HAL open science

Les légumineuses dans l'Europe du XXIè siècle : Quelle place dans les systèmes agricoles et alimentaires actuels et futurs ? Quels nouveaux défis pour la recherche ?

Anne-Sophie Voisin, Jacques Guéguen, Christian Huyghe, Marie-Helene Jeuffroy, Marie-Benoît Magrini, Jean-Marc Meynard, Christophe Mougel, Sylvain Pellerin, Elise Pelzer

▶ **To cite this version:**

Anne-Sophie Voisin, Jacques Guéguen, Christian Huyghe, Marie-Helene Jeuffroy, Marie-Benoît Magrini, et al.. Les légumineuses dans l'Europe du XXIè siècle : Quelle place dans les systèmes agricoles et alimentaires actuels et futurs ? Quels nouveaux défis pour la recherche ?. Innovations Agronomiques, 2013, 30, pp.283-312. 10.17180/767p-n553 . hal-01005055v1

HAL Id: hal-01005055

https://hal.science/hal-01005055v1

Submitted on 11 Jun 2014 (v1), last revised 9 Mar 2017 (v2)

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

Innovations Agronomiques 30 (2013), 283-312

Les légumineuses dans l'Europe du XXIè siècle : Quelle place dans les systèmes agricoles et alimentaires actuels et futurs ? Quels nouveaux défis pour la recherche ?

Voisin A.S.[1], Guéguen J.[2], Huyghe C.[3], Jeuffroy M.H.[4], Magrini M.B.[5], Meynard J.M.[6], Mougel C.[1], Pellerin S.[7], Pelzer E.[4]

[1] : INRA, UMR1347 Agroécologie, BP 86510, F-21000 Dijon
[2] : INRA, UR1268 Biopolymères Interactions Assemblages, F-44300 Nantes
[3] : INRA, Centre Poitou-Charentes, BP 6, F-86600 Lusignan
[4] : INRA, UMR211 Agronomie, F-78850 Thiverval-Grignon
[5] : INRA, UMR 1248 AGIR, BP 52627, F-31320 Castanet-Tolosan
[6] : INRA, Département SAD, BP1, F-78850 Thiverval-Grignon
[7] : INRA, UMR 1220 TCEM, F-33883 Villenave d'Ornon

Correspondance : Anne-Sophie.Voisin@dijon.inra.fr

Résumé :

L'intensification agricole amorcée depuis les années 1950 a globalement conduit au déclin des cultures légumineuses, qui représentent aujourd'hui moins de 3 % des grandes culture françaises et européennes. Pourtant, les légumineuses présentent plusieurs atouts : (i) en tant que source de protéines végétales pour l'alimentation humaine ou animale et (ii) en tant que plantes fixatrices de l'azote de l'air, économes en intrants azotés, et (iii) en tant que cultures de diversification dans les systèmes de culture. Une analyse des systèmes de production des légumineuses à graines et fourragères en France montre que les différents facteurs freinant l'insertion de ces cultures relèvent d'un processus de « verrouillage » du régime socio-technique agricole dominant. Pourtant les légumineuses pourraient jouer un rôle majeur dans la transition agroécologique vers des systèmes agricoles, alimentaires et énergétiques plus durables. Une approche économique mobilisant l'approche multi-niveaux de la théorie des transitions a permis d'identifier des voies de déverrouillage de la production de légumineuses. A la lumière de cette analyse, quatre grands groupes de questions de recherche ont été identifiés, concernant (i) l'analyse des verrouillages et l'identification des leviers de transition vers des systèmes intégrant plus de légumineuses (ii) l'identification de débouchés nouveaux et diversifiés pour les légumineuses dans une chaine alimentaire durable, (iii) l'évaluation et l'amélioration des services écosystémiques rendus par les légumineuses à l'échelle des systèmes de culture et des territoires, et (iv) l'optimisation de la conduite des cultures de légumineuses dans une démarche globale d'intensification écologique.

Mots-clés : légumineuses, fourrages, protéagineux, légumes secs, systèmes agricoles et alimentaires, innovation, agroécologie, durabilité, impacts environnementaux, azote, protéines, alimentation, transitions, valeur ajoutée, bioénergies, associations végétales, élevage, symbiose, filière, économie, recherche, France, Europe.

Abstract: Legumes in 21st century Europe: present and future importance in agri-food systems? New challenges for reseach.

Intensification of agriculture since 1950 has globally led to the decline of grain legume crops, which currently represent less than 3 % of arable crops in France and Europe. Nevertheless, legumes have several major assets (i) as plant proteins for animal feed and human food and (ii) as plants fixing atmospheric N_2 and thereby saving nitrogen inputs in cropping systems, and (iii) as diversification crops. The analysis of forage and grain legume producing systems in France showed that the dominant system results in a lock-in of the different factors limiting legume insertion into the current systems. But

legumes could have a major role to play in the agroecological transition towards more sustainable agricultural, food and energy systems. The multi-level perspective in the theory of transitions helped us to identify ways of unlocking legume production. Four groups of research questions were thus identified: (i) analysing the lock-ins in the current systems and identifying ways of moving towards systems that include more legumes (ii) identifying new and more diversified outlets for legumes in a sustainable food chain, (iii) assessing and improving the ecosystem services provided by legumes at cropping system and territory scales and (iv) optimising legume crop management in a global agroecological approach.

Keywords: legumes, forage, pulses, agri food systems, innovation, agroecology, sustainability, environmental impacts, nitrogen, protein, food, feed, transitions, added value, biofuels, intercropping, animal production, symbiosis, supply chain, market, research, France, Europe.

Introduction

La révolution agricole de l'après-guerre a conduit, entre les décennies 1950 et 1980, à une intensification importante de l'agriculture française, grâce au développement de la mécanisation et à un usage de plus en plus intensif d'intrants de synthèse. Cette intensification, et la structuration concomittante des filières, ont favorisé une forte spécialisation des systèmes de production pratiqués, avec une séparation géographique entre production animale et végétale et des rotations de plus en plus courtes. Cette évolution, basée sur le choix d'espèces cultivées assurant la meilleure rentabilité à court terme, a conduit à l'abandon d'espèces produisant certains services agronomiques et environnementaux telles que les légumineuses (Schott et al, 2010). A partir des années 1990, l'incertitude naissante sur les disponibilités énergétiques futures, la montée en puissance des préoccupations environnementales et le développement de l'agriculture biologique marquent les premiers signes d'une remise en cause de ce système de production agricole intensif en capital et hautement spécialisé, qualifié par Allaire et Boyer (1995) d'agriculture du fordisme. La reconnaissance croissante des externalités négatives associées aux systèmes intensifs (pollutions des milieux, émissions de gaz à effet de serre, perte de biodiversité ...) incite alors une partie des acteurs du monde agricole à rechercher des pratiques plus économes et plus respectueuses de l'environnement. Toutefois, la transition vers une agriculture plus durable ne s'initie pas rapidement, malgré les préconisations avancées par de nombreuses études (Altieri et al., 1983 ; Hill et MacRae, 1995; Millenium Ecosystem Assessment, 2005 ; Aubertot et al., 2005 ; Rapport Tuot, 2007 ; Le Roux et al., 2008 ; Butault et al., 2010). Des modes de production innovants limitant l'usage d'intrants et reposant sur une valorisation de la diversité et des régulations bio(éco)logiques dans les agro-systèmes, que l'on peut regrouper sous le terme d'"agro-écologie" (Altieri, 1992 ; Altieri et Nicholls, 2012), peuvent répondre à ces objectifs ; mais leur développement se heurte à une organisation très structurée des acteurs des filières et des institutions, qui ne laisse guère de place pour des systèmes de production en rupture avec l'existant (Vanloqueren et Baret, 2009 ; Roep et Wiskerke 2012 ; Meynard et al., 2013). Par ailleurs, la croissance démographique mondiale, associée à une convergence des revenus et des modes de vie à l'occidentale (avec une forte consommation des produits carnés), remet en question la capacité de l'agriculture à répondre aux besoins alimentaires des 9 milliards d'individus que comptera la planète à l'horizon 2050. Une substitution partielle des protéines animales par des protéines végétales pourrait permettre de répondre à cette demande croissante dans le cadre d'un développement durable des systèmes agricoles et alimentaires (Dorin et al., 2011).

Dans ce contexte, les légumineuses présentent plusieurs atouts : (i) au niveau des systèmes alimentaires, pour les utilisateurs humains ou animaux, les légumineuses constituent une source de protéines végétales de bonne valeur nutritionnelle, avec des protéines aux caractéristiques complémentaires de celles des céréales, (ii) au niveau des systèmes de production, la capacité à fixer l'azote de l'air en symbiose avec des bactéries du sol leur confère un fort potentiel d'insertion dans les

systèmes de culture à bas niveaux d'intrants et à faible niveau d'émission de gaz à effet de serre. (iii) Enfin, dans les systèmes de culture actuels dominés par deux ou trois espèces majeures, les légumineuses jouent un rôle de cultures de diversification, permettant une rupture des cycles des bioagresseurs, le développement de populations d'auxiliaires de défense des cultures, une réduction des intrants pour les autres cultures de la succession, l'amélioration de leur efficience, et l'accroissement de la qualité des mosaïques paysagères. Les légumineuses peuvent par conséquent jouer un rôle majeur dans la transition agro-écologique en faveur de systèmes agricoles plus durables, avec de surcroit des effets positifs attendus dans des domaines connexes à l'agriculture (réduction de la consommation d'énergie pour la fabrication d'engrais azotés de synthèse, amélioration des régimes alimentaires). Paradoxalement, malgré un intérêt environnemental certain et l'existence de débouchés importants non seulement pour l'alimentation animale mais aussi pour l'alimentation humaine, les légumineuses à graines occupent une très faible place dans les systèmes agricoles français et européens, leur contribution dans les prairies artificielles et temporaires étant plus significative. Pourtant, différents signaux montrent le souhait des pouvoirs publics français et européens de favoriser le développement de ces cultures. Face à ce constat, les auteurs proposent de s'interroger sur les travaux de recherche à privilégier pour accompagner cette évolution. Les objectifs de cet article sont, sur l'exemple de la France, représentative des systèmes de culture et de production européens, (i) de mettre en évidence les causes de la faiblesse des surfaces en légumineuses, puis d'identifier les leviers d'action en amont et en aval de la filière qui favoriseraient une insertion plus grande des légumineuses dans les systèmes de production, pour contribuer à la transition agroécologique de l'agriculture, puis (ii) à la lumière de cette analyse, de proposer un renouvellement des questions de recherche dans les différentes disciplines mobilisées, et enfin (iii) d'en tirer quelques enseignements pour l'organisation actuelle de la recherche et la nécessité de favoriser une posture de recherche interdisciplinaire et partenariale plus forte.

I. Place des légumineuses dans les systèmes agricoles et alimentaires actuels et futurs.

I.1. Contexte ayant conduit à la faible place des légumineuses dans les systèmes agricoles français du début du XXIème siècle:

Depuis les années 1950, la part des légumineuses à graines et fourragères dans l'agriculture française a considérablement diminué, sous l'effet conjugué de l'intensification des élevages, appuyé progressivement par des importations massives de soja, un soutien politique européen aux productions de céréales (Cavaillès et al, 2009) et un contexte climatique et parasitaire de moins en moins favorable. Ces évolutions sont similaires en Europe, où les légumineuses à graines ou fourragères en culture pure couvraient en moyenne seulement 3.3 % de la surface agricole en 2006, contre plus de 30 % aux USA (Figure 1). Pourtant, des débouchés existent, et la majorité des besoins en protéines végétales sont couverts par les importations.

I.1.1 Légumineuses fourragères : un déclin des lié à l'intenstification de l'agriculture.

Historiquement en France, les légumineuses étaient principalement cultivées pour la production de fourrages riches en protéines. Ces cultures étaient insérées dans les systèmes de polyculture-élevage en raison de leur rôle agronomique vis-à-vis de l'azote dans la rotation. Leur culture se développe en France à partir du milieu du 18ème siècle. Au début des années 1960, les surfaces en culture pure atteignaient en France 3.3 millions d'hectares et représentaient 17 % des terres arables (Figure 2). Au cours des 30 années suivantes, les surfaces de légumineuses ont diminué, pour atteindre des surfaces inférieures à 400 000 ha. En revanche, les légumineuses se sont maintenues dans les associations prairiales des prairies temporaires, qui sont restées relativement stables des années 1960 aux années 2000 (autour de 3 millions d'hectares, dont 35 à 40% d'association avec légumineuses).

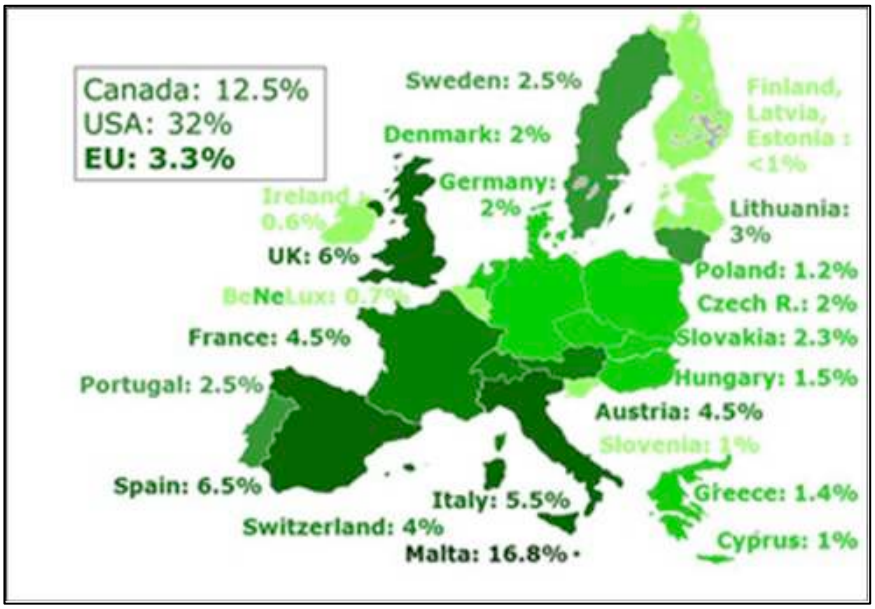


Figure 1 : Part relative des surfaces de légumineuses à graines par rapport aux grandes cultures dans les pays de l'UE en 2006 (Source UNIP).

La forte chute, au cours des années 1960, des surfaces de légumineuses fourragères en cultures pures est le résultat de la révolution fourragère. L'objectif de cette révolution était de répondre à la forte demande de l'après-guerre en produits agricoles et en particulier en produits carnés. Dans ce contexte, les légumineuses prairiales ont été progressivement remplacées par le maïs ensilage et les prairies de graminées monospécifiques, abondamment fertilisées. Ainsi, l'utilisation massive d'engrais azotés de synthèse, disponibles à prix attractifs, a été encouragée et soutenue par la recherche agronomique, et a fait oublier le rôle fertilisant des légumineuses dans les rotations. Cette évolution a concordé avec une évolution des systèmes d'alimentation des ruminants substituant progressivement le maïs ensilage et le tourteau de soja au foin et aux protéines de luzerne. Le recours à l'ensilage de graminées et de maïs, à valeur énergétique plus élevée, offre à l'éleveur une meilleure qualité et sécurité fourragère, tout en réduisant les charges de travail. En effet, la récolte en foin des légumineuses nécessitait beaucoup de main d'œuvre, en l'absence de mécanisation adaptée, avec des qualités peu prévisibles du fait des risques de perte de feuilles lors de la fenaison ; et les fourrages de légumineuses sont peu propices à une conservation en ensilage, en raison de leur faible teneur en sucres.

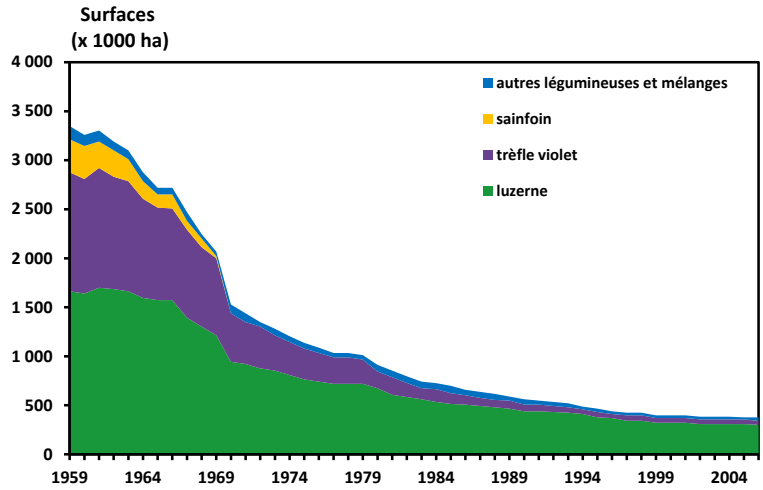


Figure 2 : Evolution des surfaces française en légumineuses fourragères pures de 1960 à 2007, d'après données Agreste (source : Etude relance des légumineuses CGDD 2009)

Par ailleurs, le contexte de prix des matières premières de l'alimentation animale est devenu fortement défavorable aux rations hivernales à base de foin de légumineuses (complété par des céréales). En

effet, alors que les légumineuses fourragères n'ont jamais bénéficié de soutien de la PAC, à l'exception des fourrages séchés, les importations de soja ont bénéficié de régimes de protection aux frontières de l'Union Européenne, qui ont entrainé un différentiel prix favorable à l'utilisation des tourteaux de soja. Enfin, la diminution des légumineuses fourragères dans les systèmes de culture a été accentuée par la spécialisation géographique de la production agricole, qui a conduit à séparer régions céréalières et régions d'élevage.

I.1.2 Légumineuses à graines : un essor de courte durée lié aux évolutions de la PAC.

A l'origine, les légumineuses à graines étaient majoritairement cultivées en tant que source de protéines pour l'alimentation humaine. Au début des années 1960, ces cultures représentaient en France 161 000 ha dont 55 % de haricot, et 24 % de fèves et féverole. Avec l'évolution des régimes alimentaires incorporant de plus en plus de produits carnés, la consommation de légumineuses à graines en France a chuté de 7.3 à 1.4 kg par personne et par an entre 1950 et 1985. Après une forte régression dans les années 1960, ces cultures n'occupaient plus que 60 700 ha en 1972. Du fait de la quasi absence de soutien politique et économique accordé aux légumes secs, cette production à destination de l'alimentation humaine est devenue confidentielle en France, avec des surfaces cultivées inférieures à 15 000 ha (moyenne 2003-2007).

A la fin des années 1970, la culture des légumineuses à graines pour l'alimentation animale s'est développée, grâce une forte volonté politique de la Communauté Européenne. Suite à l'embargo sur le soja décrété en 1973 par les Etats-Unis, l'Europe a pris conscience de sa dépendance au soja américain. Les tourteaux de soja américains constituaient en effet la source majeure de matières riches en protéines pour l'alimentation animale. Les dispositifs mis en place dans les années 1970 par la Politique Agricole Commune (PAC) ont permis de soutenir les productions de protéagineux (terme réglementaire regroupant pois protéagineux, lupin et féverole), garantissant des prix compétitifs à la fois pour les agriculteurs et les transformateurs. Les surfaces de légumineuses à graines ont ainsi augmenté de façon spectaculaire dans les années 1980, avec une prédominance du pois qui a atteint plus de 700 000 ha en 1993 avec en France, suivi par la féverole et le lupin (Figure 3). Le soutien des prix s'est accompagné d'un soutien à la sélection végétale et à la création de références agronomiques sur leurs modes de culture. Mais depuis le début des années 1990, les surfaces n'ont cessé de diminuer, pour atteindre des niveaux de l'ordre de 100 000 hectares ces dernières années. Cette évolution est fortement reliée à l'évolution de la PAC. En 1992, le découplage des aides aux producteurs agricoles a en effet entraîné la fin du soutien des prix des protéagineux, intégrés au régime d'aide aux grandes cultures. En tant que première substituable pour l'alimentation animale, le prix du pois est fixé par celui des autres matières premières : ainsi, le pois apportant dans les formules plus d'énergie (45 % d'amidon) que de protéines (21 %), son prix est positivement corrélé au cours des céréales et dans une moindre mesure à celui du tourteau de soja, avec un différentiel de prix finalement assez faible par rapport au blé.

La baisse des prix a entrainé une décroissance des surfaces ; et cette chute des surfaces a été aggravée par l'instabilité des rendements. Les cultures protéagineuses tempérées sont des espèces jeunes en termes de sélection variétale même si trente années de sélection, essentiellement chez le pois, mais aussi chez la féverole, ont permis une amélioration significative des rendements et de la qualité des graines. Toutefois, les rendements plafonnent à un niveau nettement inférieur à celui des céréales. Si cette différence peut être en partie expliquée par un coût énergétique intrinsèque élevé induit par la biosynthèse des protéines (Munier-Jolain et Salon, 2005), elle est sans doute due aussi au moindre investissement de la sélection sur les protéagineux. Par ailleurs, depuis les années 2000, les rendements en conditions agricoles présentent une très forte variabilité interannuelle. Du fait d'un retour trop fréquent du pois sur les parcelles à bon potentiel de rendement, une partie de celles-ci est infestée par *Aphanomyces euteiches*. Or, il n'existe aucun moyen de lutte efficace contre ce champignon. Lorsque la culture de pois n'a pas disparu des rotations, elle s'est souvent déplacée vers de moins bonnes terres. Par ailleurs, les rendements ont été ces dernières années fortement affectés par

l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des stress thermiques et hydriques liés au changement climatique (Vadez et al., 2012). La forte sensibilité des rendements aux stress peut s'expliquer par le fait que la fixation symbiotique, résultant d'une interaction biologique entre la plante et des micro-organismes de la rhizosphère, est particulièrement sensible aux stress biotiques et abiotiques.

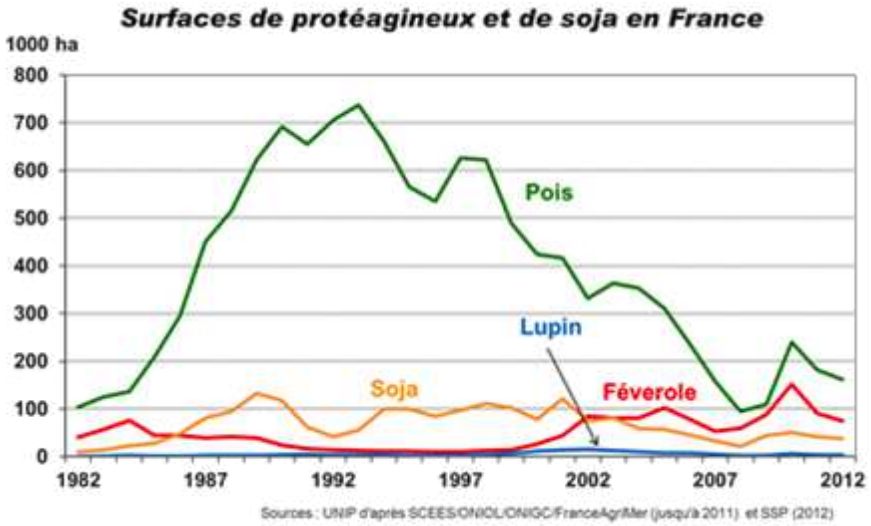


Figure 3 : Surfaces de protéagineux et de soja en France (source UNIP-ONIDOL)

Ainsi, dans le contexte climatique et réglementaire actuel, malgré leurs intérêts agro-écologiques, les protéagineux sont devenus des cultures risquées et peu attractives pour les agriculteurs. En systèmes conventionnels, les agriculteurs sont réticents à cultiver des légumineuses (Schneider et al., 2010), invoquant une trop faible rentabilité par rapport aux céréales, sur la base d'un calcul de la marge brute à l'échelle de la culture combinant des rendements faibles et des cours peu élevés sur le marché. Pourtant, des études ont montré qu'à l'échelle du système de culture, la marge brute d'un système incluant un pois n'est pas inférieure à un système de culture sans pois (Carrouée et al., 2012). Les faibles volumes ainsi produits rendent l'approvisionnement des industriels utilisateurs peu sécurisé, et limitent les possibilités de segmentation et de valorisation de la qualité. Ceci, associé à une faible transformation en aval, fait que les graines de protéagineux sont des produits de faible valeur ajoutée qui, économiquement, les rendent peu attractives pour les agriculteurs.

I.1.3 Un bilan déficitaire en matières riches en protéines.

Les légumineuses à graines et fourragères ont une place mineure dans la production matières premières riches en protéines commercialisées (Figure 4). Et malgré la production croissante de tourteaux d'oléagineux comme coproduits de la filière bioénergie, la France, comme le reste de l'Union Européenne, reste très déficitaire en protéines végétales. L'alimentation animale constitue le débouché principal des légumineuses à graines. Toutefois, le débouché de l'alimentation humaine a progressé ces dernières années (50% de la campagne en pois française en 2011-2012 ;données PROLEA). En effet, un marché s'est récemment développé à l'export pour les graines entières à destination de l'Inde (pois) ou de l'Egypte (féverole), et pour le secteur de la transformation industrielle en France, en Belgique et en Scandinavie (Géhin et al., 2010). Pour les industriels utilisateurs, la priorité est de disposer d'une filière sécurisée en terme d'approvisionnement, capable de fournir une matière première de qualité constante : la faible disponibilité des graines de protéagineux sur ces marchés est donc un problème majeur pour les industriels, avec une forte concurrence des importations de soja, qui couvrent la majeure partie des besoins pour l'alimentation animale. En effet, le tourteau de soja est très disponible sur le marché international et ses performances en alimentation animale sont en général supérieures à celle des protéagineux européens, en raison d'une teneur en protéines élevée, peu variable et d'une meilleure digestibilité de ses protéines. Enfin, le tourteau de soja présente une moins

grande dispersion géographique d'approvisionnement que le pois. De même, avec une consommation qui reste faible, la France reste largement déficitaire en légumes secs pour l'alimentation humaine (en particulier pour les lentilles, les haricots secs et les pois chiches), avec un taux d'approvisionnement intérieur qui n'est que de 27 % en moyenne sur la période 2001-2008. Un enjeu pour le marché français est donc l'indépendance protéique à différentes échelles, de l'exploitation au territoire.

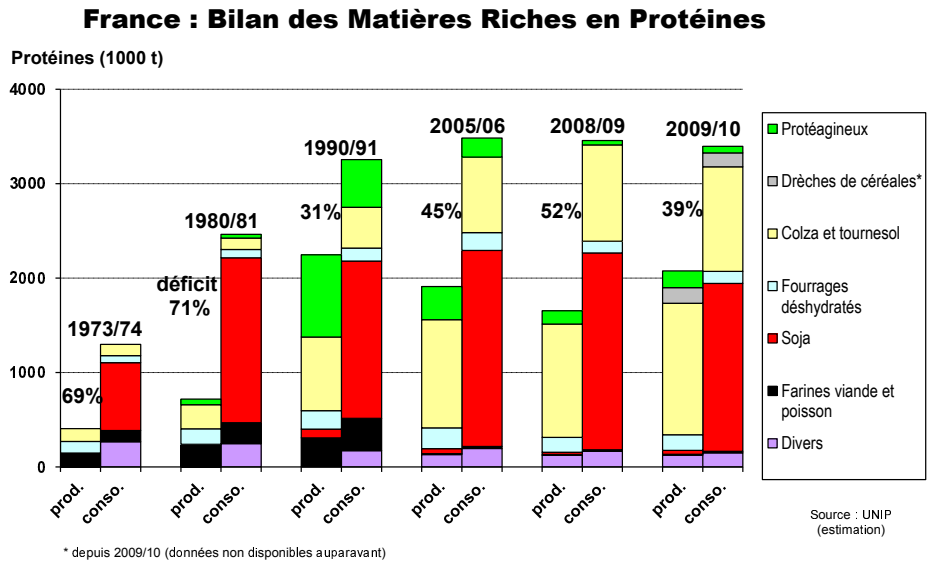


Figure 4 : Bilan des matières riches en protéines en France (Source : UNIP/ONIDOL)

I.1.4 Un verrouillage des systèmes socio-techniques.

La faible place qu'occupent aujourd'hui les légumineuses dans les assolements tant des régions céréalières que des régions d'élevage apparaît liée à différents facteurs, étroitement imbriqués. La recherche de l'accroissement de la productivité de la terre et du travail a détourné les agriculteurs de ces espèces, d'autant que des ressources extérieures étaient disponibles pour y suppléer (tourteau de soja et d'oléagineux dans les aliments composés pour les animaux, fertilisation azotée minérale pour remplacer l'apport d'azote symbiotique). Occupant de faibles surfaces, les légumineuses n'ont bénéficié que d'un investissement limité en matière de sélection variétale par rapport aux cultures dominantes, (blé, maïs, colza), ce qui a participé à leur déficit de rentabilité. Ces dernières cultures ont fait également l'objet d'un effort beaucoup plus important en termes d'expérimentation et de création de références agronomiques, et d'une priorité dans l'organisation de la logistique de collecte. Les réseaux d'acteurs, les innovations et les acquisitions de compétences clés qui ont accompagné la structuration des filières des cultures majeures leur confèrent aujourd'hui de nombreux atouts pour renforcer leur position concurrentielle sur les marchés (Meynard et al., 2013). Le développement des légumineuses se heurte dans ces conditions à un véritable « verrouillage » du système sociotechnique. Le concept de verrouillage technologique désigne des situations où, bien qu'une technologie jugée plus efficace existe, la technologie initialement choisie reste la norme, car l'ensemble du système s'est organisé autour ; et il semble par conséquent difficile d'en changer (Arthur, 1994, Cowan et Gunby, 1996). Le verrouillage d'un système de production conduit à un tri entre les innovations : celles qui sont totalement compatibles avec la technologie de référence ont une chance de se développer, alors que celles qui remettent en cause soit celle-ci, soit les relations entre acteurs telles qu'elles se sont organisées autour de la référence, ont beaucoup moins de chances de se développer. Le verrouillage ne résulte pas d'une stratégie délibérée de tel ou tel acteur, mais des mécanismes d'auto-renforcement qui se créent autour d'une solution technologique. Ainsi, bien que l'intérêt de développer les légumineuses soit admis par tous, celles-ci restent marginales, parce que les systèmes de production, les industries de transformation et les filières se sont progressivement organisées, puis renforcées, sans elles. Par exemple, l'essor des culture de pois s'est accompagné dans les années 1980-2000 de travaux de recherche sur le fractionnement des graines et les propriétés des constituants (amidon, protéines,

fibres) pour l'alimentation humaine et les usages non-alimentaires (Vose, 1980 ; Guéguen, 1983 ; Colonna et al., 1985 ; Lourdin et al., 1995). Mais même si ces études ont démontré l'intérêt potentiel de ces graines pour l'industrie de transformation, les développements industriels sont restés limités (Géhin et al., 2010). Et le cœur des compétences du régime agricole actuel s'articule autour d'un ensemble de routines partagées, tant dans le choix des espèces et des itinéraires techniques en production végétale, que dans le choix des formules d'alimentation en production animale, et qui sont globalement en défaveur des légumineuses (Farès et al., 2012). Par exemple, les enjeux de réduction des engrais azotés aboutissent plus naturellement à des innovations incrémentales, comme la recherche d'un ajustement plus précis des doses et dates d'apport aux besoins des cultures (e.g. le dispositif Farmstar, Labarthe, 2010) qu'à une reconception du système de culture insérant des légumineuses dans la rotation. Les réseaux d'acteurs contribuent par ailleurs au verrouillage, dans la mesure où aucun des acteurs n'a intérêt à changer son comportement tant que celui des autres n'évolue pas. Qu'il s'agisse de chercheurs, de politiques, de dirigeants industriels ou de représentants syndicaux, leur position dans les institutions et leur interconnexion contribuent à aligner leurs choix en faveur d'un paradigme technologique partagé et auquel chacun trouve des avantages (Vanloqueren et Baret, 2009). Cette organisation très cohérente des secteurs de l'amont, de l'aval, de l'organisation de la création de références et du conseil technique freine le développement des légumineuses.

I.2. Un renouveau des enjeux du développement des légumineuses dans le contexte de la transition agroécologique.

La relativement faible contribution des légumineuses à graines à la production agricole en France pose question car ces espèces pouraient jouer un rôle majeur dans la transition agroécologique en contribuant au développement de systèmes agricoles, alimentaires et énergétiques plus durables.

I.2.1 D'un enjeu démographique à un enjeu nutritionnel :

En 2050, l'agriculture mondiale devra répondre aux besoins alimentaires de 9 milliards d'individus, tout en garantissant des productions plus durables. La prospective « Agrimonde 2050 » (Dorin et al., 2011), qui couple des problématiques d'agriculture et d'alimentation à l'échelle mondiale, a été utilisée ici pour préciser la place que pourraient occuper les légumineuses dans les systèmes agricoles et alimentaires futurs.

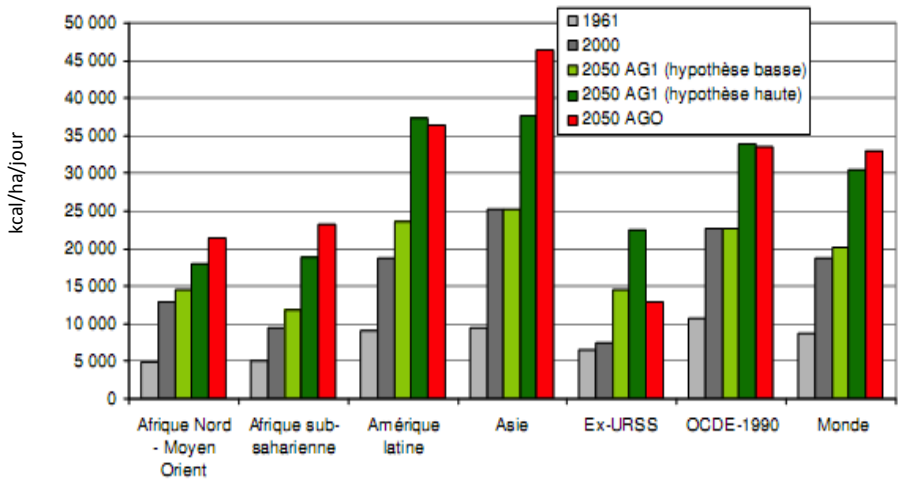


Figure 5 : Rendements alimentaires régionaux en 1961, 2000, 2050 dans les scénarios Agrimonde : Production de calories alimentaires végétales par hectare cultivé (kcal/ha/jour)[1]. (Source : Dorin et al., 2011, Agrimonde) [1] AG1 : On considère qu'il y a peu de réserve de rendements en Asie, OCDE-1990, Afrique du Nord , Moyen Orient, d'où une faible progression du rendement de leurs cultures alimentaires entre 2000 et 2050 (hypothèse basse : 0 à 20% , hypothèse haute : 40 à 50%). Pour l'Amérique latine et l'Afrique subsaharienne, les gains de rendement sont de 30% et 100% pour les hypothèses basse et haute respectivement. L'ex-URSS opère un

rattrapage spectaculaire : le rendement est doublé (hypothèse basse) ou triplé (hypothèse haute). (Source : Dorin et al., 2011, Agrimonde)

Deux scénarii ont ainsi été proposés (Figure 5) : un premier scénario (AG0) prolonge les évolutions historiques de croissance, de production et de consommation des calories alimentaires dans chaque région du monde (Figure 6), pour atteindre au niveau mondial en 2050, une disponibilité alimentaire apparente de 3588 kcal/jour/habitant, dont 23 % d'origine animale. Ce scénario montre une consommation de produits animaux qui continue à croître et de fortes inégalités entre régions du monde. Dans le second scénario (AG1), les niveaux de revenu et de consommation alimentaire sont partiellement décorrélés, en raison de préoccupations de santé, d'équité et d'environnement. Ce scénario conduit à une hypothèse de disponibilité alimentaire moyenne de 3000 kcal/habitant/jour dans toutes les régions du monde, dont seulement 16 % d'origine animale (Esnouf et al., 2011). Ce scénario implique que les disponibilités en calories totales et en produits animaux diminuent fortement dans les pays de l'OCDE (respectivement – 25 % et –50 %) et augmentent très significativement en Afrique sub-saharienne.

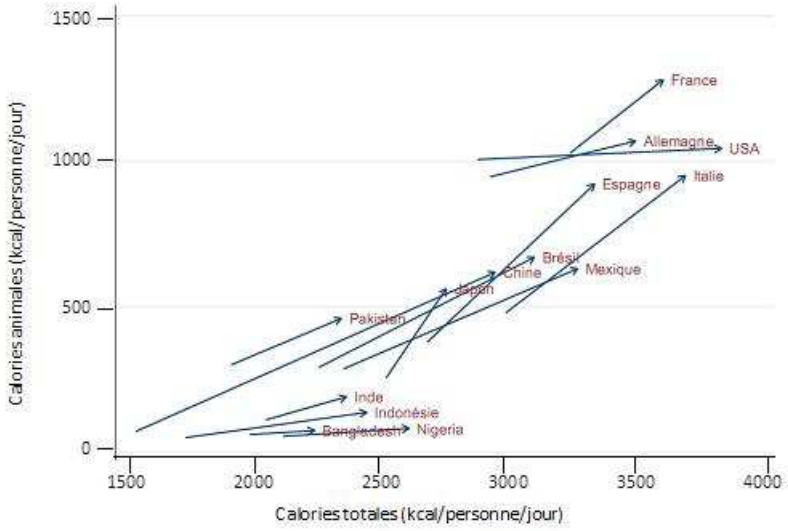


Figure 6 : Disponibilité en calories animales et en calories totales de 1961 à 2005 : quelques exemples dans le monde. (Source : Esnouf et al. 2011, Dualine - d'après Combris 2006 - établi à partir des données de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture - STAT)

Ces deux scénarii supposent **des évolutions majeures**, variables suivant les régions du monde, en termes de rendement (Figure 5), de gestion de l'eau, de pratiques culturales, de durabilité mais aussi de comportements alimentaires. Il apparaît que, selon ces deux scénarii, la demande mondiale en calories d'origine animale risque d'augmenter, selon AG0 dans de nombreuses régions du monde en suivant l'accroissement global de la disponibilité des calories totales, ou selon AG1 dans certains pays d'Asie et de l'Afrique sub-saharienne pour atteindre le seuil de 500 kcal/habitant/jour. Cette augmentation de la demande en protéines animales pourrait donner lieu à une demande accrue en matières premières riches en protéines, dont les protéagineux, pour le secteur de l'alimentation animale. Dans l'hypothèse AG1, la réduction de la consommation de protéines animales dans les pays de l'OCDE devrait induire **une substitution croissante des protéines animales par de nouvelles sources de protéines dont des protéines végétales** (Boland et al., 2013), à la fois pour les usages nutritionnels et comme ingrédients techno-fonctionnels (texturants, émulsifiants, moussants…) dans la formulation des aliments par l'industrie agro-alimentaire. Cette évolution devrait favoriser la consommation de graines de légumineuses et de leurs produits dérivés enrichis en protéines. Elle peut être favorisée à la fois par la prise de conscience par ces populations des nouveaux enjeux de santé liés à l'augmentation des maladies dites « de civilisation », et par le moindre coût économique, énergétique et environnemental de la production des protéines végétales. Ces perspectives peuvent offrir de nouveaux débouchés aux légumineuses, tant en produits de consommation directe qu'en produits transformés. Les légumineuses pourraient bénéficier d'une demande de produits répondant à

des besoins de plaisir, santé, praticité, et naturalité, qui se développent nettement dans les modes de vie occidentaux. La restauration hors foyer, qui progresse régulièrement, et la restauration scolaire restent également des segments de marché où les légumes secs pourraient être mieux valorisés en s'appuyant sur les recommendations du Plan National Nutrition Santé (PNNS). Par ailleurs, une moindre consommation de produits animaux pourrait entraîner de nouvelles exigences de qualité sensorielle, fonctionnelle et nutritionnelle pour les produits dérivés des légumineuses.

I.2.2 Des enjeux écologiques.

La prise en compte des enjeux environnementaux conduit la société occidentale à concevoir des systèmes de production plus durables, pour réduire leurs impacts négatifs sur les milieux, gérer la raréfaction de certaines ressources (eau, énergie fossile), et s'adapter aux changements climatiques. En ce sens, de nouvelles pratiques agricoles plus efficientes et respectueuses de l'environnement doivent être adoptées. Face à cet enjeu, les légumineuses ont un rôle important à jouer (Jensen et al., 2012).

Par leur capacité à fixer l'azote de l'air, les cultures de légumineuses ne nécessitent pas de fertilisation azotée. De ce fait, elles permettent de limiter les apports d'engrais azotés dans les systèmes de culture où elles sont introduites. De plus, la minéralisation de leurs résidus de culture permet une réduction de la fertilisation azotée de la culture suivante. Ainsi, les recommandations de réduction de dose azotée après pois peuvent être en moyenne de 20 à 60 kg N/ha pour un blé et de 30 à 60 kg N/ha pour un colza, pour un rendement équivalent ou supérieur (Carrouée et al., 2012). Cette réduction de la fertilisation azotée contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre (Nemececk et al., 2008 ; Jensen et al. 2012 ; Figure 7) : dioxyde de carbone (CO_2) émis lors de la production des engrais (procédé Haber-Bosch), et protoxyde d'azote (N_2O) émis lors de leur épandage. De plus, les cultures de légumineuses et la minéralisation de leurs résidus ont des niveaux d'émissions de N_2O similaires aux cultures non légumineuses non fertilisées (Jeuffroy et al., 2013 ; Rochette et Janzen, 2005 ; Jensen et al., 2012).

	Nb rotations dans la moyenne	Kg N	Energie non renouvelable fossile et nucléaire en éq. MJ	Effet de serre (IPCC 07) en kg eq CO_2	Formation d'ozone, NOx élevé POCP, kg éq ethylène	Eutrophi-sation potentielle combinée, kgN	Acidifica-tion, kg éq SO_2 (EDIP97)	Toxicité aquatiq 100 ans (CML), kg éq. 1.4-DCB
Témoin sans pois	3(Beauc) 2(Bourg.) 5(Mosell)	100% Be : 168 Bo : 167 Mo : 164	100% Be : 28939 Bo : 21784 Mo : 22967	100% Be : 3357 Bo : 3132 Mo : 2993	100% Be : 0.75 Bo : 0.62 Mo : 0.68	100% Be : 73 Bo : 96 Mo : 89	100% Be : 43 Bo : 40 Mo : 43	100% Be : 756 Bo : 2035 Mo : 679
A_pois Beauce (22% pois)	10	77%	87%	84%	90%	87%	78%	90%
A_pois Bourgogne (14% pois)	8	83%	92%	90%	96%	92%	85%	104%
A_pois Moselle (13% pois)	9	85%	93%	92%	96%	87%	88%	83%

Figure 7 : Impacts environnementaux par hectare des rotations avec pois par rapport à l'impact de rotations de référence «témoin sans pois» par région (% des rotations de référence pour la moyenne des alternatives), d'après des analyses de cycle de vie de successions. Pour chaque succession (avec ou sans pois) et chaque région, les opérations culturales été simulées sur la base de la description des systèmes de culture par les experts régionaux. Les simultations ont été optimisées en tenant compte des effets précédents du pois ; d'après Carrouée et al., 2012.

La contribution des légumineuses à la réduction des émissions de gaz à effet de serre (donc à la mitigation du changement climatique) et à la réduction de l'épuisement des énergies fossiles, peut donc

s'avérer très importante. Sachant par ailleurs que produire 1 calorie animale de poulet ou de porc exige 4 calories végétales et 11 calories dans le cas du bœuf (FAO, 2009), une plus grande substitution de protéines animales par des protéines végétales dans l'alimentation humaine peut représenter un effet de levier supplémentaire et majeur dans la réduction des gaz à effet de serre.

D'autres services écosystémiques rendus par les légumineuses méritent d'être considérés, comme l'amélioration de la structure du sol, la diversification des rotations et la rupture des cycles de pathogènes telluriques et la réduction de la lixiviation des nitrates dans le cas de légumineuses pérennes à système racinaire profond (Jensen et al., 2012). Une légumineuse pérenne et exploitée essentiellement par fauche, comme la luzerne, favorise la biodiversité aviaire au niveau des territoires (Berthet et al., 2012). Se pose néanmoins la question d'une rémunération de ces services écosystémiques et du rôle des politiques publiques dans cette rémunération, certains services s'adressant à l'agriculture (biodiversité favorisant la pollinisation, les auxiliaires), d'autres servant la société (limitation des pollutions), certains de ces services étant directement rémunérateurs pour l'agriculteur (économies d'engrais azoté) et d'autres pas (limitation des pollutions).

Enfin, les légumineuses prennent une importance particulière en agriculture biologique ; en effet, elles constituent dans ces systèmes un levier essentiel pour assurer l'équilibre du bilan azoté des exploitations, particulièrement dans les systèmes sans élevage, caractérisés par un déficit chronique de disponibilité en azote (David et al., 2005), L'objectif des pouvoirs publics français de développer l'agriculture biologique (20% de la surface agricole en 2020 contre moins de 4% aujourd'hui) devrait donc entrainer une croissance des surfaces en légumineuses. Cependant, en conditions d'agriculture biologique, de nombreux facteurs biotiques et abiotiques limitent considérablement le rendement des légumineuses (Hellou et Crozat, 2005).

I.2.3 Des enjeux de territorialisation des ressources.

Le déclin des légumineuses est lié au développement de l'usage des intrants chimiques, à la dynamique de spécialisation agricole régionale, et à la mise en place de circuits industriels longs. Ainsi, la baisse des surfaces en légumineuses fourragères en culture pure a accompagné le recul des systèmes de polyculture élevage. Les zones d'élevage intensif, concentrées dans l'ouest de la France, se situent près des usines de fabricants d'aliments concentrés localisées elles-mêmes près des ports (où arrivent massivement les tourteaux de soja) et non dans les régions de production de protéagineux. A l'inverse, on peut imaginer que la recherche d'une plus grande autonomie azotée des exploitations agricoles, un retour de l'élevage dans les régions de grandes cultures, ou le développement de circuits courts puissent favoriser un renouveau des légumineuses. De telles dynamiques territoriales, en vue de la production et de l'utilisation locale de légumineuses, ont été identifiées en production de pois pour l'alimentation de monogastriques dans la région Bourguignone (Petit et al., 2012) ou en production de foin de luzerne pour l'alimentation de ruminants en région Poitou-Charentes (E. Berthet, comm pers.). Cependant, les tendances économiques actuelles ne vont pas dans ce sens (Chatellier et Gaigné, 2012) : la recherche d'économies d'échelles ainsi que l'augmentation importante du prix des céréales, tendent à accélérer l'abandon de l'activité d'élevage par les exploitations agricoles polyvalentes. Un retour à des productions agricoles territorialisées pourrait néanmoins être induit (i) par des choix forts de politique publique (politiques agricoles visant à la diversification des assolements et rotations, soutien à l'émergence de filières locales assurant un développement de l'emploi…), (ii) par un renchérissement du coût de l'énergie (recherche d'autonomie énergétique des exploitations, réduction des coûts de transport), (iii) par la recherche, de la part d'industriels, d'une sécurisation de leurs approvisionnements basée sur la contractualisation avec des producteurs locaux, mais aussi (iv) par une demande de traçabilité et de lien social induisant le développement des circuits courts (Lamine, 2005) et des signes de qualité. Le développement des signes officiels et des appellations d'origine permettent en effet d'attester auprès du consommateur une certaine qualité reposant sur des pratiques de production sous cahier des charges (Allaire, 2002). Face à la forte standardisation des produits issus de l'industrie appliquée au domaine alimentaire, émergent de nouveaux signes distinctifs valorisant les ressources

spécifiques territoriales et qui renforcent la confiance du consommateur. Une plus grande consommation locale de légumineuses, en alimentation animale ou humaine, pourrait ainsi contribuer à la construction de systèmes territorialisés de transformation et de consommation plus durables (Muchnik et de Sainte Marie, 2009), puisque la grande variété des légumineuses permet d'envisager leur culture sur de nombreux territoires. Le redéploiement de ces cultures dans la sole française est ainsi susceptible de favoriser le développement de nouvelles activités de transformation et de commercialisation générateur d'emplois et de richesses dans les territoires, selon la valeur ajoutée qui pourrait être dégagée de ces nouveaux débouchés.

I.3 Quels leviers pour favoriser la transition vers des systèmes de production intégrant plus de légumineuses ?

La combinaison des enjeux démographiques, environnementaux et économiques contemporains appelle une nouvelle transition agricole, qualifiée de transition agroécologique, dans laquelle les légumineuses pourraient avoir un rôle important à jouer. Toutefois, le « verouillage » des systèmes agricoles actuels limite les possibilités d'adoption de nouvelles cultures comme les légumineuses. Pourtant, l'approche multi-niveaux de la théorie des transitions (e.g. Geels, 2011) nous indique que de nouveaux systèmes en rupture peuvent émerger et soutenir l'insertion des légumineuses dans les systèmes agricoles de demain.

I.3.1 Les leviers du déverouillage.

D'un côté, les inflexions contemporaires du contexte démographique, social, politique, économique et environnemental ou « paysage socio-technique » (Figure 8) peuvent exercer une pression sur le « régime socio-technique » dominant (excluant les légumineuses), par exemple via l'instauration de nouvelles mesures réglementaires. Ainsi, le « verdissement » des aides de la Politique Agricole Commune dans le cadre de la réforme 2014-2020, conditionne une partie des aides au respect d'un critère de diversification de l'assolement ; cette règle pourrait encourager des cultures de diversification telles que les légumineuses. De l'autre côté, de petits réseaux d'acteurs attentifs aux inflexions contemporaines pevent faire émerger des innovations de « niches » répondant aux attentes sociétales. Les acteurs des niches ne sont pas verrouillés par les routines et standards des acteurs du régime dominant car ils se situent en dehors ou à la marge du régime dominant ("outsiders"); ceci leur permet d'innover de manière plus radicale, en ne mobilisant pas les mêmes socles de connaissances et compétences. La gamme des innovations est large : elles peuvent être d'ordre purement technologique, mais peuvent également concerner de nouvelles procédures, organisations, normes, nouveaux produits, etc. Certaines innovations en provenance de niches peuvent se diffuser progressivement au système dominant, qui alors se déverrouille, après une étape de transition.

Si toutes les niches n'ont pas vocation à se développer, certaines peuvent constituer des "ressorts" pour amorcer des transitions avec le régime socio-technique dominant. Ces transitions conduisent à la production de technologies, produits, normes, etc, qui ne seront plus celles du système en place, ni celles proposées par les niches, mais constituent les bases du nouveau régime, hybride. A titre d'exemple, la niche de l'agriculture biologique a véhiculé l'idée selon laquelle la diminution de l'utilisation des produits de synthèse en faveur de produits naturels est bénéfique. Cette pensée amène aujourd'hui les industriels de la transformation à développer des stratégies dites de « naturalité » (ou de "clean label"). Ces stratégies adoptent les mêmes principes que l'agriculture biologique dans l'étape de transformation, en remplaçant les conservateurs et colorants de synthèse par des produits dérivés naturels. Pourtant, aucun label officiel ne permet pour l'instant d'afficher clairement cette démarche.

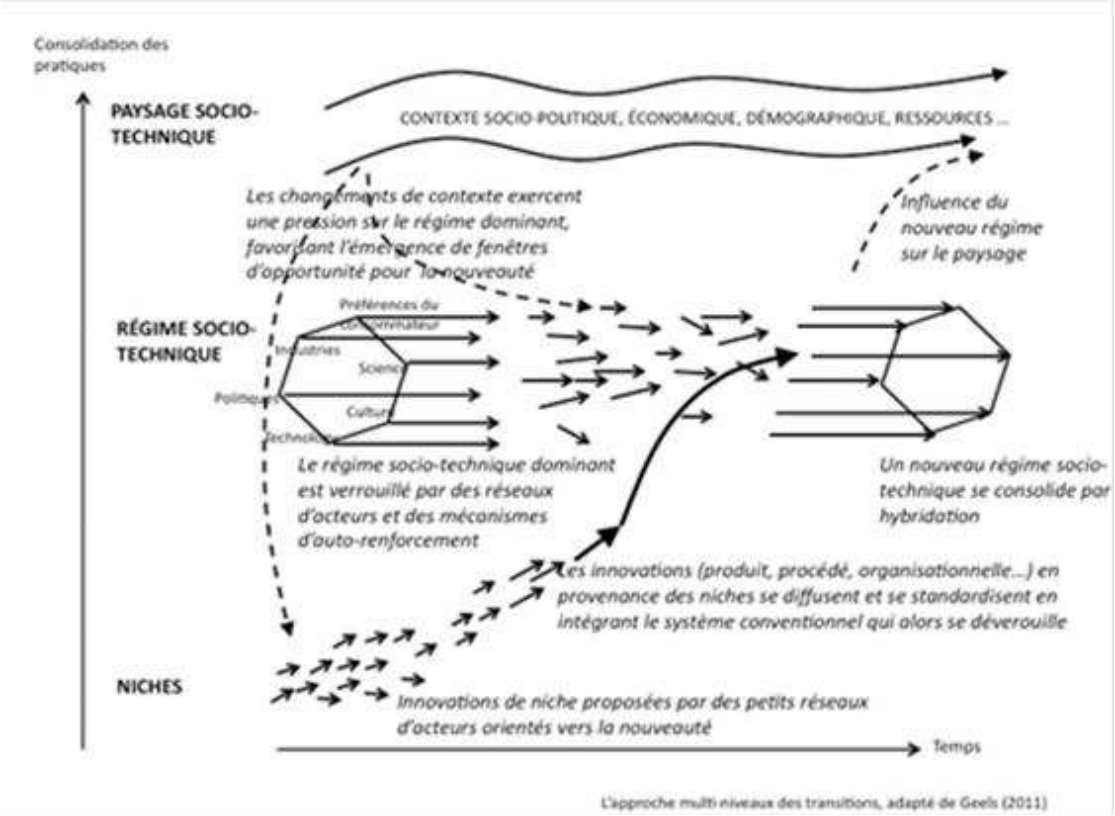


Figure 8 : Approche multi-niveau de la transition, d'après Geels, 2011

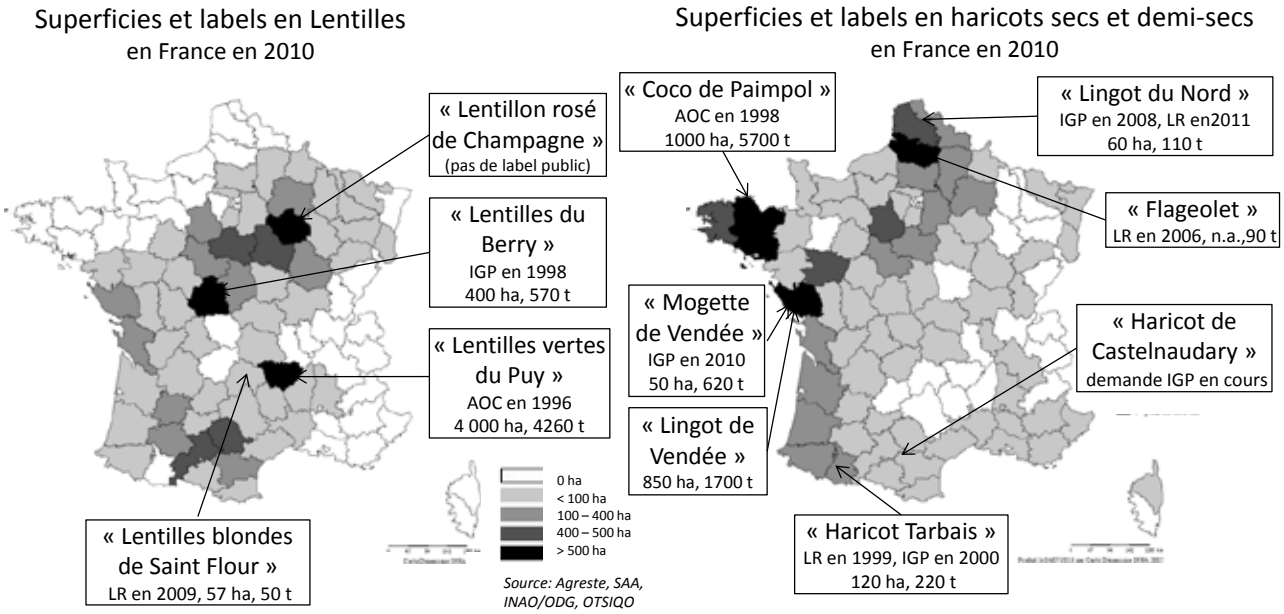
I.3.2 Quelle valeur ajoutée pour soutenir de nouvelles niches en faveur des légumineuses ?

Un retour des cultures de légumineuses dans les territoires suppose l'existence d'une rémunération suffisante associée à des débouchés économiquement viables. Ce surplus de valeur ajoutée peut émaner de deux grandes logiques d'innovation dans la différenciation des produits sur les marchés de l'agro-alimentaire. L'une correspond à la diversification de la composition des produits, l'autre à la mise en avant de caractéristiques identitaires (Allaire, 2002). Une valorisation de ces innovations au travers du lien au territoire pourrait donner un nouvel attrait économique aux cultures de légumineuses, d'abord localement, puis i*n fine* favoriser leur ancrage durable dans les productions françaises.

La première stratégie peut s'appliquer au développement d'un segment dit de "matières protéiques végétales transformées", avec un lien au territoire dans une logique de réduction des coûts. En effet, l'achat de matières premières sur des marchés internationaux, plus instables et moins normés, nécessite un ensemble des contrôles intermédiaires. Les coûts induits par ces contrôles, ajoutés à des coûts intermédiaires de stockage et d'acheminement plus importants, peuvent se traduire *in fine* par des coûts de transaction élevés pour les transformateurs. Cette stratégie peut concerner les graines fractionnées pour une utilisation en tant qu'ingrédients de l'industrie alimentaire, ou pour des usages non alimentaires (Guéguen, 1983, 1999 ; Géhin et al., 2010). Elle peut également s'appliquer à l'utilisation en plante entière pour les fourrages, les bioénergies et la chimie verte. Cette stratégie met en avant la qualité fonctionnelle du produit, qu'elle soit nutritionnelle ou technologique. Elle repose sur des données de composition, de propriétés physicochimiques et de structure des constituants.

La deuxième stratégie peut être complémentaire à la première, en mettant en avant des savoirs-faire locaux spécifiques, valorisant la diversité des légumineuses. Cette stratégie est déjà développée pour le marché de l'alimentation humaine où 50 % de la production française de légumes secs est commercialisée sous signe officiel de qualité. Cette proportion est nettement moins élevée pour les légumineuses à destination de l'élevage. Cette stratégie pourrait être qualifiée de "retour aux sources", avec un lien au territoire dans une logique de qualité spécifique ; elle peut répondre aux attentes des

consommateurs en quête de produits locaux dénotant de différentes formes de qualité (sanitaire, organoleptique, environnementale, etc.).



AOC : Appellation d'origine contrôlée ; IGP : Indication Géographique Protégée ; LR Label : « Label Rouge »

Figure 9 : Les cartes indiquent les surfaces cultivées en lentilles ou en haricots secs et demi-sec en France en 2010. Les légendes indiquent –quand ils existent- les surfaces et volumes produits sous labels public ou privés.

Pour ces deux stratégies, l'industrie agro-alimentaire et le secteur marchand ont un rôle majeur à jouer dans l'évolution des comportements, au travers de la mise en valeur des produits et de la création de ces marchés de niches, soutenus par des labels privés ou publics (Figure 9). Au plan biotechnique, le développement de ces nouveaux marchés repose sur des efforts importants d'innovation en matière de transformation des produits ; les innovations technologiques peuvent notamment combler des "défauts" de qualité des produits agricoles. Au plan économique, l'enjeu pour les acteurs territoriaux est de favoriser la réduction des coûts de transaction en développant de nouveaux modes de coordination qui garantissent la qualité des produits. Ainsi, on observe actuellement en France une augmentation des contrats entre industriels et agricuteurs pour certains de ces débouchés. Ces contrats permettent aux industriels de mieux contrôler la qualité de leur approvisionnements (obligation de traçabilité, du respect de normes), et d'améliorer leur lisibilité sur les disponibilités et sur les prix.

II. De nouvelles questions de recherche sur les légumineuses dans le contexte de la transition agroécologique.

A la lumière de l'analyse développée ci-dessus, quatre grands groupes de questions de recherche sur les légumineuses ont été identifiés.

II.1. Analyser les verrouillages et identifier des leviers de transition vers des systèmes intégrant plus de légumineuses.

Il s'agit d'identifier les moteurs de l'innovation et du changement, susceptibles de permettre de dépasser les logiques économiques à court terme qui conduisent au verrouillage évoqué plus haut. L'explicitation des mécanismes d'auto-renforcement à l'origine du verrouillage constitue une première étape. Une étude récente (Meynard et al., 2013) a permis de montrer que l'insuffisance de la structuration des filières et de la coordination entre les acteurs, de l'aval à l'amont, constituait une cause majeure de

l'échec de la construction ou du développement de certaines filières de diversification. Ces travaux seront à approfondir pour proposer des voies de déverrouillage. Il apparait essentiel de s'interroger sur les différents usages et débouchés que peuvent présenter les légumineuses, pour appréhender quelles peuvent être les niches qui favoriseraient leur renouveau dans le système socio-technique agricole, et contribueraient ainsi à la transition de l'agriculture française vers plus de durabilité. L'analyse des différentes modalités de coordination des acteurs dans la mobilisation de leviers de marché spécifiques peut aider à définir la structuration de nouvelles filières pour les légumineuses. De façon plus générale, il apparaît essentiel d'appréhender les innovations à l'échelle de la filière car la combinaison de solutions agronomiques, technologiques et organisationnelles est souvent nécessaire pour gérer la variabilité de la production et de sa qualité.

Dans l'objectif de valoriser soit la qualité environnementale des cultures de légumineuses soit la qualité nutritionnelle des protéines de légumineuses, une diversité d'instruments de politiques publiques devra être explorée. En effet, les politiques publiques peuvent infléchir les tendances par des incitations financières. Dans cet objectif, les recherches devront combiner modélisation économique et analyse des jeux d'acteurs. L'analyse agroécologique des systèmes de production innovants suppose une évaluation par des approches multi-acteurs, multi-critères et multi-échelles. L'analyse multicritères doit notamment inclure des dimensions économiques et sociologiques, ainsi que des critères d'appréciation de la résilience et de la flexibilité des systèmes. Ces approches posent des questions méthodologiques autour de la définition et la pondération des critères de l'évaluation. L'association des acteurs porteurs d'enjeux, d'innovations et de connaissances constitue un enjeu majeur. Il s'agit non seulement d'explorer et d'exploiter la diversité des acteurs, mais aussi de les associer à la diffusion des innovations et à l'évaluation des solutions innovantes (notamment pour la définition et la pondération des critères d'évaluation).

II.2. Identifier des débouchés nouveaux et diversifiés pour les légumineuses dans une chaine de production durable.

La théorie des transitions (Geels, 2011) offre des perspectives de déverrouillage en montrant que même si le système agricole dominant freine l'adoption de certaines pratiques, ces dernières peuvent être adoptées par des acteurs à la recherche d'une différenciation sur le marché. La diversification des débouchés des légumineuses, notamment au travers de marchés "de niche" à plus forte valeur ajoutée, pourrait ainsi contribuer, via des processus de diffusion et d'hybridation au système conventionnel, à faire évoluer le système agricole en leur faveur. Par ailleurs, l'émergence de ces débouchés peut être soutenue par des politiques publiques. De nouveaux débouchés méritent ainsi d'être étudiés.

II.2.1 de nouveaux débouchés pour l'alimentation humaine.

La consommation de légumineuses peut répondre aux nouveaux enjeux liés au rééquilibrage des régimes alimentaires, aux échelles individuelles et planétaires (Leterme, 2002). Dans l'objectif de modifier les comportements alimentaires, il s'agit de proposer au consommateur des produits diversifiés, ayant une image moins désuète et plus pratiques à cuisiner. En effet, contrairement aux céréales pour lesquelles il existe une multitude de produits transformés, aucun effort d'innovation technologique n'a à ce jour abouti pour construire une gamme de produits diversifiés à partir de graines de légumineuses ou de plantes entières de légumineuses fourragères. Des développements technologiques, à l'échelle industrielle, avaient été faits en France dans les années 1980 – 1990 pour extraire les protéines à partir des feuilles de luzerne, mais ce marché ne s'est pas développé fortement. Des efforts en ce sens sont actuellement réalisés au Canada (Figure 10). Une meilleure définition de la valeur "santé" de ces graines est également nécessaire pour permettre le développement de leurs usages en alimentation humaine. Toutefois, le « débloquage » de nouveaux usages peut nécessiter un appui des instances publiques pour soutenir l'aval dans des démarches innovantes. Ainsi, à travers le Plan National Nutrition et Santé (PNNS), les pouvoirs publics offrent la possibilité de signer des chartes avec les acteurs professionnels du secteur agro-alimentaire qui s'engagent à améliorer le profil

nutritionnel de leurs produits. Par exemple, la filière BBC (Bleu Blanc Cœur) s'est spécialisée dans la fourniture de viandes dont la composition lipidique des omégas est améliorée par l'incorporation dans la ration alimentaire de graines riches en acide alpha linolénique (Lessirard, 2009). De ce fait, ce label soutient la production de lin, de luzerne, de lupin et de féverole.

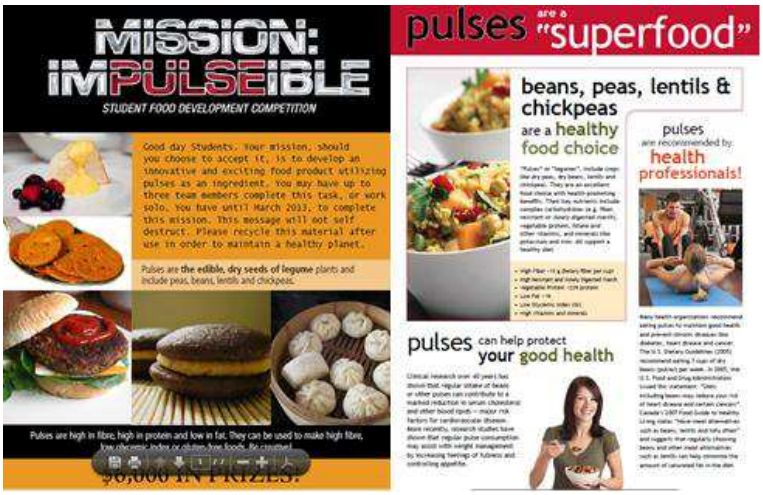


Figure 10 : Exemple de promotion pour l'utilisation de légumineuses pour l'alimentation humaine au Canada (source : pulsecanada.com)

III.2.2 de nouveaux débouchés pour l'extraction de composés à haute valeur ajoutée.

Les industriels sont potentiellement demandeurs de fractions protéiques d'origine végétale, de fibres et d'amidon. Il existe des procédés pour le fractionnement des légumineuses et l'utilisation des différentes fractions pour des applications alimentaires ou non (Géhin et al., 2010).

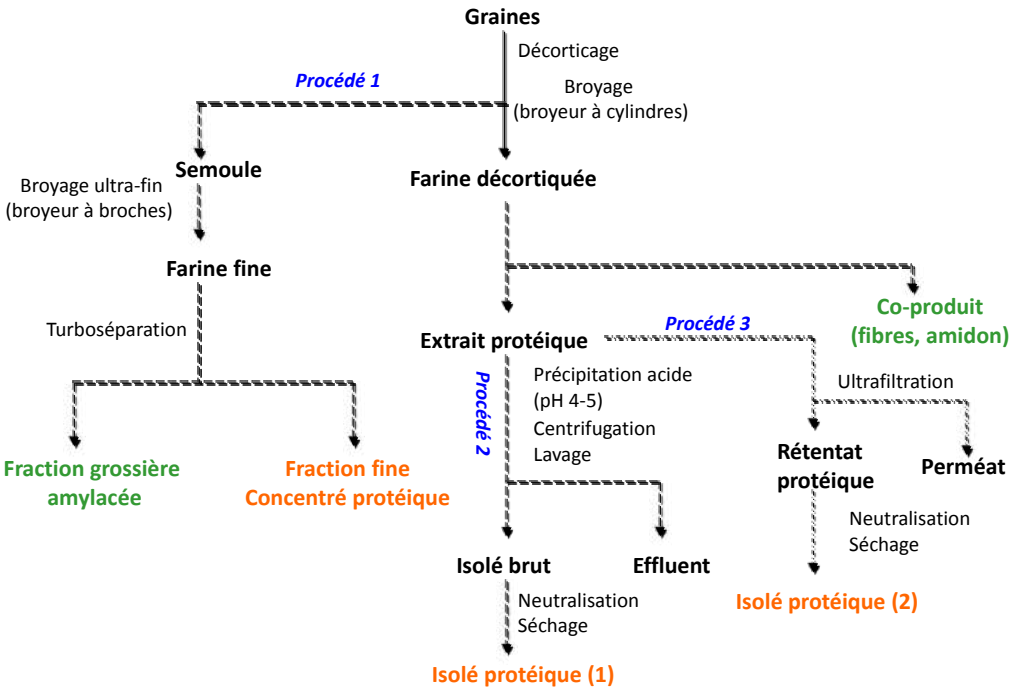


Figure 11 : Principaux procédés de fabrication de matières protéiques végétales à partir de légumineuses amylacées pour la production de fractions enrichies en protéines et en amidon: Procédé voie sèche (1) : procédé par turboséparation ; Procédés voie humide (2,3) : isolé protéique par précipitation isoélectrique (1), par ultrafiltration (2).

III.2.3 De nouveaux débouchés pour la production de bioénergies.

Les légumineuses ont un rôle particulier à jouer dans la production de biomasse pour les bioénergies, car elles permettent d'améliorer les bilans environnementaux du fait de la moindre utilisation d'engrais azotés permise par la fixation biologique d'azote atmosphérique. De nouvelles valorisations des légumineuses sont donc envisageables en plante entière pour la production de biomasse pour la bioénergie (Thomsen et Hauggaard-Nielsen, 2008 ; Jensen et al., 2012). La valorisation de co-produits de culture peut également être envisagée : par exemple l'utilisation des tiges de luzerne pour la production de bioéthanol, avec l'utilisation des feuilles en fourrage (Lamb et al., 2007). Au niveau des systèmes de culture et des territoires et des filières, l'enjeu est d'intégrer les légumineuses (associées ou non), en alternative aux cultures dédiées pérennes (taillis, miscanthus). Les cultures annuelles ou pluriannuelles présentent en effet l'avantage de s'insérer dans les systèmes de culture classiques, permettant ainsi une plus grande flexibilité, une diversification des cultures dans les successions, et une conservation d'une partie de la rotation dédiée à l'alimentation humaine et animale. Les travaux doivent inclure des évaluations environnementales approfondies à l'échelle des filières et intégrer la question de la diffusion de l'innovation dans les systèmes de culture et de transformation.

Figure 12: Association Triticale-Vesce en vue de la production de bioénergie. E. Pelzer, Essai INRA Versailles 2011-2013.

Cependant, les cultures de légumineuses peuvent présenter certaines limites (Jensen et al., 2012). D'abord, l'utilisation des légumineuses pour la production de biomasse peut limiter leur contribution à la fertilité du sol par l'enfouissement des résidus, qui est moindre si l'ensemble de la plante est récolté pour les débouchés de la bioénergie. Par ailleurs, même si les besoins en énergie fossile par quantité de matière sèche sont faibles, les rendements le sont également, comparés à d'autres espèces dédiées. Enfin, la qualité de la biomasse de légumineuse est moins bien adaptée à certains procédés. Néanmoins, il existe encore peu de données aujourd'hui concernant cette qualité, et ces données sont variables entre espèces et selon les références (e.g. Petersson et al., 2007; Martin et al., 2008; Thomsen et Hauggaard-Nielsen, 2008). La culture des légumineuses en association avec des graminées (Figure 12) peut permettre de lever certaines limites, comme la productivité (Jensen et al., 2012), ou la maîtrise de la qualité pour une adéquation de la biomasse aux procédés de transformation. Les associations végétales méritent donc d'être travaillées pour cet usage. L'identification des espèces et variétés de légumineuses les mieux adaptées ainsi que la mise au point de leur conduite sont des enjeux importants pour répondre aux exigences des industries pour les différents procédés de transformation. Dans cet objectif, il est indispensable d'approfondir les liens avec les industriels porteurs de solutions technologiques dans les procédés de transformation.

III.3 Evaluer les services écosystémiques rendus par les légumineuses à l'échelle des systèmes de production et des territoires.

III.3.1 Evaluer les services à des échelles plus larges.

Grâce à la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique, les légumineuses sont des composantes essentielles de l'amélioration de l'efficience des systèmes de production végétale vis à vis de l'azote (Jensen et Hauggaard-Nielsen, 2003). De plus, la réduction de l'utilisation d'engrais azoté, permise par ces espèces, a des conséquences positives sur les bilans environnementaux (Nemecek et al., 2008 ; Jensen et al., 2012). Néanmoins, ces services sont aujourd'hui mal valorisés, soit parce qu'ils sont mal pris en compte dans les pratiques agricoles, largement raisonnées à l'échelle de la culture (Evans et al., 2001 ; Thomsen et al., 2001), soit parce qu'ils n'ont pas de valeur marchande, ce qui est le cas de la plupart des services environnementaux (Kinzig et al., 2011). Or, les effets d'un développement des légumineuses sont principalement significatifs à des échelles supérieures à la parcelle. A l'échelle de l'exploitation agricole, l'amélioration des bilans azotés et environnementaux liée à l'introduction des légumineuses doit s'apprécier à l'échelle de la succession et des systèmes de cultures. A l'échelle du système industriel et alimentaire, une approche élargie de la transition agroécologique (Wezel et al., 2009) favorise l'adoption de pratiques de transformation et de consommation de la production agricole plus respectueuses de l'environnement (Francis et al., 2003). Dans ce cadre, les légumineuses peuvent procurer un bénéfice environnemental aux filières dans lesquelles elles sont introduites. Ces bénéfices pourraient être évalués, puis valorisés, par exemple par la création de labels de qualité environnementale. De même, les relations entre la production de légumineuses et les systèmes d'élevage méritent d'être approfondies aux échelles locales, pour valoriser localement les protéines végétales et contribuer à améliorer la durabilité des systèmes de production aux échelles des territoires. A l'extrême inverse, les cultures intensives de soja dans la Pampa Argentine ont globalement les mêmes effets négatifs que les systèmes céréaliers intensifs en Europe. Les effets d'une diminutrion des cultures de soja dans la Pampa Argentine méritent d'être évalués ; une diversification de la production agricole pourrait en effet produire à l'échelle locale des bénéfices environnementaux et sociaux ; et la réduction de la production Argentine pourrait améliorer les bilans environnementaux à l'échelle planétaire, notamment via la réduction du transport de volumes considérables de tourteaux de soja vers l'Europe et la Chine, même si les coûts environnementaux des transports maritimes restent limités. De ce fait, un effort de recherche doit être produit pour **quantifier les services agroécologiques liés à l'insertion des légumineuses dans les systèmes de production agricole et alimentaire,** sur la base d'évaluations multicritères aux échelles des systèmes de culture, des exploitations agricoles, des territoires, des filières, et même du monde, afin d'éclairer leur intérêt auprès des acteurs de la production agricole, du conseil et des pouvoirs publics.

III.3.2 Evalutions en vue d'améliorer les services produits par les légumineuses.

Au-delà des évaluations globales, trois types d'évaluations pourraient permettre d'améliorer les services rendus par les légumineuses.

- **Evaluation des potentialités d'utilisation d'une gamme étendue d'espèces** de légumineuses doit être considérée, alors que les recherches se concentrent aujourd'hui sur un tout petit nombre d'espèces et de modes de gestion agronomique (Bridet-Guillaume et al., 2011). Pour ces espèces mineures, le manque de références techniques utilisables par les agriculteurs pour prendre leurs décisions constitue un frein à leur développement (Meynard et al., 2013). Ces manques concernent particulièrement la conduite des cultures dans différentes conditions pédoclimatiques, leurs effets 'précédent' et les causes d'accidents de rendement. Et, la gamme des services écosystémiques étudiés doit être élargie, afin de fournir une évaluation plus complète des bénéfices des légumineuses (Zhang et al., 2007).

- **Evaluation des contitions d'une insertion durable des légumineuses dans les systèmes de culture** doit être réalisée. En effet, les cultures de légumineuses sont soumises à de fortes pressions

de maladies, et peu de variétés résistantes existent aujourd'hui. L'augmentation du risque sanitaire lié à l'accroissement des surfaces et de la fréquence de retour dans les rotations doit donc être quantifiée, afin de définir le niveau et/ou les modalités d'une insertion durable dans les systèmes de culture. Par ailleurs, ces espèces sont sensibles aux facteurs climatiques limitants: il est donc nécessaire d'évaluer les modes de culture qui favoriseront une robustesse des performances des systèmes de culture. Enfin, si les légumineuses sont susceptibles d'augmenter la résilience des systèmes de production face aux changements globaux par leurs propriétés vis-à-vis du cycle de l'azote, leur contribution à l'atténuation du changement climatique mérite d'être mieux évaluée à des échelles globales.

- **Evaluations environnementales des élevages utilisant des légumineuses** doivent également être approfondies. Bien que la qualité nutritionnelle des graines de protéagineux ou des légumineuses fourragères pour l'alimentation animale soit aujourd'hui jugée satisfaisante, leur consommation par les animaux produit des déjections relativement riches en azote, avec des impacts environnementaux négatifs dans les territoires d'élevage. Ces défauts, liés à la forte solubilité des protéines végétales fraîches (des graines ou des fourrages), pourraient être corrigés en optimisant la digestibilité des constituants de l'aliment, soit par l'amélioration génétique, soit par le développement de prétraitements technologiques appliqués à l'aliment. Toutefois, ces améliorations de l'aliment ne pourront être développées que sur la base de connaissances plus approfondies des cinétiques de transit, de dégradation et d'absorption des nutriments dans le tractus digestif de l'animal. Et le besoin d'un éventuel traitement technologique doit être pris en compte dans l'organisation de circuits locaux de production, de stockage et de valorisation (Petit et al., 2012).

III.4 Optimiser la conduite des cultures de légumineuses dans une démarche globale d'intensification écologique.

Dans le cadre d'une évolution du contexte agricole vers une réduction des intrants (phytosanitaires, fertilisants), il apparaît aujourd'hui crucial d'utiliser de nouveaux leviers pour optimiser les performances agro-écologiques des plantes dans les systèmes de culture. L'intensification écologique de l'agriculture, valorisant les interactions entre les composantes biologiques des agro-écosystèmes, devrait permettre d'améliorer l'efficience de prélèvement des ressources et la tolérance aux bioagresseurs ; elles jouent également un rôle dans le maintien de la biodiversité et des services associés. Les légumineuses, occupent une place particulière dans ces interactions (i) du fait de la symbiose qu'elles établissent avec les bactéries du sol pour la fixation de l'azote atmosphérique, et (ii) parce qu'elles contribuent à la diversification de l'agriculture europénne.

III.4.1 Les associations entre plusieurs espèces végétales.

Les associations végétales, dans l'espace ou dans le temps, entre plantes récoltées, et/ou plantes de service, sont des innovations agronomiques incontournables, qui permettent d'optimiser l'efficience d'utilisation des ressources, à l'échelle de la culture ou à l'échelle de la rotation (e.g. Corre-Hellou et al., 2006 ; Hauggaard-Nielsen et al., 2009). Du fait de la fixation biologique de l'azote atmosphérique, les associations végétales à base de légumineuses permettent globalement une meilleure efficience de l'utilisation de l'azote (Hauggaard-Nielsen et al., 2003), tout en maintenant un niveau de productivité important pour des niveaux d'engrais azotés plus faibles (par rapport à des cultures pures fertilisées) (Jensen, 1996 ; Ghaley et al., 2005 ; Pelzer et al., 2012). Les associations végétales sont également des outils pour améliorer la gestion des maladies et des adventices, et réduire les ravageurs (Trenbath, 1993). Enfin, elles peuvent procurer des solutions pour améliorer la qualité des produits.

Les associations végétales entre espèces légumineuses et non légumineuses dans un même peuplement sont largement utilisées dans les systèmes d'agriculture manuelle des pays du Sud (Malézieux et al., 2009). Dans les pays occidentaux, ce sont des pratiques agronomiques à l'origine et encore largement utilisées dans les prairies pour la production de fourrages ; mais elles avaient quasiment disparu des systèmes de culture céréaliers, du fait de l'intensification de l'agriculture. Toutefois, les associations végétales suscitent aujourd'hui un regain d'intérêt pour les grandes cultures,

notamment en agriculture biologique (Figure 13). En effet, en agriculture biologique, les légumineuses associées permettent de produire des céréales à teneur en protéines élevée, en absence de fertilisation azotée ; et les céréales associées rendent possible la culture des légumineuses (peu compétitives vis-à-vis des adventices) en absence d'herbicides (Core-Hellou et al., 2011). On assiste également à une augmentation récente des associations végétales dans les prairies temporaires des systèmes de polyculture-élevage (Figure 14) puisque selon les enquêtes auprès des éleveurs, elles représentent plus de 70% des prairies semées en 2011-2012. Ce développement permet aux éleveurs de diminuer les achats de tourteaux et d'engrais dont les prix sont à la fois élevés et très variables. Les associations avec des légumineuses correctement conduites présentent des impacts environnementaux favorables, tant vis-à-vis de la réduction des fuites d'azote (vers l'eau ou l'air) que de la biodiversité hébergée.

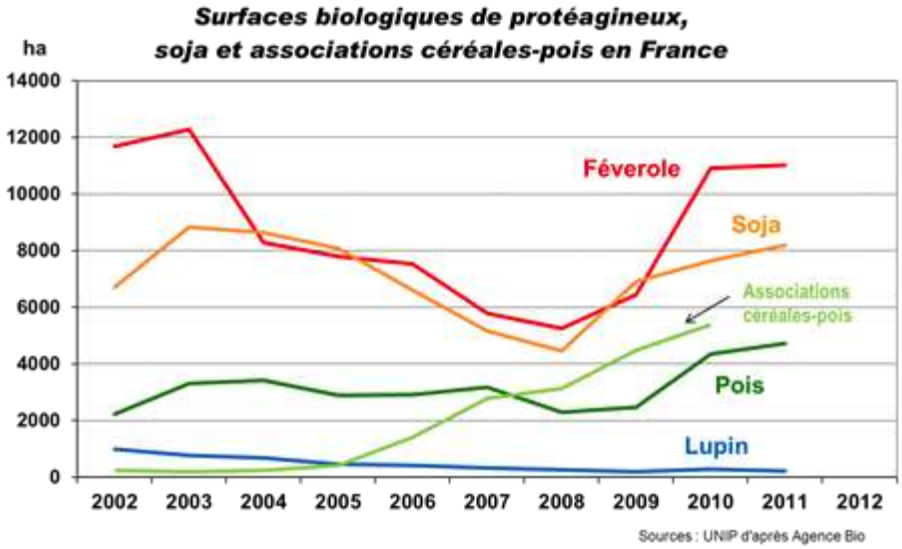


Figure 13: Surfaces de protéagineux en agriculture biologique en France, en culture pure ou en association.

- Pour la production en grains, les freins au développement des associations légumineuses-céréales résident aujourd'hui dans la maîtrise de la composition du mélange, dans l'adaptation des filières, et dans le temps nécessaire à l'apprentissage et à la diffusion de l'innovation. Les voies d'amélioration concernent d'abord les règles d'assemblage et de gestion des espèces. Par exemple, l'équilibre entre les deux espèces au cours du cycle dépend de différents facteurs, dont la proportion de chaque espèce dans le mélange au semis, ou la disponibilité en azote. Alors que le levier « fertilisation azotée » pour gérer la proportion des espèces à la récolte a été étudié (Naudin et al. 2010), le levier « proportion d'espèces au semis » l'a moins été (Corre-Hellou et al., 2006). On peut citer également le besoin de création et d'utilisation de variétés adaptées, alors que jusqu'à présent, peu de travaux de sélection on été conduits dans cette optique. Enfin, des questions de recherche concernent l'organisation des filières, et la valorisation économique de la production (et des services éco-systémiques produits). En effet, la mise en pratique des associations par les agriculteurs reste très limitée du fait de problèmes posés aux organismes de collecte en termes de logistique (tout particulièrement en termes de tri) et de commercialisation (Bousseau, 2009 ; Magrini et al., 2013), même si le développement des trieurs optiques et leur déploiement industriel modifient le paysage. Les associations légumineuses/légumineuses, entre variétés ou espèces ayant des caractéristiques complémentaires, sont probablement des voies prometteuses d'optimisation de gestion des ressources et/ou de tolérances aux bioagresseurs ; cependant, ce type d'association n'est pas pratiqué aujourd'hui et il existe peu de références à ce sujet.

- Pour la production fourragère, les atouts des associations végétales pérennes de graminées et de légumineuses résident dans l'économie d'intrants azotés puisque les prairies d'association peuvent être conduites sans fertilisation, ainsi que dans l'amélioration de la quantité et de la qualité de fourrage

produit. Le fourrage produit permet une réduction de la complémentation protéique des animaux, même s'il s'agit surtout de protéines solubles ; il offre également une possibilité de conserver ces fourrages riches en protéines par voie humide (par des techniques d'enrubannage), alors que ceci est beaucoup plus difficile pour des cultures pures de légumineuses. En effet, les sucres solubles des graminées améliorent la valorisation et la conservation des protéines. Pendant de nombreuses décennies, les freins à l'adoption par les agriculteurs résidaient dans la maîtrise de la composition botanique du mélange, la gestion à long terme sur plusieurs cycles autorisant peu de possibilités d'ajustements instantanés, mais exigeant une anticipation longue, via la conduite des prairies. En effet, seules la gestion de la défoliation et la gestion de la fertilisation azotée minérale permettent de contrôler l'abondance respective des graminées et des légumineuses lors des cycles suivants. Toutefois, de nombreux travaux de recherche ont fourni les clés de compréhension et de maîtrise des variations de production de matière sèche et de qualité, permettant aisni aux éleveurs d'être moins exposés aux aléas des prix des engrais azotés et des compléments protéiques. Les pistes d'amélioration concernent aujourd'hui une meilleure connaissance des règles d'assemblage des espèces en fonction du lieu de production, du mode d'exploitation envisagé (fauche ou pâturage) et de la durée de vie attendue, une optimisation des règles de gestion, et, à long terme des progrès génétiques au travers de la définition d'idéotypes adaptés à une utilisation en association.

La quantification des surfaces de prairies temporaires cultivées avec des associations graminées – légumineuses reste délicate, car les statistiques de surface ne sont pas disponibles. On peut toutefois estimer une surface équivalente en légumineuses pures à partir des ventes de semences, et en prenant en compte les doses de semis en culture pure et la durée de vie moyenne des couverts et des espèces de légumineuses. La figure 14 illustre les surfaces de légumineuses fourragères cultivées en pure ou associées dans les prairies temporaires, estimées depuis 1972, avec une lente décroissance suivie d'une augmentation sur les dernières années. Elle souligne la prédominance du trèfle blanc et de la luzerne parmi les légumineuses et illustre aussi que les surfaces de luzerne (exprimées en équivalent culture pure) dépassent les surfaces identifiées en culture pure (Figure 2). Avec près de 1,5 Mha, les légumineuses fourragères peuvent constituer une ressource considérable pour l'entrée d'azote dans les rotations où sont insérées ces prairies temporaires et pour la fourniture de protéines aux ruminants. Toutefois, ceci suppose que la conduite qui est ensuite mise en œuvre sur ces surfaces permette aux légumineuses de se développer de façon satisfaisante. Les légumineuses annuelles à petites graines, utilisées en cultures intermédiaires ou en espèces compagnes, sont également prises en compte dans cette estimation. Elles n'apparaissent significatives que pour l'année 2012.

- Pour la production de services à la culture ou à la rotation. Les légumineuses ont un rôle à jouer en tant que plantes de service. Les plantes de services sont définies comme des co-cultures non récoltées, produisant un service à une culture principale ou à la rotation. Les services attendus sont une meilleure maîtrise des adventices, et une meilleure gestion de la fertilisation azotée. On peut citer par exemple l'utilisation de légumineuses comme plantes de couverture semées en relais dans le blé biologique (Amossé et al., 2013), ou l'utilisation de légumineuses gélives semées dans le colza d'hiver, qui pourraient permettre la gestion des adventices sous colza à l'automne, et la restitution d'azote au colza au printemps, grâce à la minéralisation de la légumineuse (Valantin-Morison et al., 2012). Les modes d'insertion des légumineuses comme plantes de service ont été jusqu'à maintenant peu étudiés. Les freins à leur adoption concernent l'identification des espèces et variétés testées pour ce type d'usage, le coût, ainsi que les aléas associés à l'implantation des cultures de service. Les questions à traiter concernent l'identification des bons assemblages et leurs arrangements spatiaux et temporels, la meilleure compréhension et la quantification des services produits. Pour un tel usage émergent, on peut se demander s'il faut valoriser des variétés issues d'espèces largement utilisées à des fins de productions de graines ou de fourrages, en identifiant les variétés sur la base de traits particuliers, ou bien utiliser des espèces nouvelles dont les traits fonctionnels sembleraient particulièrement adaptés à un tel usage. Parmi les espèces fourragères connues, on peut citer le cas de la vesce commune,

espèce annuelle largement utilisée en culture d'hiver ou de printemps, pour laquelle il existe une activité de création variétale significative. Parmi les espèces nouvelles, on peut citer la séradelle (*Ornithopus sativus*), le fenugrec (*Trigonella foeniculum-graecum*) ou différents trèfles (incarnat, d'Alexandrie). Mais dans ce cas, la disponibilité variétale est limitée, de même que la ressource en semences de qualité germinative connue.

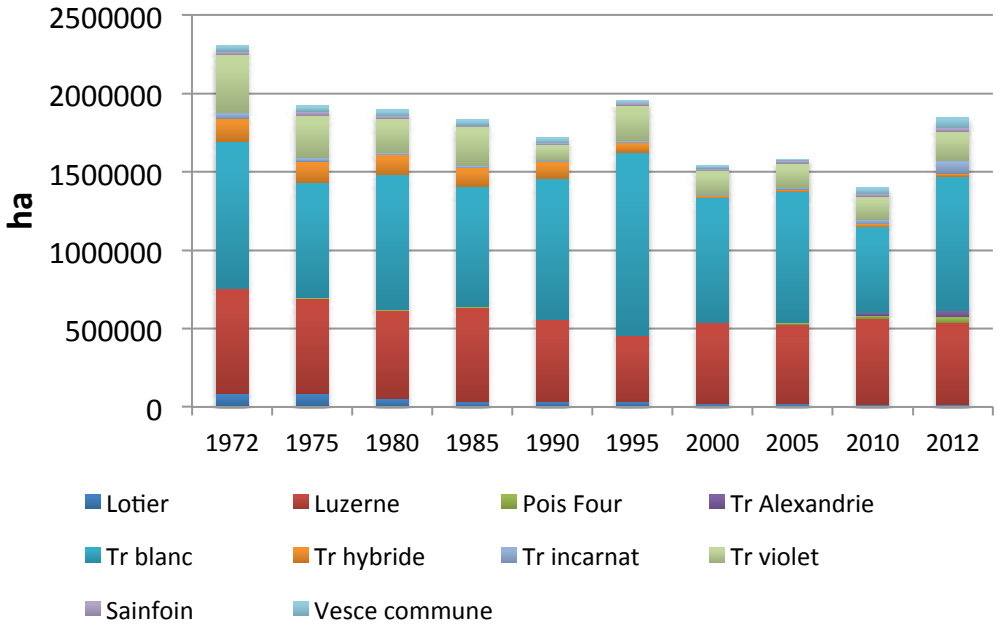


Figure 14: Surfaces de légumineuses fourragères, exprimées en équivalent de culture pure, dans les prairies artificielles et temporaires. Cette estimation prend en compte les ventes de semences, les doses de semis pour une utilisation en pure et la durée de vie moyenne de l'espèce considérée

III.4.2 Les interactions entre plantes et microorganismes de la rhizosphère.

La rhizosphère est une niche particulière dans laquelle s'exercent des interactions entre le système racinaire des plantes, le sol et les organismes qui y résident (Figure 15) (Hinsinger et al., 2005 ; Lambert et al., 2009). Le moteur de ces interactions est la libération par la plante de composés organiques selon le processus de rhizodéposition (Nguyen, 2003). Ces composés interviennent non seulement comme molécules « signal » mais aussi comme nutriments pour les microorganismes du sol (principalement hétérotrophes) (Bais et al., 2006). Ces interactions sont classiquement représentées selon un gradient allant du mutualisme symbiotique au parasitisme ; et elles peuvent être analysées en termes de coûts et bénéfices pour chaque partenaire. Pour la plante, le coût métabolique important de la rhizodéposition est compensé par des bénéfices en termes de croissance (fourniture d'éléments minéraux, meilleure alimentation hydrique) et de protection contre les parasites. En retour, le coût métabolique pour les microorganismes à exprimer ces fonctions est compensé par le bénéfice à utiliser les rhizodépôts produits par la plante (Lambert et al., 2009). Les interactions plante-microorganismes peuvent donc constituer un levier important dans l'amélioration des performances agroécologiques des plantes en général et des légumineuses en particulier ; mais ce levier n'a jamais réellement été quantifié.

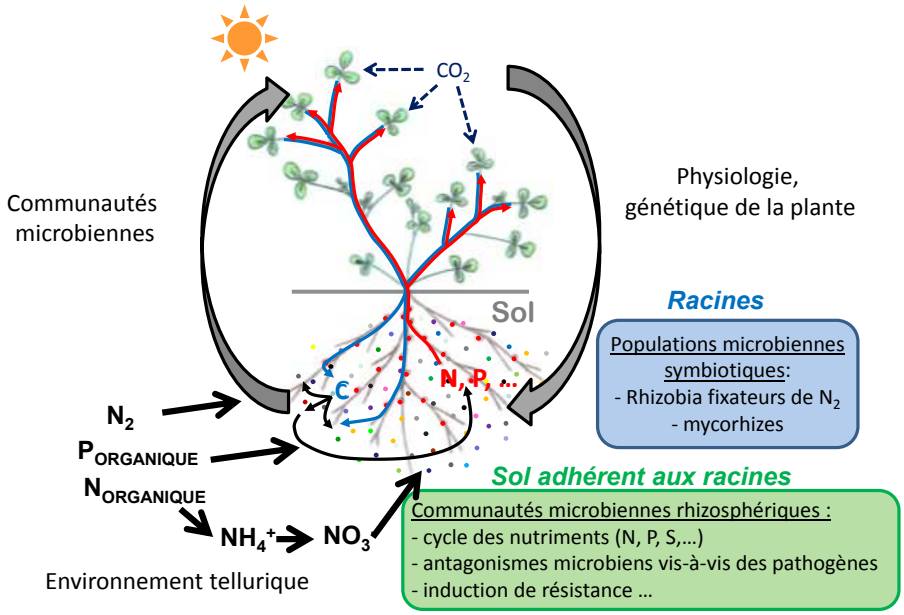


Figure 15 : Schématisation des interactions entre les plantes et les micro-organismes du sol

Les légumineuses ont la particularité d'établir des relations symbiotiques avec les bactéries du genre *Rhizobia* ainsi qu'avec les champignons endomycorhiziens. Ces symbioses sont non seulement limitées intrinsèquement par un coût en énergie à l'échelle de la plante, mais aussi par l'environnement biotique ou abiotique. Ainsi, la symbiose fixatrice est très sensible au stress hydrique, à la limitation en phosphore, à certains ravageurs du genre *Sitona* et, dans le cas du pois, à une maladie fongique du système racinaire (*Aphanomyces euteiches*). Les recherches dédiées à l'analyse des interactions plante-microorganismes dans la rhizosphère se sont restreintes, jusqu'à un passé récent, à l'étude des bases moléculaires et physiologiques de l'interaction des microorganismes mutualistes de type symbiotique (bactéries fixatrice d'azote et mycorhizes) ; et l'immense gamme d'interactions entre la plante et les communautés microbiennes n'a pas été prise en compte (Mougel et al., 2006 ; Zancarini et al., 2013a). Or, l'ensemble des communautés microbiennes du sol peut contribuer à améliorer la croissance et la santé des plantes ; plus spécifiquement, elles peuvent améliorer la mise en place et l'efficacité des symbioses, par la mise à disposition d'eau et d'éléments minéraux nécessaires à leur fonctionnement, et/ou par la protection contre des stress biotiques. Les capacités des plantes cultivées à maintenir ces interactions n'ont pas été prises en compte par les schémas de sélection passés, réalisés dans des systèmes à forts niveaux d'intrants –voire contre-sélectionnées– ce qui offre des perspectives de les restaurer par l'amélioration génétique. En effet, l'établissement de ces interactions représente un coût pour la plante, et leur expression est restreinte aux conditions environnementales limitantes (cf l'inhibition de la symbiose fixatrice d'azote en présence de nitrate et de la symbiose endomycorhizienne en présence de phosphate). Ces interactions doivent donc être mieux identifiées, et quantifiées, relativement aux services rendus, en évaluant les rôles respectifs de la diversité génétique des microorganismes de la rhizosphère, de la diversité génétique des plantes, des pratiques agricoles et des conditions environnementales (Zancarini et al., 2013b). Il s'agit pour les physiologistes d'identifier les traits de la plante qui sont impliqués dans l'assemblage des communautés microbiennes, et symétriquement, pour les microbiologistes, d'identifier les traits microbiens qui ont un effet sur la plante. En génétique, la question est d'identifier les gènes de la plante qui pilotent la sélection des interactions avec les microorganismes du sol (Friesen et al., 2011). Les possibilités de pilotage de ces interactions

via le génotype de la plante doivent être évaluées, et le bénéfice attendu quantifié par des évaluations multicritères.

III. Quelles transitions pour les acteurs de la recherche ?

Cette analyse nous a conduit à réfléchir à un nouveau positionnement des recherches à mener sur les légumineuses. Elle interroge également sur le rôle des chercheurs dans la transition agroécologique.

III.1. Le paysage de la production scientifique actuelle.

Le paysage de la production scientifique sur les légumineuses à graines et légumineuses modèles a été décrit dans une analyse bibliométrique sur les publications de la période 2000-2009, qui représentent en fait l'effort de recherche sur la période 1995-2005 (Bridet-Guillaume et al., 2010). Au niveau mondial, la répartition de la production scientifique entre espèces de légumineuses est globalement corrélée aux volumes de production agricole. Par rapport à la production scientifique mondiale, la production française présente les particularités suivantes : une faible part des publications sur le soja (de l'ordre de 10% vs plus de 50% dans le monde), associée à une part plus forte du pois (40 % vs. 20% dans le monde) et à une très forte contribution sur les espèces modèles (*Medicago tr* et *Lotus Jap.* : 35 % en France vs. 5 % dans le monde). Ainsi, la France contribue à 25 % des publications sur les espèces modèles. La féverole, le lupin et le pois chiche contribuent chacun à moins de 10 % des publications, en France et dans le monde. Une caractérisation des publications par discipline sur les protéagineux (pois, lupin, féverole, pois chiche) montre une prédominance de la génétique (50 %) et de la physiologie végétale (40 %), suivies par la protection des plantes (15 %), l'agronomie et l'écophysiologie (15 %), par la microbiologie des sols (5 %), par l'alimentation animale (5-7 %). Les travaux en alimentation humaine, sur les usages non alimentaires et en économie restent peu nombreux (moins de 5 %). Les travaux sur les espèces modèles relèvent essentiellement de disciplines fondamentales (génétique, physiologie, biochimie et biologie moléculaire et microbiologie). Une annotation thématique des publications françaises sur les protéagineux montre des "signaux forts" sur la symbiose et l'acquisition des ressources, sur la tolérance aux stress biotiques et abiotiques et sur la composition de la graine, et par ordre décroissant des "signaux faibles" sur les impacts environnementaux, la transformation technologique, l'utilisation de l'eau, la protection contre les adventices, la nutrition et la santé, l'économie et les filières, les associations, la pollinisation et l'agriculture biologique.

III.2. Un nouveau positionnement des questions de recherche.

Pour les acteurs de la recherche, cette réflexion conduit à **repositionner le questionnement sur les légumineuses en termes d'agroécologie au sens large**, en vue d'une transition vers des systèmes de production plus diversifiés et plus durables, et de ce fait plus flexibles et plus résilients. La définition élargie de l'agroécologie comme « *The integrative study of the ecology of the entire food system, encompassing ecological, economic and social dimensions» (*Francis et al., 2003) nous invite à poser les questions au niveau de l'ensemble du système alimentaire, et non aux seuls niveaux de la parcelle ou de l'exploitation agricole, comme le ferait un agronome, ou de la transformation des produits, comme le ferait un technologue. Ce nouveau positionnement conduit à ouvrir des horizons de recherche nouveaux et à une nouvelle hiérarchie des priorités. En changeant de point de vue, on peut alors envisager de contourner des situations qui paraissaient inextricables. Par exemple, les conditions nécessaires au développement de l'utilisation du pois en alimentation animale semblent difficiles à réunir ; mais si on change d'enjeu, en mettant en avant la question de la sécurité alimentaire, on pointe alors l'intérêt de développer des recherches sur l'innovation technologique et la construction de filières pour l'alimentation humaine. Et le fait que ces recherches aient été peu développées par le passé laisse présager d'une marge de progrès importante.

L'agroécologie met en avant le principe qu'une diversité accrue des systèmes de production augmente leur durabilité (Altieri, 1992 ; Ratnadass et al., 2012) : une transition de la recherche doit s'opérer des

espèces modèles et/ou dominantes vers une **diversification des espèces étudiées**, en valorisant en génétique la conservation de synténie entre espèces proches, et en mobilisant des concepts d'écophysiologie comparée et d'écologie fonctionnelle pour les fonctions biologiques recherchées. Une rupture importante consiste à envisager les innovations génétiques et agronomiques, non pas comme le levier majeur pour une adaptation à un débouché majoritaire (l'alimentation animale), mais sous un angle nouveau au regard : (1) d'un ensemble de nouveaux débouchés en analysant les potentialités de marchés en fonction des propriétés spécifiques, fonctionnelles et nutritionnelles des légumineuses, (2) des solutions technologiques proposées par les acteurs de la R&D qui peuvent pallier des "défauts de qualité", (3) des propriétés particulières des légumineuses pour leurs intérêts dans des systèmes de production écologiquement intensifs selon différents modes d'insertion dans les systèmes de culture et dans les systèmes de production animale.

III.3. Une mise en œuvre et un apprentissage collectifs de la transition

Les questions mises en avant dans les paragraphes qui précèdent relèvent souvent **de recherches pluridisciplinaires et multi-échelles.** Elles appellent donc la construction de projets intégrés, favorisant la co-construction des problématiques par les différentes disciplines. Une difficulté réside dans la mobilisation des compétences de certaines disciplines jusqu'à présent peu investies sur les légumineuses telles que les sciences économiques et sociales, les sciences de l'alimentation et de la nutrition, l'ingénierie des procédés, l'agronomie et l'écologie. Enfin, il faut encourager un rapprochement entre les chercheurs et les acteurs des filières, pour mieux appréhender les innovations technologiques et organisationnelles nécessaires à la transition de l'ensemble du système de production agricole et agro-industriel vers plus de durabilité.

La recherche et l'enseignement ont un rôle clé à jouer dans l'apprentissage collectif de la transition vers des systèmes agricoles intégrant plus de légumineuses. Dans la gestion stratégique des niches, les processus d'apprentissage et d'accumulation des connaissances sont un facteur clé de transition (Kemp et al., 1997). La transition sera ainsi favorisée par la capacité du monde agricole et industriel à concevoir ou développer des innovations technologiques. La recherche et l'enseignement peuvent aider à mobiliser les acteurs sur de nouveaux apprentissages, par exemple dans la prise en compte des services écosystémiques associés aux légumineuses. En particulier, la formation initiale et continue ont un rôle majeur dans la diffusion des innovations. En effet, la majeure partie du conseil et des références techniques sont apportés aux agriculteurs par les organismes stockeurs ; or, leurs exigences actuelles en termes d'approvisionnement (en quantité, qualité et stabilité) font qu'ils sont aujourd'hui peu enclins et peu formés à fournir un appui technique sur les cultures de légumineuses.

III.4. Quelle valeur générique de la réflexion menée sur l'exemple de la France ?

Cet article dresse un tableau général des priorités de recherche sur l'exemple de la situation française. Toutefois, sa déclinaison dans une région ou un pays particulier, de même que son adaptation à l'évolution du contexte ne sont pas triviales. La dynamique des savoirs, autant que la perception par l'équipe de recherche de la « demande sociale », entrent en ligne de compte.

- **La dynamique des savoirs** peut être éclairée par une analyse bibliométrique comme celle menée par Bridet-Guillaume et al. (2010), car elle permet d'identifier les points forts et faibles du dispositif de recherche. Il ressort qu'au niveau international, la prédominance des recherches en génétique et en physiologie mériterait d'être interrogée, au regard de la relative faiblesse des investissements en agronomie, en écologie des sols, en sciences de l'alimentation et de la nutrition humaine et en sciences économiques et sociales. En France, la forte proportion de travaux portant sur des espèces modèles sans intérêt agronomique invite à accorder une place majeure aux recherches sur les modalités de transposition des connaissances d'une espèce à une autre.

- **La perception par les chercheurs de la « demande sociale »** peut avoir différentes sources : des demandes explicites de certains acteurs (partenaires économiques, médias, pouvoirs publics…) ; des évaluations multicritères des systèmes agricoles et alimentaires actuels et/ou des prospectives participatives sur leur évolution, qui peuvent conduire à travailler sur les points faibles identifiés, ou bien à concevoir des systèmes plus satisfaisants. Les travaux des chercheurs peuvent ainsi fournir des informations qui aideront les pouvoirs publics à arbitrer entre des avenirs possibles.

La portée générale de l'analyse proposée ici est de montrer qu'une vision agroécologique implique de re-situer chaque brique, issue des travaux de chaque spécialiste, dans la perspective globale du système alimentaire en y intégrant les enjeux d'éco-conception et de cycle de vie des produits. Dans cette perspective, chaque chercheur doit s'attacher à expliciter le chaînage de connaissances qui serait susceptible de relier ses recherches à l'innovation et à l'utilité sociale, à se préoccuper de l'utilisation qui peut être faite des connaissances qu'il produit, et à s'interroger sur ce que ses compétences et son domaine de recherche lui permettent de produire, qui serait utile à d'autres chercheurs. C'est ce que nous avons essayé de faire dans cet article.

Références bibliographiques

Allaire G., 2002. L'économie de la qualité, en ses territoires, ses secteurs et ses mythes. Géographie, Economie et Société 4 (2), 155-180.

Allaire G., Boyer R., 1995. La grande transformation de l'agriculture, INRA- Economica (eds.), Paris.

Altieri MA., Martin P.B., Lewis W.J., 1983. A quest for ecologically based pest management systems. Env Management 7, 91-100.

Altieri M.A., 1992. Agroecological foundations of alternative agriculture in California. Agriculture, Ecosystems and Environment 39, 23-53.

Altieri M.A., Nicholls C.I., 2012. Agroecology scaling up for food sovereignty and resiliency. E. Lichtfouse (ed) Sustainable Agriculture Reviews 11, 1-29.

Amossé C., Jeuffroy M.H., David C., 2013. Relay intercropping of legume cover crops in organic winter wheat: Effects on performance and resource availability. Field Crops Research 145, 78–87.

Anderson J.W., Major A.W., 2002. Pulses and lipaemia, short- and long-term effect: potential in the prevention of cardiovascular disease. British Journal of Nutrition 88 (3), 263-271.

Aubertot J.N., Barbier J.M., Carpentier A., Gril J.J., Guichard L., Luca S., Savary S., Savini S., Voltz M., 2005, Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux, Expertise scientifique collective Inra-Cemagref. http://www.observatoire-pesticides.fr/upload/bibliotheque /70462426125289393 5317453066156/pesticides_synthese_inra_cemagref.pdf

Axelos M., Bérot S., Schmidt I., Guéguen J., 2006. Propriétés tensioactives de biopolymères amphiphiles. P. Colonna, Lavoisier (ed) « La Chimie verte », 271 – 304.

Bais H.P., Weir T.L., Perry L.G., Gilroy S., Vivanco J.M., 2006. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. The Annual Review of Plant Biology 57, 233-266.

Berthet E.T.A., Bretagnolle V., Segrestin B., 2012 Analyzing the design process of farming practices ensuring little bustard conservation: lessons for collective landscape management. Journal of Sustainable Agriculture 36 (3), 319-336.

Boland M.J, Rae A.N, Vereijken J.M, Meuwissen M.P.M., Fischer A.R.H., van Boekel M.A.J.S., Rutherfurd S.H, Gruppen H., Moughan P.J., Hendriks W.H., 2013. The future supply of animal-derived protein for human consumption. Trends in Food Science & Technology 29, 62-73.

Bousseau D., 2009. Associations céréales-légumineuses et mélanges de variétés de blé tendre : point de vue agronomique et pratique d'une coopérative. Innovations Agronomiques 7, 129-137.

Bridet-Guillaume F., Millot D., Buitink J., Gueguen J., Jeuffroy M.H., M. Le Gall, Munier-Jolain N.G , Duc G., 2010. Analyse bibliométrique des publications scientifiques françaises et mondiales sur les protéagineux au cours de la période 2000-2009 : comparaison au soja et aux espèces modèles. Innovations Agronomiques 11, 137-145.

Butault J.P., Dedryver C.A., Gary C., Guichard L., Jacquet F., Meynard J-M., Nicot P., Pitrat M., Reau R., Sauphanor B., Savini I., Volay T., 2010. Ecophyto R&D, Quelles voies pour réduire l'usage des pesticides. Synthèse du rapport d'étude. INRA éditeur (France) 90 pages. http://www6.paris.inra.fr/depe/Projets/Pesticides-agriculture-et-environnement.

Carrouée B., Schneider A., Flénet F., Jeuffroy M.H., Nemecek T., 2012. Introduction du pois protéagineux dans des rotations à base de céréales à paille et colza : impacts sur les performances économiques et environnementales. Innovations Agronomiques 25, 125-142.

Cavaillès E., Commissariat Général au Développement Rural, 2009. La relance des légumineuses dans le cadre d'un plan protéines: quels bénéfices environnementaux ? Etudes et Documents, n°15, http://www.developpement-durable.gouv.fr/spip.php?page=article&id_article=12730

Colonna P., Mercier C., 1985. Pisum sativum and Vicia faba carbohydrates. 6. gelatinization and melting of maize and pea starches with normal and high amylase genotypes. Phytochemistry 24, 1667-1674.

Combris P., 2006. Le poids des contraintes économiques dans les choix alimentaires. Cahier de Nutrition et de Diététique 41 (5), 279-284.

Corre-Hellou G., Crozat Y., 2005. N2 fixation and N supply in organic pea (*Pisum sativum* L.) cropping systems as affected by weeds and peaweevil (*Sitona lineatus* L.). European Journal of Agronomy 22, 449-458.

Corre-Hellou G., Fustec J., Crozat Y., 2006. Interspecific competition for soil N and its interaction with N_2 fixation, leaf expansion and crop growth in pea-barley intercrops. Plant and Soil 282, 195–208.

Corre-Hellou G., Dibet A., Hauggaard-Nielsen H., Crozat Y., Gooding M., Ambus P., Dahlmann C., von Fragstein P., Pristeri A., Monti M., Jensen E.S., 2011. Competitive ability of pea-barley intercrops against weeds and interactions with crop productivity and soil N acquisition. Field Crops Reseach 122, 264-272.

David C., Jeuffroy M.H., Henning J., Meynard J.M., 2005. Yield variation in organic winter wheat: a diagnostic study in the Southeast of France. Agronomy for Sustainable Development 25, 213–223

Dorin B, Treyer S., Paillard S., 2011. Agrimonde- Scenarios and Challenges for Feeding the World in 2050. (Eds) Editions Quae, Paris. http://www.foresight-platform.eu/brief/efp-brief-no-196-agrimonde/

Esnouf C., Russel M., Bricas N., 2011. Pour une alimentation durable. Réflexion stratégique duALIne. (ed) Quae, Paris, 288p. http://www.cirad.fr/publications-ressources/edition/etudes-et-documents/dualine

Evans J., McNeill A.M., Unkovich M.J., Fettell N.A., Heenan D.P., 2001. Net nitrogen balances for cool-season grain legume crops and contributions to wheat nitrogen uptake: a review. Australian Journal of Experimental Agriculture 41, 347–359.

Fares M., Magrini M-B., Triboulet P., 2012. Transition agro-écologique, innovation et effets de verrouillage: le rôle de la structure organisationnelle des filières. Le cas de la filière blé dur française. Cahiers d'Agricultures 21, 34-45.

Friesen M.L., Porte, S.S., Stark S.C., von Wettber E.J., Sachc J.L., Martinez-Romero E., 2011. Microbially mediated plant functional traits. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics 42, 23-46.

Geels F.W., 2011. The multi-level perspective on sustainability transitions : response to seven criticisms. Environnemental Innovation and Societal Transitions 1, 24-40.

Géhin B., Guéguen J., Bassot P., Seger A., 2010. Répondre aux besoins spécifiques de qualité pour augmenter l'utilisation des légumineuses en transformation industrielle. Innovations Agronomiques 11, 115-127.

Ghaley B.B., Hauggaard-Nielsen H., Hogh-Jensen H., Jensen E.S., 2005. Intercropping of wheat and pea as influenced by nitrogen fertilization. Nutrient Cycling in Agroecosystems 73, 201–212.

Guéguen J., 1983. Legume seed protein extraction, processing and end product characteristics. Qualitas Plantarum Plant Foods for Human Nutrition 33, 267-303.

Guéguen J., 1999. Les protéines végétales : un réservoir de macromolécules multifonctionnelles. OCL 6, 498-504.

Guilbert S., Morel M.H, Cuq B., 2006. Protéines matériaux. P. Colonna (ed) « La Chimie verte », Lavoisier, pp 179-204.

Hauggaard-Nielsen H., Ambus P., Jensen E.S., 2003. The comparison of nitrogen use and leaching in sole cropped versus intercropped pea and barley. Nutrient Cycling in Agroecosystems 65, 289–300.

Hauggaard-Nielsen H., Gooding M., Ambus P., Corre-Hellou G., Crozat Y., Dahlmann C., Dibet A., Fragstein, P. von Pristeri A., Monti M., Jensen E.S., 2009. Pea-barley intercropping for efficient symbiotic N2-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems. Field Crops Research 113, 64–71.

Heng L., Vincken J.P., Van Koningsveld, Legger A., Gruppen H., Van Boekel T., Roozen J., Voragen F., 2006. Bitterness of saponins and their content in dry peas. Journal Science Food Agriculture 26, 1225-1231.

Heng L., Vincken J.P., Hoppe K., Van Koningsveld, Decroos K.., Gruppen H., Van Boekel M.AJ.S., Voragen A.G.J., 2006. Stability of pea DDMP saponin and the mechanism of its decomposition. Food Chemistry 99, 326-334.

Hill S.B., MacRae R.J., 1995. Conceptual framework for the transition from conventional to sustainable agriculture. Journal of Sustainable Agriculture 7, 81–87.

Hinsinger P., Gobran G.R., Gregory P.J., Wenzel W.W., 2005. Rhizosphere geometry and heterogeneity arising from root-mediated physical and chemical processes. New Phytologist 168, 293-303.

Jensen E.S., 1996. Grain yield, symbiotic N2 fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops. Plant and Soil 182, 25–38.

Jensen E., Peoples M., Boddey R., Gresshoff P., Hauggaard-Nielsen H., J.R. Alves B., Morrison M., 2012. Legumes for mitigation of climate change and the provision of feedstock for biofuels and biorefineries. A review. Agronomy for Sustainable Development 32, 329–364.

Jensen E.S., Peoples M.B., Boddey R.M., Gresshoff P.M., Hauggaard-Nielsen H., Alves B.J.R., Morrison M.J., 2012. Legumes for mitigation of climate change and the provision of feedstock for biofuels and biorefineries. A review. Agronomy for Sustainable Development 32, 329–364.

Jensen E.S., Hauggaard-Nielsen H., 2003. How can increased use of biological N_2 fixation in agriculture benefit the environment? Plant Soil 252, 177–186.

Jeuffroy M.H., Baranger E., Carrouée B., de Chezelles E., Gosme M., Hénault C., Schneider A., Cellier P., 2013. Nitrous oxide emissions from crop rotations including wheat, rapeseed and dry peas. Biogeosciences 10, 1787-1797.

Kemp R., Schot J., Hoogma R., 1998. Regime shifts to sustainability through processes of niche Formation : the approach of strategic niche management. Technology Analysis & Strategic Management 10,175-195.

Kinzig P.A., Perrings C., Chapin F.S., Polasky S., Smith V.K., Tilman D., Turner B.L., 2011. Paying for Ecosystem services – Promise and Peril. Science 334, 603-604.

Labarthe P., 2010. Services immatériels et verrouillage technologique. Le cas du conseil technique aux agriculteurs. Economies et Sociétés 44, 173-96.

Lamb, J.F.S., Jung, H.J.G., Sheaffer, C.C., Samac, D.A., 2007. Alfalfa leaf protein and stem cell wall polysaccharide yields under hay and biomass management systems. Crop Science 47, 1407–1415.

Lambers H., Mougel C., Jaillard B., Hinsinger P., 2009. Plant-microbe-soil interactions in the rhizosphere: an evolutionary perspective. Plant and Soil 321, 83-115.

Lamine C., 2005 Settling the shared uncertainties: local partnerships between producers and consumers. Sociologia Ruralis 45, 324-345.

Le Roux X., Barbault R., Baudry J., Burel F., Doussan I., Garnier E., Herzog F., Lavorel S., Lifran R., Roger-Estrade J., Sarthou J.P., Trommetter M., 2008. Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA (France) . http://www6.paris.inra.fr/depe/Projets/Agriculture-et-biodiversite

Leterme P., 2002. Recommendations by health organizations for pulse consumption. British Journal of Nutrition 88, 239-242.

Lourdin D., Colonna P., 2006. Matériaux à base d 'amidons et de leurs dérivés. (ed) P. Colonna, « La Chimie verte » Lavoisier, pp 145-178.

Lourdin D., Della Valle G., Colonna P., 1995. Influence of amylose content on starch films and foams. Carbohydrate Polymers 27, 261-270.

Magrini M.B., Triboulet P., Bedoussac L., 2013. Pratiques agricoles innovantes et logistique des coopératives agricoles. Une étude ex-ante sur l'acceptabilité de cultures associées blé dur-légumineuses » Economie Rurale 38: in press

Malézieux E., Crozat Y., Dupraz C., Laurans M., Makowski D., Ozier-Lafontaine H., Rapidel B., de Tourdonnet S., Valantin-Morison M., 2009. Mixing plant species in intercropping systems : concepts, tools and models. A review. Agronomy for Sustainable Development 29, 43-62.

Martin C., Thomsen M.H., Hauggaard-Nielsen H., Thomsen A.B., 2008. Wet oxidation pretreatment, enzymatic hydrolysis and simultaneous saccharification and fermentation of clover-ryegrass mixtures. Bioresource Technology 99, 8777–8782.

Meynard J.M., Messéan A., Charlier A., Charrier F., Farès M., Le Bail M., Magrini M.B., Savini I., 2013. Freins et leviers à la diversification des cultures. Etude au niveau des exploitations agricoles et des filières. Synthèse du rapport d'étude, INRA, 52 p. http://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-decisions/Etudes/Toutes-les-actualites/Diversification-des-cultures

Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-being: General Synthesis. World Resources Institute, Island Press,Washington DC. www.millenniumassessment.org

Mougel C., Offre P., Ranjard L., Corberand T., Gamalero E., Robin C., Lemanceau, P., 2006. Dynamic of the genetic structure of bacterial and fungal communities at different development stages of Medicago truncatula Jemalong J5. New Phytologist 170, 165-175.

Muchnik J., de Sainte Marie C., 2009. "Le temps des Systèmes Agro-alimentaires Localisés" (ed) QUAE, Paris

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 N_2 fixation. Field Crops Research 119, 2–11.

Nemecek T., Von Richthofen J.-S., Dubois G., Casta P., Charles R., Pahl H., 2008. Environmental impacts of introducing grain legumes into European crop rotations. European Journal of Agronomy 28, 380-393.

Nguyen C., 2003. Rhizodeposition of organic C by plants: mechanism and controls. Agronomie 23, 375-396.

Pelzer E., Bazot M., Makowski D., Corre-Hellou G., Naudin C., Al Rifaï 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. European Journal of Agronomy 40, 39–53.

Petersson A., Thomsen M.H., Hauggaard-Nielsen H., Thomsen A.B., 2007. Potential bioethanol and biogas production using lignocellulosic biomass from winter rye, oilseed rape and faba bean. Biomass and Bioenergy 31, 812–819.

Petit M.-S., Challan-Belval C., Blosseville N., Blancard S., Castel T., Lecomte C., Duc G., 2012. Un exemple de gestion de systèmes de polyculture élevage à l'échelle de territoires : le cas des protéagineux et de l'élevage de monogastriques en Bourgogne. Innovations Agronomiques 22, 135-157.

Ratnadass A., Fernandes P., Avelino J., Habib R., 2012. Plant species diversity for sustainable management of crop pests ans diseases in agroecosystems : a review. Agronomy for Sustainable Management 32, 273-303.

Rochette, P., Janzen, H.H., 2005. Towards a revised coefficient for estimating N_2O emissions from legumes. Nutrient Cycling in Agroecosystems 73, 171–179.

Roep D., Wiskerke J.S.C., 2012. Reshaping the foodscape. In: Spaargaren G, Oosterveer P, Loeber A. (eds) Food practices in transition: changing food consumption, retail and production in the age of reflexive modernity. Routledge, New York/London, pp 207-228.

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, 1-16 .

Thomsen K., Kjellerup V., Christensen B.T., 2001. Leaching and plant offtake of N in field pea/cereal cropping sequences with incorporation of 15N-labelled pea harvest residues. Soil Use and Management 17, 209-216.

Thomsen M.H., Hauggaard-Nielsen H., 2008. Sustainable bioethanol production combining biorefinery principles using combined raw materials from wheat undersown with clover-grass. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology 35, 303–311.

Trenbath B.R., 1993. Intercropping for the management of pests and diseases. Field Crops Research 34, 381–405.

Vadez V., Berger J.D., Warkentin T, Asseng S., Ratnakumar P.C., Rao K.P., Gaur P.M., Munier-Jolain N.G., Larmure A., Voisin A.S., Sharma H.C., Pande S., Sharma M., Krishnamurthy L., Zaman M.A., 2012. Adaptation of grain legumes to climatic changes: A review. Agronomy for Sustainable Development 32, 31-44.

Valantin-Morison M., Butier A., Berder J., Pinochet X., 2012. Crop growth and nitrogen utilisation of a Mixture of Winter oilseed rape (Brassica napus-WOSR) and legume in multi-local trials. Proceedings of the XIIth congress of the European Society of Agronomy, Helsinki, 19-24 August 2012.

Vanloqueren G., Baret P.V., 2009. How agricultural research systems shape a technological regime that develops genetic engineering but locks out agroecological innovations. Research Policy 38 (6), 971-983.

Vose J.R, 1980. Production and functionality of starches and protein isolates from legume seeds (field peas and horsebeans). Cereal Chemistry 57, 406-410.

Zancarini A., Mougel C., Terrat S., Salon C., Munier-Jolain N., 2013a. Combining ecophysiological and microbial ecological approaches to study the relationship between Medicago truncatula genotypes and their associated rhizosphere bacterial communities. Plant and Soil 365, 183-199.

Zancarini A., Lépinay C., Burstin J., Duc G., Lemanceau P., Moreau D., Munier-Jolain N., Pivato B., Rigaud T., Salon C., Mougel C., 2013b. Combining molecular microbial ecology with ecophysiology and plant genetics for a better understanding of plant-microbial communities interactions in the rhizosphere. In: Bruijn, F.J. de (Ed.) Molecular Microbial Ecology of the Rhizosphere, John Wiley & Sons, Inc, sous presse

Zhang W., Ricketts T.H., Kremenc C., Carneyd K., Swintona S.M., 2007. Ecosystem services and dis-services to agriculture. Ecological Economics 64, 253–260