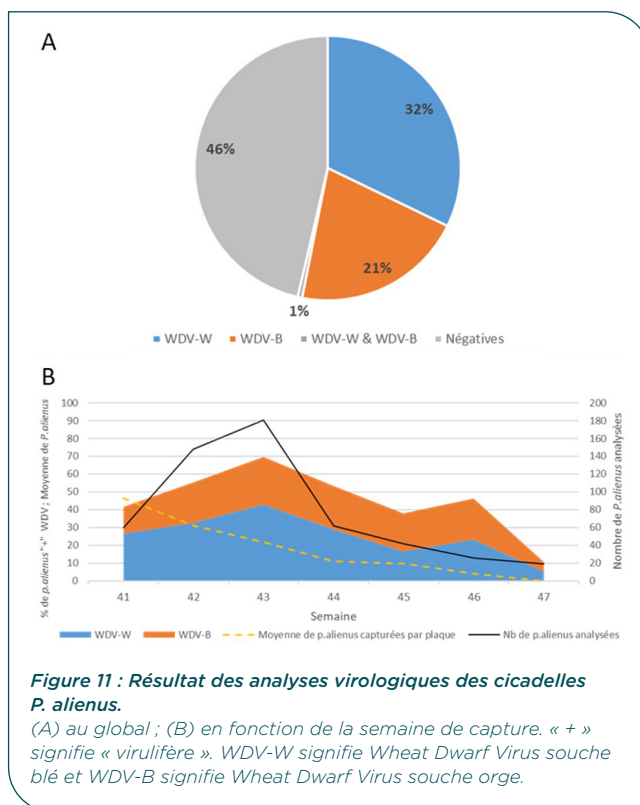
► Évaluation du comportement de variétés de blé et d'orge vis-à-vis de la maladie des pieds chétifs au champ

Suivi des cicadelles *P. alienus* et de la pression virale

Pour d'évaluer la pression du vecteur, des pièges englués ont été installés afin de capturer les cicadelles tout au long de la saison, depuis la levée des cultures jusqu'aux premières gelées. Entre 2020 et 2023, 2 906 cicadelles de l'espèce *P. alienus* ont été capturées sur des sites répartis dans les départements de la Vienne (86), du Cher (18), de l'Oise (60) et de l'Eure-et-Loir (28). Les captures ont révélé une variabilité interannuelle marquée, avec une présence élevée des cicadelles dès la semaine 41 et diminuant progressivement jusqu'à la fin de la saison (Fig. 10).

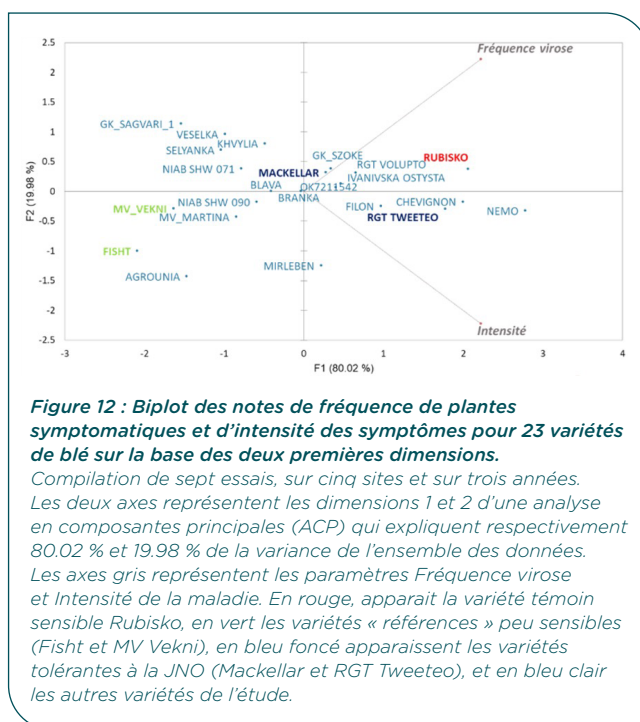


Les analyses moléculaires réalisées sur un sous-échantillon de 2 077 cicadelles ont révélé que plus de 50 % d'entre elles étaient porteuses du WDV. Parmi celles-ci, environ 30 % étaient infectées par l'isolat spécifique au blé (WDV-W), tandis qu'environ 20 % l'étaient par l'isolat spécifique à l'orge (WDV-B). La proportion de cicadelles virulifères a présenté une variation temporelle importante, atteignant jusqu'à 70 % en semaine 43, avant de chuter à 10 % en semaine 47 (Fig. 11). Mais il est important de noter que l'effectif de cicadelles capturées puis analysées est bien moindre en semaine 47 par rapport à la semaine 43, ce qui peut indirectement influencer la robustesse des prévalences obtenues. De plus, l'échantillonnage de ces cicadelles au champ a été réalisé par capture sur plaque jaune engluée. Il est donc possible qu'un biais soit associé à cette technique de capture, notamment en ce qui concerne le sex-ratio des individus capturés, ainsi que, peut-être, la prévalence du virus chez les individus capturés sur plaque.



Réponse des génotypes étudiés au WDV

Les essais au champ ont permis d'identifier des génotypes de blé et d'orge présentant des niveaux de sensibilité variés face au WDV. En ce qui concerne le blé, les variétés Fisht, MV Vekni, Agrounia, MV Martina et Mirleben ont montré une moindre sensibilité au WDV sur la base des symptômes par rapport au témoin sensible Rubisko (Fig. 12). À l'inverse, les variétés Nemo, Chevignon et RGT Tweeteo ont présenté des symptômes plus marqués, indiquant une sensibilité plus importante au virus WDV.



En cages insect-proof, en raison des sélections successives de génotypes au fil des années, peu de variétés sont communes aux essais 2022, 2023 et 2024. Cependant, ces essais ont permis de confirmer le comportement peu sensible des variétés Fisht et MV Vekni sur la base des symptômes, comparativement au témoin sensible Rubisko et au témoin tolérant à la JNO, RGT Tweeteo (Fig. 13). La réussite de ces essais en conditions de cages insect-proof ouvre la voie à l'utilisation possible de ce système pour caractériser plus facilement la sensibilité variétale du blé tendre via ce type de dispositif.

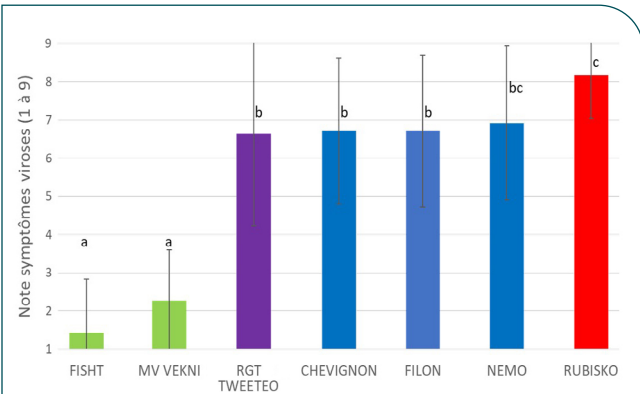


Figure 13 : Histogramme représentant la note de symptômes viroses (pieds chétifs) en fonction du génotype cultivé dans des dispositifs en cages insect-proof.

Compilation de 12 essais menés en cages insect-proof (4 sites et 2 années). La note symptômes viroses est une échelle de 1 à 9 : 1 signifiant l'absence de symptômes et 9 la disparition des plantes. En rouge, apparaît la variété témoin sensible Rubisko, en vert les variétés « références » peu sensibles (Fisht et MV Vekni), en violet apparaît la variété tolérante à la JNO (RGT Tweeteo), et en bleu les autres variétés de l'étude. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les lettres identiques (a, b, c) indiquent que les groupes correspondants ne diffèrent pas significativement entre eux, tandis que des lettres différentes montrent des différences significatives ($p < 0,05$; ANOVA avec test post-hoc de Duncan).

Concernant l'orge d'hiver, au champ, le cultivar Post s'est distingué par une faible symptomatologie, suivi des cultivars Var 01, Amistar et Var 02, qui ont montré une symptomatologie bien plus faible que le témoin Etincel. En revanche, la plupart des autres variétés étudiées ont présenté une sensibilité comparable à celle du témoin (Fig. 14). Il est important de préciser que sur orge, l'espèce étant plus sensible que le blé à la JNO, la contamination des essais par la JNO a eu plus d'impact que le blé. L'interprétation des résultats est donc plus difficile. En cages insect-proof, les contaminations importantes dues à l'introduction de pucerons vecteurs de la JNO dans le dispositif n'ont pas permis de classer les variétés selon leur niveau de sensibilité au WDV.

En ce qui concerne les dispositifs d'essai en parcelle de 20 m² mis en place au Subdray (Arvalis) durant les automnes 2021 et 2023, la faible présence de MPC n'a malheureusement pas permis d'évaluer la sensibilité des variétés étudiées vis-à-vis du virus des pieds chétifs sur la base des pertes de rendement. Le dispositif mis en place sur ce même site en 2022 a, quant à lui, présenté à la fois des infestations par les pucerons et par la cicadelle *P. alienus*. Les deux maladies (JNO et MPC) ont été retrouvées sur le dispositif.

Concernant le blé, le témoin Rubisko a présenté une surface atteinte de 20 %, avec une perte de rendement d'environ 17 % entre les micro-parcelles non traitées et celles traitées avec un insecticide (Fig. 15). Les variétés possédant un gène de résistance partielle à la JNO, comme Wolverine et RGT Tweeteo, ont montré des surfaces similaires mais des pertes de rendement moins importantes, de l'ordre de 5 à 10 %. En revanche, la variété de référence MV Vekni, supposée moins sensible au WDV, a été impactée dans des proportions proches de celles du témoin. Ces résultats suggèrent que la JNO a eu un impact important sur le dispositif blé, rendant difficile l'évaluation de la sensibilité variétale vis-à-vis du WDV, présent en moindre proportion.

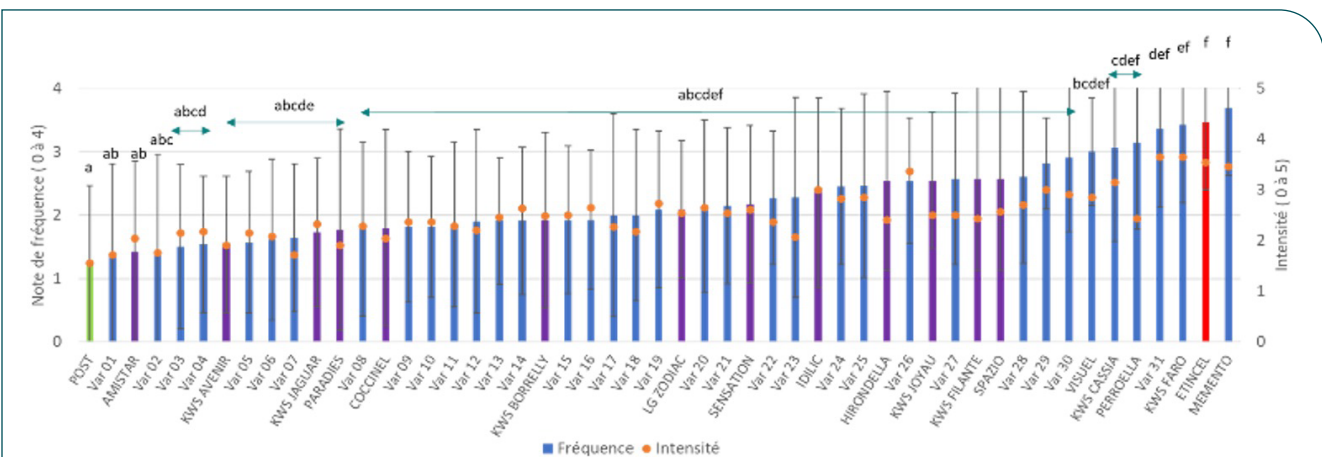


Figure 14 : Histogramme représentant les notes de symptômes de pieds chétifs (fréquence et intensité de la maladie) en fonction du génotype.

Compilation de 9 essais menés sur 6 sites (3 années). La note de fréquence est représentée par des histogrammes et correspond à une échelle de 0 à 4 : 0 signifiant l'absence de symptôme et 4 signifiant que 100% des plantes de la parcelle présentent des symptômes. La note d'intensité est représentée par un point orange et correspond à une échelle de 0 à 5 : 0 signifiant l'absence de symptôme et 5 signifiant la disparition des plantes. En rouge, apparaît la variété témoin sensible Etincel, en vert la variété « référence » peu sensible (Post), en violet apparaissent les variétés tolérantes à la JNO (Amistar, Hironde, ...) et en bleu les autres variétés de l'étude. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard sur la variable « Note de fréquence ». Les lettres identiques (a, b, c, d, e, f) indiquent que les groupes correspondants ne diffèrent pas significativement entre eux, tandis que des lettres différentes montrent des différences significatives sur la variable « Note de fréquence » ($p < 0,05$; ANOVA avec test post-hoc de Tukey).

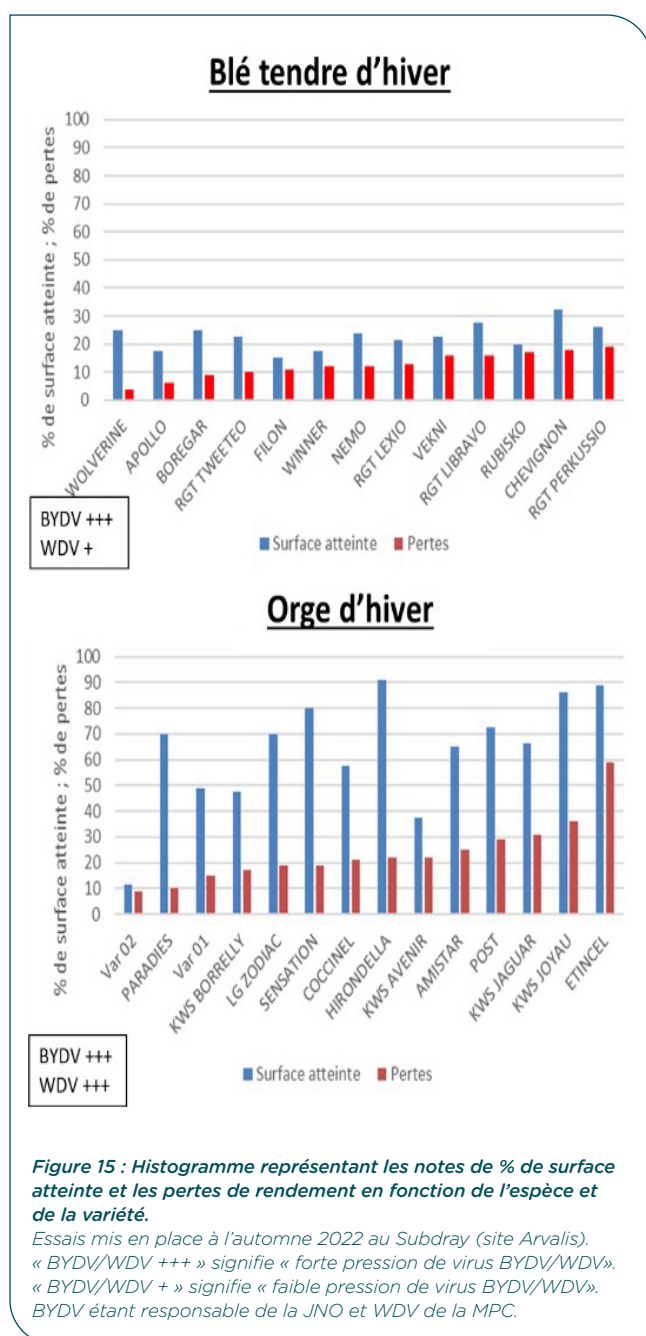
Concernant l'orge, la variété témoin Etincel a été fortement impactée, avec environ 80 % de surface atteinte et 60 % de pertes de rendement. La variété de référence vis-à-vis du WDV, POST, présente une perte de rendement plus faible, de 30 % environ. Parmi les variétés tolérantes à la JNO, on observe une grande variabilité de pertes de rendement, allant de 35 % pour KWS Joyau à 10 % pour Paradies. Ces résultats suggèrent une présence marquée des deux virus dans le dispositif, confirmée par analyse moléculaire. Dans ce contexte de forte pression virale (JNO et MPC), certaines variétés, telles que Var 02, Paradies, Var 01 ou encore KWS Borrelly, se sont distinguées par leurs faibles pertes comparées au témoin. Malgré la contamination par la JNO, les résultats de cet essai sont particulièrement pertinents, car, en conditions de terrain, la présence de la MPC sur une parcelle est souvent associée à celle de la JNO, entraînant ainsi une pression combinée des deux maladies sur les variétés.

Un autre point important à souligner concerne la corrélation entre les notations des symptômes et les pertes de rendement (Fig. 15). Nous observons que, pour certaines variétés, cette corrélation est plutôt bonne, tandis que pour d'autres, elle apparaît moins fiable, que ce soit pour le blé ou l'orge. Par exemple, pour le blé, RGT Perkussio a perdu près de trois fois plus de rendement que Boregar pour un même niveau de surface atteinte. De même, pour l'orge, KWS Jaguar a perdu trois fois plus de rendement que Paradies, alors que la surface atteinte était quasi équivalente. Ces résultats soulignent l'importance d'évaluer les variétés également sur le critère des pertes de rendement, qui reste le critère décisif.

DISCUSSION

Après les semis de céréales d'hiver (en octobre-novembre en Europe occidentale), les insectes vecteurs de virus migrants depuis les réservoirs sont exposés à une mosaïque de variétés d'hôtes potentiels (Macholdt et Honermeier, 2016 ; Krishna et Veetil, 2022) et doivent donc choisir un hôte afin de se nourrir et de se reproduire. Cette étape de migration permet l'introduction (l'inoculation primaire) du virus dans les parcelles de plantes nouvellement semées. Bien que notre compréhension du processus de sélection des hôtes par les membres des Cicadellidae ait été récemment améliorée (par exemple Tholt *et al.*, 2015 ; Aráoz *et al.*, 2019), les préférences de ces insectes pour les espèces/cultivars hôtes sont peu documentées (voir Appala *et al.*, 2019 pour un exemple). Les résultats produits en laboratoire dans le cadre de cette étude montrent que les cultivars de blé et d'orge semblent avoir un effet neutre sur le processus de sélection de l'hôte par *P. alienus*, ce qui suggère que la fréquence des inoculations primaires peut être considérée comme similaire entre les différentes variétés implantées.

Une fois introduits dans le champ, les insectes se nourrissent des plantes et ont, pour les individus virulifères, la possibilité de délivrer des particules virales dans l'hôte (Brault *et al.*, 2010). Les particules virales inoculées utilisent les ressources de l'hôte pour démarrer l'infection (Péréfarres *et al.*, 2014 ; Jain *et al.*, 2023). Ainsi, l'efficacité de l'infection de l'hôte (taux d'infection) dépend de la souche/de l'isolat du virus (Chain *et al.*, 2005 ; Péréfarres *et al.*, 2014), de l'espèce végétale/du cultivar (qualité de l'hôte ; Benkovics *et al.*, 2010 ; Souquet *et al.*, 2021) et/ou des stress abiotiques (Yvon *et al.*, 2017). Le suivi du taux d'infection (un indicateur de la qualité de l'hôte) met en évidence les différentes sensibilités des hôtes sensibles au WDV. Associée à la fréquence des inoculations primaires, la réduction des taux d'infection a un impact négatif sur l'intensité de l'introduction de la maladie dans les champs (Jones *et al.*, 2010). De plus, comme cela a été démontré pour de nombreux pathosystèmes, la dynamique de population de l'insecte, qui repose sur la capacité de l'insecte à s'accoupler, à se reproduire, à pondre des œufs et à assurer la viabilité de la descendance, est un facteur essentiel de la propagation des maladies virales transmises par les insectes (Fabre *et al.*, 2003 ; Shaw *et al.*, 2017). Ainsi, toute propriété d'antibiose (impact négatif d'une plante sur les performances des insectes (Dogimont *et al.*, 2010)) d'un cultivar devrait être prise en compte pour



gérer les populations d'insectes vecteurs. Cette étude montre que plusieurs génotypes de blé (par exemple les cvs. Complice, Hyking, Nemo et Filon) réduisent la survie et/ou la fécondité de *P. alienus*, ce qui suggère que ces cultivars réduisent le nombre de vecteurs qui seront disponibles pour accomplir la dissémination secondaire. Enfin, l'efficacité de la propagation secondaire d'une maladie virale dépend de la qualité des plantes en tant que source de virus. La diminution significative de l'efficacité de la transmission observée avec les plantes sources du cv. Filon utilisées 14 jours après l'inoculation illustre les variations possibles de la qualité de l'hôte pour la transmission du virus. Cependant, ce résultat n'est pas associé à une accumulation plus faible de WDV.

Les données présentées ci-dessus tiennent compte de l'effet du génotype hôte sur les paramètres épidémiologiques individuels basés sur les interactions plante-virus ou plante-vecteur. Cette approche a été largement utilisée dans la littérature pour caractériser l'impact des plantes sur plusieurs maladies virales (Ripl *et al.*, 2020 ; Kordan *et al.*, 2021 ; Souquet *et al.*, 2021 ; Pichon *et al.*, 2022 ; Chen *et al.*, 2023). Cependant, l'épidémiologie des maladies virales transmises par les insectes résulte de la combinaison de ces interactions. Une analyse multivariée a été réalisée pour décrire la qualité d'hôte des variétés de blé étudiées. Cette approche a permis de montrer que les cultivars Filon et Boregar présentent une sensibilité réduite à la MPC. En outre, des blés présentant une qualité d'hôte réduite pour le virus (par exemple cv. Solindo CS) ou le vecteur (par exemple cvs. Complice et Hyking) ont été décrits.

Concernant le volet expérimental conduit au champ, un large panel de variété de blé et d'orge inscrites ou non au catalogue français a été étudié. L'interprétation des résultats a été compliquée par la co-infection avec la JNO, une maladie virale transmise par les pucerons et fréquemment observée dans les parcelles de céréales à paille. Cette co-infection a pu interférer avec l'expression des symptômes de la MPC, rendant plus difficile l'évaluation précise des symptômes attribuables uniquement à l'infection par le WDV.

Néanmoins, grâce à un nombre important d'essais répartis sur plusieurs sites et années, il a été possible d'identifier des génotypes d'intérêt de blé et d'orge. De plus, les dispositifs en cages, mis en place à partir de la seconde année du projet, semblent prometteurs, notamment pour l'évaluation variétale du blé. Ils pourraient permettre de caractériser la sensibilité des variétés de blé et d'orge au WDV de manière plus sûre et moins coûteuse. Cependant, ce type de dispositif n'est pas tout à fait exempt de contamination par la JNO, et la date d'introduction des cicadelles dans les cages insect-proof est un facteur déterminant pour assurer la réussite de ce type d'essai. De plus, le faible nombre de plantes de chaque génotype dans ces cages nécessite de multiplier le nombre de cages pour disposer de résultats robustes.

Concernant le blé tendre, la variété Filon se distingue du témoin sensible sur la base des symptômes. Cependant, elle reste nettement plus symptomatique que les variétés de référence Fisht et MV Vekni. D'autres variétés de blé, telles que Agrounia, MV Martina et Mirleben, semblent afficher un comportement proche de celui des référents peu sensibles. Une étude plus approfondie de ces variétés, à l'instar de ce qui a été fait sur le cv. Filon en laboratoire, pourrait permettre d'identifier les caractères responsables de cette moindre sensibilité ainsi que les traits génétiques associés.

En ce qui concerne l'orge, les cultivars Var 01 et Var 02 montrent des résultats prometteurs en termes de réduction des symptômes. Par ailleurs, la variété Amistar, tolérante à la JNO, présente également un bon comportement vis-à-vis de la maladie des pieds chétifs, ouvrant ainsi la voie à un potentiel cumul de tolérances (à la JNO et à la maladie des pieds chétifs).

Alors que la base moléculaire sous-jacente aux phénotypes observés doit à présent être évaluée (identification des QTL ; par exemple Pfrieme *et al.*, 2022), les résultats produits par ce projet pourraient déjà être pris en compte pour les futurs programmes de sélection contre la MPC et/ou pour la mise en place de stratégies de gestion agronomique de cette maladie.

Références bibliographiques

Abt, I., Jacquot, E. (2015). Wheat dwarf., in: Virus Diseases of Tropical and Subtropical Crops, CABI Plant Protection Series. CABI, pp. 27–41.

Abt, I., Souquet, M., Angot, G., Mabon, R., Dallot, S., Thébaud, G., Jacquot, E. (2020). Functional transcomplementation between wheat dwarf virus strains in wheat and barley. *Viruses* 12, 34. <https://doi.org/10.3390/v12010034>

Appala, Raju, Sesha, Mahalakshmi, Sandhya, Rani (2019). Screening of genotypes against cotton leafhopper, *Amarasca devastans* (Cicadellidae: Hemiptera) 7, 861–864.

Aráoz, M.V.C., Jacobi, V.G., Fernandez, P.C., Albarracin, E.L., Virla, E.G., Hill, J.G., Catalán, C. a. N. (2019). Volatiles mediate host-selection in the corn hoppers *Dalbulus maidis* (Hemiptera: Cicadellidae) and *Peregrinus maidis* (Hemiptera: Delphacidae). *Bull. Entomol. Res.* 109, 633–642. <https://doi.org/10.1017/S000748531900004X>

Benkovics, A.H., Vida, G., Nelson, D., Veisz, O., Bedford, I., Silhavy, D., Boulton, M.I. (2010). Partial resistance to Wheat dwarf virus in winter wheat cultivars. *Plant Pathol.* 59, 1144–1151. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02318.x>

Brault, V., Uzest, M., Monsion, B., Jacquot, E., Blanc, S. (2010). Aphids as transport devices for plant viruses. *C. R. Biol.* 333, 524–538. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2010.04.001>

Buerstmayr, M., Buerstmayr, H. (2023). Two major quantitative trait loci control wheat dwarf virus resistance in four related winter wheat populations. *Theor. Appl. Genet.* 136, 103. <https://doi.org/10.1007/s00122-023-04349-3>

Chain, F., Riault, G., Trottet, M., Jacquot, E. (2005). Analysis of accumulation patterns of barley yellow dwarf virus-PAV (BYDV-PAV) in two resistant wheat lines. *Eur. J. Plant Pathol.* 113, 343–355. <https://doi.org/10.1007/s10658-005-7966-7>

Chen, Y.-J., Pandey, S., Catto, M., Leal-Bertioli, S., Abney, M.R., Bag, S., Hopkins, M., Culbreath, A., Srinivasan, R. (2023). Evaluation of wild peanut species and their allotetraploids for resistance against thrips and thrips-transmitted tomato spotted wilt orthotospovirus (TSWV). *Pathogens* 12, 1102. <https://doi.org/10.3390/pathogens12091102>

Clark, M.F., Adams, A.N. (1977). Characteristics of the microplate method of enzyme-linked immunosorbent assay for the detection of plant viruses. *J. Gen. Virol.* 34, 475-483. <https://doi.org/10.1099/0022-1317-34-3-475>

Cooper, J.I., Jones, A.T. (1983). Responses of plants to viruses: proposals for the use of terms. *Phytopathology* 73, 127. <https://doi.org/10.1094/Phyto-73-127>

Derlink, M., Abt, I., Mabon, R., Julian, C., Virant-Doberlet, M., Jacquot, E. (2018). Mating behavior of *Psammotettix alienus* (Hemiptera: Cicadellidae). *Insect Sci.* 25, 148-160. <https://doi.org/10.1111/1744-7917.12379>

Dogimont, C., Bendahmane, A., Chovelon, V., Boissot, N. (2010). Host plant resistance to aphids in cultivated crops: genetic and molecular bases, and interactions with aphid populations. *C. R. Biol., Les pucerons : modèles biologiques et ravageurs des cultures* 333, 566-573. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2010.04.003>

Fabre, F., Dedryver, C.-A., Leterrier, J., Plantegenest, M. (2003). Aphid abundance on cereals in autumn predicts yield losses caused by barley yellow dwarf virus. *Phytopathology* 93, 1217-22. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.2003.93.10.1217>

Gadiou, S., Ripl, J., Jaňourová, B., Jarošová, J., Kundu, J.K. (2012). Real-time PCR assay for the discrimination and quantification of wheat and barley strains of wheat dwarf virus. *Virus Genes* 44, 349-355. <https://doi.org/10.1007/s11262-011-0699-0>

GEVES, (2023). Le catalogue officiel des espèces et variétés de plantes cultivées en France. <https://www.geves.fr/>. URL <https://www.geves.fr/catalogue/> (accessed 9.5.23).

Habekuß, A., Riedel, C., Schliephake, E., & Ordon, F. (2009). Breeding for resistance to insect-transmitted viruses in barley - an emerging challenge due to global warming. *Journal für Kulturpflanzen* 61, 53-61.

Jain, H., Chahal, S., Singh, I., Sain, S., Siwach, P. (2023). The rising threat of geminiviruses: molecular insights into the disease mechanism and mitigation strategies. *Mol. Biol. Rep.* 50, 3835-3848. <https://doi.org/10.1007/s11033-023-08266-y>

Jones, R.A.C., Salam, M.U., Maling, T.J., Diggle, A.J., Thackray, D.J. (2010). Principles of predicting plant virus disease epidemics. *Annu. Rev. Phytopathol.* 48, 179-203. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-073009-114444>

Köklü, G., Ramsell, J.N.E., Kvarnheden, A. (2007). The complete genome sequence for a Turkish isolate of wheat dwarf virus (WDV) from barley confirms the presence of two distinct WDV strains. *Virus Genes* 34, 359-366. <https://doi.org/10.1007/s11262-006-0029-0>

Kordan, B., Wróblewska-Kurdyk, A., Bocianowski, J., Stec, K., Jankowski, K., Gabryś, B. (2021). Variation in susceptibility of rapeseed cultivars to the peach potato aphid. *J. Pest Sci.* 94, 435-449. <https://doi.org/10.1007/s10340-020-01270-2>

Lindblad, M., Sigvald, R. (2004). Temporal spread of wheat dwarf virus and mature plant resistance in winter wheat. *Crop Prot.* 23, 229-234. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2003.08.011>

Lindblad, M., Waern, P. (2002). Correlation of wheat dwarf incidence to winter wheat cultivation practices. *Agric. Ecosyst. Environ.* 92, 115-122. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00302-4)

Macholdt, J., Honermeier, B. (2016). Impact of climate change on cultivar choice: adaptation strategies of farmers and advisors in German cereal production. *Agronomy* 6, 40. <https://doi.org/10.3390/agronomy6030040>

Manurung, B., Witsack, W., Mehner, S., Grüntzig, M., Fuchs, E. (2005). Studies on biology and population dynamics of the leafhopper *Psammotettix alienus* Dahlb. (Homoptera: Auchenorrhyncha) as vector of wheat dwarf virus (WDV) in Saxony-Anhalt, Germany / Zur Biologie und Populationsdynamik der Zwergzikade *Psammotettix alienus* Dahlb. (Homoptera: Auchenorrhyncha) als Vektor des Wheat dwarf virus (WDV) in Sachsen-Anhalt, Deutschland. *Z. Für Pflanzenkrankh. Pflanzenschutz J. Plant Dis. Prot.* 112, 497-507.