

Quels nouveaux leviers pour protéger les légumineuses à graines contre les maladies et les ravageurs?

Moussart A.^{1,4}, Baranger A.^{2,4}, Plessix S.³, Jaloux B.³

¹Terres Inovia, Avenue Lucien Bretignières, F- 78850 Thiverval-Grignon

² INRA UMR IGEPP, Domaine de la Motte, F-35653 Le Rheu

³ Agrocampus Ouest UMR IGEPP, 2 rue André Le Nôtre, F-49045 Angers

⁴ Unité Mixte Technologique INRA-Terres Inovia, Pisom, Domaine de la Motte, F-35653 Le Rheu

Correspondance : a.moussart@terresinovia.fr

Résumé

Le développement des cultures de légumineuses à graines en France et en Europe est limité par l'irrégularité des rendements, due en grande partie aux dommages causés par les maladies et les ravageurs. Cette synthèse a pour but d'identifier les principaux enjeux ainsi que les pistes de recherche et développement à explorer pour améliorer à court et moyen termes le contrôle de ces bioagresseurs. Une meilleure appréciation des risques phytosanitaires actuels et à venir, la gestion des espèces dans le temps et dans l'espace, les associations végétales, le développement des ressources génomiques et des nouvelles méthodes de sélection et l'exploration des solutions de biocontrôle ont été identifiés comme les principaux nouveaux leviers d'action. Ces leviers disponibles ou émergents présentent généralement une efficacité partielle, dépendante des conditions environnementales, et seule leur combinaison raisonnée pourra assurer une protection efficace et durable.

Mots-clés : Maladies, Ravageurs, Protection intégrée des cultures, Protéagineux, Biocontrôle, Cultures associées

Abstract: Which new levers to protect pulse crops from pests and diseases?

Pulse crop development in France and in Europe is hampered by irregular yields mostly due to pest and disease damages. This review aims at identifying the main issues, along with research and development pathways, towards a better control of these pests and diseases in the short and medium terms. A better quantification of present and future sanitary risks, species introduction management in time and space, intercropping, development of genomic resources and breeding methods, and exploration of biocontrol solutions have been identified as the main levers to consider. These levers, already available or emerging, usually present a partial efficacy depending on environmental conditions, and only their reasoned combination will guarantee an efficient and sustainable protection.

Keywords: Diseases, Pests, Integrated management, Pulse crop, Biological control, Intercropping

Introduction

L'insertion des légumineuses à graines dans les systèmes de culture présente de nombreux intérêts agronomiques, environnementaux, et économiques (Schneider et Huyghe, 2015). Le développement de ces cultures se heurte à plusieurs verrous, dont l'irrégularité des rendements, qui tend à décourager les agriculteurs. Cette irrégularité est directement liée aux aléas climatiques, mais résulte aussi en grande

partie de l'impact des maladies et des ravageurs (ultérieurement qualifiés de bioagresseurs, à l'exclusion des adventices, non considérées dans cette synthèse).

Plusieurs types de leviers sont mobilisables pour protéger les légumineuses à graines. Ceux-ci peuvent agir à différentes étapes du cycle du bioagresseur (conservation, dispersion, contamination, multiplication), et être mis en œuvre à différentes échelles spatiales (parcelle, groupes de parcelles ou paysage) et/ou temporelles (itinéraire technique, succession culturale). Certains leviers, prophylactiques, permettent d'agir en amont du déclenchement des épidémies, des pullulations, ou des infestations, en réduisant la taille des populations initiales, voire d'échapper aux attaques en évitant la concordance entre la période favorable à l'installation du bioagresseur et la période de plus forte sensibilité de la culture. D'autres, agissant une fois le bioagresseur présent, consistent à limiter les conditions favorisant son développement, à réduire son temps ou sa surface d'interaction avec la plante hôte, ou à mobiliser des régulations biologiques défavorables au bioagresseur. Les leviers actuels, alternatifs ou complémentaires à la lutte chimique, sont essentiellement cultureux ou génétiques. Ils concernent l'utilisation de semences certifiées saines, le choix des dates et densités de semis, la gestion des résidus de récolte, le travail du sol ou encore l'utilisation de variétés partiellement résistantes (Davidson et Kimber, 2007 ; Davidson et al., 2007 ; Stoddard et al., 2010 ; Mishra et al., 2017 ; Hokkanen et Menzler-Hokkanen, 2018 ; Knodel et Shrestha, 2018). Ces leviers restent essentiels mais leur efficacité est souvent insuffisante en cas de forte pression épidémique ou parasitaire lorsqu'ils sont utilisés individuellement. En complément de ces leviers traditionnels, d'autres approches, en lien notamment avec la diversification et l'augmentation de la biodiversité dans les systèmes, remises au gout du jour ou en cours d'étude, sont susceptibles d'améliorer la lutte contre les maladies et les ravageurs des légumineuses à graines.

1. Evaluer les risques dans un contexte de changements globaux

Protéger efficacement et durablement les légumineuses à graines contre les maladies et les ravageurs nécessite d'analyser au préalable les risques phytosanitaires actuels et à venir, afin de définir des stratégies de prévention et de contrôle adaptées. Les risques liés aux maladies et aux ravageurs varient en effet en fonction de différents éléments du système de culture et du pédoclimat, et peuvent être amenés à évoluer rapidement en nature et en intensité, en particulier dans le contexte actuel de changements globaux. La diversification des systèmes de culture dans le temps et dans l'espace d'une part (avec notamment l'insertion de légumineuses en culture de rente, ou pour des services écosystémiques de soutien ou de régulation), le changement climatique d'autre part, et enfin la réduction programmée ou imposée de l'usage des pesticides (baisse des IFTs recherchée par les plans Ecophyto et retrait d'usage de substances actives) peuvent en effet conduire à une évolution des cortèges et pressions de bioagresseurs.

1.1 Identifier les bioagresseurs présents et émergents

Evaluer au plus juste les risques phytosanitaires commence par l'identification des maladies et des ravageurs présents et émergents à différentes échelles (territoire, exploitation, parcelle), en lien avec le contexte. Plusieurs dispositifs d'épidémiosurveillance ont récemment permis de préciser certains risques actuels. Un récent observatoire en parcelles d'agriculteurs a par exemple mis en évidence que l'ascochytose, considérée jusqu'à présent comme l'une des principales maladies de la féverole en France, était désormais peu fréquente à l'échelle nationale et souvent confondue avec une autre maladie aérienne, le botrytis (Brier et al., 2018). En Charente-Maritime, certains problèmes racinaires observés dans les sols de groies et souvent attribués à l'aphanomyces, principal agent de la pourriture racinaire du pois, sont en fait dus à un nématode, *Heterodera goettingiana*, dont la gestion à l'échelle de la rotation est différente de celle de l'aphanomyces (Moussart, 2017a). Enfin, Luquet et al. (2018),

grâce aux données de captures quotidiennes du réseau de pièges à succion AGRAPHID, ont montré qu'en France la migration des principaux pucerons ravageurs des protéagineux vers les cultures a été avancée en saison au printemps de près de 40 jours en 40 ans, en réponse à l'augmentation des températures hivernales liée au réchauffement climatique, et que l'abondance relative des espèces de pucerons spécialistes des légumineuses fluctuait fortement selon l'évolution des surfaces cultivées en protéagineux à l'échelle régionale. Le maintien, voire le renforcement de ces dispositifs d'épidémiosurveillance est essentiel pour observer les évolutions récentes et prédire les évolutions futures, proposer des méthodes de lutte adaptées à l'échelle de l'itinéraire technique ou de la succession culturale, et de nombreux outils et ressources (méthodes de diagnostic moléculaire, phénotypage haut débit) sont mobilisables pour améliorer leur fiabilité et optimiser leur fonctionnement. Au Canada, les communautés fongiques associées aux nécroses racinaires du pois ont par exemple été précisées grâce au barcoding, une technique récente de taxonomie moléculaire (Taheri et al., 2017). Pour certaines cultures, des applications nomades facilitent la reconnaissance des bioagresseurs et contribuent à l'épidémiosurveillance (Armand et al., 2012). Ce type d'outil numérique appliqué aux légumineuses à graines permettrait de faciliter le diagnostic pour de nombreux acteurs et de renforcer les dispositifs actuels. Des modèles bioclimatiques ont par ailleurs été développés afin de prédire les risques à venir. Le modèle d'Olfert et al. (2012), basé sur les prévisions du GIEC, prédit par exemple un élargissement septentrional de l'aire de répartition de la sitone du pois (*Sitona lineatus*) ainsi que des abondances plus élevées dans l'aire de répartition actuelle de ce ravageur en Amérique du Nord, prévisions déjà confirmées par les observations de terrain. Salam et al. (2011a) ont quant à eux simulé l'impact du changement climatique sur l'évolution des pressions d'ascochytose sur pois dans plusieurs régions d'Australie. Des approches similaires de modélisation permettront d'anticiper les risques à l'échelle nationale et régionale et ainsi d'orienter les efforts de recherche et développement.

1.2 Définir des seuils de risque

L'appréciation des dégâts et dommages directs ou indirects, en lien avec la pression de maladies ou de ravageurs est une autre étape préalable à la mise en place de stratégies de lutte. Un bioagresseur peut en effet être présent sans pour autant être dommageable pour une culture. La définition de seuils de risque et l'explicitation du contexte dans lequel ils sont définis permettent d'apprécier des seuils de tolérance à certaines pressions. Un modèle agro-météorologique simple, Bruchi-LIS®, a par exemple été développé pour optimiser le positionnement d'un traitement contre les bruches du pois et de la féverole, en prenant en compte le bassin de production, la variété cultivée et les dates de semis (Garrabos et al., 2007). Pour d'autres bioagresseurs, le développement de ce type d'outils nécessite encore des études plus précises des facteurs déterminant la dynamique des populations et du lien entre l'abondance et les dégâts. Dans le cas de la sitone du pois et de la féverole par exemple, les adultes sont responsables de dégâts foliaires et les larves de la destruction des nodosités fixatrices d'azote. Les dégâts sur nodosités limitent considérablement la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique, mais la plante peut compenser en puisant l'azote minéral du sol, et les rendements sont souvent peu impactés. La capacité de la légumineuse à fournir un service de restitution de l'azote pour les cultures suivantes pourrait par contre être fortement réduite (Corre-Hellou et Crozat, 2005 ; Cárcamo et al., 2018). Il est difficile de lier l'abondance et l'intensité des dégâts (seul paramètre d'impact facilement observable) de sitones adultes, et l'intensité des dégâts larvaires dans les nodosités (Cantot, 1986 ; Vankosky et al., 2009 ; Cárcamo et al., 2018). Des méthodes modernes comme la tomographie aux rayons X, déjà utilisée pour quantifier les dégâts de bruches sur graines de pois (Trigui et al., 2016) pourrait, appliquée aux nodosités, permettre de préciser ce lien et ainsi de définir des seuils de risque en lien avec l'objectif de production ou de service de la culture. Le développement de pièges attractifs spécifiques combinant la phéromone d'agrégation de la sitone, et des composés volatils produits par la plante hôte pourraient permettre de quantifier les populations adultes et de mieux suivre les mouvements de l'insecte dans l'agroécosystème (Evenden, 2018 ; St Onge et al., 2018). La

combinaison de ces techniques ouvre la voie à la conception d'outils d'aide à la décision. Pour l'aphanomyces du pois, aucune méthode de lutte efficace n'est actuellement disponible mais des seuils de risque ont été définis en fonction du niveau de potentiel infectieux de la parcelle, ce qui permet de conseiller l'agriculteur sur le type de pois (hiver vs printemps) ou l'espèce de légumineuse qu'il est possible de cultiver sans risque dans la parcelle (Moussart et Baranger, 2017). Par ailleurs, plusieurs méthodes de quantification de l'inoculum aérien existent (West et Kimber, 2015) et pourraient être utilisées pour prédire les risques de développement de certaines maladies aériennes des légumineuses. En Australie par exemple, un modèle permet déjà de prédire la sévérité de l'ascochytose du pois en végétation et les pertes de rendement en fonction de la quantité de spores disponibles au semis, ce qui permet d'orienter l'agriculteur vers des stratégies de lutte adaptées (Davidson et al., 2013). Enfin, des modèles de simulation du rendement en fonction de paramètres agronomiques existent pour de nombreuses cultures et sont en voie d'amélioration par la prise en compte des stress biotiques (Donatelli et al., 2017). De tels modèles développés pour les légumineuses à graines permettraient de mieux évaluer l'impact actuel et à venir des maladies et des ravageurs en fonction du contexte de production.

2. Favoriser la diversité et maîtriser son introduction dans les systèmes de culture

2.1 Gérer l'introduction des espèces et variétés dans le temps et dans l'espace

Dans le contexte actuel de diversification et d'introduction des légumineuses dans les systèmes de culture, la gestion des successions dans le temps, via notamment la réduction de la fréquence de retour d'espèces sensibles, et dans l'espace, via des arrangements spatiaux à différentes échelles, doivent permettre de mieux contrôler la taille des populations initiales de pathogènes et de ravageurs. Dans le cas de la pourriture racinaire due à *Aphanomyces euteiches*, principale maladie tellurique du pois, une étude de spécificité d'hôtes a mis en évidence une large variabilité inter et intraspécifique de sensibilité à cette maladie chez différentes espèces de légumineuses cultivées (Moussart et al., 2008). Ceci permet d'adapter le conseil sur la gestion de la succession des cultures (choix des espèces, et choix des variétés au sein des espèces) pour préserver l'état sanitaire de sols *a priori* sains ou peu contaminés, mais aussi pour améliorer l'état sanitaire des sols déjà contaminés (Moussart et al., 2013 ; Moussart, 2017b). La gamme d'hôtes de *Didymella pinodes*, principal agent de l'ascochytose du pois, vis-à-vis des espèces cultivées et sauvages de légumineuses, a également été précisée récemment (Le May et al., 2014 ; Barilli et al., 2016). Cette information ouvre la voie à une gestion différenciée du choix des espèces de légumineuses, à l'échelle de la succession culturale mais aussi à celle du paysage, en fonction de la proximité d'autres parcelles ou d'espèces de légumineuses sauvages également hôtes, susceptibles de multiplier l'agent pathogène. De même, une étude du parasitisme des pucerons à l'échelle de l'agroécosystème a révélé que si les échanges de parasitoïdes entre les compartiments non cultivés et cultivés du paysage étaient plus rares qu'attendus pour la plupart des cultures, *Aphidius ervi*, le principal parasitoïde du puceron du pois, était l'une des espèces les plus partagées entre ces deux compartiments. Ceci permet d'envisager une gestion des bordures de parcelles favorable à cet ennemi naturel et, potentiellement, d'augmenter le parasitisme du puceron du pois dans les cultures de légumineuses (Desrocles et al., 2014). Enfin, il est possible de valoriser les intercultures en choisissant des espèces présentant des propriétés biocides, afin de réduire les populations de bioagresseurs, en particulier les pathogènes telluriques. Plusieurs études ont notamment montré l'intérêt d'introduire des Brassicacées en cultures intermédiaires pour lutter contre certaines maladies racinaires des cultures (Couëdel et al., 2017). Sur légumineuses, Hossain et al. (2015) ont par exemple mis en évidence un effet dépressif de la moutarde blanche sur la pourriture racinaire du pois due à *A. euteiches*. La biofumigation présente une efficacité très variable car elle dépend de nombreux paramètres environnementaux ainsi que de la biologie du pathogène ciblé, mais constitue un levier potentiel non négligeable dans un contexte d'exploration de successions culturales plus diversifiées.

2.2 Favoriser les interactions bénéfiques grâce aux associations végétales

Les associations végétales se développent à nouveau depuis plusieurs années dans le but de fournir un ensemble varié de services, dont la gestion raisonnée de l'azote lorsqu'elles comportent une légumineuse. Elles peuvent également constituer un levier efficace pour limiter les dégâts et dommages causés par les pathogènes et les ravageurs sur légumineuses à graines. Elles jouent en particulier sur la taille des populations initiales, sur des phénomènes d'échappement et sur la limitation des conditions favorables au développement et à la dispersion de ces bioagresseurs (Boudreau, 2013).

L'association de deux espèces comme le blé et le pois peut ainsi modifier la disponibilité de l'inoculum de *D. pinodes* en réduisant la dispersion des spores au sein du couvert (Schoeny et al., 2010), et limiter par ailleurs la contamination et l'évolution des épidémies d'ascochytose en créant un microclimat défavorable dans le couvert (Schoeny et al., 2010 ; Jumel et al., 2017). De même, le puceron vert est souvent moins abondant lorsque le pois est en association avec une céréale. Ceci est expliqué par une concentration en ressource plus faible, limitant le développement du puceron, et/ou par une modification de l'environnement sensoriel, les pucerons ayant plus de mal à distinguer leur plantes hôtes dans un couvert végétal diversifié (Ndzana et al., 2014). Les associations peuvent également constituer un habitat plus diversifié pour les ennemis naturels des ravageurs. Elles peuvent fournir des ressources supplémentaires (hôtes et proies alternatives) ou complémentaires (nectar, pollen, abris) à certaines espèces. Le parasitoïde de pucerons des céréales et des légumineuses, *Aphidius ervi*, apprend par exemple l'odeur du complexe plante-pucerons d'origine avant d'émerger de son puceron-hôte pour le rechercher préférentiellement une fois adulte (Gutierrez-Ibañez et al., 2007 ; Takemoto et al., 2009, 2012). L'environnement olfactif plus complexe en association pourrait limiter le phénomène de fidélité à l'hôte et permettre des échanges plus importants de parasitoïdes au sein de la parcelle entre la céréale et la légumineuse associée. Enfin, les associations peuvent également avoir un impact sur les populations de prédateurs généralistes. Alors que les cultures de féverole pure hébergent une communauté de carabes abondante mais assez peu diversifiée et dominée par quelques espèces de taille moyenne, l'association céréale-féverole supporte une communauté plus diversifiée où les petites espèces, notamment celles prédatrices d'œufs de sitones, sont plus représentées (Vankosky et al., 2011 ; Albert et al., 2017). La prédation par les carabes des œufs de sitones, mais aussi de stades juvéniles d'autres phytophages, pourrait donc être plus importante en association. En outre, l'accessibilité au nectar floral produit par certaines légumineuses est limitée aux pollinisateurs apiformes, en raison de la complexité de la corolle papilionacée et les ennemis naturels, dont beaucoup dépendent de ressources en nectar, n'y ont donc généralement pas accès. Le nectar extrafloral de certaines légumineuses comme la féverole est lui accessible aux ennemis naturels, mais n'est pas aussi attractif que les fleurs colorées pour les insectes floricoles. La phacélie, cultivée en association avec la féverole, permet d'attirer les syrphes ce qui a pour conséquence une réduction des populations d'*Aphis fabae* par rapport à une culture pure (Wojciechowicz-Żytka et Wnuk, 2012).

Quels que soient les processus associés, l'efficacité d'une association dans le contrôle des maladies et des ravageurs est toutefois variable car elle dépend de nombreux facteurs. La nature des espèces associées semble par exemple déterminante. Ainsi, la sévérité de l'ascochytose sur pois d'hiver est significativement réduite lorsqu'il est cultivé en associations bimodales avec des céréales (orge, avoine, triticale, blé dur) ou de la féverole, mais cet effet est beaucoup plus marqué avec le triticale et la féverole qu'avec les autres espèces (Fernandez-Aparicio et al., 2010). L'efficacité du contrôle dépend également des modes d'association : la sévérité de l'ascochytose sur pois d'hiver associé à du blé dur est réduite par rapport à celle observée sur du pois d'hiver cultivé en pur, dans le cas d'associations substitutives, mais pas dans le cas d'associations additives dans lesquelles la biomasse globale du couvert est trop importante (Bedoussac, 2009). L'efficacité du contrôle peut par ailleurs être modulée par le stade et l'état de développement de la culture. Ainsi la baisse significative de la sévérité du botrytis lorsque la féverole est cultivée en association avec des céréales (orge et avoine) a été mise en évidence essentiellement à partir de la floraison, et l'effet suppressif est d'autant plus marqué que la

féverole est courte (Fernández-Aparicio et al., 2011). Enfin, l'association peut dans certains cas constituer un facteur aggravant. Ainsi les dégâts foliaires produits par les sitones adultes sont aussi (Hurej et al., 2013), voire plus (Corre-Hellou et Crozat, 2005 ; Corre-Hellou et al., 2014) élevés en culture associée céréales-légumineuses qu'en culture pure de légumineuses, probablement en raison d'une concentration de la population d'adultes sur un nombre plus faible de plantes hôtes. La compréhension des mécanismes et l'identification des combinaisons et modes d'association les plus favorables sont donc essentielles pour améliorer la lutte contre les maladies et ravageurs.

3. Exploiter le levier génétique

3.1 Variabilité pour la résistance

L'organisation de l'accès aux collections de ressources génétiques, le développement des ressources génomiques et l'émergence de nouvelles méthodes de sélection chez les légumineuses ont permis des avancées significatives ces dernières années. De nouvelles sources de résistance à certaines maladies ainsi que les déterminants génétiques contrôlant ces résistances ont été identifiés, par exemple pour l'ascochytose, la rouille et le botrytis de la féverole (Torres et al., 2010 ; Maalouf et al., 2016), l'ascochytose du pois chiche (Bouhadida et al., 2016) et de la lentille (Sudheesh et al., 2016), l'ascochytose et la pourriture racinaire du pois (Pilet-Nayel et al., 2014). Des sources de résistance et les mécanismes associés ont été identifiés vis-à-vis de plusieurs ravageurs, dont des bruches (Kaniuczak, 2004 ; Szafirowska, 2012 ; Mishra et al., 2017 ; Aznar-Fernandez et al., 2018 ; Reddy et al., 2018) et des sitones (Wojciechowicz-Zytko et Mlynarczyk, 2002 ; Magnin-Robert et al., 2018) chez plusieurs espèces de légumineuses. Le développement récent de marqueurs SNP, notamment à partir d'opérations de séquençage haut débit, a permis de densifier les cartes génétiques de plusieurs espèces et de préciser la localisation sur ces cartes de marqueurs aux gènes ou QTL de résistance, comme pour l'ascochytose de la féverole (Kaur et al., 2014 ; Ocaña-Moral et al., 2017) ou les principales maladies (pourriture racinaire et ascochytose) du pois (Boutet et al., 2016 ; Lavaud et al., 2015, 2016). Plusieurs programmes de Sélection Assistée par Marqueurs, visant à introgresser ces gènes ou QTL de résistance dans des variétés d'intérêt agronomique, ont été mis en place chez la féverole (Torres et al., 2010), le pois (Lavaud et al., 2015) ou encore le pois chiche (Varshney et al., 2014 ; Pratap et al., 2017). Le développement des SNP a également permis l'analyse de la variabilité génétique disponible par génétique d'association (Desgroux et al., 2016 ; Cartelier et al., 2016). Qu'elle repose sur des analyses de liaison ou d'association, la description précise des haplotypes (successions d'allèles aux marqueurs liés) pour les facteurs génétiques de résistance portés par les variétés ou les lignées de sélection récentes permet de diagnostiquer les allèles déjà présents dans ces génotypes, et de les relier à leur niveau de résistance. C'est là une première étape pour orienter de nouveaux croisements et la sélection vers un cumul ciblé d'allèles favorables à un voire à plusieurs bioagresseurs, avec pour objectif d'améliorer l'efficacité et la durabilité des résistances (Lavaud et al., 2018). La mise en place de nouveaux types de croisements multisources pour créer des populations larges (NAM, MAGIC) d'une part, et l'émergence de nouvelles méthodes de sélection génomique s'affranchissant des traditionnels *back-cross* d'autre part, promettent à moyen terme une révolution dans la prise en compte conjointe de résistances à plusieurs maladies et ravageurs, associées au maintien d'un ensemble d'autres traits assurant l'acceptabilité agronomique des produits de la sélection.

3.2 Variabilité pour des caractères morphologiques ou physiologiques

En complément de la variabilité génétique pour la résistance, il est possible d'exploiter la variabilité pour des caractères morphologiques, physiologiques ou encore phénologiques afin de lutter contre les maladies et les ravageurs. Dans le cas du pois, les épidémies d'ascochytose sont modulées par l'architecture de la plante et du couvert (Le May et al., 2009 ; Tivoli et al., 2013). La sévérité de la

maladie est en effet plus faible pour les variétés hautes, à entre-nœuds longs et petites stipules, car elles permettent d'obtenir un couvert plus aéré créant ainsi un microclimat (Richard et al., 2013) ou un gradient de sénescence du couvert (Richard et al., 2012) moins favorables à la maladie. Certaines variétés récentes de pois de printemps présentent ces caractéristiques et des essais au champ ont montré un développement moins important de la maladie sur ces variétés que sur des variétés anciennes à forte densité de surface foliaire (Moussart et al., 2016). Desgroux et al. (2018) ont par ailleurs mis en évidence chez le pois des caractères d'architecture racinaire associés à un moindre développement de la pourriture racinaire. Pour certaines espèces, comme le pois par exemple, les sélectionneurs sont donc désormais proches de disposer des ressources et outils pour combiner facteurs génétiques de résistance et d'architecture afin d'améliorer le comportement de la plante face aux principales maladies (Cartelier et al., 2016 ; Desgroux et al., 2016 ; 2018). La production de nectar extrafloral chez de nombreuses espèces de légumineuses dont la féverole (Heil, 2015), permet d'attirer et de retenir sur la parcelle de nombreux ennemis naturels des ravageurs, et d'augmenter leur longévité et leur fécondité, comme pour les parasitoïdes (Jamont et al., 2013, 2014). Ce trait a été longtemps ignoré et sa prise en compte en sélection constitue une voie prometteuse pour lutter contre certains ravageurs. Le lupin bleu, *Lupinus angustifolius*, produit naturellement de fortes quantités d'alcaloïdes pour se défendre contre les phytophages et seules les espèces spécialisées les tolèrent (Cardoza et al., 2006 ; Philippi et al., 2015). La sélection de variétés pauvres en alcaloïdes, pour une meilleure utilisation en alimentation animale et humaine s'est accompagnée d'une augmentation de la pression en pucerons, avec des espèces non spécialistes désormais capables de se développer sur ces variétés. La recherche de variétés produisant de fortes concentrations d'alcaloïdes au niveau de la tige où s'alimentent les pucerons, mais moins fortes dans les graines pourrait permettre de mieux exploiter les défenses naturelles de la plante (Philippi et al., 2015, 2016). Enfin, l'épaisseur de la cire cuticulaire, la densité en trichomes chez la féverole ou l'épaisseur de la feuille chez le pois semblent être impliqués dans l'appétence de la variété pour les sitones adultes ou les pucerons *Acyrtosiphon pisum* et pourraient constituer des pistes de sélection (Chang et al., 2004 ; Vankosky et al., 2009 ; Cárcamo et al., 2018 ; Gavloski, 2018).

4. Développer le biocontrôle

Contre les ravageurs, toutes les voies de biocontrôle sont explorées, macroorganismes, microorganismes, médiateurs chimiques et substances naturelles. En zone tempérée, des lâchers inoculatifs du parasitoïde *Aphidius ervi* tôt en saison ont été envisagés pour limiter la population précoce de fondatrices d'*Acyrtosiphon pisum* avant leur dispersion sur la parcelle et leur pullulation (He et al., 2005). Cette piste n'a pas été poursuivie, les cultures en plein champ sur de grandes surfaces étant peu propices à ce type de stratégie. Plusieurs programmes d'introduction ou de lâchers systématiques de Trichogrammes oophages sont développés pour lutter contre la bruche du pois *Bruchus pisorum* dans différentes régions du globe, avec des efficacités de régulation parfois élevées (Reddy et al., 2018). Des études d'écologie chimique ont permis d'identifier des substances kairomonales associées au stade fleur et gousse de la féverole et attractives pour la bruche *Bruchus ruffimanus* (Leppik et al., 2014), ouvrant la voie au développement de solutions de suivi, de piégeage de masse ou de manipulation de l'environnement olfactif de la parcelle via l'agencement de plantes attractives et répulsives dans une approche *push-pull*. L'utilisation de microorganismes est à l'étude également, avec l'utilisation d'une souche de *Bacillus thuringiensis* contre la bruche en cours de stockage (Malaikozhundan et Vinodhini, 2018), ou le criblage de plusieurs espèces de bactéries entomopathogènes contre le puceron de pois, *Acyrtosiphon pisum* (Seye et al., 2014). La sensibilité des larves de sitone aux champignons entomopathogènes ou aux nématodes entomoparasites ouvre la voie à des stratégies de lutte biologique par conservation pour augmenter le potentiel suppressif du sol (Hokkanen et Manzler-Hokkanen, 2018). Enfin, une littérature importante est consacrée à l'utilisation d'extraits végétaux ou d'huiles essentielles principalement contre les bruches en stockage (Regnault-

Roger, 2011 ; Mishra et al., 2017 ; Reddy et al., 2018). Quelques exemples existent également en culture avec l'utilisation d'huile essentielle d'ail contre le puceron *Aphis craccivora* (Ahmed et al., 2007) ou d'extraits de sauge (Binias et al., 2016), d'absinthe (Rusin et al., 2016), de fenouil ou de coriandre (Gospodarek et al., 2011) contre la sitone du pois *Sitona lineatus*. Dans le cas des maladies des légumineuses, les études concernent principalement l'utilisation de micro-organismes qui peuvent assurer aux plantes une protection contre certains agents pathogènes, à travers différents mécanismes : la compétition pour les nutriments, l'activité antagoniste vis-à-vis de ces pathogènes ou encore la capacité à stimuler des systèmes de défense chez la plante hôte ou à accroître sa vigueur (Wille et al., 2018). Plusieurs études ont mis en évidence le rôle potentiel des champignons du genre *Trichoderma* comme agents de biocontrôle pour limiter les maladies racinaires dues à des champignons des genres *Rhizoctonia*, *Fusarium* ou *Sclerotinia* (Mishra et al., 2018). Le taux de mortalité de lentilles cultivées en serre dans un sol contaminé par *Fusarium oxysporum* peut par exemple être réduit de 33%, en inoculant préalablement à la culture ce sol avec *Trichoderma hamatum* (El Hassan et al., 2013). Mbazia et al. (2016) recommandent également l'utilisation de souches de *Trichoderma* pour lutter au champ contre le botrytis de la féverole. Des essais récents, menés en serre, ont permis de mettre en évidence l'efficacité de bactéries endophytes pour réduire les nécroses racinaires de la féverole dues à *Fusarium solani* (Bahroun et al., 2018). Quelques études concernent également l'utilisation de substances naturelles pour lutter contre les maladies. Ainsi, des essais au champ ont permis de mettre en évidence l'efficacité d'huiles essentielles de citronnelle, de thym et de menthe, utilisées en enrobage de semences, pour lutter contre les maladies racinaires de la féverole (El-Mougy et al., 2015).

Le développement de solutions de biocontrôle a été plus lent et plus limité chez les légumineuses à graines que chez d'autres cultures (comme les cultures sous abris), en raison notamment du mode de production en plein champ (conditions dans lesquelles ces solutions sont plus complexes à mettre en œuvre) et de la forte biodiversité naturellement associée à ces cultures. La diminution des solutions chimiques impose désormais d'explorer ces pistes (Verjux et al., 2018), et le biocontrôle constitue actuellement un thème de recherche important, notamment avec l'impulsion donnée par Écophyto 2018 (Herth, 2011). De nombreux travaux portent ainsi sur la compréhension des mécanismes d'action de certains produits de bio-contrôle et les conditions régissant leur efficacité. La recherche sur le biocontrôle s'est par ailleurs structurée, avec le Réseau Mixte Technologique 'Elicitra' (https://www.elicitra.org/index.php?rub=presentation_du_rmt_elicitra) qui s'intéresse aux Stimulateurs de Défense des Plantes ou encore le consortium 'biocontrôle' lancé en 2016, dont l'ambition est de favoriser et soutenir l'usage du biocontrôle en France (<https://www6.inra.fr/consortium-biocontrole/>).

5. Cumuler les leviers disponibles pour une protection efficace et durable

Les leviers disponibles ou en cours d'étude pour lutter contre les bioagresseurs des légumineuses à graines ont une efficacité partielle, et sont le plus souvent utilisés ou testés individuellement. Or, seule leur combinaison, par effets complémentaires ou additifs, peut assurer une protection efficace et durable. En Australie, la lutte contre les ascochytozes du pois (*D. pinodes*), du pois chiche (*A. rabiei*) ou de la lentille (*A. lentis*) est désormais basée sur un cumul de mesures préventives (respect des distances entre parcelles, fréquence de retour de l'hôte dans la parcelle, gestion des résidus, état sanitaire des semences, date de semis) et curatives (lutte chimique) (Davidson et Kimber, 2007). Des outils d'aide à la décision sont par ailleurs en cours d'étude ou d'élaboration pour guider les agriculteurs dans leurs choix et ainsi optimiser la gestion des risques. Le modèle développé par Salam et al. (2011b) permet par exemple de conseiller chaque année l'agriculteur sur la date de semis optimale du pois en fonction de la quantité de spores de *D. pinodes* disponibles. En France, la lutte contre l'aphanomyces du pois repose sur une combinaison de solutions à efficacités partielles (Moussart et Baranger, 2017). L'efficacité et la durabilité des variétés partiellement résistantes qui seront inscrites seront conditionnées par l'intégration de ces variétés dans une stratégie globale de gestion du risque. Concernant les ravageurs, Smart et al. (1994) ont décrit plusieurs composants d'un système *push-pull*

pour limiter la colonisation des parcelles par *S. lineatus*, combinant i) la phéromone d'agrégation produite par les mâles ainsi qu'un répulsif tel que l'huile d'*Azadirachta indica*, pour éloigner les sitones de la culture ; ii) une culture piège vers laquelle les sitones sont attirées par la phéromone ; et iii) un insecticide appliqué sur la culture piège pour réduire la population de sitones. Cette méthode est considérée comme l'une des plus prometteuses pour réduire la colonisation par les sitones adultes (Vankosky et al., 2009). Un semis précoce d'une variété de printemps de féverole en bordure de champ pourrait par ailleurs constituer une culture piège efficace (Cárcamo et Vankosky, 2011). L'adoption de combinaisons de méthodes alternatives partiellement efficaces est toutefois souvent conditionnée à la sélection préalable de variétés moins sensibles. Pour les bruches par exemple, la sélection de variétés résistantes en cours chez plusieurs espèces de légumineuses pourrait permettre de réduire l'utilisation d'insecticides, de préserver les ennemis naturels et in fine d'assurer un contrôle biologique plus efficace (Mishra et al., 2017).

Conclusion

La diversification à l'échelle de la parcelle ou du paysage, mais aussi des pratiques culturales, rend l'ensemble des interactions entre plantes (au sein des espèces ou entre espèces), entre bioagresseurs et autres organismes associés, et entre plantes et bioagresseurs, plus complexes et délicates à maîtriser. Une meilleure connaissance de cette complexité ouvre néanmoins le champ des possibles pour une meilleure protection des légumineuses à graines. De nouvelles approches ou des évolutions d'approches existantes combinant plusieurs leviers à efficacité partielle et ciblant plusieurs phases du cycle des pathogènes ou des ravageurs peuvent permettre de renouveler et de compléter les stratégies classiques de gestion de ces bioagresseurs des légumineuses à graines (Figure 1).

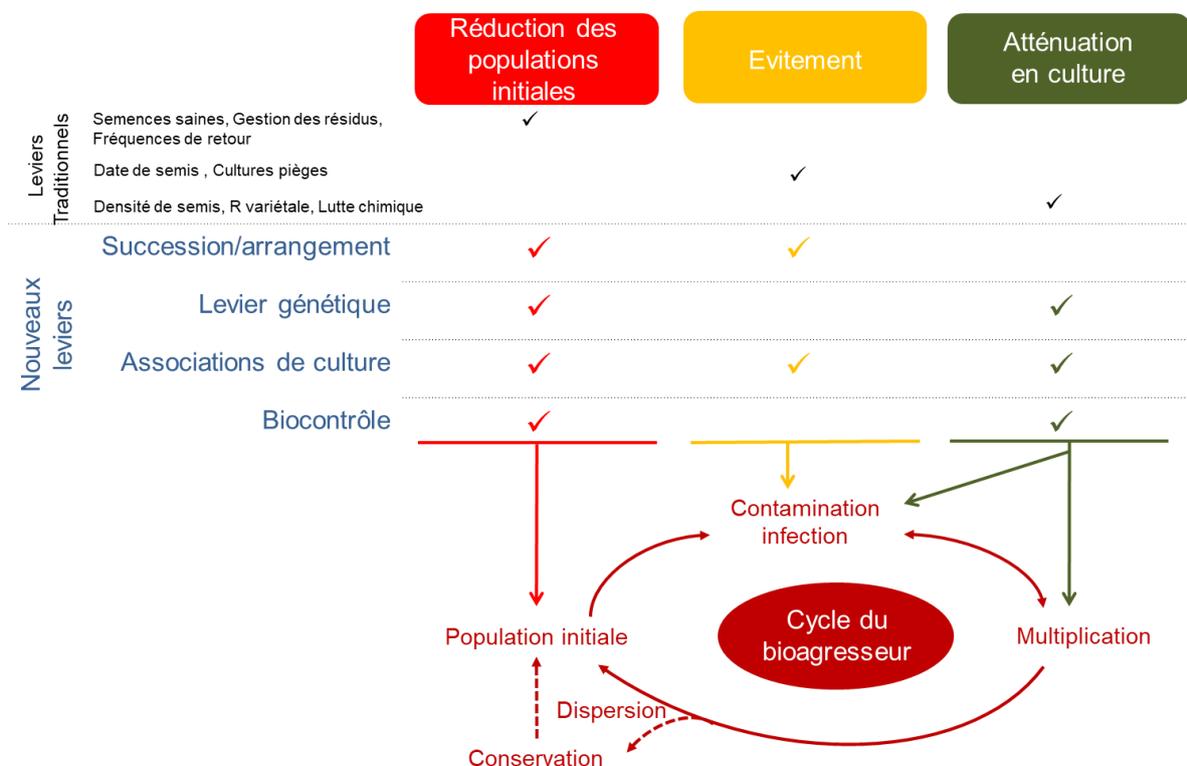


Figure 1 : Positionnement des différents leviers de gestion des maladies et ravageurs des légumineuses à graines (adapté d'après Guide STEPHY, 2011).

La maîtrise de l'introduction de la diversité agit sur la réduction des populations initiales et peut permettre des stratégies d'évitement. Le levier génétique peut jouer sur les conditions de développement des maladies et des ravageurs comme sur l'inoculum primaire. Les associations peuvent être mobilisées pour différentes stratégies, et le biocontrôle peut réduire la colonisation des cultures ou agir sur la régulation. L'étude des impacts directs et indirects de chacun de ces leviers sur les autres fonctions du système devient alors essentielle pour définir les combinaisons les plus pertinentes dans chaque contexte et pour le piloter efficacement. Le choix et la priorisation des différents leviers à combiner doit notamment tenir compte des contraintes du bassin de production et de l'exploitation, et des conditions pédoclimatiques de la parcelle. Les risques combinés et hiérarchisés liés à différents bioagresseurs, potentiellement actifs conjointement ou successivement lors d'une culture doivent également être considérés. Enfin, le choix de leviers à combiner doit se faire en maintenant les impératifs de contrôle des stress abiotiques et l'objectif final de rendement et de qualité de la production.

Les leviers traditionnels ont été développés grâce à la connaissance approfondie du cycle d'un bioagresseur, l'identification de phases sensibles ou critiques, et une approche consistant à développer des moyens d'action indépendants pour limiter la réalisation d'une phase précise de ce cycle. Les nouveaux leviers décrits dans cette synthèse agissent tous sur plusieurs étapes du cycle et interviennent dans les différentes stratégies de gestion.

Remerciements: Certains travaux décrits ont été menés dans le cadre du projet européen inter-régional Bretagne-Pays de Loire PROGRALIVE (FEADER-PEI Bretagne, 2016-2019).

Références bibliographiques

- Ahmed A.A.I., El-Salam A.M.E.A., El-Hawary F.M.A., 2007. Persistence and biological activity of mint and garlic oils against the cowpea aphid, *Aphis craccivora* Koch. (Homoptera: Aphididae). Egyptian Journal of Pest Control 17, 29–33.
- Albert L., Chenu E., Luquet M., Moschard M., Blanco A., Jaloux B., 2017. Study of the ground beetle (Coleoptera: Carabidae) community and their predation potential of *Sitona lineatus* (Coleoptera: Curculionidae) in faba bean fields and cereal-faba bean intercrops. 18th European Carabidologist Meeting, Rennes.
- Armand J.M., Ohayon M., Chamont S., Blancard D., 2012. DiPlant et VigiPI@nt: de nouveaux outils INRA de diagnostic/conseil et d'épidémiosurveillance en protection des plantes. 10^{ème} Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes, Tours.
- Aznar-Fernández T., Carillo-Perdomo E., Flores F., Rubiales D., 2018. Identification and multi-environment validation of resistance to pea weevil (*Bruchus pisorum*) in *Pisum* germplasm. Journal of Pest Science 91, 505-514.
- Bahroun A., Jousset A., Mhamdia R., Mrabeta M., Mhadhbi H., 2018. Anti-fungal activity of bacterial endophytes associated with legumes against *Fusarium solani*: Assessment of fungi soil suppressiveness and plant protection induction. Applied Soil Ecology 124, 131-140.
- Barilli E., Cobos M.J., Rubiales D., 2016. Clarification on host range of *Didymella pinodes* the causal agent of pea Ascochyta blight. Frontiers in Plant Science 7, 592.
- Bedoussac L., 2009. Analyse du fonctionnement des performances des associations blé dur-pois d'hiver et blé dur-féverole d'hiver pour la conception d'itinéraires techniques adaptés à différents objectifs de production en systèmes bas-intrants. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France.
- Biniaś B., Gospodarek J., Rusin M., 2016. Effect of sage water extracts on reduction of feeding of pea leaf weevil. Journal of Ecological Engineering 17, 157–162.
- Boudreau M.A., 2013. Diseases in Intercropping Systems. Annual Review of Phytopathology 51, 499–519.

- Bouhadida M., Beji M., Chen W., Kharrat M., 2016. Breeding chickpea for resistance to *Ascochyta* blight in Tunisia. IV International *Ascochyta* Workshop. Tróia, Portugal.
- Boutet G., Alves Carvalho S., Falque M., Peterlongo P., Lhuillier E., Bouchez O., Lavaud C., Pilet-Nayel M.L., Rivière N., Baranger A., 2016. SNP discovery and genetic mapping using genotyping by sequencing of whole genome genomic DNA from a pea RIL population. *BMC genomics* 17, 121.
- Brier C., Baranger A., Moussart A., 2018. Observatoire des maladies de la féverole en Bretagne-Pays de Loire. Colloque 'Vers des systèmes de culture agroécologiques pour une réduction des intrants de synthèse'. Agrocampus Ouest, Rennes.
- Cantot P., 1986. Quantification des populations de *Sitona lineatus* L. et de leurs attaques sur pois protéagineux (*Pisum sativum* L.). *Agronomie* 6, 481-486.
- Cárcamo H., Vankosky M., 2011. Managing the pea leaf weevil in field peas. *Prairie Soils and Crops Journal* 4, 77–85.
- Cárcamo H., Vankosky M., Wijerathna A., Olfert O.O., Meers S.B., Evenden M.L., 2018. Progress toward integrated pest management of pea leaf weevil: A review. *Annals of the Entomological Society of America* 111, 144–153.
- Cardoza Y.J., Wang S.F., Reidy-Crofts J., Edwards O.R., 2006. Phloem alkaloid tolerance allows feeding on resistant *Lupinus angustifolius* by the aphid *Myzus persicae*. *Journal of Chemical Ecology* 32, 1965-1976.
- Cartelier K., Miteul H., Boutet G., Aubert G., Burstin J., Pilet-Nayel M.L., Rivière J.P., Vetel P., Baranger A., 2016. Association mapping of partial resistance to *Didymella pinodes* and architectural traits in pea. IV International *Ascochyta* Workshop, Troia, Portugal.
- Chang G.C., Rutledge C.E., Biggam R.C., Eigenbrode S.D., 2004. Arthropod diversity in peas with normal or reduced waxy bloom. *Journal of Insect Science* 4, 18.
- Corre-Hellou G., Crozat Y., 2005. N₂ fixation and N supply in organic pea (*Pisum sativum* L.) cropping systems as affected by weeds and pea weevil (*Sitona lineatus* L.). *European Journal of Agronomy* 22, 449-458.
- Corre-Hellou G., Baranger A., Bedoussac L., Cassagne N., Cannavacciuolo M., Joëlle J., Pelzer E., Piva G., 2014. Interactions entre facteurs biotiques et fonctionnement des associations végétales. *Innovations Agronomiques* 40, 25–42.
- Couëdel A., Seassau C., Wirth J., Alletto L., 2017. Potentiels de régulation biotique par allélopathie et biofumigation; services et dis-services produits par les cultures intermédiaires multiservices de crucifères. *Innovations Agronomiques* 62, 1-15.
- Davidson J.A., Kimber R.B.E., 2007. Integrated disease management of *ascochyta* blight in pulse crops. *European Journal of Plant Pathology* 119, 99-110.
- Davidson J.A., Pande S., Bretag T.W., Lindbeck K.D., Krishna-Kishore G., 2007. Biology and Management of *Botrytis* spp. in Legume Crops. In: Elad Y., Williamson B., Tudzynski P., Delen N. (Eds) *Botrytis: Biology, Pathology and Control*. Springer, Dordrecht.
- Davidson J.A., Wilmshurst C.J., Scott E.S., Salam M.U., 2013. Relationship between *ascochyta* blight on field pea (*Pisum sativum*) and spore release patterns of *Didymella pinodes* and other causal agents of *ascochyta* blight. *Plant Pathology* 62, 1258–1270.
- Desgroux A., Baudais V., Aubert V., Le Roy G., de Larambergue H., Miteul H., Aubert G., Boutet G., Duc G., Baranger A., Burstin J., Manzanares-Dauleux M., Pilet-Nayel M.L., Bourion V., 2018. Comparative genome-wide-association mapping identifies common loci controlling root system architecture and resistance to *Aphanomyces euteiches* in pea. *Frontiers in Plant Science* 8, 2195.
- Desgroux A., L'Anthoëne V., Roux-Duparque M., Rivière J.P., Aubert G., Tayeh N., Moussart A., Mangin P., Vetel P., Piriou C., McGee R.J., Coyne C.J., Burstin J., Baranger A., Manzanares-Dauleux M., Bourion V., Pilet-Nayel M.L., 2016. Genome-wide association mapping of partial resistance to *Aphanomyces euteiches* in pea. *BMC Genomics* 17,124.
- Desrocles S.A.P., Le Ralec A., Besson M.M., Maret M., Walton A., Evans D.M., Plantegenest M., 2014. Molecular analysis reveals high compartmentalization in aphid–primary parasitoid networks and low parasitoid sharing between crop and noncrop habitats. *Molecular Ecology* 23, 3900-3911.

- Donatelli M., Magarey R.D., Bregaglio S., Willocquet L., Whish J.P.M., Savary S., 2017. Modelling the impacts of pests and diseases on agricultural systems. *Agricultural Systems* 155, 213-224.
- El Hassan S.A, Gowen S.R., Pembroke B., 2013. Use of *Trichoderma hamatum* for biocontrol of lentil vascular wilt disease: efficacy, mechanisms of interaction and future prospects. *Journal of Plant Protection Research* 53, 12-26.
- El-Mougy N.S., Shaban A.M.H., Abdel-Kader M.M., 2015. Evaluation of seed coating with some essential oils and bio-agents against root rot disease of faba bean. *International Journal of Engineering and Innovative Technology* 4, 244-248.
- Evenden M.L., 2018. Semiochemical-Based management of the pea leaf weevil (Coleoptera: Curculionidae). *Annals of the Entomological Society of America* 111, 154–160.
- Fernández-Aparicio M., Amri M., Kharrat M., Rubiales D., 2010. Intercropping reduces *Mycosphaerella pinodes* severity and delays upward progress on the pea plant. *Crop Protection* 29, 744-750.
- Fernández-Aparicio M., Shtayac M.J.Y, Emerand A.A., Allaguie M.B., Kharrat M., Rubiales D., 2011. Effects of crop mixtures on chocolate spot development on faba bean grown in mediterranean climates. *Crop Protection* 30, 1015-1023.
- Garrabos P., Bouttet D., Hémet A., 2007. Contre la bruche, intervenir au bon moment. *Perspectives Agricoles* 330, 61-63.
- Gavloski J., 2018. Integrated management of sap feeding insects of pulse crops. *Annals of the Entomological Society of America* 111, 184–194.
- Gospodarek J., Glen K., and Boliglowa E., 2011. The effect of broad bean cultivar Windsor Bialy intercropping with selected herbs on *Sitona* sp. beetles feeding. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* 56, 117-121.
- Guide STEPHY, 2011. Guide pratique pour la conception de systèmes de cultures plus économes en produits phytosanitaires. En ligne :<https://agriculture.gouv.fr/guide-pratique-pour-la-conception-de-systemes-de-culture-plus-economes-en-produits-phytosanitaires>.
- Gutierrez-Ibañez C., Villagra C.A., Niemeyer H.M., 2007. Pre-pupation behaviour of the aphid parasitoid *Aphidius ervi* (Haliday) and its consequences for pre-imaginal learning. *Naturwissenschaften* 94, 595–600.
- He X.Z., Wang Q., Teulon D.A.J., 2005. The effect of parasitism by *Aphidius ervi* on development and reproduction of the pea aphid, *Acyrtosiphon pisum*. *New Zealand Plant Protection* 58, 202-207.
- Heil M., 2015. Extrafloral nectar at the plant-insect interface: A spotlight on chemical ecology, phenotypic plasticity, and food webs. *Annual Review of Entomology* 60, 213–232.
- Herth A., 2011. Le bio-contrôle pour la protection des cultures : 15 recommandations pour soutenir les technologies vertes. Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche, de la ruralité et de l'aménagement du territoire. France.
- Hokkanen H.M.T., Menzler-Hokkanen I., 2018. Insect pest suppressive soils: buffering pulse cropping systems against outbreaks of *Sitona* weevils. *Annals of the Entomological Society of America* 111, 139–143.
- Hossain S., Bergkvist G., Glinwood R., Berglund K., Mårtensson A., Hallin S., Persson P., 2015. Brassicaceae cover crops reduce *Aphanomyces* pea root rot without suppressing genetic potential of microbial nitrogen cycling. *Plant Soil* 392, 227–238.
- Hurej M., Twardowski J.P., Kozak M., 2013. Weevil (Coleoptera: Curculionidae) assemblages in the fields of narrow-leafed lupin sown as pure stand and intercropped with spring triticale. *Žemdirbyste-Agriculture* 100, 393–400.
- Jamont M., Crépellière S., Jaloux B., 2013. Effect of extrafloral nectar provisioning on the performance of the adult parasitoid *Diaeretiella rapae*. *Biological Control* 65, 271-277.
- Jamont M., Dubois-Pot C., Jaloux B., 2014. Nectar provisioning close to host patches increases parasitoid recruitment, retention and host parasitism. *Basic and Applied Ecology* 15, 151-160.

- Jumel S., Langrume C., Moussart A., Baranger A., 2017. Assembling rules for the control of Ascochyta blight in winter wheat-pea mixtures. Eucarpia Symposium on Breeding for Diversification, University of Kassel, Witzenhausen, Germany.
- Kaniuczak Z., 2004. Seed damage of field bean (*Vicia faba* L. var. Minor Harz.) caused by bean weevils (*Bruchus rufimanus* Boh.)(Coleoptera: Bruchidae). Journal of Plant Protection Research 44, 125–129.
- Kaur S., Kimber R.B.E., Cogan N.O.I., Materne M., Forster J.W., Paull J.G., 2014. SNP discovery and high-density genetic mapping in faba bean (*Vicia faba* L.) permits identification of QTLs for ascochyta blight resistance. Plant Science 217–218, 47-55.
- Knodel J.J., Shrestha G., 2018. Pulse Crops: Pest Management of Wireworms and Cutworms in the Northern Great Plains of United States and Canada. Annals of the Entomological Society of America 111, 195-204.
- Lavaud C., Lesné A., Piriou C., Le Roy G., Boutet G., Moussart A., Poncet C., Delourme R., Baranger A., Pilet-Nayel M.-L., 2015. Validation of QTL for resistance to *Aphanomyces euteiches* in different pea genetic backgrounds using near isogenic lines. Theoretical and Applied Genetics 128, 2273-2288.
- Lavaud C., Baviere M., Le Roy G., Hervé M., Moussart A., Delourme R., Pilet-Nayel M.-L., 2016. Single and multiple resistance QTL delay symptom appearance and slow down root colonization by *Aphanomyces euteiches* in pea near isogenic lines. BMC Plant Biology 16, 166.
- Lavaud C., Boutet G., Devaux C., Dufayet V., Dufour P., Lejeune-Hénaut I., Pilet-Nayel M.-L., Baranger A., 2018. Diversité moléculaire et résistance aux stress d'une collection de variétés et de lignées de sélection de pois protéagineux. Deuxièmes Rencontres Francophones sur les Légumineuses, Toulouse, France.
- Le May C., Ney B., Lemarchand E., Schoeny A., Tivoli B., 2009. Effect of pea plant architecture on the spatio-temporal epidemic development of ascochyta blight (*Mycosphaerella pinodes*) in the field. Plant Pathology 58, 332-343.
- Le May C., Guibert M., Baranger A., Tivoli B., 2014. A wide range of cultivated legume species act as alternative hosts for the pea ascochyta blight fungus, *Didymella pinodes*. Plant Pathology 63, 877–887.
- Leppik E., Pinier C., Frerot B., 2014. Paysage chimique d'une agrobiocénose : un exemple, la féverole et son ravageur spécialiste *Bruchus rufimanus*. AFPP – Dixième Conférence Internationale sur les Ravageurs en Agriculture. Montpellier.
- Luquet M., Hullé M., Simon J.-P., Parisey N., Buchard C., Jaloux B., 2018. Relative importance of long-term changes in climate and land-use on the phenology and abundance of legume crop specialist and generalist aphids. Insect Science, 0 ??, 1-16.
- Maalouf F., Ahmed S., Shaaban K., Bassam B., Nawar F., Singh M., Amri A., 2016. New faba bean germplasm with multiple resistances to Ascochyta blight, chocolate spot and rust diseases. Euphytica 211, 157–167.
- Magnin-Robert J.-B., Deulvot C., Touratier M., Raffiot B., Marget P., Duc G., 2018. Recherche de sources de résistance à *Sitona lineatus* dans une collection de ressources génétiques de *Vicia faba* L. (féveroles et fèves). 2èmes Rencontres Francophones sur les Légumineuses, Toulouse.
- Malaikozhundan B., Vinodhini J., 2018. Biological control of the Pulse beetle, *Callosobruchus maculatus* in stored grains using the entomopathogenic bacteria, *Bacillus thuringiensis*. Microbial Pathogenesis 114, 139–146.
- Mbazia A., Ben Youssef N.O., Kharrat M., 2016. Tunisian isolates of *Trichoderma* spp. and *Bacillus subtilis* can control *Botrytis fabae* on faba bean. Biocontrol science and technology 26, 915-927.
- Mishra S.K., Macedo M.L.R., Panda S.K., Panigrahi J., 2017. Bruchid pest management in pulses: past practices, present status and use of modern breeding tools for development of resistant varieties. Annals of Applied Biology 172, 4-19.
- Mishra R.K., Bohra A., Kamaal N., Kumar K., Gandhi K., Sujayanand G.K., Saabale P.R., Sathesh N. S.J., Sarma B.K., Kumar D., Mishra M., Srivastava D.K., Singh N.P., 2018. Utilization of biopesticides as sustainable solutions for management of pests in legume crops: achievements and prospects. Egyptian Journal of Biological Pest Control 28, 3.

- Moussart A., Even M.N., Tivoli B., 2008. Reaction of genotypes from several species of grain and forage legumes to infection with a French pea isolate of the oomycete *Aphanomyces euteiches*. *European Journal of Plant Pathology* 122, 321-333.
- Moussart A., Even M.N., Lesne A., Tivoli B., 2013. Successive legumes tested in a greenhouse crop rotation experiment modify the inoculum potential of soils naturally infested by *Aphanomyces euteiches*. *Plant Pathology* 62, 545–55.
- Moussart A., Jumel S., Langrume C., Onfroy C., Baranger A., 2016. Plant and canopy architecture to control ascochyta blight epidemics in pea fields. Fourth International Ascochyta Workshop, Troia, Portugal.
- Moussart A., 2017a. Pois protéagineux: mieux connaitre le nématode à kystes *Heterodera goettingiana*. Réunion Technique Régionale Terres Inovia, Niort.
- Moussart A., 2017b. *Aphanomyces euteiches* : Quelles légumineuses pour préserver l'état sanitaire des sols ? Arvalis Terres Inovia infos, 37-38.
- Moussart A., Baranger A., 2017. Risque *Aphanomyces* sur pois : la prévention est incontournable. *Perspectives agricoles* 448, 22-24.
- Ndzana R.A., Magro A., Bedoussac L., Justes E., Journet E.-P., Hemptinne J.-L., 2014. Is there an associational resistance of winter pea–durum wheat intercrops towards *Acyrtosiphon pisum* Harris? *Journal of Applied Entomology* 138, 577-585.
- Ocaña-Moral S., Gutiérrez N., Torres A.M., Madrid E., 2017. QTLs for ascochyta blight resistance in faba bean (*Vicia faba* L.): validation in field and controlled conditions. *Theoretical and Applied Genetics* 130, 2271-2282.
- Olfert O., Weiss R.M., Cárcamo H.A., Meers S., 2012. The influence of abiotic factors on an invasive pest of pulse crops, *Sitona lineatus* (L.) (Coleoptera: Curculionidae), in North America. *Psyche*, 11.
- Philippi J., Schliephake E., Jürgens H.U., Jansen G., Ordon F., 2015. Feeding behavior of aphids on narrow-leaved lupin (*Lupinus angustifolius*) genotypes varying in the content of quinolizidine alkaloids. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 156, 37-51.
- Philippi J., Schliephake E., Jürgens H.U., Jansen G., Ordon F., 2016. Correlation of the alkaloid content and composition of narrow-leaved lupins (*Lupinus angustifolius* L.) to aphid susceptibility. *Journal of Pest Science* 89, 359-373.
- Pilet-Nayel M.-L., Hamon C., Moussart A., Roux-Duparque M., Onfroy C., Le May C., Tivoli B., Baranger A., 2014. Diversité et stabilité des facteurs génétiques de résistance aux principales maladies fongiques du pois protéagineux. *Innovations Agronomiques* 35, 27-38.
- Pratap A., Chaturvedi S.K., Tomar R., Rajan N., Malviya N., Thudi M., Saabale P.R., Prajapati U., Varshney R.K., Singh N. P., 2017. Marker-assisted introgression of resistance to fusarium wilt race 2 in Pusa 256, an elite cultivar of desi chickpea. *Molecular Genetics and Genomics* 292, 1237-1245.
- Reddy G.V.P., Sharma A., Gadi R.L., 2018. Biology, ecology, and management of the pea weevil (Coleoptera: Chrysomelidae). *Annals of the Entomological Society of America* 111, 161–171.
- Regnault-Roger C., 2011. Biocontrôle des Bruchinae par les substances végétales : méthodologies et applications. In : *Insectes ravageurs des graines de légumineuses. Biologie des Bruchinae et lutte raisonnée en Afrique*, 91-100. Quæ Éditions, Versailles.
- Richard B., Jumel S., Rouault F., Tivoli B., 2012. Influence of plant stage and organ age on the receptivity of *Pisum sativum* to *Mycosphaerella pinodes*. *European Journal of Plant Pathology* 132, 367-379.
- Richard B., Bussièrre F., Langrume C., Rouault F., Jumel S., Faivre R., Tivoli B., 2013. Effect of pea canopy architecture on microclimate and consequences on ascochyta blight infection under field conditions. *European Journal of Plant Pathology* 135, 509-524.
- Rusin M., Gospodarek J., Biniaś B., 2016. Effect of water extracts from *Artemisia absinthium* L. on feeding of selected pests and their response to the odor of this plant. *Journal of Central European Agriculture* 17, 188-206.

- Salam M.U., MacLeod W. J., Salam K.P., Maling T., Barbetti M.J., 2011a. Impact of climate change in relation to ascochyta blight on field pea in Western Australia. *Australasian Plant Pathology* 40, 397–406.
- Salam M.U., MacLeod W.J., Pritchard L., Seymour M., Davidson J.A., Salam K.P., Galloway J., McMurray L.S., Lindbeck K.D., Richardson H., 2011b. G2 Blackspot Manager model to guide field pea sowing for southern Australia in relation to ascochyta blight disease. *Australasian Plant Pathology* 40, 632–639.
- Schneider A., Huyghe C., 2015. *Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables*, 473p. Quæ Éditions, Versailles.
- Schoeny A., Jumel S., Rouault F., Lemarchand E., Tivoli B., 2010. Effect and underlying mechanisms of pea-cereal intercropping on the epidemic development of ascochyta blight. *European Journal of Plant Pathology* 126, 317–331.
- Seye F., Bawin T., Boukraa S., Zimmer J.-Y., Ndiaye M., Delvigne F., Francis F., 2014. Effect of entomopathogenic *Aspergillus* strains against the pea aphid, *Acyrtosiphon pisum* (Hemiptera: Aphididae). *Applied Entomology and Zoology* 49, 453-458.
- Smart L.E., Blight M.M., Pickett J.A., Pye B.J., 1994. Development of field strategies incorporating semiochemicals for the control of pea and bean weevil, *Sitona lineatus* L. *Crop Protection* 13, 127–35.
- Stoddard F.L., Nicholas A.H., Rubiales D., Thomas J., Villegas-Fernandez A.M., 2010. Integrated pest management in faba bean. *Field Crops Research* 115, 308-318.
- St Onge A., Cárcamo H.A., Evenden M.L., 2018. Evaluation of semiochemical-baited traps for monitoring the pea leaf weevil, *Sitona lineatus* (Coleoptera: Curculionidae) in field pea crops. *Environmental Entomology* 47, 93-106.
- Sudheesh N., Rodda M.S., Davidson J., Javid M., Stephens A., Slater A.T., Cogan N.O.I., Forster J.W., Kaur S., 2016. SNP-based linkage mapping for validation of QTLs for resistance to Ascochyta blight in lentil. *Frontiers in Plant Science* 7, 1604.
- Szafirowska A., 2012. The role of cultivars and sowing date in control of broad bean weevil (*Bruchus rufimanus* Boh.) in organic cultivation. *Vegetable Crops Research Bulletin* 77, 29–36.
- Taheri A.E., Chatterton S., Foroud N.A., Gossen B.D., McLaren D.L., 2017. Identification and community dynamics of fungi associated with root, crown, and foot rot of field pea in western Canada. *European Journal of Plant Pathology* 147, 489–500.
- Takemoto H., Powell W., Pickett J., Kainoh Y., Takabayashi J., 2009. Learning is involved in the response of parasitic wasps *Aphidius ervi* (Haliday) (Hymenoptera: Braconidae) to volatiles from a broad bean plant, *Vicia faba* (Fabaceae), infested by aphids *Acyrtosiphon pisum* (Harris) (Homoptera: Aphididae). *Applied Entomology and Zoology* 44, 23-28.
- Takemoto H., Powell W., Pickett J., Kainoh Y., Takabayashi J., 2012. Two-step learning involved in acquiring olfactory preferences for plant volatiles by parasitic wasps. *Animal Behaviour* 83, 1491-1496.
- Tivoli B., Andrivon D., Baranger A., Calonnec A., Jeger M., 2013. Foreword: plant and canopy architecture impact on disease epidemiology and pest development. *European Journal of Plant Pathology* 135, 453-454.
- Torres A.M., Avila C.M., Gutierrez N., Palomino C., Moreno M.T., Cubero J.I., 2010. Marker-assisted selection in faba bean (*Vicia faba* L.). *Field Crops Research* 115, 243-252.
- Trigui G., Le Corre L., Honoré D., Boudehri-Giresse K., 2016. How can X-ray microtomography be used to access seed morphology? Current applications and future prospects. 31th ISTA Congress. Tallinn, Estonie.
- Vankosky M., Dossdall L.M., Cárcamo H.A., 2009. Distribution, biology and integrated management of the pea leaf weevil, *Sitona lineatus* L. (Coleoptera: Curculionidae), with an analysis of research needs. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources* 4, 1-18.
- Vankosky M.A., Cárcamo H.A., Dossdall L.M., 2011. Identification of potential natural enemies of the pea leaf weevil, *Sitona lineatus* L. in western Canada. *Journal of Applied Entomology* 135, 293-301.

Varshney R.K., Mohan S.M., Gaur P.M., Chamarthi S.K., Singh V.K., Samineni S., Swapna N., Sharma M., Singh S., Kaur L., Pande S., 2014. Marker-Assisted Backcrossing to introgress resistance to fusarium wilt race 1 and ascochyta blight in C 214, an elite cultivar of chickpea. *The Plant Genome* 7. 1-11.

Verjux N., Thibord J.B., Maumené C., Duroueix F., Boyer F., Royer C., 2018. Biocontrôle : une solide ambition en grandes cultures. *Perspectives agricoles* 458, 39-53.

West J.S., Kimber R.B.E., 2015. Innovations in air sampling to detect plant pathogens. *Annals of Applied Biology* 166, 4–17.

Wille L., Messmer M.M., Studer B., Hohmann P., 2018. Insights to plant-microbe interactions provide opportunities to improve resistance breeding against root diseases in grain legumes. *Plant Cell Environment* 2018, 1–21.

Wojciechowicz-Żytko E., Mlynarczyk M., 2002. The preference of different broad bean cultivars by *Sitona lineatus* L. (Coleoptera, Curculionidae). *Journal of Plant Protection Research* 42, 81–89.

Wojciechowicz-Żytko E., Wnuk A., 2012. The occurrence of Syrphidae in *Aphis fabae* Scop. (Hemiptera) colonies on broad bean intercropped with phacelia (Part II). *Journal of Plant Protection Research* 52, 196–201.

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



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

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