



HAL
open science

Les légumineuses protéagineuses pour améliorer les bilans environnementaux en grandes cultures : principaux travaux de l'INRA qui ont accompagné la naissance de la filière et les perspectives

Gérard Duc, Marie-Helene Jeuffroy, Bernard Tivoli

► To cite this version:

Gérard Duc, Marie-Helene Jeuffroy, Bernard Tivoli. Les légumineuses protéagineuses pour améliorer les bilans environnementaux en grandes cultures : principaux travaux de l'INRA qui ont accompagné la naissance de la filière et les perspectives. *Innovations Agronomiques*, 2011, 12, pp.157-180. hal-01173259

HAL Id: hal-01173259

<https://hal.science/hal-01173259>

Submitted on 28 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Les légumineuses protéagineuses pour améliorer les bilans environnementaux en grandes cultures : principaux travaux de l'INRA qui ont accompagné la naissance de la filière et les perspectives

Duc G.¹, Jeuffroy M.H.^{2,3}, Tivoli B.⁴

¹ - INRA, UMR1347 Agroécologie, BP 86510, F-21000 Dijon, France

² - INRA, UMR 211 Agronomie, F-78850 Thiverval-Grignon, France

³ - AgroParisTech, UMR 211, Agronomie, F-78850 Thiverval-Grignon, France

⁴ - INRA, UMR 1349, Institut de Génétique, Environnement et Protection des Plantes, BP 35327, F-35653 Le Rheu, France

Correspondance : duc@dijon.inra.fr

Résumé:

Cet article présente un inventaire de 40 années de travaux de l'INRA, qui ont contribué au développement des cultures de protéagineux, tout en visant des impacts environnementaux positifs. Les innovations sont présentées pour deux niveaux d'échelle: (1) portant sur le protéagineux cultivé lui-même (meilleure utilisation des ressources d'origine symbiotique, variétés rustiques d'hiver moins consommatrices d'eau, réduction d'intrants fongicides, contribution à la biodiversité, meilleure valeur nutritionnelle réduisant les pertes dans les effluents d'élevage) ou (2) portant sur le système de culture (rotations-associations-CIPAN) insérant un protéagineux et permettant de réduire les pertes azotées, les intrants fongicides-herbicides-insecticides-azote ou enfin les infestations des racines de pois par *Aphanomyces euteiches*. Trois exemples marquants portant sur le maintien et l'utilisation des ressources génétiques, sur la définition et la gestion d'idéotypes de pois d'hiver, sur le développement d'outils d'évaluation *ex ante* des impacts environnementaux, économiques et sociaux, sont ensuite présentés. Enfin, les perspectives de ce travail et les nouvelles questions de recherche sont discutées.

Mots-clés: Protéagineux, culture d'hiver, *Pisum sativum*, *Vicia faba*, *Lupinus albus*, *Vicia sativa*, génétique, variétés, architecture, pathologie, protection, maladies, *Aphanomyces euteiches*, *Mycosphaerella pinodes*, adventices, système de culture, succession de cultures, cultures en association, CIPAN, symbioses, rhizobium, mycorhize, azote, eau, climat, interaction génotype x environnement, impacts environnementaux, N₂O, énergie, digestibilité, tanins

Abstract: Grain legumes to improve environmental services in grain crops production systems: main INRA achievements that contributed to the implementation of the supply chain and prospects.

This paper reviews 40 years of INRA activities on grain legumes for feed aiming at the development of growing areas of these crops and targeting environmental friendly impacts. Innovations are organised according to two scales of impacts: (1) those relative to the grain legume crop itself (improving use of resources of symbiotic origin, breeding winter-grown varieties with lower irrigation requirement, reducing fungicide requirements, contributing to biodiversity, reducing polluting losses in animal husbandry) or (2) those relative to the global cropping system with the insertion of a grain legume crop in rotation, intercropping or catch crop strategies, in order to reduce N leaching, fungicides-herbicides-insecticides-nitrogen inputs, damages of *Aphanomyces euteiches* on pea roots. As an illustration, three examples of actions : the maintenance and use of genetic resources, the definition and management of a winter pea plant ideotype, the development of modelling tools allowing the *ex ante* assessment of environmental,

economic and social impacts of growing grain legumes. Perspectives and new directions for research are finally discussed.

Introduction

Dans la deuxième moitié du XX^{ème} siècle, les productions végétales sont marquées par une phase d'intensification qui, en lien avec l'amélioration génétique des espèces de grande culture, a induit une utilisation forte d'énergie fossile, d'engrais azoté de synthèse et de pesticides. Cette période est aussi marquée par des importations en quantité croissante de protéines végétales sous forme de tourteaux de soja pour les élevages. Cette évolution, aidée par les réformes successives de la PAC, a soutenu le développement d'espèces céréalières et oléagineuses valorisant bien l'augmentation des intrants, et a conduit à une forte réduction de la culture des légumineuses protéagineuses (Guéguen et al., 2008 ; Duc et al., 2010a). Ces dernières couvrent aujourd'hui moins de 2% de la surface arable en France et en Europe (environ 300 000 ha en France en 2010) quand cette proportion dépasse 12 % aux USA, Canada ou Chine.

Le début du XXI^{ème} siècle a vu s'accroître le développement de nouvelles demandes à visées environnementales et de santé humaine :

- réduction de l'utilisation des pesticides (en France, Grenelle de l'Environnement, puis Plan Ecophyto 2018)
- réduction de la consommation en énergies fossiles et d'émissions de gaz à effet de serre (protocole de Kyoto)
- préservation de la ressource en eau (Loi Cadre Européenne sur l'Eau, dispositif des AAC Grenelle en France)
- préservation, voire augmentation de la biodiversité
- remise en cause des régimes alimentaires très carnés des pays développés pour revenir à des régimes davantage basés sur les végétaux car ayant une empreinte environnementale plus favorable (Prospective AgriMonde, INRA-CIRAD, 2009).

Face à ces attentes, les protéagineux peuvent apporter des réponses (Munier Jolain et Carrouée, 2003 ; AEP, 2004), et les travaux de l'INRA qui y ont contribué sont présentés dans cette revue.

Le concept de filière protéagineuse est né au début des années 1980, incluant comme principales espèces, le pois, la féverole et les lupins. Ces légumineuses, récoltées pour leurs graines, ont la capacité d'utiliser l'azote de l'air fixé par voie symbiotique, de solubiliser le phosphore minéral dans le cas des lupins, contribuent à la diversification des systèmes de culture et sont source de protéines de bonne valeur alimentaire pour l'animal et l'homme. Sur ces espèces, relativement jeunes au plan de la connaissance agronomique et génétique, une recherche à dominante publique a été mise en place. Depuis les années 1970-1980, l'INRA leur a consacré un effort important et pluridisciplinaire (Poly, 1977) bien qu'inférieur à celui dédié aux céréales et oléagineux. Ces travaux ont été conduits en relation étroite avec les partenaires, Interprofession UNIP, Arvalis institut du végétal, GEVES, FNAMS, chambres d'agriculture, réseaux d'agriculteurs et entreprises du monde agricole, qui sur différentes thématiques, ont participé aux actions de recherche, à leur financement et au transfert des résultats.

Cet article présente un inventaire des recherches et innovations sur les protéagineux qui ont été proposées par l'INRA dans cette période passée récente, pour améliorer significativement les impacts environnementaux dans les exploitations agricoles. Le terme «innovation» recouvre la notion de découverte en matériel génétique ou technique, mais aussi la mise au point de nouvelles combinaisons de techniques et cultures existantes. Cet article s'appuie d'une part sur les fiches inventaire d'actions «à

bénéfices environnementaux» construites par les chercheurs INRA (Coulon et Meynard, 2011 & site WEB INRA) et d'autre part sur l'ouvrage 'La filière protéagineuse, quels défis ?' (Guéguen et al., 2008) produit par le groupe «filiale protéagineuse de l'INRA».

Les voies d'amélioration que nous avons considérées peuvent concerner divers systèmes de production: système intensif irrigué ou non, système de culture sous contraintes, système peu intensif, système de polyculture-élevage ou système répondant au cahier des charges de l'agriculture biologique. Toute solution proposée peut avoir un impact environnemental plus ou moins important selon le système auquel on se réfère et le contexte géographique considéré. Ces voies visent principalement la réduction des intrants et les risques de rejets en azote ou pesticides, ainsi que l'économie d'eau. Indirectement, des effets bénéfiques sont ressentis en termes de consommation d'énergie fossile ou d'émission de gaz à effet de serre (moins d'utilisation d'engrais azotés) ou encore en termes de biodiversité ou de préservation des paysages (diversification des cultures). Parmi les voies d'amélioration que nous avons recensées, on note que, si nombre d'entre elles sont valides pour une palette large de systèmes de production, certaines sont particulièrement valorisables, pour ne pas dire incontournables, dans les systèmes à fortes contraintes environnementales, et parmi ceux-ci, les systèmes respectant le cahier des charges de l'agriculture biologique.

Dans une première partie, sont exposées les voies d'amélioration visant (1) un impact environnemental positif ou la réduction d'utilisation d'un intrant par une innovation portant sur le protéagineux cultivé; (2) un impact environnemental positif ou la réduction d'utilisation d'un intrant par la conception d'un système de culture (rotations, associations, CIPAN) insérant un protéagineux. Trois exemples marquants donneront ensuite un aperçu de ces deux approches et des résultats obtenus. Les perspectives de ce travail et les premiers enseignements que l'on peut en tirer seront abordés dans une dernière partie.

1- Améliorer un impact environnemental positif ou réduire l'utilisation d'un intrant, par une innovation portant sur le protéagineux cultivé

Les innovations ont été de l'ordre de l'innovation variétale, de la connaissance des relations symbiotiques établies au niveau des racines, de la conduite de culture, voire de leurs combinaisons, afin de permettre un développement de cultures productives dans des situations pédoclimatiques initialement inaccessibles, d'augmenter l'efficacité des intrants ou de réduire l'usage des pesticides, de réduire les résidus en culture ou en élevage utilisateur de protéagineux.

1-1 Exploiter et optimiser l'acquisition des ressources par les symbioses racinaires établies par les protéagineux avec les microorganismes bénéfiques du sol

Les légumineuses à graines protéagineuses établissent au niveau de leurs racines une symbiose avec des bactéries rhizobiées. Cette symbiose hébergée dans les nodules racinaires permet à la plante d'accéder à l'azote de l'air pour couvrir souvent plus de 70% de ses besoins azotés. Contrairement aux lupins, le pois et la féverole établissent aussi au niveau racinaire une symbiose avec des champignons mycorhiziens à vésicules et arbuscules (VAM) qui permet une meilleure utilisation du phosphore du sol et apporte une meilleure tolérance aux stress de sécheresse et de certaines maladies racinaires. La plante fournit en retour des ressources carbonées aux microorganismes symbiotiques. Dans la majorité des situations, un inoculum symbiotique indigène naturel préexiste dans les sols où les protéagineux sont traditionnellement cultivés. Il est bien établi qu'un apport d'azote minéral important inhibe l'établissement et le fonctionnement de la symbiose avec les rhizobia. Dans les sols à pH proches de la neutralité et n'ayant pas eu de culture récente de lupin, le lupin blanc requiert une inoculation par

Rhizobium lupini. Certains facteurs affectant négativement les populations de VAM dans les sols sont aussi connus, et notamment les forts apports de P.

Différents travaux ont montré que le couple plante x microorganisme symbiotique présente une diversité d'aptitudes quant à la reconnaissance des deux organismes ou à l'efficacité de la symbiose, ce qui permet d'envisager une maîtrise et une amélioration des performances symbiotiques sur la base d'une meilleure compréhension des mécanismes en jeu.

Dans l'association symbiotique, des mécanismes communs à différentes espèces légumineuses ont été identifiés. Ainsi, en réponse à une signalisation par des flavonoïdes sécrétés par les racines, en retour les gènes *Nod* des bactéries rhizobia déterminent la production des « facteurs Nod » qui sont des lipochito-oligosaccharides ayant capacité à induire les premières étapes d'infection des poils absorbants et d'organogénèse des nodules racinaires (Dénarié et al., 1996). Des "décorations" variées du squelette de base de ces molécules contribuent à la reconnaissance plante hôte x souche bactérienne, dès les premières étapes de construction de la symbiose. Des travaux récents ont montré qu'un mélange de lipochito-oligosaccharides « facteurs Myc » produits par des champignons à VAM, a la capacité à stimuler la symbiose à VAM chez diverses espèces végétales (Maillet et al., 2011).

Un programme de recherche de l'INRA a permis de définir *Medicago truncatula* (Mtr) comme espèce modèle pour une analyse moléculaire des symbioses et d'autres caractères physiologiques importants chez les plantes légumineuses: Mtr est une espèce légumineuse fourragère annuelle, autogame, diploïde, ayant un génome de petite taille qui présente une forte synténie avec le génome du pois (Barker et al., 1990). Un programme international a abouti au séquençage du génome de Mtr (Young et al., 2011). L'utilisation de cette plante-modèle a permis d'identifier des gènes majeurs contrôlant la réponse aux signaux Nod. Trois des gènes intervenant dans la transduction du signal Nod sont requis chez Mtr, non seulement pour la symbiose avec *Rhizobium*, mais également pour la formation de la symbiose à VAM et les gènes homologues chez le pois ont été identifiés (Ané et al., 2001 ; Levy et al., 2004 ; Duc et al., 1989b). Des gènes régulant le nombre de nodosités ont également été trouvés chez le pois et Mtr, dont certaines mutations induisent une hypernodulation, parfois associée à une hypermycorrhization (Duc et al., 1989a ; Sagan et al., 1995 ; Morandi et al., 2000 ; Krussel et al., 2002). Une approche QTL conduite chez le pois a identifié des zones importantes du génome impliquées dans l'acquisition des ressources azotées, dans le développement racinaire et le développement nodulaire, disséquant ainsi plus finement les déterminismes génétiques communs ou spécifiques de ces mécanismes (Bourion et al., 2010). Il a été montré que le génotype de la plante hôte détermine les taux d'occupation des nodules par différentes souches de rhizobia (Laguerre et al., 2007 ; Bourion et al., 2007). Différentes études écophysiologiques ont aussi permis d'établir les coûts respiratoires des activités de prélèvement d'azote par les racines nodulées et les mécanismes d'adaptation à une carence azotée (Voisin et al., 2002 ; Salon et al., 2009).

Tout en contribuant au rendement, l'optimisation du fonctionnement symbiotique permettra une diminution des intrants et une meilleure maîtrise des risques de pertes azotées en culture. Notamment, l'introduction de légumineuses en culture pure dans une succession de cultures ou en association avec une céréale, réduit l'utilisation d'engrais minéraux azotés, permet un meilleur ajustement des ressources aux besoins azotés de la plante et laisse un reliquat azoté pour la culture suivante. A l'échelle de la culture et de la succession, l'absence de fertilisation azotée sur les cultures protéagineuses et la réduction de celle-ci sur les cultures suivantes, permise par les fournitures de la culture protéagineuse, permettent une réduction de la consommation d'énergie fossile et des émissions de gaz à effet de serre, en particulier le N₂O (Jeuffroy et al., 2011 ; Thiébaud et al. 2010, Duc et al., 2010b). Si les forts reliquats d'azote après légumineuses augmentent les risques de lessivage pendant l'hiver suivant, ces derniers peuvent être réduits si une culture piège à nitrate (CIPAN) ou un colza est implanté après le protéagineux. Au contraire, les reliquats post-récolte sont réduits après la culture qui suit un pois, réduisant ainsi les risques de lessivage (Schneider et al., 2010).

Les performances de productivité des protéagineux sont encore très instables et on peut faire l'hypothèse d'un intérêt agronomique à mieux maîtriser des couples variété de légumineuse - inoculum symbiotique afin d'optimiser le fonctionnement de la symbiose. La stratégie pourrait passer par la sélection variétale utilisant des gènes d'intérêt identifiés, combinée ou non à l'inoculation avec des rhizobia, éventuellement complétés en facteurs Nod pour améliorer l'établissement de la symbiose comme cela est déjà pratiqué sur le soja. L'effet d'une inoculation par VAM, combinée ou non à l'apport de facteurs Myc, est aussi une perspective à explorer.

1-2 Rechercher des variétés mieux adaptées à des systèmes de culture peu intensifs avec de moindres besoins en irrigation

La majorité des premières variétés protéagineuses (pois, féverole, lupin blanc) développées dans les années 1980, étaient de type printemps, nécessitant dans de nombreuses situations un recours à l'irrigation pour sécuriser les rendements. Le pois de printemps consomme environ 300 mm d'eau, contre 450 mm pour le soja et 500 mm pour le maïs (Munier-Jolain et Carrouée, 2003). Dans les zones à déficit hydrique marqué et précoce, une irrigation de 50 à 80 mm au maximum en fin de printemps suffit entre la floraison et le début du remplissage des graines. Une irrigation trop importante pendant la phase végétative, visant à couvrir les besoins en eau de la culture, peut être néfaste au rendement, car elle favorise un développement végétatif trop important au détriment de la production de graines. Dans les situations très contraintes en eau, il est donc préférable d'induire un léger stress hydrique avant floraison pour favoriser le rendement (Ney et al., 1994).

Depuis plusieurs années, des efforts de sélection ont porté sur des variétés d'hiver, plus résistantes au froid. Leur semis à l'automne permet un développement plus précoce de la culture, mieux positionné par rapport à la ressource naturelle en eau et ne nécessite en général pas d'irrigation d'appoint (ou, en cas exceptionnel, un besoin inférieur à celui des variétés de printemps). Les premières variétés de protéagineux d'hiver étaient cantonnées dans les zones à hiver doux. Depuis 5 ans, on voit le niveau variétal de tolérance au gel s'accroître, permettant maintenant la culture de protéagineux en zones françaises plus continentales. Les conditions hivernales imposent, chez ces nouveaux types, d'améliorer la résistance aux maladies, la tenue de tige dans le cas du pois, et de maîtriser la précocité.

Une évaluation de la variabilité génétique dans les ressources génétiques de pois, féverole et lupin blanc a permis d'identifier des géniteurs présentant de bons niveaux de résistance au gel (Cousin, 1983 ; Etévé, 1985 ; Picard et Duc, 1986 ; Huyghe, 1991). Le programme de recherche INRA « Impact pois d'hiver » a permis de définir dans un cadre pluridisciplinaire, un idéotype de pois d'hiver adapté aux systèmes de grandes cultures français (Ney et Duc, 1997 ; Vocanson et Jeuffroy, 2007). L'analyse génétique conduite chez le pois a permis d'identifier des composantes de résistance intrinsèque et des composantes d'échappement au froid qui sont complémentaires. Un gène Hr de réponse à la photopériode permet un blocage de la plante à l'état végétatif durant l'hiver qui procure une voie d'échappement aux dégâts de gel autorisant des semis d'automne précoces (Lejeune et al., 1999, 2007). Combinant ce gène à des allèles de précocité de floraison du gène Lf (Foucher et al., 2003), on obtient un meilleur positionnement dans le temps de la phase reproductrice. Chez le pois, des approches QTL ont permis de disséquer plus finement les composantes de la résistance au gel et de proposer des marqueurs de sélection sur ce caractère et sur la précocité. Sur la base de ces acquis, l'Inra conduit le programme d'innovation variétale « Winprot » (2010-2014) (Hanocq et al., 2009) de pyramidage des caractères ou gènes d'intérêt, qui vise des variétés à productivité améliorée et stabilisée en pois et féverole d'hiver.

Des variétés Inra-AgriObtentions de pois, féverole et lupin d'hiver ont déjà été inscrites. Le bon niveau de résistance au gel de certaines leur permet de résister aux hivers moyens de la zone Est de la France. L'architecture des types hiver a été améliorée pour réduire les risques de verse (types déterminés ou semi-déterminés chez le lupin blanc et la féverole) et des sources de résistance aux maladies ont été introduites. Des géniteurs et marqueurs moléculaires pour assister la sélection sont régulièrement transférés vers les sélectionneurs privés du GSP¹ et du GIE Prolupin.

1-3 Réduire l'usage des fongicides

Depuis les années 1980, des études sont développées sur la résistance des légumineuses à graines aux maladies : recherche de sources de résistance, mise au point de tests de criblage pour la résistance, études des mécanismes et de la génétique de la résistance. Ces études ont permis de mettre en évidence des sources de résistance et de mettre au point des méthodes d'appréciation du comportement variétal pour les pathosystèmes pois/Ascochytose & Aphanomyces (Onfroy et al., 1999, 2007 ; Wicker et al., 2001a, 2001b, 2003), féverole/Botrytis & Ascochytose (Tivoli et al., 1986, 1987, 1988 ; Maurin et al., 1992, 1993 ; Bouhassan et al., 2003, 2007 ; Tivoli et al., 2006 ; Kharrat et al., 2006). Chez le pois, les mécanismes de résistance partielle font l'objet d'une identification des QTLs impliqués et d'un cumul de ceux-ci dans le cadre d'une sélection assistée par marqueurs (programme d'innovation variétale Winprot, INRA-AO, INRA-GSP, Contrat de branche) (Prioul et al., 2003, 2004, 2007 ; Pilet-Nayel et al., 2002, 2005, 2009). Par ailleurs, un programme de recherche de l'INRA a permis de définir *Medicago truncatula* comme espèce modèle pour une analyse moléculaire de la résistance aux maladies (Moussart et al., 2007). Les résultats de ces recherches sont transmis aux sélectionneurs du GIE GSP (pois ou féverole) : géniteurs de résistance, tests d'appréciation de la résistance (Moussart et Tivoli, 2005 ; Onfroy et Tivoli, 2005b ; Pilet-Nayel et al., 2005a), marqueurs de résistance en vue du développement de la sélection assistée par marqueurs (cas d'Aphanomyces). Pour l'instant, seules des variétés de féverole résistantes à *Ascochyta fabae* (agent de l'ascochytose) ont été inscrites.

Bien que l'approche génétique décrite ci-dessus soit importante, d'autres recherches innovantes sont actuellement développées. Ainsi, en ce qui concerne plus particulièrement le pois, la lutte contre l'ascochytose repose principalement sur des traitements fongicides appliqués systématiquement : au moins trois applications sont réalisées sur pois d'hiver. Les nouvelles orientations en matière de protection de l'environnement conduisent à tenter de réduire par deux le nombre d'applications fongicides. Des recherches visant à réduire le nombre d'applications fongicides, grâce à une meilleure gestion de l'architecture du couvert de pois, sont développées depuis plusieurs années. Les caractéristiques de la plante et du couvert végétal (niveaux de résistance et architecture) sont en effet des déterminants majeurs du développement épidémique des maladies aériennes, et donc de leur maîtrise dans des stratégies intégrées de phytoprotection. Les caractéristiques architecturales des plantes et des couverts sont liées, d'une part, au type variétal et à ses caractéristiques physiologiques et phénotypiques et, d'autre part, aux modes de conduite de la culture. Dans le cas du pathosystème *Mycosphaerella pinodes*-Pois, la densité de tiges, la hauteur de la tige, le nombre de nœuds et la répartition de la surface foliaire selon les étages contribuent à la mise en place d'une architecture particulière qui influence le microclimat au sein du couvert végétal (variation de la température et de la durée d'humectation) et par conséquent, le développement, mais aussi la dispersion de la maladie (Le May et al., 2005, 2009a, 2009b ; Schoeny et al., 2007, 2008, 2010). Une étude en cours (Programme ANR Systerra 'ARCHIDEMIO', 2009-2013) vise à définir comment l'architecture d'un couvert de pois

¹ GIE Groupement des sélectionneurs de protéagineux

peut gouverner une épidémie d'ascochytose. Du fait de la complexité de ces interactions, l'approche de modélisation est privilégiée. Le modèle sera utilisé comme un outil permettant d'améliorer nos connaissances sur les effets directs et indirects du couvert végétal sur le développement d'une épidémie, de hiérarchiser ces effets, et de définir des variétés (idéotypes) et pratiques culturales à l'origine de conditions défavorables au développement de l'épidémie. Ce projet constitue un appui au réseau pluridisciplinaire INRA 'EpiArch' dont l'objectif est de stimuler des réflexions et des projets de recherche liés à cette thématique. Le réseau EpiArch porté par les départements SPE et EA de l'INRA, constitue l'une des actions clés du méta-programme 'SMaCH' (Sustainable Management for Crop Health).

1-4 Contribuer à la diversité chez différents organismes microbiens, animaux, végétaux associés aux protéagineux

La simplification des rotations et des variétés et l'usage intensif de pesticides, ont réduit la survie et la diversité chez différents organismes microbiens, animaux, végétaux associés à la parcelle cultivée. Or, dans les rotations ou les cultures en associations, les protéagineux d'hiver ou printemps peuvent potentiellement servir d'habitat ou de réserve nutritionnelle pour différents d'organismes associés, et l'on peut faire l'hypothèse que le développement de ces cultures notamment en conduites intégrées ou d'agriculture biologique puisse conduire à une plus grande diversité de la microflore et microfaune du sol, préserver des insectes auxiliaires et pollinisateurs, et contribuer à la diversité des espèces végétales cultivées et adventices en grande culture. Globalement, la contribution de ces cultures à la biodiversité est encore peu étudiée, mais des premiers éléments nous renseignent sur certaines de leurs interactions biotiques :

- Par rapport à d'autres cultures, les protéagineux sont associés à une pression d'utilisation des produits phytosanitaires modérée. A l'échelle nationale, des valeurs d'IFT moyen (Indice de Fréquence de Traitement - Champeaux, 2006) de 3.1 pour la féverole, 4.0 pour le blé, 4.6 pour le pois et 6.1 pour le colza ont été rapportées (Butault et al., 2010). Dans un échantillon de systèmes de culture analysés sur la région Bourgogne (Duc et al., 2010b), les systèmes incluant un protéagineux ont un IFT moyen légèrement plus faible que les systèmes classiques à rotation de type colza-blé-orge, même s'il existe une variabilité selon le mode de conduite de ces systèmes. Sur ce même échantillon, l'impact mesuré à l'aide de l'indicateur d'impact lphy calculé à l'aide de la méthode Indigo® (Bocksteller et al., 2006) est quasi-équivalent pour tous les systèmes avec et sans pois. Dans un ensemble de systèmes de culture insérant un pois, conçus avec des experts locaux, la toxicité moyenne (aquatique et terrestre) apparaît réduite par rapport aux systèmes sans pois, la réduction étant principalement attribuée à la réduction d'herbicides sur ces systèmes (Schneider et al., 2010).
- Des protéagineux introduits dans les rotations vont contribuer à une plus grande diversité des calendriers du travail du sol et de la couverture du sol par la culture (travail du sol superficiel avant un protéagineux de printemps, binage inter-rangs de féverole ou de lupins, semis d'automne plus tardif que pour les céréales) qui auront des conséquences importantes sur la flore et le stock des semences d'adventices (Munier-Jolain et al., 2008).
- Les racines de légumineuses sont associées à une microflore du sol pathogène ou mutualiste, dans laquelle on trouve notamment les microorganismes symbiotiques (rhizobia, VAM). Dans les premiers millimètres de sol qui entourent les racines (rhizosphère), les exsudats ou

rhizodépôts sont des facteurs nutritifs ou de signalisation, promoteurs ou inhibiteurs de la croissance des populations de bactéries ou champignons. Cet effet varie en fonction de la souche microbienne, du milieu (sol-climat-conduite), de l'espèce ou du génotype de légumineuse (Pivato et al., 2007 ; Laguerre et al., 2007). La taille des racines et du compartiment symbiotique, ainsi que la composition des exsudats, seront des déterminants importants de ces interactions et de la taille des populations de microorganismes associés.

-
- La biologie florale de la féverole et des lupins a été caractérisée. Les fleurs de ces espèces sont source de nectar et pollen pour différents Apoïdes qui, par leurs visites, contribuent à la pollinisation et au rendement de ces cultures, au moins dans le cas de la féverole. Les agents de la pollinisation de la féverole sont l'abeille domestique, différentes abeilles solitaires et différentes espèces de bourdons , et jusqu'à 1000 bourdons/ha ont été dénombrés sur cette espèce (Tasei, 1984).

Le faible et récent développement de ces cultures ne permet pas aujourd'hui d'en établir un bilan global en termes de biodiversité. En outre, ce dernier va beaucoup dépendre de l'espèce considérée et des choix de systèmes de culture. Dans le cas d'une augmentation des légumineuses dans l'agriculture européenne, on peut néanmoins s'attendre à une augmentation de la biodiversité associée, qu'il faudra mieux évaluer quant à l'évolution des populations d'organismes et de leurs effets mutualistes ou parasites.

1-5 Améliorer la digestibilité pour réduire les pertes dans les effluents d'élevages, par la sélection de variétés à faibles teneurs en tannins, antitrypsiques, vicine-convicine dans les graines

Les premières variétés disponibles dans les années 1980 utilisées dans l'alimentation des animaux monogastriques contenaient dans leurs graines des constituants affectant négativement leur valeur nutritionnelle: les tannins des pois et féveroles protégeant les protéines de l'action des enzymes digestives, facteurs antitrypsiques des pois réduisant l'efficacité des protéases, ou vicine et convicine des féveroles réduisant l'efficacité énergétique chez les volailles. Ces facteurs dits « antinutritionnels » (FANs) impactent négativement les performances animales et s'accompagnent de pertes alimentaires se retrouvant dans les effluents d'élevages. Ces derniers seront donc d'autant moins chargés en résidus polluants et notamment azotés, que les constituants des aliments présenteront de fortes valeurs de digestibilité.

Une amélioration des méthodologies de dosage des FANs de la graine, puis la recherche d'une variabilité génétique dans les ressources génétiques, ont permis d'identifier des géniteurs et des déterminismes génétiques simples pour les faibles teneurs en tannins (pois-féverole), antitrypsiques (pois), et vicine-convicine (féverole) (Picard, 1976 ; Lacassagne, 1988). Ces géniteurs ont été utilisés dans les programmes de sélection. Pour les antitrypsiques du pois et la vicine-convicine de la féverole, des marqueurs moléculaires ont été développés offrant une possibilité de sélection assistée par marqueurs (Page et al., 2002 ; Guttierrez et al., 2006). Les géniteurs, méthodes de mesure et marqueurs de sélection ont été transférés vers les partenaires sélectionneurs du GSP et vers la communauté de recherche internationale. Une variabilité génétique a aussi été mise en évidence pour d'autres caractéristiques de la graine telles que chez le pois la composition protéique (Gabriel et al., 2008a, b), ou la taille des cellules et structure des parois (action ALIMAN 2001, Duc et al., 2001) qui pourraient permettre d'améliorer la broyabilité des graines et la digestibilité chez les monogastriques.

Au catalogue français, un règlement CTPS établissant des seuils éliminatoires et des systèmes de bonification a été défini. Toutes les variétés de pois protéagineux cultivées et utilisées en alimentation animale sont obligatoirement sans tanins et à faible teneur en facteurs antitrypsiques. Pour la féverole, les qualités de graines sans tanins (dites parfois « féveroles blanches »), à faible teneur en vicine-convicine, ou sous la dénomination « fevita® » des variétés à la fois pauvres en tanins et vicine-convicine, font l'objet d'une bonification à l'inscription. Dans ces différentes catégories, des variétés ont été inscrites par INRA-AgriObtentions ou les membres du GSP.

2- Un impact environnemental positif ou la réduction de l'utilisation d'un intrant obtenu par la conception d'un système de culture insérant une légumineuse

Les innovations ont notamment porté sur les choix d'espèces et de variétés de protéagineux insérées dans des stratégies de rotations, associations ou cultures intermédiaires pièges à nitrate (CIPAN).

2-1 Limiter les rejets azotés (lixiviation de NO_3^- et émissions de N_2O) issus d'une culture légumineuse (CIPAN, culture pure ou associations)

La plupart des cultures dans les successions de grande culture en agriculture conventionnelle sont fertilisées. Cette technique induit généralement des émissions de gaz à effet de serre, en particulier du N_2O . Les émissions de N_2O liées à une culture de légumineuse sont environ 5 fois plus faibles que celles d'une culture (de blé ou de colza) fertilisée (Jeuffroy et al., 2011). L'introduction d'un pois dans une succession de cultures de 3 ans permet ainsi de réduire de l'ordre de 20% les émissions de N_2O , d'une part sur cette culture car elle n'est pas fertilisée, et d'autre part sur la culture suivante, sur laquelle les fournitures d'N par la légumineuse permettent de réduire la fertilisation azotée nécessaire.

La culture de légumineuses accroît généralement les reliquats d'N minéral dans le sol après sa récolte, par rapport à d'autres cultures, et donc les risques de lixiviation de nitrate pendant l'hiver suivant. L'introduction d'une Culture Intermédiaire Piège à Nitrate, semée après la culture de légumineuse, permet d'absorber l'azote minéral disponible dans le sol, pendant l'automne, et ainsi de réduire les risques de lixiviation pendant l'hiver suivant. D'autre part, la culture associée d'une légumineuse et d'une céréale simultanément sur une même parcelle permet de réduire les reliquats d'N minéral dans le sol à la récolte par rapport à la légumineuse pure (Pelzer et al., 2012). Les travaux en cours sur l'ajustement de la nutrition azotée, l'efficacité de la remobilisation de l'azote des parties végétatives vers les graines de pois et du stockage de l'azote dans les graines (Bourgeois et al., 2011), pourront conduire à une réduction de la quantité de résidus azotés après culture d'un protéagineux.

2-2 Introduire une culture de colza derrière une culture de pois, pour réduire les fuites de nitrate pendant l'hiver suivant et pour valoriser l'azote laissé par la culture de pois

Les cultures de pois sont actuellement majoritairement suivies par une culture de céréales, l'effet précédent du pois sur le blé étant bien connu (réduction des maladies telluriques, fourniture d'N au blé suivant). Cependant, le blé absorbe peu d'azote pendant l'hiver et les fortes fournitures d'N minéral laissées dans le sol par la culture de pois présentent souvent de forts risques de lessivage pendant l'hiver suivant.

Une solution technique existe : elle consiste à faire suivre la légumineuse d'une culture de colza. Le colza peut absorber d'importantes quantités d'N pendant l'automne et pourra ainsi valoriser les quantités importantes d'N laissées par le pois et réduire les risques de lixiviation pendant l'hiver. De même, l'azote absorbé par la culture de colza permet de réduire les besoins en engrais minéral pendant

le printemps suivant, donc de réduire également les émissions de N₂O sur la culture de colza et d'améliorer le bilan énergétique de cette culture. Le test de cette technique innovante dans un réseau de parcelles agricoles (Schneider et al., 2010) a permis de montrer l'absence d'inconvénients majeurs à cette technique, qui commence à se développer chez les agriculteurs.

2-3 Réduire les intrants pesticides par l'insertion d'un pois dans une rotation

Les systèmes de culture actuels diversifient peu les cultures dans la rotation (Schott et al., 2010) et les périodes de semis. Cette situation favorise le développement de certains bioagresseurs. La diversification des dates de semis, à l'échelle de la succession culturale, par l'introduction de cultures de protéagineux (d'hiver ou de printemps), permet d'améliorer la maîtrise de la flore adventice (Munier-Jolain et al., 2008) et des maladies, et de réduire l'usage de pesticides.

Une date de semis d'un protéagineux d'hiver, souvent plus tardive que pour une céréale, peut permettre sous certaines conditions, de réduire les levées d'adventices en début de cycle (Colbach et al., 2008). L'architecture et la densité de semis de la féverole et des lupins autorisent des stratégies de binage mécanique inter-rangs. Un pois de printemps permet une réduction des adventices graminées automnales très fréquentes et nuisibles en céréales d'hiver. Le cycle de développement d'une adventice graminée automnale, le vulpin (*Alopecurus myosuroides* Huds.) a été étudié, et le modèle ALOMYSYS (Colbach et al., 2006) permet de quantifier des effets des systèmes de culture sur la dynamique de cette adventice (Colbach et al., 2010). Des simulations avec ce modèle montrent que l'addition d'un pois de printemps dans une rotation colza d'hiver/blé d'hiver/orge d'hiver réduit la densité moyenne de vulpins et cet effet a été confirmé dans des essais en parcelles d'agriculteurs (Munier-Jolain et al., 2008).

En ce qui concerne l'ascochytose, les cultures de pois d'hiver sont particulièrement exposées à la maladie en raison de conditions d'humidité extrêmement favorables et longues. En retardant la date de semis, la culture est ainsi moins exposée à ces conditions, ce qui réduit d'autant les risques de développement de l'ascochytose et ainsi, le nombre d'applications fongicides.

L'introduction d'une culture non-hôte des maladies des céréales, telle que le pois, permet la réduction de bioagresseurs telluriques majeurs des céréales à paille, *Oculimacula yallundae* (responsable du piétin-verse) et *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* (responsable du piétin-échaudage). Pendant l'année de culture du pois, les champignons pathogènes ne peuvent pas se reproduire ; à la récolte de la culture, il n'y a donc pas de résidus infectieux retournés au sol. Simultanément, le stock d'inoculum infectieux diminue avec la dégradation des résidus provenant d'anciennes cultures hôtes malades. Par rapport à d'autres cultures non-hôtes comme le maïs, le pois semble de plus ne pas réduire la microflore antagoniste de ces champignons pathogènes (Colbach et al., 1997). Pour un même stock d'inoculum infectieux, une céréale suivant un pois sera donc moins malade qu'une céréale suivant un maïs. L'introduction du pois dans les rotations permet ainsi de réduire la fréquence des traitements fongicides sur les céréales suivantes. Ces effets ont été synthétisés sous forme de modèles qui permettent d'estimer la réduction de maladies à 20-30% en blé si le maïs est remplacé par un pois dans les rotations blé/maïs, à 30-40% en passant d'une monoculture de blé à une rotation blé/pois.

2-4 Gérer les rotations incluant des légumineuses afin d'éviter l'augmentation du niveau d'infestation des sols par *Aphanomyces euteiches*

Dans la mesure où il est déconseillé de cultiver du pois de printemps dans une parcelle infestée par *Aphanomyces euteiches*, la substitution par d'autres espèces de protéagineux s'avère nécessaire.

Des résultats obtenus en conditions contrôlées (Moussart et al., 2008), corroborant des observations plus ponctuelles au champ, montrent qu'il est possible de cultiver certaines légumineuses dans les sols

infestés par *A.euteiches*. Ainsi, le lupin ne semble pas être une plante hôte du pathogène et peut donc être cultivé sans risque. Par ailleurs, les variétés de féverole cultivées en France, bien qu'attaquées par ce pathogène, présentent des niveaux très élevés de résistance à *A. euteiches* et ne contribuent pas à multiplier l'inoculum. Cette légumineuse peut donc être cultivée en alternance avec le pois et contribuer à allonger les rotations. A l'inverse, la plupart des variétés de lentille, de luzerne et de haricot sont à éviter dans les parcelles infestées par le pathogène. Enfin, certaines variétés de vesce résistantes à *A. euteiches* peuvent être choisies dans les situations à risque (Anonyme, 2007a).

Par ailleurs, le choix des espèces et variétés de CIPAN doit tenir compte des risques de maladies transmises par le sol (Anonyme, 2007b). Par exemple, il faudrait éviter d'utiliser le pois fourrager comme CIPAN dans toute parcelle susceptible d'être cultivée en pois protéagineux vis-à-vis du risque *Aphanomyces* (toutes les variétés actuelles de pois, fourragers ou protéagineux, sont sensibles au pathogène). Pour la vesce commune, la légumineuse la plus couramment cultivée ou testée en engrais vert, il a été montré qu'il existe de fortes différences variétales vis-à-vis d'*A. euteiches* (avec une souche pathogène sur pois). Il se trouve que les principales variétés actuelles sont plutôt résistantes. Cette information devrait amener à écarter les variétés sensibles comme Safran ou Améthyste dans tous les cas où le pois est présent dans la rotation. Ceci vaut également pour la production de semences de vesce ou les associations triticales+pois+vesce qui se développent en production fourragère. En effet, dans un sol contaminé par *A. euteiches*, le rendement d'une variété de vesce sensible peut être affecté et l'inoculum d'*A. euteiches* risque d'augmenter.

2-5 Gérer le choix des parcelles afin d'implanter du pois sans risque de développement de pourriture racinaire (*Aphanomyces euteiches*)

Etant donné le fort niveau de pression parasitaire lié à *Aphanomyces* et le risque de pertes de rendement importantes en cas d'infestation, un test de détection d'*A. euteiches* a été mis au point afin de pouvoir choisir les parcelles susceptibles de recevoir du pois sans risque de développement de la maladie.

Il n'existe actuellement aucune méthode de lutte contre la pourriture racinaire du pois due à *A. euteiches*, excepté la prophylaxie consistant à éviter les parcelles à risque. Un test de potentiel infectieux a donc été mis au point à l'INRA de Rennes (Moussart et al., 2009). Ce test biologique quantitatif, réalisé en chambre climatique, consiste à piéger le pathogène à l'aide d'une variété de pois sensible. Il permet d'évaluer, à partir d'un échantillon de sol de 2 litres, le niveau de potentiel infectieux (PI) d'une parcelle par la mesure de l'Indice de Nécrose Racinaire. Il existe une corrélation positive élevée ($r^2=0.86$) entre le niveau de potentiel infectieux indiqué par le test et la sévérité de la maladie au champ.

Ce test est utilisé pour les études d'épidémiologie mais il a également été transféré à plusieurs laboratoires d'analyse français qui, grâce à ce test prédictif, peuvent indiquer sur demande, le niveau de PI de l'échantillon analysé (Crosson, 2005). Ce test, utilisé pour la gestion des risques, permet aux agriculteurs d'éviter la culture du pois dans les parcelles infestées par *A. euteiches*.

La connaissance du niveau de PI d'une parcelle est également primordiale pour mener à bien la sélection variétale en conditions naturelles.

2-6 Associer des cultures légumineuses et céréales dans une même parcelle, pour réduire l'utilisation d'intrants (fongicides, herbicides, insecticides, azote)

En grande culture conventionnelle, les céréales sont cultivées en pures, avec un usage soutenu d'intrants, et les légumineuses sont le plus souvent, soit cultivées seules, avec un niveau d'intrants relativement important, soit abandonnées.

Une solution technique efficace permettant de cultiver ces deux espèces tout en réduisant l'usage d'intrants sur chacune, consiste à cultiver dans une même parcelle et pendant un même cycle de culture, une céréale et une légumineuse en association. Le semis peut être soit simultané (mélange des semences dans le semoir), soit décalé (deux passages de semoir pour alterner les rangs et adapter la profondeur de semis à chaque espèce). La récolte est simultanée. L'application d'intrants azotés optimale sur ces associations est très réduite (on recommande au maximum 40 à 60 unités d'N/ha) car (i) les besoins en N de l'association sont réduits et (ii) la nutrition azotée de la légumineuse est assurée par la fixation symbiotique. La fixation est même accrue par la présence de la céréale qui appauvrit le sol en N minéral, obligeant la légumineuse à assurer sa nutrition azotée à partir de la fixation symbiotique (Corre-Hellou et al., 2006 ; Naudin et al., 2010 ; Bedoussac et Justes, 2011). Dans ces associations, l'efficacité de l'azote est accrue et l'utilisation d'énergie fossile est réduite (Pelzer et al., 2012). Ces associations ne reçoivent pas d'application d'herbicide car (i) les deux espèces recouvrent mieux le sol qu'une espèce seule, (ii) aucun herbicide n'est homologué sur les deux espèces, (iii) la date de semis de l'association d'hiver est calée sur la date de semis du pois d'hiver, permettant ainsi de réduire les risques de levée d'adventices. L'application de fongicide est réduite (au maximum 1 fongicide, et fréquemment aucun) car la présence des deux espèces en mélange sur la parcelle limite l'infestation et l'évolution des pathogènes aériens. Pour les insectes, certains résultats semblent montrer une réduction des attaques de thrips et sitones (dans les situations de semis d'automne) et de pucerons, permettant de réduire les applications d'insecticides, tandis que d'autres montrent une augmentation des infestations, interprétée comme un effet «concentration» lié à la réduction du nombre de plantes hôtes.

2-7 Introduire une légumineuse comme plante de service dans des systèmes de culture à bas niveau d'intrants, pour améliorer la gestion des mauvaises herbes et de l'azote à l'échelle de la succession de culture

Les systèmes de culture actuels sont généralement composés de cultures pures se succédant sur une même parcelle, dont on cherche à accroître la productivité en limitant les facteurs limitants de la production par l'utilisation intensive d'intrants.

Pour réduire l'usage des intrants tout en garantissant une production élevée, il est possible d'introduire une plante de service, c'est-à-dire une plante non récoltée dont on attend avant tout qu'elle fournisse à la plante de rente des services environnementaux, permettant de réduire les nuisances environnementales à l'échelle du système de culture. Cette plante de service peut être semée en même temps ou en décalé par rapport à la plante de production. Sa conduite doit être raisonnée de manière à (i) favoriser les effets attendus, (ii) limiter la compétition sur la plante de rente. Si la plante de service est une légumineuse, elle permet (i) de réduire les infestations d'adventices car elle couvre mieux le sol que la culture pure, sans avoir à utiliser d'herbicide, (ii) de favoriser l'entrée d'azote, par la fixation symbiotique, dans le système. Ce dernier impact est particulièrement apprécié et recherché en agriculture biologique, où l'azote est un facteur limitant récurrent. La gestion en relais de la plante de service (semis au cours du cycle de la culture de rente et maintien après la récolte de la culture de rente) permet d'atteindre ces objectifs (maîtrise des adventices et entrée d'N dans le système), en perturbant moins la culture de rente, et donc ses performances (travaux en cours).

3-. Trois exemples marquants

3-1 Utilisation des collections ex situ des ressources génétiques de pois, féverole et lupins

Le principe est de rassembler, décrire, conserver la diversité génétique et ainsi la mettre à disposition des programmes de sélection afin de diversifier la base génétique des variétés. Pour le pois, la féverole et les lupins, des collections importantes contenant des populations de pays, des cultivars, quelques

formes sauvages et du matériel de recherche ont été rassemblées. Elles sont renouvelées *ex situ* et diffusées sous forme de graines.

La collection de pois a été fondée à l'Inra de Versailles au début des années 1960 puis elle s'est élargie par des contributions des Unités INRA de Mons, Dijon et Rennes. Constituée d'environ 2000 accessions, elle contient des génotypes fourragers, potagers, protéagineux ou de pois de casserie, surtout d'origine française et européenne et pour certains très anciens (certaines variétés ont été décrites dès le XVI^{ème} siècle). Diverses origines mondiales et des formes sauvages sont aussi présentes. S'y ajoutent les collections scientifiques comprenant d'une part des lignées issues de croisements à visée scientifique (populations recombinantes, lignées isogéniques), des mutants de TILLING (environ 5000 M3 de mutants induits chimiquement par l'Ethyl Methyl Sulfonate) (Le Signor et al., 2009), des mutants de gènes de symbiose (Duc et al., 1989 a, b).

La collection de féverole a été constituée dans la même période à l'INRA de Dijon et Rennes. Elle compte environ 1000 accessions de formes cultivées (populations de pays et cultivars de féverole à petites graines, ou de fèves à grosses graines d'origines mondiales, avec une dominante européenne et méditerranéenne) (Duc et al., 2010). Elle contient des mutants et lignées isogéniques. Cette collection est reconnue au niveau mondial (FAO) pour son originalité et sa diversité :

(http://www.croptrust.org/documents/web/Faba_Strategy_FINAL_21April09.pdf).

La collection de lupins a été créée à l'INRA de Lusignan dans les années 1970. Elle est constituée d'environ 1000 accessions à dominante de lupin blanc, et est très originale au niveau mondial car issue d'une vaste campagne de prospections conduite par l'INRA dans la Péninsule Ibérique, en Grèce, Italie, Turquie, sur l'archipel des Açores, Maroc et Egypte (Papineau et Huyghe, 1989).

Les collections de ressources génétiques de pois, féverole et lupin ont été regroupées à l'INRA de Dijon depuis 2004. La base de données du CRG est consultable sur <http://195.220.91.17/legumbase/> (Savois et al., 2007). L'INRA est engagé dans des collaborations internationales sur les ressources génétiques afin de construire des collections communes, bien représentatives de la variabilité génétique disponible en général ou pour certains caractères d'intérêt. Des collaborations importantes (avec USDA-USA, CAAS-Chine, VIR-Russie, Pays des Balkans, ICARDA-Syrie) ont permis d'élargir la variabilité génétique disponible en matière de résistance au froid et aux maladies chez le pois et la féverole. Au niveau européen, l'ECP/GR (*European Cooperative Programme for Crop Genetic Resources*) permet de compiler les bases de données des collections européennes de légumineuses et de partager des méthodologies communes de maintien et d'évaluation. Les collections sont pour partie diffusées publiquement et sont largement utilisées dans le cadre des programmes de recherche et de sélection du groupe protéagineux INRA, permettant notamment le développement d'approches par génétique d'association (recherche de gènes de résistances aux bioagresseurs et aux stress abiotiques, de compositions de graines particulières). Chez le pois, de nombreuses données génotypiques (marqueurs SSRs et SNPs) et phénotypiques sont désormais disponibles sur une collection de référence de 372 accessions et une core collection de 92 accessions (Deulvot et al., 2010). Chez *Vicia faba*, des marqueurs moléculaires et une core collection sont en cours de développement.

En puisant dans ces collections, les sélectionneurs privés et publics amplifient la diversité dans les variétés cultivées et peuvent mieux adapter les variétés à une diversité de systèmes de culture et de milieux biotiques et abiotiques, en minimisant les intrants et en maximisant les impacts environnementaux positifs. Des sources de variabilité originale ont déjà été identifiées puis exploitées jusqu'au niveau variétal, pour des résistances au gel et à certaines maladies, des architecture de plante et des compositions de graines particulières. En perspective, une caractérisation phénotypique plus fine de ces collections, notamment permise par le développement des plateformes de phénotypage à haut débit, sera très profitable à la valorisation de ces ressources.

3-2 Vers la création et le déploiement de nouveaux géotypes de pois d'hiver résistants aux stress hivernaux : une approche pluridisciplinaire . . .

Les cultures de pois protéagineux se sont développées en Europe entre 1970 et 1992, principalement en cultures de printemps. Comme pour les autres cultures, les semis d'automne ou d'hiver peuvent produire des rendements supérieurs et plus stables que les semis de printemps (Lejeune-Hénaut et al., 1999). Les pois d'hiver se développant sur une plus longue période de croissance et présentant une initiation florale plus précoce, permettent de limiter les impacts des stress hydriques et thermiques de fin de cycle sur le rendement. Cependant, la longueur de la période de croissance, ainsi que les conditions climatiques pendant l'hiver (nombreuses périodes pluvieuses, longues périodes de durée d'humectation et gels hivernaux) prédisposent le pois d'hiver à deux types de dommages: abiotique et biotique, respectivement dus au gel et au développement précoce de l'ascochytose.

Deux types distincts de pois d'hiver sont actuellement disponibles. Les variétés classiques (hr) doivent être semées tard en automne (novembre-décembre) pour s'assurer que la résistance au gel soit maintenue jusqu'à la fin de l'hiver. Cependant, l'implantation de la culture est plus difficile en raison des pluies de fin d'automne et les stress hydriques et thermiques du printemps sont loin d'être négligeables (Biarnès et al., 2004). Pour éviter ces inconvénients, de nouveaux géotypes de pois (types Hr) se bloquant à l'état végétatif pendant l'hiver en réaction aux jours courts, peuvent être semés début octobre en France (Lejeune-Hénaut et al., 1999, 2008 ; Etévé et al., 2004 ; Vocanson et Jeuffroy, 2008). Ces géotypes doivent combiner deux stratégies complémentaires pour s'adapter aux conditions environnementales : l'échappement au gel et l'acclimatation au froid (Lejeune-Hénaut, 1999). Ils sont porteurs du gène dominant Hr, qui leur confère une plus grande sensibilité de la date de floraison à la photopériode que celle observée dans la plupart des variétés de pois commercialisées, en bloquant le passage à l'initiation florale en jours courts (Lejeune-Hénaut et al., 1999, 2008). En plus d'avoir une forte sensibilité à la photopériode, les géotypes Hr expriment une croissance de type rosette pendant l'hiver. Lors de cette période, ils développent beaucoup plus de ramifications que les autres cultivars, et tous leurs organes aériens demeurent nanifiés, avec de courts entrenœuds et de petits organes foliaires (Lejeune-Hénaut, et al., 2008). Au printemps, quand la longueur du jour atteint environ 13,5 heures, les plantes de type Hr retrouvent leur croissance érigée via l'élongation des entrenœuds et commencent à produire de plus grandes stipules.

Contrairement aux variétés d'hiver, les nouveaux géotypes Hr peuvent être semés tôt à l'automne, sans accroître le risque de dégâts de froid (Vocanson et Jeuffroy, 2007). Cependant, plusieurs études ont montré que les semis précoces en favorisant une installation plus précoce de la maladie, augmentent le risque de développement grave d'ascochytose (Schoeny et al., 2007). Par ailleurs, Le May et al. (2009) ont analysé au champ le développement épidémique sur un géotype de type Hr, comparé à celui se développant sur les variétés classiques Cheyenne et Dove (semis réalisés mi-septembre et mi-octobre pour les deux types) sur cinq sites différents : Dijon, Estrées-Mons, Maise, Rennes et Toulouse. Selon les sites, les niveaux de maladie peuvent être très différents, mais ils sont toujours plus élevés sur les plantes issues des premières dates de semis et ce, chez tous les géotypes. Le type Hr possède partout le plus faible niveau de maladie et l'ascochytose est moins affectée par la date de semis sur le type Hr que sur Cheyenne et Dove. Lors du stade 'rosette', la plante développe ses ramifications, qui sont positionnées à la surface du sol et sont ainsi soumises à des conditions d'humidité favorisant fortement la contamination et le développement de la maladie. Inversement, ce stade rosette, via une architecture particulière, peut conduire à un microclimat défavorable au développement de la maladie. Ces différences d'architecture peuvent entraîner des vitesses différentes de développement de l'ascochytose comme cela a déjà été démontré sur différents géotypes (Le May et al., 2005).

La sélection sur les types hr, semés plus tardivement, vise principalement à cumuler résistance au gel et résistance à l'ascochytose. Cette dernière résistance devrait à terme s'appuyer sur la capacité du

génotype à éviter/différer l'installation et/ou le développement de l'ascochytose via ses caractéristiques architecturales.

Un programme d'innovation variétale spécifiquement dédié au pois d'hiver est actuellement en cours à l'INRA (Winprot, Hanocq et al., 2009). Il vise à développer des pois d'hiver résistants aux stress hivernaux précédemment évoqués. Cette démarche est conduite en forte collaboration avec les sélectionneurs privés (GSP). Si l'inscription de pois d'hiver classiques se poursuit régulièrement depuis des décennies, la première variété de Pois d'hiver de type Hr, cv Geronimo (obteneur Serasem) a été inscrite au catalogue français des variétés à l'automne 2010. Ces programmes de sélection et de déploiement dans des systèmes de culture innovants à bas niveau d'intrants font l'objet d'étroites collaborations entre généticiens, pathologistes et agronomes.

3-3 Valoriser les intérêts des légumineuses dans de nouveaux systèmes de culture : le développement d'outils d'évaluation ex ante des impacts environnementaux, économiques et sociaux

Faire face aux demandes de la société vis-à-vis des pratiques agricoles et aux exigences environnementales croissantes nécessite de changer de système de culture : ce n'est pas une technique qu'il faut changer, mais l'ensemble des techniques. En effet, les interactions fortes qui existent entre elles impliquent ce changement systémique. Cependant, pour un agriculteur, changer de système de culture n'est pas évident : comment savoir quel nouveau système choisir, quel système sera adapté aux conditions pédo-climatiques de l'exploitation, et aux exigences environnementales prioritaires locales ? Comment être sûr qu'il va produire les résultats escomptés ? Comment démarrer le changement ? Ces questions ont induit le développement de recherches sur les méthodes de conception de nouveaux systèmes de culture adaptés localement, et sur les outils d'évaluation multi-critères de systèmes de culture, avant leur mise en œuvre au champ. Différents outils ont ainsi été développés. Le modèle DECID'Herb, par exemple, aide au choix de stratégies raisonnées de lutte contre les adventices (Munier-Jolain et al., 2005, 2008). La méthode IPhy (Girardin et al., 2000) propose des indicateurs de risques environnementaux, y compris des risques toxicologiques liés à l'usage des produits phytosanitaires. L'outil MASC® permet une appréciation globale de la durabilité des systèmes de culture selon des critères économiques, sociaux et environnementaux (Sadok et al., 2007). L'Analyse de Cycle de Vie permet une évaluation plus large des systèmes de culture en prenant en compte les activités en amont de la production au champ (Deytieux et al., 2012.). Ces derniers outils ont permis de montrer et de quantifier, dans plusieurs programmes, les intérêts environnementaux des systèmes de culture incluant des légumineuses à graines, par rapport aux systèmes actuels sans légumineuses, sans baisse du revenu économique sur le pas de temps de la succession (Schneider et al., 2010 ; Thiébault et al., 2010 ; PSDR PROFILE-Duc et al., 2010b), dès lors que l'on tient compte des effets précédents du pois dans la conduite des cultures suivantes, ce qui n'est malheureusement pas toujours le cas en parcelles agricoles (Ballot, 2009).

Conclusions et perspectives

Des variétés et systèmes de culture assurant des marges attractives pour l'agriculteur doivent permettre un accroissement des surfaces cultivées en protéagineux, et corrélativement des économies d'intrants azotés, d'énergies fossiles, et une diminution des émissions de GES. Dans son rapport 2009, le Commissariat Général au Développement Durable estime que le passage de 4% à 7% des surfaces arables françaises en légumineuses cultivées, économiserait environ 10% d'épandages d'engrais minéraux et réduirait les émissions de gaz à effet de serre d'environ 1,8 Mteq CO₂ (CGDD, 2009). Convaincus du rôle positif que les protéagineux peuvent jouer dans ces directions, la commission de l'environnement, de la santé publique et de la sécurité alimentaire au parlement européen a

recommandé dans ses débats de février 2011 (<http://www.europarl.europa.eu>) d'introduire davantage de légumineuses dans les rotations culturales, et dès 2010, l'Etat français de son côté, a mis en place un plan de relance de ces cultures.

Un partenariat entre la recherche et les partenaires économiques (notamment UNIP-ARVALIS-FNAMS-CTPS, RAD, CIVAM, Chambres d'agriculture) a permis de nombreuses actions collectives essentielles afin d'orienter la recherche vers des problèmes réels, et de valider, intégrer et transférer les solutions proposées (exemple des actions AIP-INRA-Impact pois d'hiver (2005), structure RMT-SDCi et GIS GC-HP2E., différents projets CASDAR et projet PSDR-Profile (sites web listés dans les références bibliographiques).

En ce qui concerne les légumineuses en général et les protéagineux en particulier, des efforts de recherche/développement pluridisciplinaires doivent être poursuivis dans les années qui viennent, selon trois grands axes:

Axe lié à la production

Pour valoriser leur aptitude à fixer l'azote atmosphérique, tout l'enjeu consiste à faire en sorte que les légumineuses à graines (pois, féverole, lupins), ainsi que les légumineuses fourragères (trèfles, luzerne, vesce notamment), soient au cœur des systèmes de production. Il y a nécessité de concevoir et de créer les conditions de développement de tels systèmes qui constituent, à terme, un important pilier pour asseoir une agriculture durable. Dans un environnement économique et réglementaire de plus en plus incertain, la recherche doit permettre aux agriculteurs de disposer d'une diversité d'espèces protéagineuses d'hiver et de printemps capables de répondre au mieux à différents contextes économiques et pédoclimatiques et de connaître leurs intérêts. La diversification des variétés conditionne l'extension des zones de culture. La « compétitivité » d'une culture pourra de moins en moins se limiter au simple calcul d'une marge brute à l'hectare. On dépassera ce stade avec des recherches basées sur des approches systémiques, de modélisation, déclinées par bassin de production et systèmes de culture. Dans ce contexte, la hiérarchisation des facteurs limitants (maladies ou architectures des systèmes aériens et racinaires) est cruciale.

L'amélioration de la compétitivité des protéagineux par rapport aux autres cultures, et notamment par rapport aux céréales et aux oléagineux, apparaît comme indispensable. Cela suppose d'agir simultanément sur l'augmentation et la stabilisation des rendements (variétés plus tolérantes aux stress biotiques et abiotiques, efficaces dans l'utilisation des intrants en eau et minéraux), sur l'amélioration de la composition de ces graines (teneur en protéines et digestibilité) et sur les coûts de production. Par ailleurs, l'évolution possible de la PAC vers une plus grande prise en compte de la multifonctionnalité de l'agriculture et du développement durable devrait favoriser la valorisation « économique » des atouts environnementaux des protéagineux. Elle sera facilitée si on évalue plus précisément leurs avantages dans les rotations et si on adapte les conduites et les variétés, de façon à maximiser ces avantages environnementaux.

Axe lié aux usages

En alimentation animale, les protéagineux peuvent être une source de protéines de proximité traçable, économisant les coûts économiques et environnementaux liés au transport de matières premières concurrentes telles que le soja. Tout en assurant une bonne productivité et des masses critiques, il est stratégique de garantir la qualité sanitaire des graines consommées et de construire une palette variétale de compositions des graines stables et adaptées à différents usages. Cela permettrait de développer une valeur ajoutée basée sur des signes de qualité co-construits entre producteurs de graines et éleveurs.

Une augmentation de la consommation directe de protéines issues des graines de protéagineux par l'homme serait un facteur de réduction des coûts économiques et d'impacts environnementaux liés aux élevages. Pour l'alimentation humaine, il s'agit d'adapter la composition des graines pour optimiser leur valeur santé et leur adaptation aux transformations. Même si les consommateurs occidentaux n'ont actuellement pas ou peu exprimé de véritables attentes concernant les protéagineux et les légumes secs, il est important de mieux appréhender et faire connaître l'intérêt potentiel de ces produits. Par ailleurs, des travaux de recherche permettraient de mieux répondre aux besoins des marchés à l'export vers les pays de l'Asie du Sud-Est et du Moyen Orient.

Pour des usages industriels, il s'agit de renforcer l'étude des propriétés des graines et des technologies à mettre en œuvre afin d'inclure les protéagineux dans les espèces candidates à une véritable « chimie verte » en s'inspirant éventuellement de ce qui a été réalisé dans la filière soja. Le potentiel des amidons de pois, très riches en amylose, constitue un réel atout. Pour d'éventuels usages énergétiques, il est nécessaire d'explorer le potentiel des transformations (écobilan, faisabilité technique), la variabilité génétique de composition et d'évaluer le bilan économique.

Axe socio-économique

Les impacts, synergiques ou antagonistes, des recherches biotechniques sur l'offre et la demande, sur les pratiques culturales et l'environnement, sur les conditions d'utilisation et les marchés, sont majeurs dans l'évolution de la filière protéagineuse au regard des préoccupations sociétales. Le développement des protéagineux - ou leur disparition - ne sera pas sans effet sur le bilan azoté, la consommation d'eau des cultures, les systèmes d'élevage, la gestion des effluents ou l'appui à l'innovation industrielle.

Il est donc indispensable que des travaux socio-économiques évaluant les impacts économiques, environnementaux et sociétaux des innovations accompagnent la mise en œuvre des recherches (Thomas, 2010). Un effort important doit être porté sur les analyses systémiques en tenant compte des intérêts des différents acteurs de la filière, semenciers, producteurs, organismes stockeurs, éleveurs et autres utilisateurs, consommateurs.

Une recherche pluridisciplinaire réalisée sur un pas de temps relativement court (40 ans) a permis des progrès notoires mais encore insuffisants sur les protéagineux. Même si ces espèces présentent des atouts environnementaux reconnus, il est essentiel qu'en lien avec les appuis par les politiques publiques, la recherche travaille à quantifier et améliorer ces effets par la conception de nouveaux idéotypes variétaux et de nouveaux systèmes de culture, avec une visée de durabilité économique et environnementale. Il est capital d'encourager ces recherches qui permettront une valorisation des protéagineux, en veillant bien à considérer différentes échelles qui vont du niveau de la parcelle jusqu'à une vision mondiale.

Remerciements

Nous remercions Jacques Gueguen INRA Nantes, Nathalie Munier-Jolain INRA Dijon, Bernard Sève et Yves Dronne INRA, Rennes, Jean Pierre Boutin INRA Versailles, chercheurs du groupe filière protéagineuse qui ont contribué au document Guéguen et al. 2008 dont certains éléments sont repris dans ce texte; Nicolas Munier-Jolain et Nathalie Colbach INRA Dijon, chercheurs qui ont contribué aux fiches d'inventaire des impacts environnementaux des protéagineux; Christian Huyghe INRA Paris, Directeur Scientifique Adjoint "Agriculture" pour ses apports à cet article; et Martine Georget INRA Paris, coordinatrice des groupes filières végétales pour son appui à ce travail.

Références bibliographiques

- Anonyme, 2007a. Sensibilité d'autres espèces de légumineuses à *Aphanomyces euteiches*. Quoi de Neuf, Editions UNIP-Arvalis Institut du Végétal
- Anonyme, 2007b. Légumineuses et Cipan (Cultures intermédiaires pièges à nitrates). Quoi de Neuf, Editions UNIP-Arvalis Institut du Végétal
- AEP, 2004. Association européenne de recherche sur les Protéagineux. Grain legumes and the environment: how to assess benefits and impacts. AEP Eds. ISBN 2-9509491.8.5, 226 pp
- Ané J.M., Kiss G.B., Riely B.K., Penmetsa R.V., Oldroyd G.E.D., Ayax C., Lévy J., Debellé F., Baek J.M., Kalo P., Rosenberg C., Roe B.A., Long S.R., Dénarié J., Cook D.R., 2004. *Medicago truncatula DMIII* required for bacterial and fungal symbioses in legumes. *Science* 303, 1364-1367
- Ballot R., 2009. Prise en compte de facteurs agronomiques dans les indicateurs de rentabilité: Impact de la succession culturale sur la gestion de l'enherbement. Mémoire de fin d'études ESA Angers (co-encadrement UNIP), 135 pp + annexes
- Barker D., Bianchi S., Blondon F., Dattée Y., Duc G., Essad S., Flament P., Gallusci P., Genier G., Muel X., Tourneur J., Denarié J., Huguet T., 1990. *Medicago*, a model plant for studying the molecular genetics of the Rhizobium-legume symbiosis. *Plant Molecular Biology Reporter* 8, 40-49
- Bedousac L., Justes E., 2011. The efficiency of a durum wheat-winter pea intercrop to improve yield and wheat grain protein concentration depends on N availability during early growth. *Plant and Soil* 330, 19-35
- Bockstaller C., Gaillard G., Baumgartner D., Freiermuth Knuchel R., Reinsch M., Brauner R., Unterseher E., 2006. Méthodes d'évaluation agri-environnementale des exploitations agricoles : Comparaison des méthodes INDIGO, KUL/USL, REPRO et SALCA, Colmar, ITADA, p. 112.
- Bouhassan A., Sadiki M., Tivoli B., El Khiati N., 2003. Analysis by detached leaf assay of components of partial resistance of faba bean (*Vicia faba* L.) to chocolate spot caused by *Botrytis fabae* Sard. *Phytopathologia Mediterranea* 42, 183-190
- Bouhassan A., Sadiki M., Tivoli B., 2007. "Effects of temperature and inoculum concentration on expression of the components of partial resistance of faba bean to *Botrytis fabae* Sard. *Acta Botanica Gallica* 154, 53-62
- Bourgeois M., Jacquin F., Cassecuelle F., Savoies V., Belghazi M., Aubert G., Quillien L., Huart M., Marget P., Burstin J., 2011. A PQL (protein quantity loci) analysis of mature pea seed proteins identifies loci determining seed protein composition. *Proteomics* 11, 1581-1594
- Bourion V., Rizvi S.M.H., Fournier S., de Larambergue H., Galmiche F., Marget P., Duc G., Burstin J., 2010. Genetic dissection of nitrogen nutrition in pea through a QTL approach of root, nodule, and shoot variability. *Theoretical and Applied Genetics* 121, 71-86
- Bourion V., Laguerre G., Depret G., Voisin A.S., Salon C., Duc G., 2007. Genetic variability of nodulation and root growth influences nitrogen fixation and accumulation in pea. *Annals of Botany* 100, 589-598
- Butault J.P., Dedryver C.A., Gary C., Guichard L., Jacquet F., Meyard J.M., Nicot P., Pitrat M., Reau R., Sauphanor B., Savigny I., Volay T. (2010) *Ecophyto R&D, quelles voies pour réduire l'usage des pesticides*. (www.inra.fr) 90 pp
- CasDAR 431 Rapport (2008)
- CasDAR 7175 Rapport (2011)
- Champeaux C., 2006. Recours à l'utilisation des pesticides en grandes cultures: évolution de l'indicateur de fréquence des traitements aux travers des enquêtes «pratiques culturales» du SCEES entre 1994 et 2001. INRA, Rapport d'étude commanditée par le MAP (DGFAR). 100 pp.
- CGDD, 2009. Commissariat Général au Développement Durable. La relance des légumineuses dans le cadre d'un plan protéine : quels bénéfices environnementaux ? n°15, 43pp

- Colbach N., Duby C., Cavelier A., Meynard J.M., 1997. Influence of cropping systems on foot and root diseases of winter wheat. Fitting of a statistical model. *European Journal of Agronomy* 6, 61-77
- Colbach N., Dürr C., Roger-Estrade J., Chauvel B., Caneill J., 2006. ALOMYSYS: Modelling black-grass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) germination and emergence, in interaction with seed characteristics and movements and soil climate. I. Construction. *European Journal of Agronomy* 24, 95-112
- Colbach N., Gardarin A., Granger S., Guillemin J.P., Munier-Jolain N., 2008. La modélisation au service de l'évaluation et de la conception des systèmes de culture intégrés. *Innovations Agronomiques* 3, 61-73
- Colbach N., Schneider A., Ballot R., Vivier C., 2010. Diversifying cereal-based rotations to improve weed control. Evaluation with the ALOMYSYS model quantifying the effect of cropping systems on a grass weed. *OCL* 17, 292-300
- Coulon J.B., Meynard J.M., 2011. Vers une agriculture à hautes performances environnementales: Etat des lieux des voies d'amélioration technique proposées par l'INRA. *Innovations Agronomiques* 12, 1-15
- Cousin R., 1983. Breeding for yield and for protein content in pea. In: R. Thompson and R. Casey (Eds). *Perspectives for Peas and Lupin as Protein Crops*, Nijhoff, Netherlands, pp 146-164
- Corre-Hellou G., Fustec J., Crozat Y., 2006. Interspecific competition for Soil N and its interaction with N₂ fixation, leaf expansion and crop growth in pea-barley intercrops. *Plant Soil* 282, 195-208
- Crosson P., 2005. *Aphanomyces euteiches*. Un test plus sensible pour éviter le risque. *Bulletin des semences* 182, 26-28
- de Tourdonnet S., 2008. Utilisation de cultures associées en semis direct. *TCS* 46, 21-2
- Dénarié J., Debellé F., Promé J.C., 1996. Rhizobium lipo-oligosaccharide nodulation factors: signaling molecules mediating recognition and morphogenesis. *Ann. Rev. Biochem.* 65, 503-35
- Deulvot C., Charrel H., Marty A., Jacquin F., Donnadiou C., Lejeune-Henaut I., Burstin J., Aubert G., 2010. Highly-multiplexed SNP genotyping for genetic mapping and germplasm diversity studies in pea. *BMC Genomics* 11, 468-478
- Deytieux V., Nemecek T., Freiermuth Knuchel R., Gaillard G., Munier-Jolain N., 2012. Is integrated weed management efficient for reducing environmental impacts of cropping systems? A case study based on life cycle assessment. *Europ. J. Agronomy* 36, 55-65
- Duc G., Messenger A., 1989a. Mutagenesis of pea (*Pisum sativum* L.) and the isolation of mutants for nodulation and nitrogen fixation. *Plant Science* 60, 207-213
- Duc G., Trouvelot A., Gianinazzi-Pearson V., Gianinazzi S., 1989b. First report of non-mycorrhizal plant mutants (Myc-) obtained in pea (*Pisum sativum* L.) and faba bean (*Vicia faba* L.). *Plant Science* 60: 215-222
- Duc G., Bertrand D., Bourdon D., Carré B., Faurie F., Gallant D., Hess V., Huart M., Marget P., Melcion J.P., Moessner A., Mousset-Déclas C., Sève, B., Thibault J.F., Tisserand J.L., 2001. Cotyledon cell-wall composition and distribution in *Pisum sativum* L.: some genetic variability and its relationship with the seed grinding response and the nutritional value. 4th European Conference on Grain Legumes, Cracovie, Poland, 8-12/07/2001, AEP (Pbs), ISBN n° 2-9509491-4-2, 84-85
- Duc G., Bao S.Y., Baum M., Redden B., Sadiki M., Suso M. J., Vishniakova M., Zong X.X., 2010. Diversity maintenance and use of *Vicia faba* L. genetic resources. *Field Crops Research* 115, 270-278
- Duc G., Mignolet C., Carrouée B., Huyghe C., 2010a. Importance économique passée et présente des légumineuses : rôle historique dans les assolements et les facteurs d'évolution. *Innovations Agronomiques* 11, 1-24
- Duc G., Blancard S., Hénault C., Lecomte C., Petit M.-S., Bernicot M.-H., Bizouard F., Blanc N., Blondon A., Blosserville N., Bonnin E., Bois B., Castel T., Challan-Belval C., Coulon C., Delattre M., Deytieux V., Dobrecourt J.F., Dumas M., Geloën M., Humeau F., Huot E., Jeuffroy M.-H., Killmayer M., Larmure A., Lelay D., Leseigneur A., Mabire J.-B., Mangin P., Marget P., Million G., Raynard L., Robin P., Ronget D., Richard Y., Vaccari V., Vermue A., Villard A., Villery J., Vivier C., 2010b. Potentiels et leviers pour développer la production et l'utilisation des protéagineux dans le cadre d'une agriculture durable en Bourgogne. *Innovations Agronomiques* 11, 157-173

- Eteve G., 1985. Breeding for Tolerance and Winter Hardiness in Pea. In: Hebblethwaite, P.D., M.C. Heath and T.C.K. Dawkins (Eds.). *The Pea Crop A Basis for Improvement*, Butterworths, London, UK. pp 163-172
- Foucher F, Morin J, Courtiade J, Cadioux S, Ellis N, Banfield M, Rameau C., 2003. DET and LF are two TFL1/CEN homologues controlling two distinct phases of flowering initiation and development in pea. *Plant Cell* 15, 2742-2754
- Gabriel I., Lessire M., Juin H., Burstin J., Duc G., Quillien L., Thibault J.F., Leconte M., Hallouis J.M., Ganier P., Mèzière N., Sève B., 2008a. Variation in seed protein digestion of different pea (*Pisum sativum* L.) genotypes by cecectomized broiler chickens: 1. Endogenous amino acid losses, true digestibility and *in vitro* hydrolysis of proteins. *Livestock Science* 113, 251-261
- Gabriel I., Quillien L., Cassecuelle F., Marget P., Juin H., Lessire M., Sève B., Duc G., Burstin J., 2008b. Variation in seed protein digestion of different pea (*Pisum sativum* L.) genotypes by cecectomized broiler chickens. 2. Relation between *in vivo* protein digestibility and pea seed characteristics, and identification of resistant pea polypeptides. *Livestock Science* 113, 262-273
- Grant C., Bittman S., Montreal M., Plenchette C., Morel C., 2005. Soil and fertilizer phosphorus: Effects on plant P supply and mycorrhizal development. *Can. J. Plant Sci.* 85, 3–14
- Girardin P., Bockstaller C., van der Werf H., 2000. Assessment of potential impacts of agricultural practices on the environment: the AGRO ECO method. *Environment Impact Assessment Review* 20, 227-239.
- Gueguen J., Duc G. (coordonnateurs), Boutin, J.P., Dronne, Y., Munier-Jolain, N., Sève, B., Tivoli, B., 2008. La filière protéagineuse. Quels défis ? Editions Quae, 147 p.
- Gutierrez N., Avila C.M., Duc G., Marget P., Suso M.J., Moreno M.T., Torres, A.M., 2006. CAPs markers to assist selection for low vicine and convicine contents in faba bean (*Vicia faba* L.). *Theoretical and Applied Genetics* 114, 59-66
- Hanocq E., Jeuffroy M.H., Lejeune-Hénaut I., Munier-Jolain N., 2009. Construire des idéotypes pour des systèmes de culture variés en pois d'hiver. *Innovations Agronomiques* 7, 14-28
- Huyghe C., 1991. Winter growth of autumn sown white lupin (*Lupinus albus* L.): main apex growth model. *Ann. Bot.* 67, 429-434
- Jeuffroy M.H., Baranger A., Carrouée B., de Chezelles E., Cellier P., Hénault C., Schneider A., 2011. Greenhouse gas emission decreases by introducing peas in cropping systems. Nitrogen & Global Change conference in Edinburgh, April 2011
- Kharrat M., Le Guen J., Tivoli B., 2006. Genetics of resistance to 3 isolates of *Ascochyta fabae* on faba bean (*Vicia faba* L.) in controlled conditions. *Euphytica* 151, 49-61
- Krussel L, Madsen L.H., Sato S., Aubert G., Genua A., Szczyglowski K, Duc G., Tabata S., Bruijn F., Pajuelo E., Sandal N., Stougaard J., 2002. Shoot regulation of nodule and root development is mediated by a serine/threonine receptor kinase. *Nature* 420, 422-426
- Lacassagne L., 1988. Alimentation des volailles substitués au tourteau de soja. *INRA productions animales* 1, 47-57
- Laguerre G., Depret G., Bourion V., Duc G., 2007. *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* genotypes interact with pea plants in developmental responses of nodules, roots and shoots. *New Phytol.* 176, 680-690
- Le May C., Jumel S., Schoeny A. and Tivoli B., 2009a. *Ascochyta* blight development on a new winter pea genotype highly reactive to photoperiod under field conditions. *Field Crops Research* 111, 32-38
- Le May C., Ney B., Lemarchand E., Schoeny A., Tivoli B. 2009b. 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., Schoeny A., Tivoli B, Ney B., 2005. Improvement and validation of a pea crop growth model to simulate the growth of cultivars infected with *Ascochyta* blight (*Mycosphaerella pinodes*). *Eur. J. Plant Pathol.* 112, 1-12

- Le Signor C., Savoie V., Aubert G., Verdier J., Nicolas M., Pagny G., Moussy F., Sanchez M., Baker D., Clarke J., Thompson R., 2009. Optimizing TILLING populations for reverse genetics in *Medicago truncatula*. *Plant Biotechnology Journal* 7, 430-441
- Lejeune-Hénaut I., Bourion V., Etévé G., Cunot E., Delhaye K., Desmyter C., 1999. Floral initiation in field-grown forage peas is delayed to a greater extent by short photoperiods, than in other types of European varieties. *Euphytica* 109, 201-211
- Lejeune-Hénaut I., Hanocq E., Bethencourt L., Fontaine V., Delbreil B., Morin J., Petit A., Devaux R., Boilleau M., Stempniak J.J., Thomas M., Laine A.L., Foucher F., Baranger A., Burstin J., Rameau C., Giauffret C., 2008. The flowering locus *Hr* colocalizes with a major QTL affecting winter frost tolerance in *Pisum sativum* L.. *Theor. Appl. Gen.* 116, 1105-1116
- Bourion V., Laguerre G., Depret G., Voisin A.S., Salon C., Duc G., 2007. Genetic Variability in Nodulation and Root Growth Affects Nitrogen Fixation and Accumulation in Pea. *Annals of Botany* 100, 589-598
- Lévy J., Bres C., Geurts R., Chalhoub B., Kulikova O., Duc G., Journet E.P., Ané J.M., Lauber E., Bisseling T., Dénarié J., Rosenberg C., Debelle F., 2004. A putative Ca²⁺ and calmodulin-dependent protein kinase required for bacterial and fungal symbioses. *Science* 303, 1361-1364
- Maillet F., Poinot V., André O., Puech-Pagès V., Haouy A., Gueunier M., Cromer L., Giraudet D., Formey D., Niebel N., Martínez E.A., Driguez H., Bécard G., Dénarié J., 2011. Fungal lipochitooligosaccharide symbiotic signals in arbuscular mycorrhiza. *Nature* 469, 58-63
- Maurin N., Tivoli B., 1992. Variation in the resistance of *Vicia faba* to *Ascochyta fabae* in relation to disease development in field trials. *Plant Pathol.* 41, 737-744
- Maurin N., Gourret J.P., Tivoli B., 1993. Histopathology of interaction between *Ascochyta fabae* and *Vicia faba*: comparison of susceptible and resistant reactions. *Agronomie* 13, 921-927
- Morandi D., Sagan M., Prado-Vivant E., Duc G., 2000. Influence of genes determining supernodulation on root colonization by the mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* in *Pisum sativum* and *Medicago truncatula* mutants. *Mycorrhiza* 10, 37-42
- Moussart A., Wicker E., Duparque M., Rouxel F. 2001 – Development of an efficient screening test for pea resistance to *Aphanomyces euteiches*. Fourth european conference on grian legumes, 8-12 July, Cracow, Proceedings, AEP : 272-273.
- Moussart A., Tivoli B., 2005. Test de criblage en conditions contrôlées pour la résistance du pois à *Aphanomyces euteiches*. Cahier des Technique de l'INRA, Méthodes d'appréciation du comportement variétal vis-à-vis des bioagresseurs, Ed INRA, 115-117.
- Moussart A, Onfroy C, Lesné A, Esquibet M, Grenier E, Tivoli B (2007). Host status and reaction of *Medicago truncatula* accessions to infection by three major pathogens of pea (*Pisum sativum*) and alfalfa (*Medicago sativa*). *Eur J Plant pathol* 117:57-69
- 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*. *Eur J Plant pathol* 122 : 321-333.
- Moussart A. Wicker E., Le Delliou B., Abélard J.M., Esnault R., Lemarchand E., Rouault F., Le Guennou F., Pilet-Mayel M.L., Baranger A., Rouxel F. and Tivoli B. (2009). Spatial distribution of *Aphanomyces euteiches* inoculum in a naturally infested pea field. *European Journal of Plant Pathology*, 123: 153-158
- Munier Jolain N., Carrouée B., 2003. Quelle place pour le pois dans une agriculture respectueuse de l'environnement ? Argumentaire agri-environnemental. *Cahiers Agricultures* 12, 111-120
- Munier-Jolain N.M., Savoie V., Kubiak P., Maillet-Mézeray J., Jouy L., Quéré L., 2005. DECID'Herb, a decision support system on the WEB, designed for sustainable weed management in cultivated fields. In: XIII European Weed Research Society Symposium. Bari, Italy.
- Munier-Jolain N., Deytieux V., Guillemin J.P., Granger S., Gaba S., 2008. Conception et évaluation multicritères de prototypes de systèmes de culture dans le cadre de la Protection Intégrée contre la flore adventice en grandes cultures. *Innovations Agronomiques* 3, 75-88

- Naudin C., Corre-Hellou G., Pineau S., Crozat Y., Jeuffroy M.H., 2010. The effect of various dynamics of N availability on winter pea-wheat intercrops: Crop growth, N partitioning and symbiotic N₂ fixation - Field Crops Research 119, 2-11.
- Ney B., Duthion C., Turc O., 1994. Phenological response of pea to water stress during reproductive development. Crop Sci. 34, 141-146
- Ney B., Duc G., 1997. Potential and problems with winter sowing of food legumes in northern Europe. In: AEP (Eds), Problems and Prospects for winter sowing of grain Legumes in Europe. AEP, pp 35-42
- Onfroy C., Tivoli B., Corbière R., Bouznad Z., 1999. Cultural, molecular and pathogenic variability of *Mycosphaerella pinodes* and *Phoma medicaginis* var *pinodella* isolates from dried pea in France. Plant Pathol 48, 218-229
- Onfroy C., Tivoli B., 2005. Test de criblage du pois protéagineux au stade juvénile pour la résistance au pathogène fongique *Mycosphaerella pinodes*. Cahier des Techniques de l'INRA, Méthodes d'appréciation du comportement variétal vis-à-vis des bioagresseurs, Ed INRA, pp 123-126
- Onfroy C., Baranger A., Tivoli B., 2007. Biotic factors affecting the expression of partial resistance in pea to ascochyta blight in a detached stipule assay. EJPP 119, 13-27
- Page D., Aubert G., Duc G., Welham T., Domoney C., 2002. Combinatorial variation in coding and promoter sequences of genes at the Tri locus in *Pisum sativum* accounts for variation in trypsin inhibitor activity in seeds. Mol Genet Genomics 267, 359-369
- Papineau J., Huyghe C., 1989. Collecting white lupin in the Azores. Plant Genetic Resources Newsletter 88-89, 77-78
- Pelzer E., Bazot M., Makowski D., Corre-Hellou G., Naudin C., Al Rifai M., Baranger E., Bedoussac L., Biarnès V., Boucheny P., Carrouée B., Dorvillez D., Foissy D., Gaillard B., Guichard L., Mansard M.C., Omon B., Prieur L., Yvergniaux M., Justes E., Jeuffroy M.H., 2012. Pea-wheat intercrops in low-input conditions combine high economic performances and low environmental impacts. Eur. J. Agr. 40, 39-53
- Pilet-Nayel M.L., Muehlbauer F.J., McGee R.J., Kraft J.M., Baranger A., Coyne C.J., 2002. Quantitative trait loci for partial resistance to *Aphanomyces* root rot in pea. Theor. Appl. Genet. 106, 28-39
- Pilet-Nayel M.L., Esnault R., Boitel C., Roux-Duparque M., 2005. Test de criblage au champ pour la résistance du pois à *Aphanomyces euteiches*. Cahier des Techniques de l'INRA, Méthodes d'appréciation du comportement variétal vis-à-vis des bioagresseurs, Ed INRA, pp. 65-67
- Pilet-Nayel M.L., Muehlbauer F.J., McGee R.J., Kraft J.M., Baranger A., Coyne C.J., 2005. Consistent QTLs in pea for partial resistance to *Aphanomyces euteiches* isolates from United States and France. Phytopathology 95, 1287-1293.
- Pilet-Nayel M.L., Prospéri J.M., Lesné A., Lecoïnte R., Le Goff I., Hervé M., Deniot G., Delalande M., Huguet T., Jacquet C., Baranger A., 2009. AER1, a major gene conferring resistance to *Aphanomyces euteiches* in *Medicago truncatula*. Phytopathology 99, 203-208
- Picard J., Duc G., 1986. "Côte d'Or", a highly frost resistant population of faba bean. Fabis Newsletters 13, 11-12
- Picard J., 1976. Aperçu sur l'hérédité du caractère absence de tannins dans les graines de féveroles (*Vicia faba* L.). Annales de l'amélioration des plantes 26, 101-106
- Pivato B., Mazurier S.; Lemanceau P. Siblot S., Berta G., Mougél C., van Tuinen D., 2007. *Medicago* species affect the community composition of arbuscular mycorrhizal fungi associated with roots New Phytol. 176, 197-210
- Poly J., 1977. L'approvisionnement de la France en aliments riches en protéines destinés aux animaux domestiques. Eds INRA, 47 p
- Prioul, C. Onfroy, Tivoli B., Baranger A., 2003. Controlled environment assessment of partial resistance to *Mycosphaerella pinodes* in pea (*Pisum sativum* L.) seedlings. Euphytica 131, 121-130
- Prioul S., Frankewitz A., Deniot G., Morin G., Baranger A., 2004. Mapping of Quantitative Trait Loci for partial resistance to *Mycosphaerella pinodes* in pea (*Pisum sativum* L.) at the seedling and adult plant stages. Theoretical and Applied Genetics 108, 1322-1334

- Prioul-Gervais S., Deniot G., Receveur E.M., Frankewitz A., Fourmann M., Rameau C., Pilet-Nayel M.L., Baranger A., 2007. Candidate genes for quantitative resistance to *Mycosphaerella pinodes* in pea (*Pisum sativum* L.). *Theoretical and applied genetics* 114, 971-984
- Sagan M., Ney B., Duc G., 1993. Plant symbiosis as a tool to analyse nitrogen nutrition and yield relation ship in field-grown peas (*Pisum sativum* L.). *Plant and Soil* 153, 33-45
- Sagan M., Morandi D., Tarengi E., Duc G., 1995. Selection of nodulation and mycorrhizal mutants in the model plant *Medicago truncatula* (Gaertn.) after gamma-ray mutagenesis. *Plant Science* 111, 63-71
- Salon C., Lepetit M., Gamas P., Jeudy C., Moreau S., Moreau D., Voisin A.-S., Duc G., Bourion V., Munier-Jolain N., 2009. Analysis and modeling of the integrative response of *Medicago truncatula* to nitrogen constraints. *Comptes Rendus Biologies* 332, 1022-1033
- Savois V., Durand S., Magnin-Robert J.B., Lesignor C., Duc G., Burstin J., 2007. LegumBase, une application polyvalente conçue pour gérer le CRG légumineuses à graines. *Graines 2007*, Institut national d'horticulture, Angers, France, 7-8 juin 2007. Book of abstracts pp. 83
- Schneider A., Flénet F., Dumans P., Bonnin E., de Chezelles E., Jeuffroy M.H., Hayer F., Nemecek T., Carrouée B., 2010. Diversifier les rotations céréalières notamment avec du pois et du colza – Données récentes d'expérimentations et d'études. *OCL*, 17, 301-311
- Schoeny A, Menat J., Darsonval A., Rouault F., Jumel S, Tivoli B., 2008. Effect of pea canopy architecture on splash dispersal of *Mycosphaerella pinodes* conidia. *Plant Pathology* 57, 1073-1085
- Schoeny A., Jumel S., Rouault F., Le May C., Tivoli B., 2007. Primary inoculum availability and modelling of disease onset of *Ascochyta* blight in field peas. *Eur. J. Plant Pathol.* 118, 87-97
- 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 Pathol.* 126, 317-331
- Schott C., Mignolet C., Meynard J.M., 2010. Les oléoprotéagineux dans les systèmes de culture : évolution des assolements et des successions culturales depuis les années 1970 dans le bassin de la Seine. *OCL* 17, 276-291
- Tasei J.N., 1984. Légumineuses fourragères et protéagineuses. In : P. Pesson et J. Louveaux (Eds.). *Pollinisation et productions végétales INRA Eds.* ISBN2.85340.481.1. pp 261-308
- Thiébeau P., Lô-Pelzer E., Klumpp K., Corson M., Hénault C., Bloor J., de Chezelles E., Soussana J.F., Lett J.M., Jeuffroy M.H. (2010) Conduite des légumineuses pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle de la culture et de l'exploitation agricole *Innovations Agronomiques* 11, 45-58
- Thomas A., 2010. Evaluation de l'impact environnemental des politiques et prix agricoles en grande culture. *Innovations Agronomiques* 11 (2010), 129-136
- Tivoli B., Berthelem D., Le Guen J., Onfroy C., 1986. Comparison of some methods for evaluation of reaction of different winter faba bean genotypes to *Botrytis fabae*. *FABIS Newsl.* 16, 46-51
- Tivoli B., Reynaud B., Maurin N., Berthelem P., Le Guen J., 1987. Comparison of some methods for evaluation of reaction of different faba bean genotypes to *Ascochyta fabae*. *FABIS Newsletter* 17: 35-38
- Tivoli B., Berthelem P., Le Guen J., Onfroy C., 1988. A study of the performance of certain faba bean genotypes in relation to *Botrytis fabae* and *Ascochyta fabae* in France. *FABIS Newsletter* 21, 36-39
- Tivoli B., Baranger A., Avila CM., Banniza S., Barbetti M., Chen W., Davidson D., Lindeck K., Kharrat M., Rubiales D., Sadiki M., Sillero JC., Sweetingham M., Muehlbauer FJ., 2006. Screening techniques and sources of resistance to foliar diseases caused by major necrotrophic fungi in grain legumes. *Euphytica* 147, 223-253
- Voisin A.S., Salon C., Munier-Jolain N.G., Ney B., 2002. Effect of mineral nitrogen on nitrogen nutrition and biomass partitioning between the shoot and roots of pea (*Pisum sativum* L.). *Plant and Soil* 242, 251-262
- Vocanson A., Jeuffroy M.H., 2007. Agronomic performance of different pea cultivars under various sowing periods and contrasting soil structures. *Agron. J.* 3, 748-759

Wicker E., Hullé M., Rouxel F., 2001a. Pathogenic characteristics of isolates of *Aphanomyces euteiches* from pea in France. *Plant Pathol.* 50, 433-442

Wicker E., Rouxel F., 2001b. Specific behaviour of French *Aphanomyces euteiches* Drechs. populations for virulence and aggressiveness on pea, related to isolates from Europe, America and New-Zealand. *Eur J Plant Pathol.* 107, 919-929

Wicke E., Moussart A., Duparque M., Rouxel F., 2003. Further contributions to the development of a differential set of pea cultivars (*Pisum sativum*) to investigate the virulence of isolates of *Aphanomyces euteiches*. *Eur. J. Plant Pathol.* 109, 47-60

Young N.D. et al. ,2011. The Medicago genome provides insight into the evolution of rhizobial symbioses. *Nature* 480: doi 10.1038/nature10625

<http://www.paris.inra.fr>

<http://www5.paris.inra.fr/depe/Projets/Agrimonde>. INRA-CIRAD (2009). Agrimonde, Agricultures et alimentations du monde en 2050 : scénarios et défis pour un développement durable

<http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?type=REPORT&reference=A7-2011-0026&language=FR>

http://www.inra.fr/presse/signature_gis_grande_cultuture_hautes_performances_economiques_enviromentales

<http://www.systemesdecultureinnovants.org/>.

<http://www4.inra.fr/psdr-bourgogne/par-la-recherche/Projets-de-recherche/PROFILE>