

**La transition vers des systèmes agro-alimentaires durables : quelle place et qualification pour les légumineuses à graines ?**

**Which place for grain legumes in the transition to a sustainable agrofood system ?**

Magrini M-B., Voisin A-S., Anton M., Cholez C., Duc G., Hellou G., Jeuffroy M-H., Meynard J-M., Pelzer E., Walrand S.

*La contribution à cet article de chercheurs issus de différentes disciplines (économie, agronomie, nutrition humaine, génétique, écophysiologie, génie des procédés) permet d'éclairer différentes dimensions du système agro-alimentaire industriel qui pourraient permettre de mieux valoriser des légumineuses à graines à l'amont et à l'aval des filières.*

**Introduction**

La transition des systèmes productifs vers plus de durabilité interpelle de plus en plus les politiques publiques et privées pour déterminer des leviers d'action permettant d'enclencher un changement profond des technologies. Depuis le début des années 2000, la littérature sur la transition durable s'est particulièrement développée en mobilisant différents cadres d'analyse systémique en sciences humaines et sociales. Pour l'essentiel, quatre cadres théoriques dominent cette littérature. Deux premiers cadres visent une compréhension systémique des « grands » principes du processus de transition via ses composantes technologiques et sociales : i) l'approche par les systèmes d'innovations technologiques (« innovation systems », e.g. Hekkert et al. 2007) centrée sur les trajectoires technologiques des secteurs d'activité ; ii) l'approche multi-niveaux (« multi-level perspective », e.g. Geels 2011) dans une analyse couplant les réseaux d'acteurs et les technologies, au travers des concepts de régimes socio-techniques et de niches d'innovation, mobilisant les approches évolutionnistes. Deux autres cadres, à visée plus opérationnelle, proposent de s'intéresser aux conditions d'émergence et de diffusion des innovations dans le processus de transition : iii) le management de la transition (« transition management », e.g. Kern et Smith 2008) ; iv) le management stratégique des niches (« strategic niche management », e.g. Raven et Geels, 2010). L'ensemble de ces analyses contribue à définir des approches dites de « co-évolution » (« coevolutionary framework », e.g. Foxon 2011) dans la compréhension des interactions multiples entre technologies et acteurs privés et publics, lors de la transition des systèmes de production vers plus de durabilité. Elles constituent un cadre heuristique interdisciplinaire permettant d'articuler différentes dimensions relatives aux technologies, aux règles politiques, économiques et sociales, aux valeurs culturelles. Selon Foxon et al. (2013), ces approches contribuent à façonner un nouveau courant en économie d'analyse de la complexité des transitions (« complexity economics for sustainability »).

Si le cadre théorique de la transition se construit, ses champs d'investigation demeurent néanmoins à ce jour restreints. Concentré sur les secteurs de l'énergie et des transports, et bien que d'autres domaines aient peu à peu émergé comme l'eau et l'assainissement, le secteur agro-alimentaire reste peu étudié (Markard et al. 2012). Les enjeux sont pourtant d'ampleur. L'agriculture occupe la moitié de la surface du territoire (en France), assurant un service majeur de production alimentaire, ce secteur interagit avec de nombreuses ressources naturelles, influençant la biodiversité et le changement climatique. Face à la transition démographique et énergétique, plusieurs rapports ont mis en avant l'urgence de traiter les enjeux de la disponibilité d'une alimentation saine pour l'ensemble de la population mondiale (Chaumet et al. 2009) ; et plus récemment aussi face aux enjeux de la transition épidémiologique (réduction des maladies infectieuses mais progression des maladies chroniques en lien avec notre alimentation). Pour répondre à ces enjeux, Marsden (2012) rappelle l'importance de reconsidérer l'agriculture et l'alimentation comme étroitement liées, afin de comprendre les leviers

d'une co-transition de ces systèmes de production, renforçant la nécessité de recourir à des approches systémiques.

Nous parlerons de transition du système agro-alimentaire pour désigner les changements articulés de l'agriculture et de l'alimentation<sup>1</sup>. Dans une vision systémique, la transition du système agro-alimentaire peut être considérée comme un processus dual englobant une *transition amont* et une *transition aval*. L'enjeu est alors de comprendre comment ces deux transitions peuvent s'enclencher simultanément pour co-évoluer vers un nouveau système agro-alimentaire qualifié d'« agro-écologique » (e.g. Francis et al. 2003). Un levier majeur de cette transition réside dans une plus grande diversification des ressources végétales dans les systèmes de production *amont*<sup>2</sup>, qui interpelle la capacité de l'*aval* des filières à valoriser une plus grande diversité d'espèces végétales dans les systèmes de transformation agro-alimentaires.

Cet enjeu de diversification a été notamment analysé pour le cas français (Meynard et al. 2013). **Nous proposons dans cet article de nous intéresser à cette diversification amont et aval au travers d'une plus grande place que pourraient occuper les légumineuses à graines cultivées pour leurs graines riches en protéines**<sup>3</sup>. Les légumineuses à graines présentent en effet différents intérêts. De par leurs propriétés spécifiques liées à la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique, ces cultures ne nécessitent pas d'apports d'engrais azotés pour leur croissance, contribuant à une réduction significative des gaz à effets de serre liés la fabrication, au transport et à l'épandage des engrais azotés par ailleurs utilisés sur les cultures non légumineuses fertilisées (e.g. Pellerin et al. 2013, Munier-Jolain et Carrouée 2003, Choquet et al. 2014). Leur insertion dans des rotations céréalières simplifiées a des effets propres à toute diversification comme la réduction des cycles des bio-agresseurs (Colbach et al. 1996, Colbach et Saur 1998, Munier-Jolain 2002). En outre, la richesse en protéines de leurs graines confère à ces espèces des valeurs nutritionnelles intéressantes, tant pour l'alimentation animale qu'humaine (Gueguen et Duc, 2008). D'autres propriétés fonctionnelles contribuent aussi à leur usage dans les produits de l'agro-alimentaire, le secteur des médicaments ou plus largement de la chimie (Voisin et al. 2013). Malgré ces différents atouts, le mouvement de spécialisation des grandes cultures a conduit à une marginalisation des légumineuses à graines (Coudurier et al. 2013). Elles représentent aujourd'hui moins de 2 % des surfaces de grandes cultures françaises et européennes ; alors que leur assolement varie entre 10% et 25% dans les pays d'Amérique du Nord et d'Asie. Certains pays, comme le Canada, ont même relancé fortement ces cultures au cours de ces vingt dernières années, multipliant sa production par 10 pour atteindre aujourd'hui, par exemple, le rang de 1<sup>er</sup> exportateur de pois protéagineux. Peu cultivées dans nos assolements, les légumineuses à graines sont tout autant peu présentes dans les filières industrielles agro-alimentaires implantées en France. Pourquoi ont-elles été progressivement marginalisées dans notre système de production ? Quelles innovations en cours sont susceptibles d'annoncer une plus forte présence de ces espèces dans notre assolement et dans notre alimentation ?

---

<sup>1</sup> Nous renvoyons aux travaux de Malassis (1979) sur le concept d'agroalimentaire qui forge une vision de l'agriculture comme insérée dans le développement économique, plus particulièrement comme composante essentielle d'un système capitaliste industriel.

<sup>2</sup> Les régulations agro-écologiques (ie. services écosystémiques) repose sur une plus forte biodiversité, dont tout particulièrement une plus grande diversité cultivée, reconnue comme un principe majeur de l'agroécologie (e.g. Altieri 1999).

<sup>3</sup> Les légumineuses à graines font partie de la famille des Fabacées et recouvrent une large variété d'espèces (pois, féverole, lupin, lentilles, haricots...) dont les caractéristiques communes sont de fixer l'azote de l'air grâce à une symbiose avec des bactéries du sol, d'avoir des graines riches en protéines (taux moyen variant entre 22 et 40 %) et d'être récoltées en sec pour l'alimentation. La nomenclature statistique française distingue les protéagineux (terme européen réglementaire regroupant pois protéagineux, lupin et féverole) historiquement orientés au lendemain de la seconde guerre mondiale pour l'alimentation animale, et les légumes secs traditionnels utilisés majoritairement pour l'alimentation humaine (lentilles, pois, haricots, pois chiche...). Le soja, classé dans les oléo-protéagineux, tend à constituer une catégorie spécifique de par sa double richesse en huile et en protéines. Nous renvoyons à l'article Voisin et al. (2014) pour un rappel des principales espèces concernées et à leur évolution statistique dans les assolements.

L'analyse *a posteriori* du secteur agro-alimentaire français montre que le système socio-technique dominant, forgé autour de la valorisation des céréales, a concentré les investissements en faveur de ces espèces « majeures » au détriment d'autres espèces qualifiées de « mineures » par Meynard et al. (2013). **Nous précisons ici plusieurs éléments de compréhension dans l'organisation du système socio-technique agro-alimentaire qui a défavorisé les légumineuses à graines afin de comprendre, en s'appuyant sur les théories de la transition, quels peuvent être les leviers mobilisables pour favoriser une co-évolution des systèmes de production amont et aval en leur faveur.**

La première section de cet article consiste en une analyse du verrouillage du système agro-alimentaire en défaveur des légumineuses et détaille l'enjeu de leur valorisation pour répondre à une plus grande diversification. La deuxième section explicite le cadre d'analyse théorique retenu pour étudier la co-évolution du régime technologique agricole et agro-alimentaire et les différents leviers mobilisables pour soutenir cette transition duale du système agro-alimentaire en faveur d'une plus grande place des légumineuses à graines. Ces leviers s'intéresseront plus particulièrement aux innovations en cours du système. Deux domaines d'innovation par les légumineuses seront analysés : dans les pratiques agronomiques, essentiellement au travers des pratiques de fertilisation et de valorisation d'autres services écosystémiques (section 3) ; dans la valorisation de ces espèces dans l'alimentation humaine, essentiellement au travers de la question du re-équilibre entre protéines animales et végétales dans les régimes alimentaires (section 4). En conclusion nous reviendrons sur la compréhension globale d'une co-évolution de ces changements.

## **Section 1. Le verrouillage du système agro-alimentaire en défaveur des légumineuses à graines**

Une plus grande insertion de légumineuses en grandes cultures pourrait contribuer à une agriculture plus durable (Voisin et al. 2014). Mais cette diversification se heurte à une organisation très structurée des acteurs des filières et de la R&D. La sélection, l'expérimentation pour la conduite des cultures, la R&D sur la transformation des produits se concentrent sur un petit nombre d'espèces, qui sont déjà les plus cultivées et voient ainsi croître leur avantage compétitif par rapport aux autres espèces (Meynard et al, 2013). La recherche a concentré ses efforts sur le « paradigme génétique », visant l'amélioration des plantes pour l'optimisation d'usage des intrants de synthèse, plutôt que sur le « paradigme agroécologique », visant une meilleure valorisation des régulations bio-écologiques entre espèces (Vanloqueren et Baret, 2009). La transition vers une agriculture favorisant une plus grande diversité, pour plus de durabilité, ne s'initie donc pas facilement ; et ce malgré les différentes évaluations économiques qui mettent en avant des bénéfices réels à l'échelle de la succession de culture (e.g. Schneider et al. 2010, Carrouée et al 2012). Les économistes qualifient cette situation de verrouillage technologique (« lock-in ») : l'organisation du système socio-technique agricole, en reposant sur un usage intensif d'intrants combiné à une recherche génétique adaptée, a favorisé une réduction de la diversité cultivée, comme nous le précisons en introduction. Plusieurs auteurs de la littérature nationale et internationale mettent en avant une telle situation de verrouillage pour l'agriculture contemporaine, permettant de comprendre les difficultés rencontrées pour la faire évoluer vers des pratiques plus durables (e.g. Cowan et Gunby 1996, Labarthe et Laurent 2011, Lamine et al., 2011, Fares et al., 2012, Roep et Wiskerske 2012, Meynard et al., 2013)<sup>4</sup>. Cette situation de verrouillage s'explique par un ensemble de facteurs d'auto-renforcement (« self-reinforcement ») qui favorisent des rendements croissants d'adoption en faveur des espèces majeurs sur lesquelles reposent le paradigme productif conventionnel (1.1), ces facteurs appliqués au secteur agro-alimentaire éclairent la difficulté du système dominant à se diversifier par une meilleure valorisation des légumineuses (1.2).

### 1.1 Verrouillage technologique et dépendance du chemin

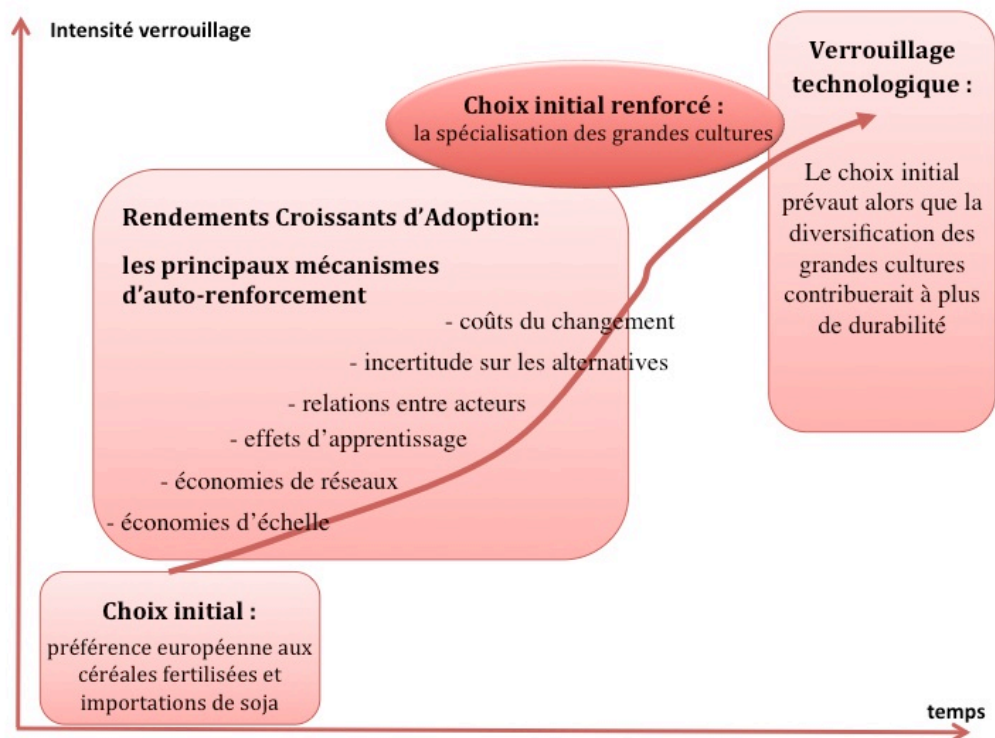
La théorie du verrouillage, initiée par les théoriciens évolutionnistes (Dosi et Nelson 2010) permet de comprendre pourquoi le choix initial d'un système de production conduit à se renforcer dans le temps,

---

<sup>4</sup> Citons, par exemple, Roep et Wiskerske (2012, page 208) : « *the modernization of agriculture and the agri-food system since the WWII is a well-elaborated example of such a lock-in and the institutionalized incapacity to deal with in-built unsustainability* ».

créant un processus de dépendance au chemin (« path dependency ») grâce à l'enclenchement des rendements croissants d'adoption. Le concept de « rendements croissants d'adoption » (RCA) forgé par Arthur (1989) explique, au travers de différents mécanismes d'auto-renforcement (Figure 1), pourquoi une technologie standard n'est pas forcément choisie parce qu'elle est la meilleure, mais elle devient la meilleure parce qu'elle est choisie. L'argumentation est la suivante : par l'effet conjugué des économies d'échelle (réduction du coût unitaire par le volume de production), de l'apprentissage par la pratique (amélioration des performances par l'expérience) et des externalités de réseau (plus le nombre d'utilisateurs est important, plus l'utilité pour chacun d'entre eux est grande) on parvient au résultat selon lequel plus un système productif est « adopté » (i.e., plus il se diffuse), plus ses coûts de production baissent et son utilité augmente, au détriment de solutions alternatives (Foray, 1989). Les incertitudes sur les solutions alternatives qui ont bénéficié de moins d'investissements et d'apprentissage, et le coût du changement inhérent renforcent d'autant plus le choix initial dans le temps, pouvant même conduire dans certains contextes à une situation d'irréversibilité (Liebowitz et Margolis, 1995). Les rendements d'adoption sont donc dits « croissants ». En ce sens, plus les cultures majeures se sont développées dans les assolements et plus leur performance technico-économique, évaluée essentiellement au travers des indicateurs de rendement et de marge brute annuelle<sup>5</sup>, s'est améliorée ; renforçant d'autant leur adoption au détriment d'autres espèces, dont les rendements sont moins élevés et/ou plus variables, de part notamment des itinéraires techniques et une sélection génétique moins maîtrisés.

Figure 1. La marginalisation des espèces légumineuses dans le verrouillage du système de production



En revanche, une conséquence majeure de cette spécialisation croissante des grandes cultures est que l'efficacité de ce système n'est plus nécessairement assurée face aux augmentations de charges induites par les intrants de synthèse (Figure 2 en annexe sur l'évolution des prix des engrais minéraux azotés) et les multiples externalités que nous rappelons en introduction. Ce mode de production intensif en intrants de synthèse contribue, en effet, à une très forte consommation d'énergie et à une perte de biodiversité. Parmi ces mécanismes d'auto-renforcement, la recherche d'économies d'échelle

<sup>5</sup> Ce problème d'évaluation renvoie à une absence de comptabilité analytique de la plupart des exploitations. Peu d'exploitations agricoles disposent d'un conseil technique adapté à une évaluation de la rotation pour déterminer la marge nette inter-annuelle (Meynard et al. 2013).

apparaît comme un déterminant majeur de la spécialisation des bassins de production en agriculture. La recherche d'économie d'échelle a contribué à une simplification des systèmes de culture qui se traduit par des rotations plus courtes (Schott et al. 2010, Fuzeau et al., 2012). Cette simplification des systèmes s'est renforcée dans le temps par son étroite dépendance à l'organisation des systèmes productifs industriels et des marchés interagissant avec le monde agricole qui, eux aussi, ont privilégié la recherche d'économies d'échelle, laissant peu de place aux cultures de diversification tout particulièrement pour les légumineuses à graines dans les débouchés des grandes cultures (Magrini et Thomas, forthcoming).

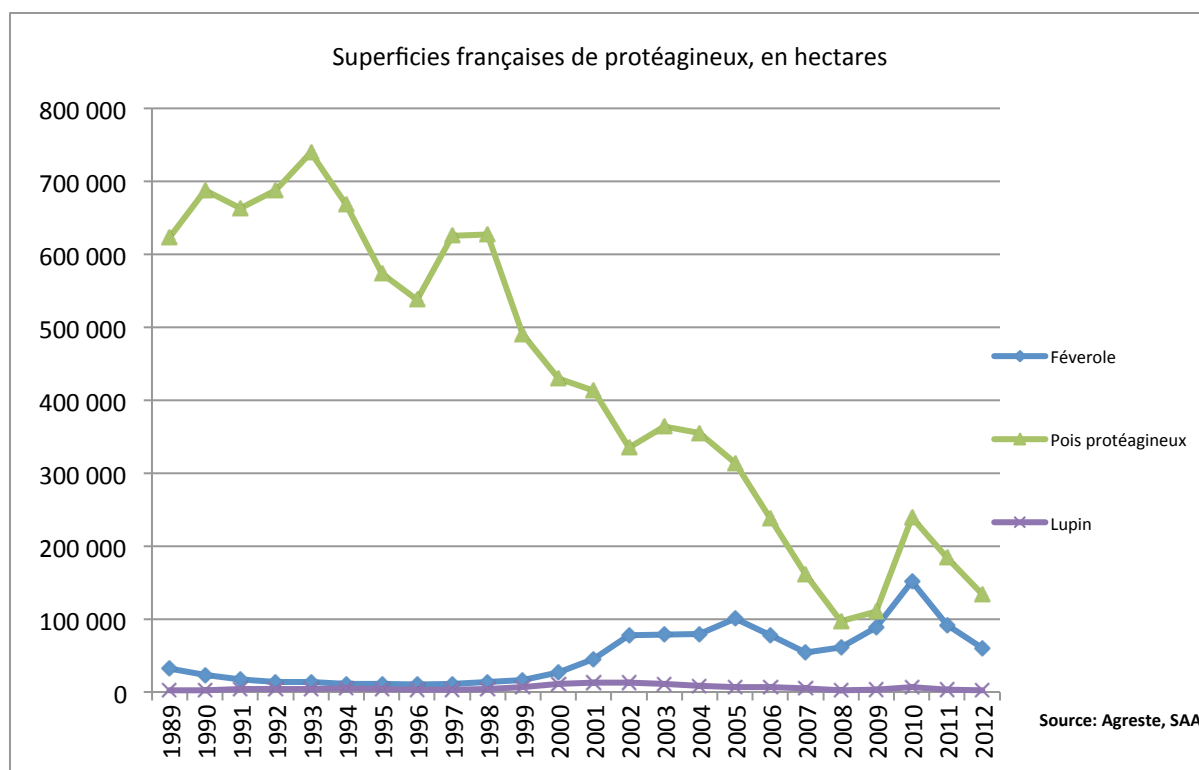
## 1.2. La marginalisation des légumineuses à graines dans le système agro-alimentaire

Comme le rappellent Thomas et al. (2013) dans leur analyse historique des évolutions de surface en pois en fonction des politiques publiques, pour répondre à l'objectif d'autosuffisance en céréales, la Communauté Economique Européenne a mis en place, dans les années 1960, une protection des prix céréaliers, s'engageant en contrepartie dans les accords commerciaux avec les Etats-Unis à l'entrée en quantité illimitée d'oléo-protéagineux sans prélèvements douaniers. Ces accords internationaux ont favorisé des importations massives de soja<sup>6</sup>, et plus précisément de tourteaux, riches en protéines et peu chers pour les élevages au détriment des oléo-protéagineux qui auraient pu être produits sur le territoire. En 1973, l'embargo sur le soja américain a entraîné une prise de conscience des autorités publiques de la très forte dépendance des systèmes d'élevage au soja importé. Différents « plans protéines » ont alors été mis en place afin de relancer la production d'oléo-protéagineux (Meynard et al. 2013 ; Magrini et Thomas, forthcoming). Néanmoins, ces politiques n'ont pas permis de renverser le rapport de force entre les espèces qui s'est progressivement construit au travers des mécanismes de rendements croissants d'adoption précisés supra. En effet, si on observe une forte progression des surfaces jusqu'à la fin des années 1980, grâce aux premiers plans protéines des années 1970 et à une sélection génétique spécifique pour l'usage du pois en alimentation animale, les superficies protéagineux entament à partir du début des années 1990 une décroissance que les aides ponctuelles (« plans protéines ») ne suffisent plus à renverser (Figure 3). Parallèlement, bien que le développement des céréales ait permis d'atteindre l'autosuffisance dès le début des années 1980, la progression du blé dans les assolements s'est poursuivie. Cette période d'excédents céréaliers soutenus par les prix est qualifiée « d'exportations subventionnées », période de consolidation des RCA en faveur des céréales.

Figure 3. Evolution des surfaces cultivées pour les trois principales cultures protéagineuses

---

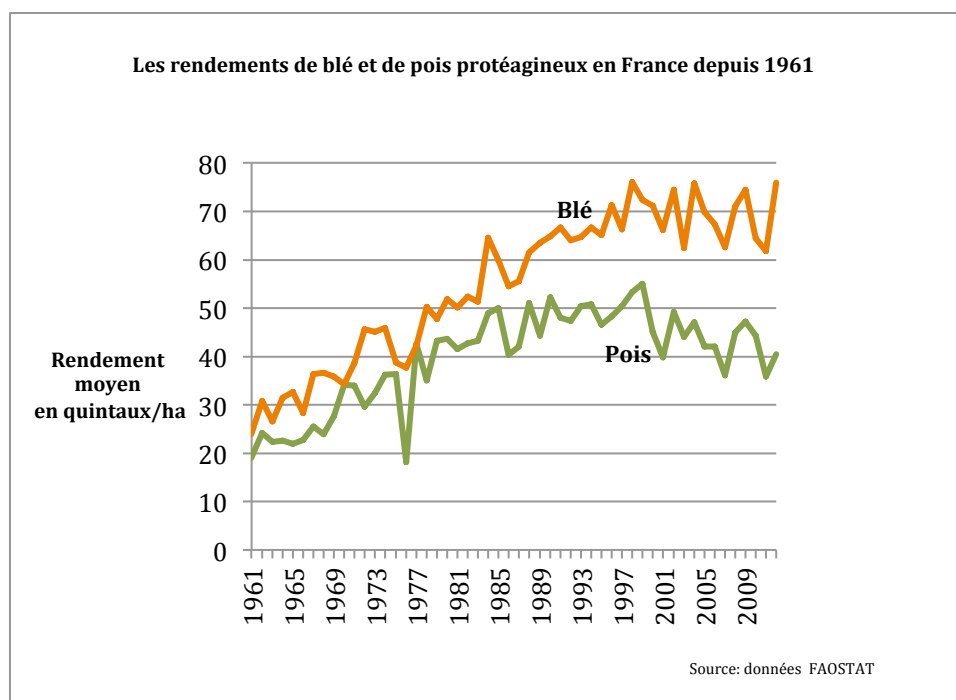
<sup>6</sup> et par là-même des RCA pour le soja sur le continent américain (Voisin et al. 2014).



La chute des surfaces en protéagineux à partir du début des années 1990 s'explique par différents facteurs, dont le creusement du différentiel de marge annuelle pour l'agriculteur vis-à-vis des cultures céréalières (Choquet et al. 2014). La marge brute annuelle des légumineuses est de l'ordre de 2 à 6 fois moins importante que celle des cultures non légumineuses en France (Dequiedt 2012). Suite au choix initial instauré au travers des accords commerciaux céréales – protéagineux, deux facteurs importants ont contribué à ce processus.

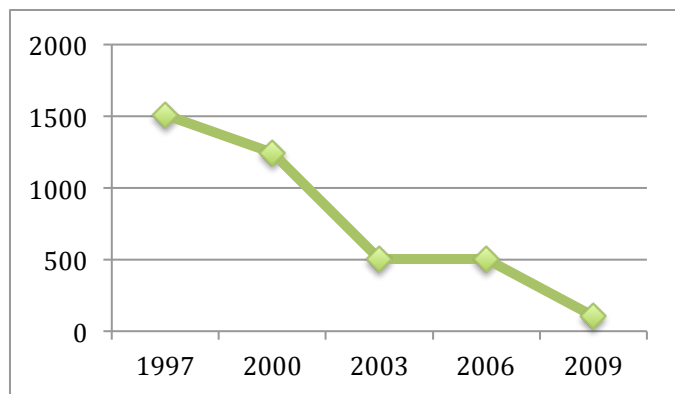
D'une part, la spectaculaire progression des rendements du blé a contribué à focaliser l'attention des acteurs sur le développement de produits alimentaires à base de cette céréale (Hesser 2006). Entre les années 1960 et 1980, le rendement du blé et du pois protéagineux ont tous deux plus que doublé. Mais le différentiel de rendement avec le blé s'accroît à partir de la fin des années 1980 (Figure 4) ; différentiel que le maintien d'un effort de la recherche publique sur le pois protéagineux (retenu comme espèce modèle par l'INRA pour la recherche génétique sur les protéagineux) ne permet pas de combler. Les rendements des légumineuses plafonnent à un niveau nettement inférieur à celui des céréales et la courbe d'évolution du rendement moyen national dans les 10 dernières années montre même une nette tendance à la baisse. Le rendement du pois était égal à 90% de celui du blé en 1990, puis chute à 55% à la fin des années 2000. D'abord, l'effort de sélection variétale reste plus récent et l'investissement des entreprises de sélection est très nettement inférieur à celui des espèces dominantes. Ensuite, du fait d'un retour trop fréquent du pois sur les parcelles à bon potentiel de rendement dans les années 1980, une partie de celles-ci est infestée par *Aphanomyces E.*, champignon contre lequel il n'existe à ce jour aucun moyen de lutte efficace, si ce n'est de ne plus cultiver du pois dans cette parcelle. Lorsque la culture du pois n'a pas disparu des rotations culturales, dans les régions autrefois fortement productrices, elle est alors souvent reléguée vers de moins bonnes terres, les meilleures étant souvent infestées par ce champignon.

Figure 4. Evolution des rendements du pois protéagineux et du blé tendre



D'autre part, ce différentiel croissant de compétitivité entre les espèces céréalières et légumineuses à graines s'est d'autant plus creusé qu'une autre « préférence historique » a été donnée aux légumineuses à graines : celle d'être destinées quasi-exclusivement à l'alimentation animale (Gueguen et Duc, 2008), les plaçant directement en concurrence avec les tourteaux de soja, qui fournissent des protéines peu chères en grande quantité, et délaissant les voies de progrès d'une meilleure valorisation dans des débouchés à plus forte valeur ajoutée de l'alimentation humaine. Aujourd'hui, face à la concurrence des autres matières premières, notamment par le développement d'autres co-produits (tourteaux de colza, drêches de blé éthanol en particulier), l'usage des légumineuses en alimentation animale s'est fortement réduit. De 3 millions de tonnes utilisées à la fin des années 1980, moins de 500 000t sont encore destinés aux élevages. Très concurrencées sur le marché des aliments concentrés, les graines de légumineuses représentent ainsi moins de 2% de ces formules et sont considérées comme une variable d'ajustement (Charrier et al. 2013) et leur insertion a particulièrement chuté ces dernières années (Figure 5). Que ce soit pour les producteurs ou pour les utilisateurs, les rendements croissants d'adoption en faveur des espèces majeures ont créé un écart de compétitivité avec les légumineuses à graines que les aides de soutien aux prix et à la production ne combleront plus. Comme le suggère l'analyse de Thomas et al. (2013), ces aides instables dans le temps, n'ont pas contribué à une incitation durable pour leur production au contraire des dynamiques marchandes qui ont structuré des débouchés importants pour les céréales, et plus récemment pour les oléagineux (pour la production d'agro-carburants et d'huile alimentaire). De plus, la réduction de leur production renvoie le signal d'une offre décroissante, incitant d'autant moins les formulateurs à les incorporer dans les aliments pour animaux. Elles deviennent une matière d'opportunité au gré du rapport des cours du marché entre les matières premières en concurrence.

Figure 5. La chute du pois dans les aliments concentrés (en kT) pour animaux de ferme (source : Agreste).



Côté alimentation humaine, le faible investissement de la recherche et développement sur ces espèces n'a pas créé d'opportunités de marché à plus forte valeur ajoutée qui auraient pu contribuer à leur plus large production. En France, la consommation de légumes secs a chuté au cours du 20<sup>ème</sup> siècle (passant de 7,3 kg/an/hab en 1920 à moins de 1,4 depuis les années 1980). Alors que celle de céréales est 10 fois plus importante<sup>7</sup> et que la consommation de produits d'origine animale a fortement progressé ces dernières décennies (Combris et Soler 2011). La chute de la consommation de légumes secs a accompagné la progression de la consommation de viande. Quelques marchés de niche se sont cependant constitués sur le marché des ingrédients fonctionnels, tels que celui de l'amidon et des protéines de pois (Duc et al. 2008), ou sur le marché des légumes secs avec les productions sous label, voire également des marchés exports de graines entières tels que les féveroles pour le marché égyptien ou les pois verts pour le marché indien (Voisin et al. 2014). Ces niches offrent aux producteurs des niveaux de rémunération supérieurs au débouché alimentation animale. Mais à ce jour, ces espèces restent peu présentes dans la consommation courante française. Les études du Groupe d'Etude sur les Protéines Végétales montrent ainsi qu'aujourd'hui la majorité des protéines végétales est issue du blé et du soja, respectivement en France et dans le reste du monde<sup>8</sup>.

Enfin, rappelons aussi que l'organisation de la recherche a contribué elle-même à spécialiser les travaux et à renforcer les recherches en faveur des espèces sur lesquelles les industries agro-alimentaires souhaitent développer des débouchés, telles que les céréales, particulièrement le blé. Les activités de la recherche sur la sélection variétale l'illustrent bien (Hessr, 2006 ; Meynard et al. 2013).

La progression des rendements céréaliers et le cours élevé de ces espèces ont donc renforcé le choix des agriculteurs en leur faveur (Dequiedt 2012), au détriment des principes agronomiques d'une plus grande diversification des espèces pour réduire le recours aux intrants de synthèse. Ce verrouillage socio-technique a abouti à un système agro-industriel cohérent des acteurs dans leurs pratiques et choix technologiques qui innovent selon une trajectoire essentiellement incrémentale en faveur des espèces majeures. Le déverrouillage du système vers un nouveau paradigme productif fondé sur une plus grande diversification des cultures, d'ici les légumineuses à graines, suppose des innovations plus radicales. Les théories de la transition des systèmes de production offrent un cadre d'analyse heuristique pour comprendre quelles peuvent être des pistes de déverrouillage du système.

## Section 2. Les voies d'une transition agro-alimentaire

<sup>7</sup> d'après données Agreste-alimentation.

<sup>8</sup> Tous les deux ans, le GEPV (Groupement d'Etudes sur les Protéines Végétales) réalise un bilan de référencement des produits alimentaires contenant des matières protéiques végétales en France. Si le nombre de références augmente régulièrement, et plus fortement ces dernières années, la majorité de ces protéines sont issues du blé, 62 % des produits en 2011, contre 19 % pour le soja, 10 % pour la fève, 6 % pour le pois et moins de 2 % pour le lupin.



Les mécanismes qui ont soutenu le développement de notre actuel système agro-alimentaire ont contribué à emboîter les différents secteurs d'activité interconnectés à l'agriculture (la production de semences et autres intrants, la collecte-stockage, la transformation agro-alimentaire,...). S'est tissé progressivement un schéma cohérent d'organisation de la production et de la consommation (ie. une « convention » agro-alimentaire au sens des théories régulationnistes) dont il est aujourd'hui difficile de sortir si tous ces secteurs ne changent pas en même temps (lock-in). Comme rappelé en introduction, la littérature internationale s'est enrichie ces dernières années sur l'approche systémique des transitions vers la durabilité (sustainability transition studies). Cette littérature offre un cadre d'analyse complémentaire du verrouillage et déverrouillage, initié par les théoriciens évolutionnistes au travers de la théorie des rendements croissants d'adoption (Nelson et Winter 1977 ; Dosi 1988 ; Dosi et Nelson 2010 pour une synthèse de leurs travaux). De nouveaux concepts, tels que le régime socio-technique, remettent l'accent sur l'imbrication des technologies productives et des organisations sociales et leur stabilité, qui freine le changement des trajectoires vers des innovations radicales. L'approche multi-niveaux des transitions (MLP Multi-level perspective, e.g. Geels 2011) est notamment mobilisée par Voisin et al. (2014) pour expliquer la dynamique de changement qui pourrait s'initier dans le système agro-industriel français afin de relancer la production de légumineuses à graines. Dans cette approche, le concept de « régime socio-technique » permet d'appréhender la cohérence et le verrouillage du système de production, que nous rappelions en section 1, tandis que celui de « fenêtres d'opportunité » et de « niches d'innovation » permet de comprendre les dynamiques d'initiation du changement que nous proposons d'approfondir dans les sections suivantes.

Nous proposons ici d'appréhender ce changement comme une transition duale saisie au travers des interactions entre les différentes composantes du système agro-alimentaire (ie. tant à l'amont qu'à l'aval des filières). Le recours à cette approche systémique relève d'une approche par la complexité qui insiste sur les multiples interactions qui forgent la cohérence d'un système (2.1), dans lequel certaines inflexions contemporaines sont susceptibles d'ouvrir la voie à de nouvelles innovations pouvant contribuer à la transition globale du système (2.2).

## 2.1 La transition des systèmes de production : une approche de la complexité

L'approche conceptuelle de la transition des systèmes de production vers plus de durabilité requiert une approche fondée sur la « complexité ». Cette idée de la complexité des systèmes économiques qui sous-tendent nos systèmes de production a été introduite par Brian Arthur (1989) dans ses travaux sur le verrouillage. Pour autant, on retient généralement de son approche les enseignements sur les mécanismes d'auto-renforcement que nous rappelions en section 1, et moins cette idée générale que nos systèmes sont « complexes et adaptatifs » (complex adaptive systems). Cette vision tend à s'opposer à un courant orthodoxe en économie qui cherche à proposer des modèles quantitatifs simplificateurs de la réalité. L'économie de la complexité ne constitue pas à ce jour un cadre conceptuel formalisé, mais regroupe un ensemble de courants de pensée, tout particulièrement issus des théories évolutionnistes et des théories des institutions. L'ensemble de ces apports offre un cadre d'analyse « particularly relevant for addressing environmental and sustainability challenges » (Foxon et al. 2013, page 190). Le dénominateur commun de ces courants est d'insister sur la co-évolution des technologies et des acteurs<sup>9</sup>. Reprenant l'argumentation de Beinhocker (2006), Foxon et al. (2013) précisent que cette approche par la complexité diffère de l'économie orthodoxe pour au moins 5 assertions :

- i) la dynamique : les économies sont ouvertes, des systèmes en évolution constante, loin d'atteindre un équilibre stable ;
- ii) la pluralité des acteurs : il est difficile de considérer un acteur représentatif face à l'hétérogénéité des acteurs et à leur rationalité limitée, loin d'atteindre des choix optimaux

---

<sup>9</sup> « ... ongoing process of coevolution of physical technologies, social technologies (i.e. institutions or ways of coordinating human activities) and business plans underlies the creation of wealth in industrialised countries, notably as property rights-based market economies encourage technological and social innovations for meeting (and creating) consumer demand. » (Foster et al. 2013, page 190).

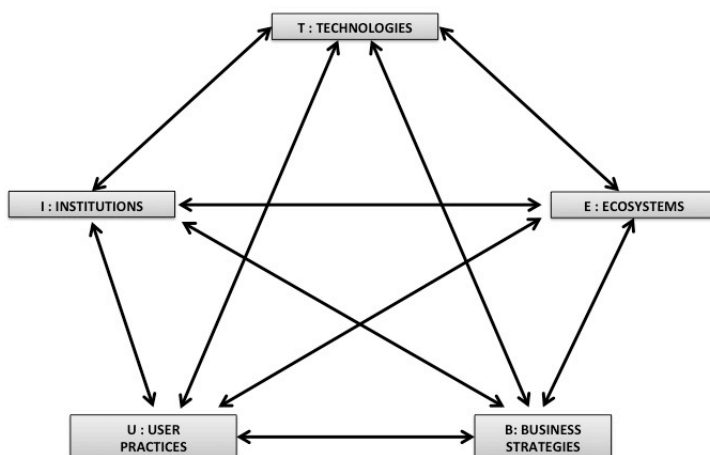
ou une capacité à prédire efficacement le futur, les acteurs progressent en revanche par des processus d'apprentissage et s'adaptent ;

- iii) les réseaux : les acteurs ne prennent pas leur décision purement individuellement, ils sont encastrés dans des réseaux d'influence ;
- iv) l'émergence : ce sont les interactions individuelles qui fondent l'émergence de phénomènes globaux, loin de lois macroéconomiques stables ;
- v) l'évolution : les processus évolutionnistes créent le changement et structurent la complexité des systèmes.

Dans son analyse de la transition vers des économies durables (low carbon economy), Foxon (2011) résume au travers du schéma suivant (Figure 6) la complexité des interactions entre les différentes composantes des systèmes qui co-évoluent dans le temps. Comme le précise Foxon (2011, page 2261) « *the value of such a framework is that it focuses attention on the most relevant analytical categories, (...) any transition analysis should examine the evolution of each of these systems and their causal interactions* ». Chacune des composantes peut être considérée comme un système, leur approche globale comme un méso-système que nous dénommons ici I-TEBU.

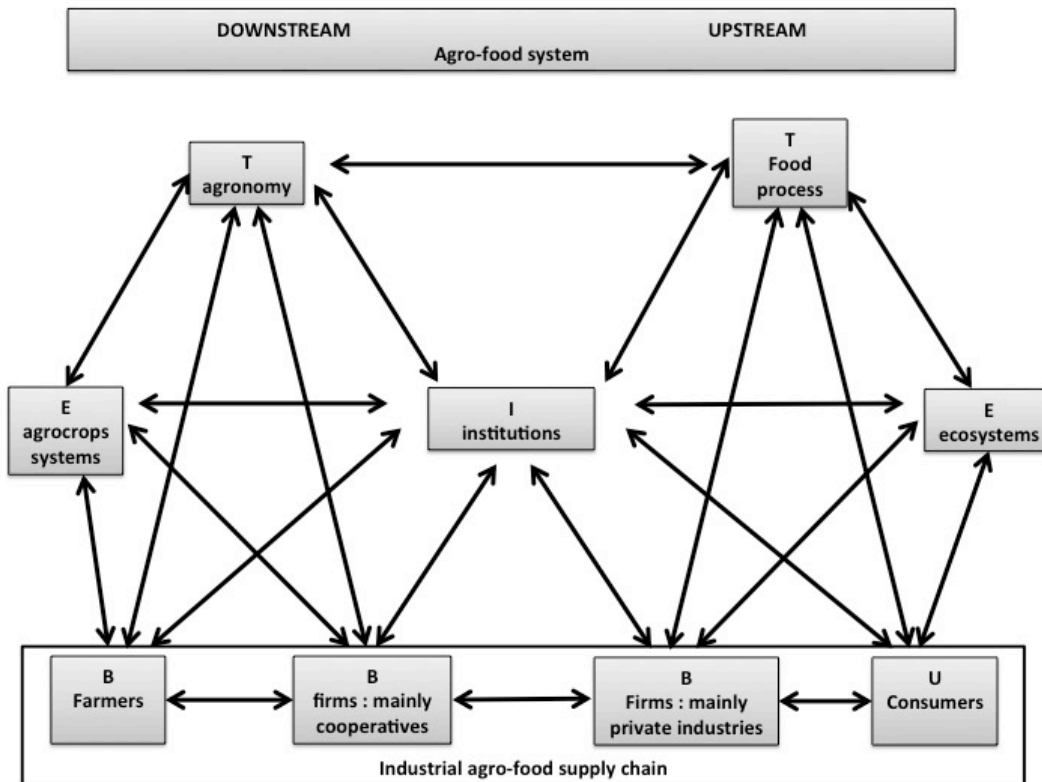
Les institutions (I) désignent l'ensemble des règles d'action (social rules) (North, 2003). L'approche néo-institutionnelle tend à distinguer au sein des institutions l'environnement institutionnel et les arrangements institutionnels (Laperche 2012). L'environnement institutionnel se réfère à l'ensemble des règles d'action collectives (politiques, sociales, juridiques), telles que par exemple les accords commerciaux que nous citons ci-avant. Ces règles sont véhiculées au travers de normes écrites mais aussi non-écrites. Les arrangements institutionnels désignent les modes d'organisation des transactions économiques au sein de ces règles. Ces modalités d'organisation renvoient à différents modes de gouvernance de la production et de l'échange : les marchés, les entreprises (ie. hiérarchies) et les différentes combinaisons de coordination entre le marché et la hiérarchie (formes hybrides, telles que des accords contractuels) (Ménard 2012). Les technologies (T) regroupent l'ensemble des techniques et pratiques d'un domaine de production qui sont mises en œuvre par des entreprises selon leur stratégie économique (B) pour produire des biens et services qui répondent aux attentes des consommateurs (U). L'ensemble de ces choix interagit ou impacte l'environnement (E). Toutes les interactions entre les différentes composantes de ce méso-système seraient trop longues à illustrer. Rappelons, par exemple, que l'environnement conditionne aussi les choix techniques, les choix des entreprises et des consommateurs, et est de plus en plus pris en compte par les institutions qui régulent l'action de ces acteurs. L'ensemble de ces choix deviennent interdépendants et co-évoluent.

Figure 6. Le I-TEBU : un cadre d'analyse de la co-évolution, d'après Foxon (2011).



Ce pentagone n'est pas sans rappeler celui proposé par Geels dans l'approche multi-niveaux du régime socio-technique, mais insiste ici l'inclusion des « ecosystems ». Ces « écosystèmes » sont entendus ici comme l'ensemble des ressources naturelles (eau, air, sols, biodiversité...). L'addition de cette dimension environnementale nous paraît particulièrement intéressante pour traiter du lien entre la transition amont et aval du système industriel agro-alimentaire. La dualité de cette transition, nous amène à proposer un schéma élargi insistant sur les institutions comme une courroie de transmission entre les systèmes.

Figure 7. Le I-TEBU amont et aval du système agro-alimentaire



La prise en compte de différentes composantes du système est nécessaire pour analyser les changements technologiques permettant de faire transiter l'ensemble du système vers un système durable, nous reviendrons sur un certain nombre d'entre eux dans les sections suivantes. Précisons ici les différentes inflexions susceptibles d'entraîner une co-évolution de ces composantes et les niches d'innovation qui y répondent.

## 2.2 La co-évolution du système agro-alimentaire : quelles inflexions et niches d'innovation ?

Le verrouillage d'un système de production conduit à un tri entre les pratiques et les innovations : celles qui sont totalement compatibles avec la technologie standard ont une chance de se développer, alors que celles qui remettent en cause celle-ci, ou les relations entre acteurs qui se sont organisés autour du standard, ont beaucoup moins de chances de se développer (Geels 2011). Néanmoins, à cause des multiples interactions qui lient les composantes du système agro-alimentaire, si un changement conjoint des différentes composantes du système parvient à s'initier, l'ensemble du système peut évoluer et entamer une transition. L'approche multi-niveaux des transitions insiste alors sur les niches perçues comme des réseaux d'acteurs orientés vers l'innovation radicale. A l'affût des évolutions macro (croissance démographique, changement climatique, ...) et des règles d'action (par exemple, changements de normes imposés par l'Etat), ces acteurs sont susceptibles de proposer des changements de pratiques, de techniques ou de modes d'organisation des échanges plus radicaux que les innovations incrémentales générées par les acteurs du système dominant (Rip et Kemp, 1998). Il devient alors intéressant de comprendre quelles sont les inflexions contemporaines et les niches

d'innovation qui sont susceptibles de porter des « graines » de la transition du système agro-alimentaire (Wiskerke et Ploeg, 2004) vers plus de diversification.

Les inflexions contemporaines majeures auxquelles est liée la transition du système agro-alimentaire témoignent plus largement d'autres transitions en cours. Quatre d'entre-elles nous apparaissent étroitement liées à l'évolution du système agro-alimentaire.

- i) *la transition énergétique* liée à la raréfaction des ressources fossiles (Foxon 2011) impactant la production d'engrais minéraux. Le prix des intrants a entamé une progression plus forte que celle des précédentes décennies. Le prix croissant de l'énergie qui augmente le coût du poste fertilisation azotée ((Figure 2 en annexe) pourrait contribuer à changer le différentiel de marge brute annuelle protéagineux - céréales dans les prochaines années. De plus, la fabrication, le transport et l'épandage de ces engrais contribuent significativement aux émissions de gaz à effet de serre (Pellerin et al. 2013). Cet enjeu appelle à un usage accru des légumineuses dans les assolements, cultures aux besoins réduits en engrais azotés et intrants énergétiques associés.
- ii) *la transition démographique* : face à l'augmentation de la population mondiale (de 7 milliards actuellement à plus de 9 milliards prévus en 2050) et à l'absence d'un accroissement massif des terres agricoles disponibles, l'augmentation de la productivité agricole apparaît comme un des facteurs essentiels pour remplir les objectifs de sécurité alimentaire fixés lors du sommet mondial de l'alimentation à Rome en 1996 (FAO, 2003). Combiné avec la transition précédente, il est nécessaire de développer des systèmes produisant plus avec moins d'intrants de synthèse.
- iii) *la transition épidémiologique* : la réduction des maladies infectieuses laisse la place à une croissance des maladies dites de civilisation, dont l'obésité, qui interpelle la question de l'évolution de nos habitudes alimentaires (Etiévent et al. 2010).
- iv) Ces deux dernières transitions interpellent fortement *la transition nutritionnelle* : l'évolution de nos régimes alimentaires dans le dernier quart de siècle a été marquée par une consommation croissante de produits d'origine animale (Combris et Soler, 2011), qui questionne l'équilibre nutritionnel des pays industrialisés au regard du développement des maladies dites « de civilisation » (obésité, maladies cardiovasculaires, diabète de type 2, etc.) (Esnouf, 2011). Cet enjeu de santé par l'alimentation a conduit récemment plusieurs pays à modifier les pyramides alimentaires<sup>10</sup> en faveur d'une insertion plus forte des légumineuses dans la catégorie « protéines » pour diversifier les apports protéiques recommandés (Champ, forthcoming). De plus, les protéines végétales offrent l'accès à une offre protéique moins chère. Pour autant, les protéines végétales de l'alimentation en France restent peu diversifiées (majoritairement issues du blé, voir *supra*) et très peu de produits préparés offrent la garantie d'un équilibre protéique végétal permettant une substitution à la consommation de produits animaux.

Au regard du cadre du cadre théorique d'approche par la complexité, nous comprenons que la contribution des légumineuses à ces différentes transitions suppose de coordonner les changements amont et aval du système. Ces transitions orientent vers un changement dans les pratiques amont, tout particulièrement au regard de la gestion de la fertilisation azotée, et des pratiques aval dans la proposition de produits agro-alimentaires valorisant mieux les protéines végétales. Dans la suite de cet article, nous proposons de revenir sur les innovations répondant à ces enjeux et qui peuvent contribuer à la transition agro-alimentaire, en mobilisant cette approche de la complexité, c'est-à-dire en s'intéressant aux différentes composantes du I-TEBU.

---

<sup>10</sup> Une pyramide alimentaire est une illustration du régime alimentaire recommandé pour une alimentation équilibrée : les aliments à la base de la pyramide (eau, boissons non sucrées, fruits et légumes) sont ceux qui doivent être ingérés en plus grande quantité et inversement, ceux qui se trouvent au sommet (matières grasses, produits sucrés) sont ceux dont il faut limiter la consommation. Les autres aliments sont positionnés dans les strates intermédiaires. La pyramide alimentaire est née aux États-Unis en 1992, la plupart des pays utilisent cette illustration pour concevoir leurs recommandations nutritionnelles.

### Section 3. Les innovations agronomiques en faveur des légumineuses à graines

L'accent mis récemment sur les services écosystémiques (Millennium Ecosystem Assessment, 2005) modifie le cadre d'analyse et de gestion des agroécosystèmes (Wallace, 2007; Zhang *et al.*, 2007). Si pendant longtemps, la gestion des agroécosystèmes a quasi exclusivement visé la production de biens alimentaires, engendrant de fait des effets majeurs fortement perturbants pour l'environnement. Les attentes vis-à-vis des agroécosystèmes ont aujourd'hui fortement évolué. Comme rappelé en introduction, la diversification des cultures constitue un levier pour diminuer les externalités négatives de l'agriculture ; et les légumineuses présentent des bénéfices environnementaux importants pour soutenir une écologisation des pratiques. Leur capacité à fixer l'azote atmosphérique permet une gestion plus efficace du cycle de l'azote pendant la culture, une diminution de l'utilisation d'engrais azotés de synthèse, réduisant ainsi la dépense énergétique agricole, et les émissions de gaz à effet de serre liées à leur fabrication, transport et application (3.1.). Dans un contexte d'amélioration de la durabilité des agroécosystèmes, l'insertion des légumineuses peut donc être envisagée comme une solution agronomique intéressante pour répondre à la hausse du coût de l'énergie, à la raréfaction prévisible des énergies fossiles, et à une mitigation du changement climatique via la diminution des GES. D'autres services écosystémiques liés à l'insertion des légumineuses dans les systèmes de culture actuels, très peu diversifiés, sont également à considérer comme la réduction de la pression phytosanitaire, l'amélioration de la qualité des sols ou encore le maintien de la biodiversité (3.2). Si ces services écosystémiques dépendent des fonctions écologiques caractérisant les légumineuses et de leur place vis-à-vis des autres espèces dans les agrosystèmes, ils dépendent aussi de l'appropriation par les acteurs de ces fonctions et de leur valorisation en bénéfices (De Bello *et al.*, 2010), et des multiples interactions qui relient les différentes composantes du I-TEBU pour promouvoir la valorisation de ces espèces.

#### 3.1. Les légumineuses en faveur d'une agriculture agro-écologique

Des enjeux économiques et environnementaux majeurs pèsent sur la gestion de l'azote en agriculture. A l'échelle du système de culture, cette gestion ne repose pas uniquement sur une bonne technologie de fertilisation. L'entrée d'azote dans les systèmes de culture peut être atteinte efficacement et gratuitement grâce aux légumineuses. Au sens donné par le Millenium Ecosystem Assessment, trois types de services sont fournis par la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique, spécificité des légumineuses (Peoples *et al.*, 2009a ; 2009b) : (1) un service de production : la fixation de N<sub>2</sub> contribue à produire des aliments riches en protéines ; (2) un service support : l'azote fixé constitue une source d'azote renouvelable qui peut contribuer à améliorer la fertilité des sols pour les cultures suivantes (Jensen & Hauggaard-Nielsen, 2003) : ainsi la fertilisation N des cultures suivant les légumineuses peut être significativement diminuée, et leur efficacité d'absorption des engrais azotés apportés est également améliorée (Carrouée *et al.*, 2012), du fait d'effets bénéfiques au plan sanitaire (limitation de maladies racinaires notamment) ; (3) un service de régulation : la fixation symbiotique réduit l'utilisation d'engrais azotés et de ce fait diminue les impacts négatifs de la fertilisation azotée, source d'émissions de gaz à effet de serre (GES) et de consommation d'énergie fossile. Ainsi, la fixation symbiotique confère aux légumineuses des bénéfices environnementaux importants, démontrés à l'échelle de la culture (Munier-Jolain & Carrouée, 2003), des successions (Nemecek *et al.*, 2008) et du système de culture (Schneider *et al.*, 2010) : réduction des émissions de GES (N<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub> ; Rochette & Janzen, 2005 ; Jeuffroy *et al.*, 2013 ; Thiébeau *et al.*, 2010) ; réduction directe et indirecte de l'utilisation d'énergie fossile. Le passage de 4 % à 7 % des surfaces arables françaises en légumineuses cultivées permettrait d'économiser environ 10 % d'engrais minéraux épandus et réduirait les émissions de GES d'environ 1,8 Mteq CO<sub>2</sub> (Cavaillès, 2010).

Néanmoins, ces services sont aujourd'hui mal valorisés, soit parce qu'ils sont mal pris en compte par les agriculteurs dans les pratiques, principalement raisonnées à l'échelle de la culture, et tenant rarement compte des effets à moyen terme des cultures dans la rotation (Schneider *et al.*, 2010 ; Evans *et al.*, 2001 ; Thomsen *et al.*, 2001), soit parce qu'ils n'ont pas une valeur marchande jugée suffisante pour être favorisée dans la stratégie commerciale des coopératives, ce qui est le cas aussi de la plupart des services environnementaux (Kinzig *et al.* 2011). Cependant des innovations émergent, telles que

l'organisation d'un marché carbone domestique en faveur des légumineuses à graines (Choquet et al. 2014). De plus, l'amélioration des bilans azotés, environnementaux et économiques liée à l'introduction des légumineuses doit s'apprécier à l'échelle de la succession et des systèmes de culture, supposant l'appui d'un conseil agronomique et systémique plus fort, encore trop rare aujourd'hui, y compris auprès des institutions de conseil.

En France, l'introduction d'une légumineuse à graines dans une rotation est rarement accompagnée de modifications de la conduite des cultures précédentes et suivantes. Les pratiques de fertilisation, par exemple, sont encore aujourd'hui peu différenciées en fonction du précédent cultural (Schneider *et al.*, 2009). Le choix de la légumineuse en fonction des facteurs du milieu et le choix de sa place dans la rotation pourraient être aussi davantage raisonnés. La variabilité de la fixation symbiotique (en fonction de contraintes biotiques et abiotiques) et la difficile prévision de la quantité restituée au sol sont souvent considérées comme des contraintes supplémentaires pour la délicate et de plus en plus fine gestion de la fertilisation azotée ; ces contraintes prennent le dessus sur les bénéfices potentiels. Une meilleure prise en compte par les acteurs des connaissances actuelles sur les réponses de la fixation symbiotique aux contraintes du milieu, combinée à des adaptations des systèmes de cultures, permettrait de mieux valoriser cette capacité de fixation des légumineuses et les fonctions associées, tout en réduisant les disservices restants<sup>11</sup>.

Les associations végétales (telles que blé tendre-pois, blé dur-féverole, soja-tournesol, colza-légumineuses gélives) sont également des innovations agronomiques qui permettent d'augmenter, par rapport aux espèces cultivées seules, l'efficacité 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 efficacité de l'utilisation de l'azote (Hauggaard-Nielsen et al., 2003; Pelzer et al. 2012), tout en maintenant un niveau de productivité important, pour des niveaux d'engrais azotés beaucoup plus faibles par rapport aux cultures pures fertilisées (Jensen, 1996 ; Ghaley et al., 2005 ; Naudin et al. 2010 ; Pelzer et al., 2012). Les associations permettent, le plus souvent, d'obtenir un rendement moyen supérieur au rendement moyen des deux espèces cultivées seules, tout en réduisant de manière importante la fertilisation azotée appliquée, et en réduisant les risques de pertes de N dans l'environnement. Les associations végétales sont également des moyens efficaces pour réduire le développement des maladies aériennes (Schoeny et al., 2010), des adventices (Corre-Hellou et al., 2011), et parfois les ravageurs. Enfin, elles peuvent procurer des solutions pour améliorer la qualité des produits (Gooding et al. 2009).

Toutefois, la mise en pratique des associations végétales par les agriculteurs reste encore très limitée du fait d'une inadaptation de la logistique (tout particulièrement en termes de tri) des organismes de collecte et de commercialisation (Bousseau, 2009 ; Magrini et al., 2013). Une adaptation des organismes de collecte et de conseil est nécessaire pour favoriser l'adoption de ces nouvelles pratiques. Néanmoins quelques exemples dans des coopératives acceptant ces cultures associées montrent là aussi que des convergences de l'amont et l'aval permettent d'envisager ces innovations dans les filières (la culture associée facilite la production de protéagineux en évitant les nombreux problèmes rencontrés en culture pure comme les adventices, la verse, les maladies...) ; des collecteurs sont prêts à collecter des mélanges et à investir dans des outils de tri pour mieux valoriser ces productions sur le marché.

---

<sup>11</sup> Les légumineuses présentent en effet l'inconvénient de laisser dans le sol, après leur cycle cultural, des quantités d'azote minéral en moyenne plus élevées que pour les autres cultures, augmentant ainsi le risque de pertes de nitrate dans les eaux de ruissellement pendant l'automne et l'hiver si aucune mesure préventive n'est prise. La culture simultanée, sur une même parcelle, d'une légumineuse et d'une céréale (association légumineuse-céréale) permet de réduire significativement les quantités d'azote laissées dans le sol après récolte (Pelzer et al., 2012). Un autre moyen de réduire les risques de lixiviation après une légumineuse ou après une culture ayant mal valorisé l'azote consiste à implanter une culture intermédiaire non récoltée (Justes et al., 2012) ou une culture de rente à forte capacité d'absorption, telle qu'un colza qui absorbera l'azote du sol pendant l'automne.

Malgré leurs intérêts agro-écologiques, les protéagineux sont perçus comme des cultures risquées et peu attractives pour les agriculteurs. Les agriculteurs sont réticents à cultiver ces espèces en systèmes conventionnels (Schneider et al., 2010), invoquant une trop faible rentabilité par rapport aux céréales et au colza, sur la base d'un calcul de la marge brute à l'échelle de la culture, combinant des rendements faibles, des cours peu élevés sur le marché, et une conduite de culture peu optimisée. Alors que des études ont montré qu'à l'échelle du système de culture, la marge brute d'un système optimisé incluant un pois n'est pas inférieure à un système de culture sans pois (Carrouée et al., 2012). Du fait d'une faible surface cultivée, les faibles volumes produits rendent l'approvisionnement des industriels utilisateurs peu sécurisé, et limitent les possibilités de segmentation et de valorisation de la qualité. Ceci conduit alors à une faible transformation en aval, et rend les graines de protéagineux peu attractives pour les agriculteurs, du fait de leur faible valeur ajoutée.

Au contraire, les légumineuses prennent une importance de plus en plus grande en agriculture biologique (source Agence Bio). En effet, elles constituent, dans ces systèmes, un levier essentiel pour assurer l'équilibre du bilan azoté des exploitations, tout 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 entraîner une croissance des surfaces en légumineuses bio. Cependant, en conditions d'agriculture biologique, de nombreux facteurs biotiques et abiotiques limitent considérablement le rendement des légumineuses à graines (Hellou et Crozat, 2005). Dans ces systèmes également, les associations d'espèces présentent des intérêts majeurs par rapport aux cultures pures. Par ailleurs, l'organisation actuelle des filières bio permet plus facilement d'envisager la collecte et la valorisation des produits issus de cultures associées.

### 3.2 Le paradoxe des légumineuses en tant que cultures de diversification : un atout pour des systèmes agricoles plus durables, mais un difficile déverrouillage amont

Paradoxalement, si les légumineuses ont un rôle à jouer dans la durabilité des agrosystèmes en tant que cultures de diversification, leur position de culture mineure, dans l'assolement national, aujourd'hui constitue un frein à leur développement. En effet, jusqu'à présent, la formation initiale, le conseil agricole et les références techniques disponibles étaient peu axés sur ces espèces, constituant ainsi un frein à leur développement (Meynard et al., 2013). De plus, alors que la grande diversité des légumineuses pourrait permettre une diversité de services, de valorisations économiques, et une adaptation locale aux conditions pédo-climatiques, la majorité des références scientifiques et techniques disponibles en France concerne le pois, espèce majeure pour les légumineuses à graines (Bridet-Guillaume et al., 2010). Aujourd'hui, les potentialités de production et d'utilisation d'une gamme étendue d'espèces de légumineuses doit être évaluée. Les travaux urgents à entreprendre concernent particulièrement la conduite des cultures dans différentes conditions pédo-climatiques, la quantification des effets 'précédent' de ces espèces, et les causes d'accidents de rendement. De plus, la gamme étudiée des services écosystémiques fournis par ces espèces doit être élargie, afin de fournir une évaluation plus complète des bénéfices des légumineuses (Zhang et al., 2007).

Une meilleure évaluation des conditions d'une insertion 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 les niveaux 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 comportement vis-à-vis du changement climatique mérite d'être mieux évaluée, ces espèces étant particulièrement sensibles à des stress hydriques et thermiques.

Les institutions, et tout particulièrement 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 accompagner le développement 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 a un rôle majeur dans la diffusion des innovations. En effet, la majeure partie du conseil et des références techniques est apportée 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.

Le développement de débouchés à plus forte valeur ajoutée en alimentation humaine, constitue également une voie de déverrouillage particulièrement intéressante pour accompagner la transition amont du système. En effet, la spécialisation des grandes cultures en faveur des céréales a été renforcée par le développement d'une offre alimentaire orientée sur ces espèces. En ce sens, le développement de nos régimes alimentaires accordant une place plus importante aux légumineuses à graines (transition aval) est susceptible d'apporter de nouvelles incitations à leur culture (Crews et Peoples, 2004).

#### **Section 4. Quelle place et qualification des légumineuses dans les régimes alimentaires ?**

Si les légumineuses peuvent contribuer à une agriculture plus durable, elles ne constituent pas à ce jour une culture de rente recherchée par l'agriculteur, à défaut, notamment de débouchés commerciaux à plus forte valeur ajoutée par rapport à celle correspondant à l'alimentation animale. Pour autant, de nouvelles connaissances scientifiques et des innovations de rupture dans les industries agro-alimentaires sont susceptibles d'offrir de nouvelles opportunités de marché. Quelles sont les nouvelles orientations nutritionnelles susceptibles de mieux qualifier les apports de ces espèces dans nos régimes alimentaires (4.1) ? Quels sont les approches originales et les procédés technologiques qui peuvent contribuer à la mise sur le marché de produits agro-alimentaires innovants à base de légumineuses à graines (4.2) ? Bien que moins investies par la R&D agro-alimentaire, des avancées significatives apportent aujourd'hui des opportunités nouvelles.

##### **4.1. Vers une nouvelle qualification nutritionnelle des légumineuses à graines dans notre alimentation ?**

Face aux excès de calories animales (viandes et produits laitiers) dans notre alimentation (Combris et al., 2011), la question du re-équilibre entre protéines animales et végétales fait l'objet de nouvelles attentions. De par leur richesse en protéines et face aux enjeux de la transition démographique, les légumineuses à graines peuvent apparaître comme de nouvelles sources d'aliments. Trois logiques peuvent être considérées, liées, en grande partie, au choix de qualification nutritionnelle qui peut être donnée à ces espèces. Dans une simple logique de ré-équilibre alimentaire, une réduction de la consommation de produits animaux pour corriger les excès caloriques ne se traduit pas pour autant par une augmentation de la consommation des protéines végétales. La nécessité d'une réduction du coût d'achat alimentaire par les ménages et la reconnaissance des propriétés nutritionnelles des légumineuses peut conduire en revanche à une substitution partielle de notre alimentation actuelle en leur faveur. On entre alors dans une logique que nous pouvons qualifier d'« efficiente ».

Dans une logique « efficiente », l'augmentation prédite du prix de la viande face à la croissance démographique mondiale (OECD-FAO, 2013), peut conduire à terme à une plus forte consommation de protéines végétales par une substitution partielle des protéines animales. En effet, la production d'une calorie animale nécessite la mobilisation de 7 calories végétales (Rastoin et al. 2010), justifiant un coût de production, et *in fine* d'achat pour le consommateur, plus élevé que des protéines végétales. La consommation de protéines végétales peut alors apparaître comme plus efficiente dans cette logique de coût de l'offre alimentaire. Par ailleurs, la substitution de produits animaux par des produits végétaux interpelle le choix du consommateur envers une réduction de l'impact environnemental de son alimentation, au regard des différents services environnementaux mis en exergue en section 3. Néanmoins, les protéines animales restent à ce jour les protéines de meilleure qualité nutritionnelle et



les mieux assimilées par le corps humain pour répondre aux besoins de croissance des enfants, puis au maintien des masses protéiques corporelles, en particulier au niveau du muscle squelettique, chez le sujet adulte (Tomé, 2012). L'efficacité nutritionnelle de cette substitution nécessite alors une combinaison spécifique des sources de protéines végétales, afin d'assurer la complémentarité des acides aminés nécessaires au métabolisme protéique corporel. Aussi, la consommation simultanée des protéines issues des légumineuses et des céréales permet de retrouver la matrice des acides aminés essentiels contenus dans les produits animaux. Si différentes études (Petitot et al. 2009) ont montré certaines combinaisons comme efficaces, des travaux de recherche sont encore nécessaires pour explorer les différentes combinaisons possibles entre protéines végétales et les conditions de leur assimilation et de leur efficacité métabolique. Des enjeux apparaissent alors sur les conditions d'associations alimentaires et de procédés de transformation permettant d'améliorer l'efficacité d'assimilation et le rendement métabolique de ces protéines végétales, comparativement à celles issues des protéines animales. De nouveaux produits innovants peuvent donc s'avérer efficaces nutritionnellement. Une évaluation de leur rapport coût de production/ efficacité nutritionnelle serait nécessaire pour comparer leur efficacité par rapport aux produits d'origine animale.

Le développement de ce type de produits agro-alimentaires interpelle la capacité des acteurs publics et privés à réviser les qualifications nutritionnelles et environnementales de notre alimentation, c'est à dire à créer de nouveaux standards de qualité dans l'offre agro-alimentaire (Allaire 2010). En effet, la consommation en France de protéines végétales issue de la consommation directe de légumes secs souffre d'une image désuète. La chute de leur consommation peut s'expliquer par le défaut de praticité face à une réduction des temps de préparation culinaire des foyers. Par exemple, le temps de cuisson des lentilles, qui est le légume sec le plus rapide à préparer, reste deux à trois fois supérieur à celui du blé et du riz. Ces espèces dominantes dans l'offre alimentaire ont en revanche bénéficié d'une recherche variétale pour réduire leur temps de cuisson. La qualification nutritionnelle de ces espèces reste également confuse dans l'esprit du consommateur. Classée comme « féculents » dans notre pyramide alimentaire, peu de consommateurs les citent comme source de protéines<sup>12</sup> malgré le vieil adage de « viande du pauvre ». En revanche, dans d'autres pays occidentaux, les pyramides alimentaires ont récemment changé pour positionner ces graines comme source de protéines et substituts de la viande<sup>13</sup>. Ainsi l'USDA affiche en tête de ses recommandations alimentaires « *With protein foods, variety is key. Protein foods include both animal (meat, poultry, seafood, and eggs) and plant (beans, peas, soy products, nuts, and seeds) sources* »<sup>14</sup>. En France, quelques produits innovants sont entrés sur le marché de la grande distribution telles que des préparations pré-cuites mélangeant des graines de légumineuses et de blé. Pour autant, elles restent positionnées commercialement comme une alternative aux féculents traditionnels (pâtes, riz) et non comme un substitut de protéines. Leur positionnement commercial reste fidèle aux classements nutritionnels promus au travers du PNNS (Plan National Nutrition et Santé), instance publique créée au début des années 2000 pour définir et promouvoir les recommandations nutritionnelles nationales. Seule une communication forte sur les propriétés nutritionnelles de ces espèces est susceptible de changer le comportement du consommateur. C'est en ce sens que des discussions sont en cours dans les instances de l'ANSES : est-ce que leurs conclusions pourraient conduire à une révision des qualifications nutritionnelles des légumineuses à graines ? Ces changements institutionnels pourraient influencer la stratégie des industries agro-alimentaires dans leur offre, et par rétroaction auprès de l'amont agricole dans les stratégies de productions agricoles.

---

<sup>12</sup> D'après l'étude conjointe ONIDOL-GEPV sur « la perception des protéines végétales » réalisée en 2011, étude n°1100886.

<sup>13</sup> <http://www.hsph.harvard.edu/nutritionsource/pyramid-full-story/#healthy-eating-pyramid> pour la pyramide alimentaire proposée par l'Ecole de Médecine de Harvard aux Etats-Unis ; [http://www.hc-sc.gc.ca/fn-an/alt\\_formats/hpfb-dgpsa/pdf/food-guide-aliment/view\\_eatwell\\_vue\\_bienmang-eng.pdf](http://www.hc-sc.gc.ca/fn-an/alt_formats/hpfb-dgpsa/pdf/food-guide-aliment/view_eatwell_vue_bienmang-eng.pdf) pour le guide alimentaire du gouvernement canadien où les « légumineuses cuisinées » sont positionnées comme une alternative aux produits carnés.

<sup>14</sup> <http://www.choosemyplate.gov>, site officiel de l'USDA, Center for Nutrition Policy and Promotion, l'équivalent du PNNS français.

Au-delà de leur atout protéique, les progrès de connaissance sur ces espèces glissent progressivement vers une logique « nutritionnelle » liée à la reconnaissance de multiples propriétés nutritionnelles. Dans une récente synthèse de ces propriétés évaluées dans différentes études cliniques internationales, Champ (*forthcoming*) avance des effets préventifs dans certaines maladies de civilisation (diabète de type II, cholestérol, cancer du colon, etc.). Pour autant, la reconnaissance d'allégations nutritionnelles spécifiques, au regard de la réglementation européenne, nécessite des études complémentaires alors que dans d'autres pays ces allégations sont déjà utilisées par l'offre agro-alimentaire. Par exemple au Canada, les légumineuses sont reconnues comme des produits très riches en fibres, expliquant une partie de leurs effets bénéfiques, alors que cette mention n'est pas présente sur les produits français. Les règles institutionnelles influencent ainsi fortement la stratégie commerciale des industries agro-alimentaires. Différents travaux en cours cherchent également à mieux apprécier les atouts des légumineuses pour contribuer à une alimentation équilibrée en termes de micro-nutriments (potassium, etc,...) et pour donner une réponse nutritionnelle adaptée aux déficiences alimentaires en fonction des âges de la vie. Par exemple, l'alimentation des seniors se caractérise par une forte réduction de la consommation de viande, liée à des difficultés principales de mastication (au-delà d'autres considérations économiques possibles). La conséquence est une carence protéique qui amène à proposer des aliments appréciés par cette population plus riche en protéines végétales, tels que par exemple du pain enrichi en farine de légumineuses.

Les progrès des connaissances nutritionnelles sur ces espèces combinées aux enjeux des différentes mouvances démographiques rappelées précédemment laissent envisager une transition alimentaire, qui reste cependant soumise à l'évolution des règles institutionnelles et aux progrès technologiques. Celles-ci pourront être apportés pour favoriser cette transformation de l'offre agro-alimentaire industrielle.

#### 4.2 Quelle place pour les légumineuses à graines dans les procédés alimentaires industriels ?

Les technologies de transformation des graines de légumineuses ont particulièrement évolué ces dernières années même si les applications sont encore essentiellement orientées vers l'alimentation animale. Un potentiel d'innovation reste de plus encore important grâce aux transferts technologiques possibles entre sous secteurs de l'industrie agro-alimentaire (Coudurier et al. 2013). Aujourd'hui, le marché des graines de légumineuses destinées à être utilisées comme ingrédients de l'industrie agro-alimentaire pour la consommation humaine est évalué à 120 000 t/an de graines produites en France<sup>15</sup> ; dont une part importante reste liée à la trituration des graines de pois protéagineux (plus de 80 000 t/an). Comparativement, le marché de la consommation alimentaire des graines entières de légumineuses en France (essentiellement lentilles, haricots, pois chiche) est estimé à 100 000 t/an dont la moitié est importée. Ainsi le débouché des ingrédients industriels représente un poids deux fois plus important dans la production agricole française de légumineuses. Ce développement est dû en grande partie au progrès des connaissances nutritionnelles (supra), mais également à une meilleure coordination des acteurs dans ce secteur et dans la reconnaissance d'autres propriétés fonctionnelles qui peuvent contribuer à cette transition des pratiques des industries agro-alimentaire.

Les ingrédients issus de matières végétales riches en protéines sont appelés des MPV (Matières Protéiques Végétales). Il s'agit de produits séchés (environ 90% de matière sèche) pauvres en lipides et riches en protéines, encadrés par une circulaire administrative<sup>16</sup> qui les classent selon un taux de protéines sur matière sèche supérieur ou égal à 45%. Si l'on considère les MPV en France, deux catégories de produits représentent les 2/3 des aliments référencés contenant des protéines végétales utilisées en tant qu'ingrédient : les produits des filières Boulangerie Viennoiserie Pâtisserie (BVP) et ceux de l'industrie de la viande. Deux autres secteurs sont en croissance, celui des produits diététiques et celui des produits « traiteurs ». Outre leur intérêt économique, ces protéines végétales possèdent des fonctionnalités qui permettent d'optimiser la texture et/ou la stabilité physique des produits en contrôlant les propriétés rhéologiques, émulsifiantes, moussantes et de rétention d'eau. L'utilisation de ces MPV est encore freinée par des performances fonctionnelles moindres, comparées à celles de

---

<sup>15</sup> Moyenne sur les dernières campagnes de production depuis 2008, données UNIP.

<sup>16</sup> Circulaire du 27/08/1975(DGAF/SRF/C 1375).

certaines protéines animales (protéines laitières, ovoproduits, gélatine..), et par une acceptabilité par le consommateur plus limitée à cause du goût « végétal » encore souvent prononcé. Des progrès doivent être faits pour dépasser ces verrous sensoriels. Sur la base des acquis des dernières décennies, plusieurs voies méritent d'être explorées : mieux exploiter dans sa diversité le potentiel fonctionnel des protéines de graines, réduire les goûts indésirables, et exploiter les synergies fonctionnelles entre protéines végétales d'une part, protéines animales et autres biopolymères d'autre part. Des approches très innovantes ayant pour stratégie la conception d'assemblages contrôlés entre protéines végétales (légumineuses/céréales) ou des mixtes protéines animales/protéines végétales, pour une meilleure fonctionnalité sont actuellement développées dans de nombreux laboratoires. L'usage accru de protéines végétales dans les produits alimentaires transformés nécessitera également de revisiter les procédés de transformation.

Différents procédés technologiques permettent d'obtenir ces ingrédients sous différentes formes : farines, concentrés, isolats, etc. se caractérisant par différentes teneurs en protéines sur matière sèche (de 45 à plus 90%). Ces ingrédients sont alors incorporés dans les produits agro-alimentaires pour répondre à des besoins nutritionnels, nutraceutiques ou purement technologiques. Certaines propriétés texturantes (émulsions, mousses, gels...) permettent aujourd'hui de les substituer à d'autres matières (notamment issues des produits animaux). Dans le secteur de la pâtisserie, certaines industries ont par exemple remplacé des œufs par du lupin qui possède des propriétés émulsifiantes, en sus de sa couleur jaune et de sa richesse en protéines. La farine de féverole en panification permet d'éclaircir la mie du pain. La plupart de ces utilisations restent confinées aujourd'hui à des marchés de niche, mais tendent à progresser.

De plus les progrès réalisés avancent vers des MPV de « seconde génération » grâce aux connaissances développées sur les associations entre MPV en croisant génétique et procédés pour définir des familles de protéines du végétal. Ces progrès permettent aujourd'hui d'obtenir des fractions « à la carte » pour différents usages, des MPV enrichies en propriétés fonctionnelles via de nouveaux assemblage fonctionnels. L'accumulation de ces innovations progresse vers de nouveaux débouchés et métiers de la « bioraffinerie » valorisant différentes propriétés : protéiques, glucides, fibres, amidon...

Ces progrès technologiques permettent aussi d'appuyer le développement de nouveaux produits associant différentes protéines végétales pour leur intérêt nutritionnel. A titre illustratif, les pâtes alimentaires associant farine de blé dur et farine de légumineuses ont récemment fait l'objet de recherches (projet ANR Pastaleg) montrant la faisabilité technologique et avançant des qualités nutritionnelles spécifiques (Petitot et al. 2010). L'incorporation de farines de légumineuses à la semoule de blé dur permet d'obtenir des pâtes mixtes bénéficiant des qualités nutritionnelles des deux matières premières. Les chercheurs ont prouvé la faisabilité technologique d'une pâte incorporant un taux élevé (35%) de légumineuse, tout en utilisant des procédés classiques de fabrication. Aucun aliment de ce type n'est actuellement disponible sur le marché. Les pâtes obtenues sont riches en protéines (et équilibrées en acides aminés indispensables), en fibres, vit B1, Mg et P. Elles sont également pauvres en lipides et en alpha-galactosides, responsables de flatulences.

Ces produits déjà commercialisés aux Etats-Unis pourraient l'être aussi en France. Néanmoins, la réglementation actuelle définissant les pâtes alimentaires comme exclusivement à base de blé dur ne permet pas aujourd'hui de développer ces produits. Une fois encore, ces exemples montrent comment les institutions conditionnent fortement la stratégie des opérateurs sur le marché et révèlent l'importance d'une considération systémique du système agro-alimentaire pour apprécier sa capacité d'évolution.

Plusieurs enjeux technologiques se présentent aujourd'hui aux chercheurs publics et privés pour développer l'utilisation de protéines de légumineuses comme ingrédients pour l'alimentation humaine :

- 1- Améliorer les stratégies d'extraction et valorisation co-produits : il conviendra de retravailler les schémas d'extraction des molécules (protéines, lipides, ...) afin d'obtenir des fractions (ou co-fractions) moins dénaturées, plus solubles et avec de meilleures fonctionnalités. Egalement, la valorisation de co-produits (notamment polysaccharides mais aussi protéines) pour la fabrication de matériaux actuellement dominée par l'utilisation de carbone fossile doit être intensifiée.

2- Cribler des assemblages fonctionnels pour propriétés innovantes : il existe des assemblages in planta (complexes protéines, oléosomes, ...) possédant des propriétés spécifiques et plus simple à obtenir que les molécules purifiées : leur extraction devra être recherchée dans une logique d'éco-conception. En même temps la réassociation de protéines végétales extraites et peu solubles pour l'obtention de novo d'assemblages à propriétés améliorée est une piste à explorer.

3- Concevoir des mix protéines animales / protéines végétales pour produits traditionnels : la conception de produits alimentaires non encore existants et uniquement à base protéines végétales est illusoire. Il convient dans une première approche économiquement et socialement acceptable de commencer à incorporer des protéines végétales en association avec des protéines animales dans des produits formulés habituellement constitués de protéines animales (tels que fromages, yaourts, ...).

4- Revisiter les procédés dans une logique d'éco-conception : les spécificités des protéines végétales (capacité à s'agréger, faible solubilité, interactions avec les métaux, ...) peut conduire à repenser les schémas de fabrication des produits transformés avec une vision de procédés écologiquement profitables à la planète par une meilleure efficacité des facteurs de production dans les procédés de transformation. Dans le même esprit les traitements d'hydrolyse améliorant la solubilité ou de fermentation, ainsi que les traitements physiques innovants (haute pressions, micro-ondes, ...) permettant une texturation, sont des atouts technologiques à envisager.

Les investissements en faveur de ces recherches peuvent ainsi contribuer à faire évoluer le système aval des filières agro-alimentaires en faveur des légumineuses à graines.

## **Conclusion**

Les préférences historiques données au lendemain de la seconde guerre mondiale ont fortement orienté l'évolution des assolements et de la R&D, par les différents mécanismes d'auto-renforcement en faveur des céréales et qui ont marginalisé les légumineuses à graines. La progression des rendements céréaliers et le cours élevé de ces espèces ont en effet renforcé le choix des agriculteurs en leur faveur. Les céréales se retrouvent aujourd'hui majoritairement présentes dans les assolements, qui continuent à se spécialiser au détriment des principes agronomiques d'une plus grande diversification pour réduire le recours aux intrants de synthèse. Le différentiel de compétitivité aujourd'hui atteint entre les espèces majeures et mineures renforce ainsi donc le choix des agriculteurs dans une faible diversification des assolements. Le verrouillage du système de production a conduit à un tri entre les pratiques et les innovations agro-alimentaires : celles qui sont totalement compatibles avec le paradigme technologique en place (agro-chimique) ont une chance de se développer (par exemple, la fertilisation de précision), alors que celles qui remettent en cause celui-ci (insertion de légumineuses dans la rotation) et les relations entre acteurs telles qu'elles se sont organisées autour du régime dominant (par exemple, l'organisation du conseil technique) se sont moins développées. Cette étude illustre pour le domaine agro-alimentaire, comment à partir d'un choix initial, les RCA peuvent conduire un système productif à un système non durable.

Pour appréhender les conditions d'un changement de trajectoire technologique, et plus particulièrement pour transiter vers une agriculture reposant sur moins d'intrants de synthèse nous avons mobilisé un cadre théorique de la transition des systèmes de production perçue comme un système de relations entre technologie, écosystème, institutions, acteurs privés de l'amont à l'aval des filières. La compréhension des liens entre ces différentes composantes du système agroalimentaire et des innovations possibles dans chacun de ces domaines, peut permettre de mieux envisager comment ces différentes composantes peuvent co-évoluer. Tout particulièrement, de nouveaux marchés alimentaires, valorisant des propriétés nutritionnelles des légumineuses et s'appuyant sur les progrès technologiques de la transformation industrielle, peuvent offrir des opportunités nouvelles pour leur culture. Dans cette co-évolution, nous avons mis en évidence un rôle majeur des institutions dans l'accompagnement du changement. A l'amont pour une évolution du conseil technique, à l'aval dans une évolution de la qualification nutritionnelle et des procédés technologiques. L'évolution de ces règles d'action pourraient permettre de mieux soutenir les différentes niches d'innovation qui se sont construites en cette fin de XXème et début de XXIème siècles sur les légumineuses à graines au regard

des différentes inflexions contemporaines qui appellent pour une transition à la fois agricole, industrielle et nutritionnelle.

## References

- Allaire, G., 2010. Applying economic sociology to understand the meaning of “Quality” in food markets. *Agricultural Economics*, 41(s1), 167-180.
- Altieri M., 1989. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 74, 19–31.
- Arthur B., 1989. Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-In by Historical Events. *The Economic Journal*, Vol.99, 394, 116-131.
- Beinhocker E., 2006, *The Origin of Wealth: Evolution, Complexity, and the Radical Remaking of Economics.*, Harvard Business School Press, Boston.
- de Bello, F. *et al.* 2010. Towards an assessment of multiple ecosystem processes and services via functional traits. *Biodiversity and Conservation*, 19, 2873-2893.
- 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., Le Gall M., Munier-Jolain N., Tivoli B., 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
- 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., 2009. La relance des légumineuses dans le cadre d'un plan protéines: quels bénéfices environnementaux ? *Etudes et Documents*, n°15, Commissariat Général au Développement Rural, France. [http://www.developpement-durable.gouv.fr/spip.php?page=article&id\\_article=12730](http://www.developpement-durable.gouv.fr/spip.php?page=article&id_article=12730) Accessed 18 October 2013
- Cavaillès E., 2010. Avantages environnementaux et économiques d'une relance des légumineuses en France. *Le point sur*, n°40. Commissariat Général Au Développement Durable.
- Champ M., *forthcoming*, Conséquences nutritionnelles et technico-fonctionnelles de l'utilisation des légumineuses dans l'alimentation humaine et les produits agro-industriels in *Les légumineuses dans les systèmes de production agricole – Etat des connaissances et impacts agronomiques, environnementaux et économiques*, Huygues, Schneider (eds).
- Charrier F., Magrini M.B., Charlier A., Fares M., Le Bail M., Messéan A., & Meynard J. M. , 2013. Alimentation animale et organisation des filières: une comparaison pois protéagineux-lin oléagineux pour comprendre les facteurs freinant ou favorisant les cultures de diversification. *OCL*, 20(4), D407.
- Chaumet, J. M., Delpuech, F., Dorin, B., Gherzi, G., Hubert, B., Le Cotty, T., ... & Treyer, S. (2009). Agrimonde: Agricultures et alimentations du monde en 2050: scénarios et défis pour un développement durable. CIRAD/INRA.
- Choquet P-L., Compère P., Berthoud A., 2014. Favoriser l'insertion des légumineuses dans les grandes cultures en finançant les réductions d'émissions induites sur les marchés du carbone., *Innovations Agronomiques*, à paraître.
- Colbach N., Maurin N., Huet P., 1996. Influence of cropping system on foot rot of winter wheat in France. *Crop Protection* 15, 295-305.
- Colbach N., Saur L., 1998. Influence of crop management on eyespot development and infection cycles of winter wheat. *European Journal of Plant Pathology* 104, 37-48
- Combris P, Goglia R, Henini M, Soler LG, Spiteri M., 2011. Improvement of the nutritional quality of foods as a public health tool. *Public Health*, 125(10):717-24.
- Combris P. et Soler L.G, 2011. Consommation alimentaire: tendances de long terme et questions sur leur durabilité. *Innovations agronomiques*, 13, 149-160.
- Corre-Hellou G. and Crozat Y. 2005 - N<sub>2</sub> fixation and N supply in organic pea (*Pisum sativum* L.) cropping systems as affected by weeds and pea weevil (*Sitona lineatus* L.). *European Journal of Agronomy*, 22 (4): 449-458.

- Corre-Hellou G., Fustec J. and Crozat Y., 2006. Interspecific competition for soil N and its interaction with N<sub>2</sub> 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 Research*, 122: 264-272
- Cowan R., Gunby P. (1996). Sprayed to Death: Path Dependence, Lock-in and Pest Control Strategies., *The Economic Journal*, 106, 521-42.
- Coudurier B., Georget M., Guyomard H., Huyghe C., Jean-Louis Peyraud (sous la direction de). 2013. Vers des agricultures à hautes performances. Vol 4. Analyse des voies de progrès en agriculture conventionnelle par orientation productive. Rapport d'étude Inra. 484p.
- Crews, T.E., Peoples, M.B., 2004. Legume versus fertilizer sources of nitrogen: ecological tradeoffs and human needs. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 102, 279-297.
- David C, Jeuffroy MH, Henning J, Meynard JM., 2005. Yield variation in organic winter wheat: a diagnostic study in the Southeast of France. *Agron Sustain Dev* 25: 213–223.
- Dequiedt B., 2012, Réduire les émissions de l'agriculture : l'option des légumineuses. *Les cahiers de la Chaire Economie du Climat*, n°19, octobre, 31p.
- Dosi, G., 1988. The nature of the innovative process. *Technical change and economic theory*, 2, 590-607.
- Dosi G., Nelson R., 2010. Technical change and industrial dynamics as evolutionary processes in Hall B., Rosenberg N. (eds) *Handbook of the economics of innovation*, éd. Elsevier.
- Etiévant, P., Bellisle, F., Dallongeville, J., Etilé, F., Guichard, E., Padilla, M., & Romon-Rousseaux, M. (2010). Les comportements alimentaires. Quels en sont les déterminants? Quelles actions, pour quels effets. Expertise Scientifique Collective: Paris, France: Institut national de la Recherche Agronomique (INRA).
- 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.
- Esnouf C., Russel M., Bricas N. (coords)., 2011. Pour une alimentation durable. Réflexion stratégique du ALIne. Editions Quae, 288 p.
- FAO, 2003. World agriculture towards 2015-2030. An FAO perspective. [<http://www.fao.org/docrep/005/y4252e/y4252e00.htm>]
- Fares M., Magrini M.B., Triboulet P. 2012. « Transition agro-écologique, innovation et effets de verrouillage: le rôle de la structure organisationnelle des filières. ». *Cahier d'Agricultures*, 21 (1), 34-45
- Finckh M.R., Gacek E.S., Goyeau H., Lannou C., Merz U., Mundt C.C., Munk L., Nadziak J., Newton A.C., De Vallavieille-Pope C., Wolfe M.S., 2000. Cereal variety and species mixtures in practice, with emphasis on disease resistance. *Agronomie*, 20 : 813-837.
- Foray, 1989. Les modèles de compétition technologique. Une revue de la littérature. *Revue d'économie industrielle*, 48, 16-34.
- Foxon, T. J. (2011). A coevolutionary framework for analysing a transition to a sustainable low carbon economy. *Ecological Economics*, 70(12), 2258-2267.
- Foxon, T. J., Köhler, J., Michie, J., & Oughton, C. (2013). Towards a new complexity economics for sustainability. *Cambridge journal of economics*, 37(1), 187-208.
- Francis, C., Lieblein, G., Gliessman, S., Breland, T. A., Creamer, N., Harwood, R., ... & Poincelot, R. (2003). Agroecology: the ecology of food systems. *Journal of sustainable agriculture*, 22(3), 99-118.
- Fuzeau V, Dubois G, Théron O, Allaire G., 2012. Diversification des cultures dans l'agriculture française – état des lieux et dispositifs d'accompagnement. *Études et documents* du Service de l'Économie, de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable (SEEIDD) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD), N°. 67
- Geels F., 2011. The multi-level perspective on sustainability transitions: Responses to seven criticisms, *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 1(1), 24-40.
- Ghaley BB, Hauggaard-Nielsen H, Høgh-Jensen H, Jensen ES., 2005. Intercropping of wheat and pea as influenced by nitrogen fertilization. *Nutr Cycl Agroecosys* 73: 201–212.
- Giller, K.E., Cadisch, G., 1995. Future benefits from biological nitrogen fixation: An ecological approach to agriculture. *Plant and Soil* 174, 255-277.

- Gooding M.-J., Kasynova E., Ruske R., Hauggaard-Nielsen H., Jensen E.-S., Dahlmann C., von Fragstein P., Dibet A., Corre-Hellou G., Crozat Y., Pristeri A., Romeo M., Monti M. and Launay M. 2008 - Intercropping with pulses to concentrate nitrogen and sulphur in wheat. *Journal of Agricultural Science*, 145 (5): 469-475.
- Gueguen J. et Duc G. (eds), 2008, La filière protéagineuse. Quels défis ? Editions QUAE, 147p.
- Hauggaard-Nielsen H., Gooding M., Ambus P., Corre-Hellou G., Crozat Y., Dahlmann C., Dibet A., Von Fragstein P., Pristeri A. and Monti M., 2009. Pea–barley intercropping for efficient symbiotic N<sub>2</sub>-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems. *Field Crops Research*, 113 (1): 64-71.
- Hekkert, M., Suurs, R., Negro, S., Kuhlmann, S., Smits, R., 2007. Functions of innovation systems: a new approach for analyzing technological change. *Technological Forecasting and Social Change*, 74, 413–432.
- Hesser, L. F. , 2006. The man who fed the world: Nobel Peace Prize laureate Norman Borlaug and his battle to end world hunger: An authorized biography, Park East Press, 276 p.
- Jensen E.S., 1996. Grain yield, symbiotic N<sub>2</sub> fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops. *Plant Soil* , 182: 25–38.
- Jensen, E.S., Hauggaard-Nielsen, H., 2003. How can increased use of biological N<sub>2</sub> fixation in agriculture benefit the environment? *Plant and Soil*, 252, 177-186.
- Jensen E, Peoples M, Boddey R, Gresshoff P, Hauggaard-Nielsen H, Alves BJR, Morrison M , 2012. Legumes for mitigation of climate change and the provision of feedstock for biofuels and biorefineries. A review. *Sustain Dev* 32: 329–364.
- Jeuffroy MH, 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*.
- 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(2), 175-198.
- Kern, F., et Smith, A. , 2008. Restructuring energy systems for sustainability? Energy transition policy in the Netherlands. *Energy Policy*, 36(11), 4093-4103.
- Kinzig AP, Perrings C, Chapin FS, Polasky S, Smith VK, Tilman D, Turner BL (2011) Paying for Ecosystem services – Promise and Peril. *Science* 334: 603-604.
- Labarthe, P., & Laurent, C. (2011). Économie des services et politiques publiques de conseil agricole. *Cahiers Agricultures*, 20(5), 343-351.
- Lamine C., Meynard J.-M., Bui S., Messéan A. (2010). Réductions d'intrants : des changements techniques, et après ? Effets de verrouillage et voies d'évolution à l'échelle du système agri-alimentaire, *Innovations Agronomiques*, 8, 121-134.
- Laperche B., 2012. General presentation innovation processes: why institutions matter ?, *Journal of Innovation Economics & Management*, 9 : 232-233.
- Liebowitz, S. and Margolis, S. E. "Path Dependence, Lock-in, and History," *Journal of Law, Economics, & Organization* (11:1), 1995, pp. 205-226.
- Magrini M-B, Thomas A. forthcoming, Analyses multi-enjeux et dynamiques socioéconomiques des systèmes de production avec légumineuses in *Les légumineuses dans les systèmes de production agricole – État des connaissances et impacts agronomiques, environnementaux et économiques*, Huygues, Schneider (eds).
- Magrini MB, 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
- Malassis, L. (1979). Economie agricole, agro-alimentaire et rurale. *Économie rurale*, 131(1), 3-10.
- Markard, J., Raven, R., & Truffer, B., 2012. Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects. *Research Policy*, 41(6), 955-967.
- Marsden, T., 2012. Towards a Real Sustainable Agri-food Security and Food Policy: Beyond the Ecological Fallacies? *The political quarterly*, 83(1), 139-145.
- Ménard C., 2012. “Hybrid modes of organization”, in Gibbons R. & Roberts J. (Eds.), *Handbook of organizational economics*, Princeton University Press, 1066- 1108.
- Meynard J.M., A. Messéan, A. Charlier, F. Charrier, M. Fares, M. Le Bail, M.B. Magrini, I. Savini, 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.

- Mignolet C., Schott C., Benoît M., Meynard J.M. et al., 2012. Transformations des systèmes de production et des systèmes de culture du bassin de la Seine depuis les années 1970 : une spécialisation des territoires aux conséquences environnementales majeures. *Innovations agronomiques*, 22,1-16.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-being: General Synthesis. World Resources Institute, Island Press, Washington DC. [www.millenniumassessment.org](http://www.millenniumassessment.org) Accessed 18 October 2013
- Munier-Jolain, N., 2002. The long-term impact of grain legumes on the environment: possibilities for reducing herbicides. *Grain Legumes*, 36, 16–17.
- Munier-Jolain N. & Carrouee B., 2003. Quelle place pour le pois dans une agriculture respectueuse de l'environnement? Argumentaire agri-environnemental. *Cahiers Agricultures*, 12(2).
- Munier-Jolain N., Salon, C., 2005. Are the carbon costs of seed production related to the quantitative and qualitative performance? An appraisal for legumes and other crops. *Plant, Cell & Environment* ,28, 1388-1395.
- Naudin C., Corre-Hellou G., Pineau S., Jeuffroy M.H. 2010. The effect of various dynamics of N availability on winter pea-wheat intercrops: crop growth, N partitioning and symbiotic N<sub>2</sub> fixation. *Field Crops Research*, 119: 2-11
- Nelson R. R., & Winter S. G., 1977, In search of useful theory of innovation. *Research policy*, 6(1), 36-76.
- Nemecek T, Von Richthofen JS, Dubois G, Casta P, Charles R, Pahl H., 2008. Environmental impacts of introducing grain legumes into European crop rotations. *Eur J Agron* 28: 380-393.
- North, D.C., 2003. Understanding Processes of Economic Change. Cambridge University Press.
- OECD-FAO, 2013, Agricultural Outlook 2013-2022, <http://www.oecd.org/site/oecd-faoagriculturaloutlook/publication.htm>
- Pellerin S., Bamiere L., Angers D., Beline F., Benoit M., Butault J.P., Chenu C., Colenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Henault C., Jeuffroy M.H., Klumpp K., Metay A., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., Pardon L., 2013. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude, INRA, 92 p.
- Pelzer E, Bazot M, Makowski D, Corre-Hellou G, Naudin C, Al Rifai M, Baranger E, Bedoussac, Biarnès V, Boucheny P, Carrouée B, Dorvillez D, Foissy D, Gaillard B, Guichard L, Mansard MC, Omon B, Prieur L, Yvergniaux M, Justes E, Jeuffroy MH (2012) Pea-wheat intercrops in low-input conditions combine high economic performances and low environmental impacts. *Eur J Agron* 40: 39-53.
- Peoples, M. B., Brockwell, J., Herridge, D. F., Rochester, I. J., Alves, B. J. R., Urquiaga, S., ... & Jensen, E. S. 2009a. The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. *Symbiosis* 48, 1-17.
- Peoples, M. et al. 2009b. In: Emerich, D.W., Krishnan, B. (Eds.), Nitrogen fixation in crop production. Agronomy Monograph 52. Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison USA, pp. 349-385.
- Petitot, M., Abecassis, J. & Micard, V., 2009. Structuring of pasta components during processing : impact on starch and protein digestibility and allergenicity. *Trends in Food Science & Technology*, 20, 521-532.
- Petitot, M., Boyer, L., Minier, C. & Micard V., 2010. Fortification of pasta with split pea and faba bean flours: Pasta processing and quality evaluation. *Food Research International*, 43 :634–641
- Rastoin, J. L., & Ghersi, G., 2010. Le système alimentaire mondial: concepts et méthodes, analyses et dynamiques. Éditions Quae.
- Raven, R. P. J. M., & Geels, F. W., 2010. Socio-cognitive evolution in niche development: comparative analysis of biogas development in Denmark and the Netherlands (1973–2004). *Technovation*, 30(2), 87-99.
- Rochette, P. & Janzen, H.H., 2005. Towards a revised coefficient for estimating N<sub>2</sub>O emissions from legumes. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 73(2/3), p.171–179.
- Roep D., Wiskerke J., 2012. Reshaping the foodscape. In : Spaargaren G., Oosterveer P., Loeber A. (éditeurs). Food practices in transition: changing food consumption, retail and production in the age of reflexive modernity. Routledge (Etats-Unis)
- 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 (5) 276-291.
- Schneider, A. et Carrouee, B., 2009. Rentabilité des protéagineux dans la rotation. Quelle valeur économique pour l'effet du précédent ? *Perspectives Agricoles* 360.



Schneider A., Flénet F., Dumans P., Bonnin E., de Chezelles E., Jeuffroy M.H., Hayer F., Nemecek T., Carrouée B., 2010. Diversifier les rotations céréalières notamment avec du pois et du colza – Données récentes d'expérimentations et d'études. *OCL Oléagineux Corps Gras, Lipides* 17(5), 301 - 311.

Schoeny, A., Jumel, S., Rouault, F., Lemarchand, E., & Tivoli, B. (2010). Effect and underlying mechanisms of pea-cereal intercropping on the epidemic development of ascochyta blight. *European journal of plant pathology*, 126(3), 317-331.

Thiébeau P., Lô-Pelzer E., Klumpp K., Corson M., Hénault C., Bloor J., de Chezelles E., Soussana J.F., Lett J.M., Jeuffroy M.H., 2010. Conduite des légumineuses pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle de la culture et de l'exploitation agricole. *Innovations Agronomiques*, 11, 45-58.

Thomas A., Schneider A. et Pilorgé E., 2013. Politiques agricoles et place du colza et du pois dans les systèmes de culture. *Agronomie, Environnement & Sociétés*. Vol.3, 1, 65-74.

Thomsen IK, Kjellerup V, Christensen BT., 2001. Leaching and plant offtake of N in field pea/cereal cropping sequences with incorporation of <sup>15</sup>N-labelled pea harvest residues. *Soil Use Manag* 17: 209-216.

Tome D., 2012. Criteria and markers for protein quality assessment - a review. *British Journal of Nutrition*, 108(2):S222-9.

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.

Voisin, A. S., Guéguen, J., Huyghe, C., Jeuffroy, M. H., Magrini, M. B., Meynard, J. M., Mougél Ch., Pellerin S. & Pelzer, E., 2014. Legumes for feed, food, biomaterials and bioenergy in Europe: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 343:361-380.

Wallace, K.J., 2007. Classification of ecosystem services: problems and solutions. *Biological Conservation*, 139, 235-246

Wiskerke, J. S., & Van der Ploeg, J. D. (Eds.). (2004). *Seeds of Transition: Essays in Novelty Production, Niches and Regimes in Agriculture*. Uitgeverij Van Gorcum.

Zhang, W., Ricketts, T.H., Kremen, C., Carney, K., Swinton, S.M., 2007. Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological Economics* 64, 253-260.

## ANNEXES

Figure 2. Evolution du prix des engrais azotés

