

**DOSSIER
PROTÉINES ET AZOTE**

**La clé des systèmes
agricoles et alimentaires durables**

Sommaire du dossier

PROTÉINES ET AZOTE

LA CLÉ DES SYSTÈMES AGRICOLES ET ALIMENTAIRES DURABLES

M. CHRISTIAN HUYGHE, DIRECTEUR SCIENTIFIQUE ADJOINT AGRICULTURE
ET MME JULIETTE LOUIS-SERVAIS, ADJOINTE AU DIRECTEUR SCIENTIFIQUE AGRICULTURE
INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE (INRA)

LA DEMANDE MONDIALE DE PROTÉINES POUR L'ALIMENTATION HUMAINE

M. CHRISTIAN HUYGHE, DIRECTEUR SCIENTIFIQUE ADJOINT « AGRICULTURE »
INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE (INRA)

LE MARCHÉ MONDIAL DES PROTÉINES VÉGÉTALES

M. CHRISTIAN HUYGHE, DIRECTEUR SCIENTIFIQUE ADJOINT « AGRICULTURE »
INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE (INRA)

LES RESSOURCES PROTÉIQUES VÉGÉTALES

UTILISÉES EN FRANCE POUR NOURRIR LES HOMMES ET LES ANIMAUX

M. CHRISTIAN HUYGHE, DIRECTEUR SCIENTIFIQUE ADJOINT « AGRICULTURE »
INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE (INRA)

SYSTÈMES DE CULTURE MÉTROPOLITAINS

FOURNITURE DE PROTÉINES ET COÛT ENVIRONNEMENTAL

MME MARIE-HÉLÈNE JEUFFROY
UMR AGRONOMIE, INRA, AGROPARISTECH, UNIVERSITÉ PARIS – SACLAY THIVERVAL – GRIGNON
M. PIERRE CELLIER, UMR ECOSYS – INRA, AGROPARISTECH, UNIVERSITÉ PARIS – SACLAY THIVERVAL – GRIGNON
ET MME CATHERINE MIGNOLET, UR ASTER, INRA – MIRECOURT

BESOINS ALIMENTAIRES EN PROTÉINES

ET BESOINS SPÉCIFIQUES DE CERTAINES CATÉGORIES DE POPULATION

M. JEAN-MICHEL CHARDIGNY, DIRECTEUR DE RECHERCHE DÉPARTEMENT ALIMENTATION HUMAINE
INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE (INRA) – CENTRE AUVERGNE - RHÔNE - ALPES

L'ÉLEVAGE CONTRIBUE À LA PRODUCTION DURABLE DE PROTÉINES

M. JEAN-LOUIS PEYRAUD, CHERCHEUR SPÉCIALISÉ EN PRODUCTIONS ANIMALES (UMR PEGASE)

DIRECTION SCIENTIFIQUE AGRICULTURE – INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE (INRA)

ET SI LA FRANCE PASSAIT AU RÉGIME « BIO, LOCAL ET DEMITARIEN » ?

UN SCÉNARIO RADICAL DE SOBRIÉTÉ ALIMENTAIRE

ET D'AUTONOMIE PROTÉIQUE ET AZOTÉE POUR L'AGRICULTURE ET L'ÉLEVAGE

M. GILLES BILLEN, MME JULIA LE NOË, M. LUIS LASSALETTA, M. VINCENT THIEU,

MME JULIETTE ANGLADE, M. LÉO PETIT ET MME JOSETTE GARNIER, BIOGÉOCHIMISTES

UMR METIS, UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE, CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS)

PERSPECTIVES POUR DES SYSTÈMES PROTÉIQUES ET AZOTÉS PLUS DURABLES

M. CHRISTIAN HUYGHE, DIRECTEUR SCIENTIFIQUE ADJOINT « AGRICULTURE »

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE (INRA)

PROTÉINES ET AZOTE

La clé des systèmes agricoles et alimentaires durables

par Monsieur Christian Huyghe

Directeur scientifique adjoint « Agriculture »

et Madame Juliette Louis-Servais

Adjointe au directeur scientifique Agriculture

Institut national de la recherche agronomique (INRA)

Liste des illustrations

FIGURE 1

ÉTATS D'OXYDATION DE L'AZOTE ET PROCESSUS CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES LES RELIANT

FIGURE 2

SCHÉMA DE LA CASCADE DES EFFETS DE L'AZOTE D'ORIGINE AGRICOLE

FIGURE 3

REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE

DE LA PRODUCTION DE PROTÉINES UTILISÉES EN NUTRITION HUMAINE ET EN ALIMENTATION ANIMALE, AINSI QUE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX LIÉS À LA CASCADE DE L'AZOTE

FIGURE 4

VALEUR AGRONOMIQUE RELATIVE DES MATIÈRES FERTILISANTES D'ORIGINE RÉSIDUAIRE (MAFOR)

FIGURE 5

REPRÉSENTATION DES FLUX D'AZOTE AU SEIN DES SYSTÈMES AGRICOLES ET ALIMENTAIRES

Sommaire de l'article

**1. ASSOCIER PROTÉINES ET AZOTE POUR ANALYSER CONJOINTEMENT
LA PERFORMANCE ÉCONOMIQUE ET LA PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE**

2. DES CRISES ET DES PLANS POUR ACCROÎTRE L'AUTONOMIE PROTÉIQUE

3. UNE REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE POUR UNE ANALYSE GLOBALE

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Les protéines sont des composantes uniques et indispensables de notre alimentation. Consommées et métabolisées en quantité importante, elles constituent la seule source possible pour fournir des acides aminés au corps humain. Les questions touchant à la production des protéines – végétales et animales – que nous consommons sont donc cruciales et il n'est pas étonnant qu'elles fassent l'objet d'interrogations régulières des responsables politiques et agricoles aux niveaux national, européen et mondial.

Elles constituent une composante stratégique, y compris pour les États à la recherche de systèmes alimentaires durables car la question de la durabilité de leurs systèmes de production ne peut être ignorée en raison de l'impact environnemental de nombreuses formes azotées (utilisation d'engrais azotés en productions végétales, risque de pollution de l'eau par lessivage de nitrates, émissions de protoxyde d'azote), mais aussi de la concurrence pour les terres agricoles induite par l'élevage et l'alimentation animale.

La durabilité prend ici tout son sens, en particulier si on se réfère à la définition donnée, en 1987, par la norvégienne Gro Brundtland, alors présidente de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement des Nations unies : « *Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. Deux concepts sont inhérents à cette notion : le concept de « besoins », et plus particulièrement des besoins essentiels des plus démunis, à qui il convient d'accorder la plus grande priorité, et l'idée des limitations que l'état de nos techniques et de notre organisation sociale impose sur la capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et à venir* »¹. Cette approche est particulièrement bien adaptée à la question des protéines car ces composés biochimiques sont indispensables à l'alimentation non seulement en quantité, mais aussi en qualité que l'on peut approcher par la teneur en acides aminés essentiels. L'approche trans-générationnelle de la définition du rapport Brundtland est aussi particulièrement pertinente pour les protéines parce que se sont engagées, depuis une cinquantaine d'années, une large transition alimentaire mondiale et une formidable explosion des échanges mondiaux de protéines, et que ces deux évolutions ne peuvent se poursuivre sans irrémédiablement affecter les équilibres environnementaux.

1 - Le rapport Brundtland, intitulé *Notre avenir à tous*, a été publié par l'ONU en mars 1987 et sa traduction française en 1989 (http://www.diplomatie.gouv.fr/fr/sites/odyseedveloppement-durable/files/51/rapport_brundtland.pdf).

Dans ce contexte, le but de notre réflexion sur les protéines – au fil des huit articles qui composent notre dossier – est de mettre en perspective ces nouveaux équilibres à trouver et de mettre en lumière de nouveaux leviers à actionner pour la construction d'un système alimentaire sain et durable, capable de fournir aux êtres humains des protéines en quantité et en qualité suffisantes. Pourquoi faut-il s'en soucier aujourd'hui plus qu'hier ? Pour répondre à cette question, nous allons éclairer deux hypothèses :

- ◆ La première tient à la forte augmentation, au niveau mondial de la consommation de produits animaux et, donc, de protéines végétales pour l'alimentation animale. Ceci est notamment le cas en Chine dont les importations de tourteaux et de fèves de soja explosent.
- ◆ La seconde est la nécessité d'une réflexion prenant conjointement en compte les dimensions production et environnement en agriculture. Cette approche est aujourd'hui indispensable, en particulier concernant la contribution de l'agriculture dans les émissions de gaz à effet de serre.

Nous proposons donc de revisiter la question des protéines et du cycle de l'azote en posant un cadre d'analyse plus global, dépassant le débat sur la consommation de viande et explorant de nouveaux modes de production et d'associations tant au niveau des productions végétales que de l'élevage. Au fil des articles, nous allons ainsi successivement détailler :

- ◆ La demande mondiale en protéines
- ◆ Les marchés et les échanges mondiaux
- ◆ La production de protéines en France
- ◆ Les capacités de production de protéines dans différents systèmes de culture
- ◆ Les besoins protéiques en nutrition humaine et en alimentation animale, ainsi que les évolutions en cours dans ces deux secteurs
- ◆ Les conséquences potentielles du régime « *bio, local et demitarian* », un scénario alimentaire très différent de la tendance actuelle au niveau mondial
- ◆ Les sources de progrès pour de nouvelles sources de protéines, mais aussi pour une utilisation plus efficace de celles-ci afin d'en limiter les impacts.

Au final, cette approche globale permettra de percevoir la dynamique et les inter-relations au sein de cet ensemble complexe, mais aussi d'identifier les grands leviers émergents pour construire une situation européenne moins fragile au regard des protéines et de l'azote, c'est-à-dire moins dépendante des flux de matières premières ou des intrants et ayant moins d'impacts sur l'environnement.

ENCADRÉ 1

Données et graphiques du dossier *Protéines et Azote*

Le dossier « *Protéines et Azote* », composé de neuf articles et publié dans ce *Déméter 2017*, repose sur de très grands volumes de données et il est illustré par de nombreux graphiques.

Le choix de *Déméter* est d'afficher la valeur des points sur les graphiques.

Or, différentes ressources ont été utilisées pour élaborer l'ensemble de ces graphiques : des bases de données nationales, européennes et internationales, des estimations tendanciennes, ainsi que des calculs effectués par les différents auteurs. En conséquence, même si une attention particulière a été accordée à la vérification des données, des imprécisions ont pu se glisser. Mais les tendances présentées sont exactes et les conclusions ne sont pas altérées par ces éventuelles imprécisions.

1. ASSOCIER PROTÉINES ET AZOTE POUR ANALYSER CONJOINTEMENT LA PERFORMANCE ÉCONOMIQUE ET LA PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE

L'approche associant protéines et azote est particulièrement importante car la liaison entre protéines et impact environnemental est forte et originale. Elle s'articule en effet autour de l'atome d'azote. Celui-ci est très stable quand il est sous forme de N_2 dans l'atmosphère, qui est composée à 80 % de ce gaz. Mais il est hautement réactif sous forme de N, soit comme ressource unique pour le métabolisme animal et humain dans les acides aminés et les protéines où l'atome de N occupe une place centrale, soit sous forme d'intrants obtenus au prix d'une synthèse

chimique onéreuse ou de molécules à fort impact potentiel sur le milieu (nitrate, ammoniac, protoxyde et oxydes d'azote), issues d'étapes successives de dégradation des protéines. Ces molécules correspondent à différents niveaux d'oxydation de l'azote (*Figure 1*) et elles engendrent potentiellement des impacts environnementaux au travers de la cascade de l'azote (*Figure 2*). Les protéines et l'azote sont notamment au cœur des enjeux de changement climatique engendré par la production des gaz à effet de serre, que ce soit en raison de la consommation de gaz naturel pour la synthèse d'engrais azotés grâce au procédé Haber-Bosch élaboré en 1909 ou en raison des émissions de protoxyde d'azote (N_2O), un gaz à effet de serre particulièrement puissant, dont le pouvoir de réchauffement global est environ 300 fois supérieur à celui du CO_2 .

Figure 1

États d'oxydation de l'azote et processus chimiques et biologiques les reliant

(Source : adapté d'après Billen et al., 2014)

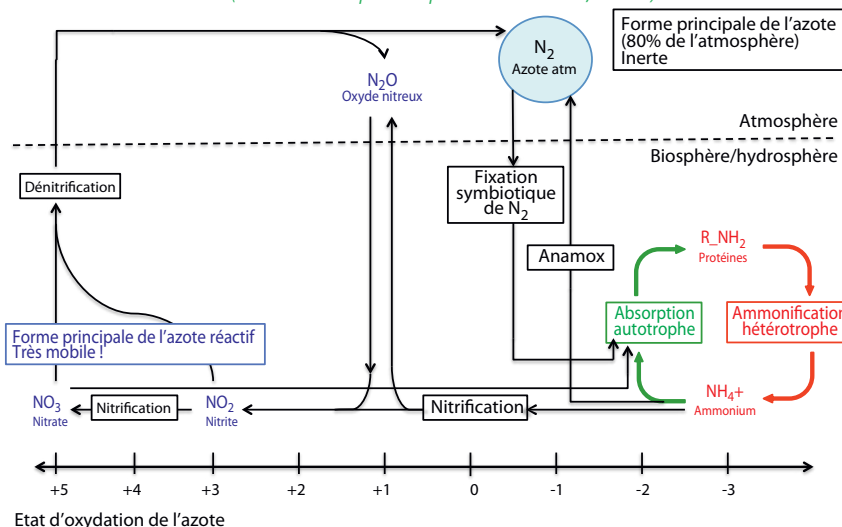
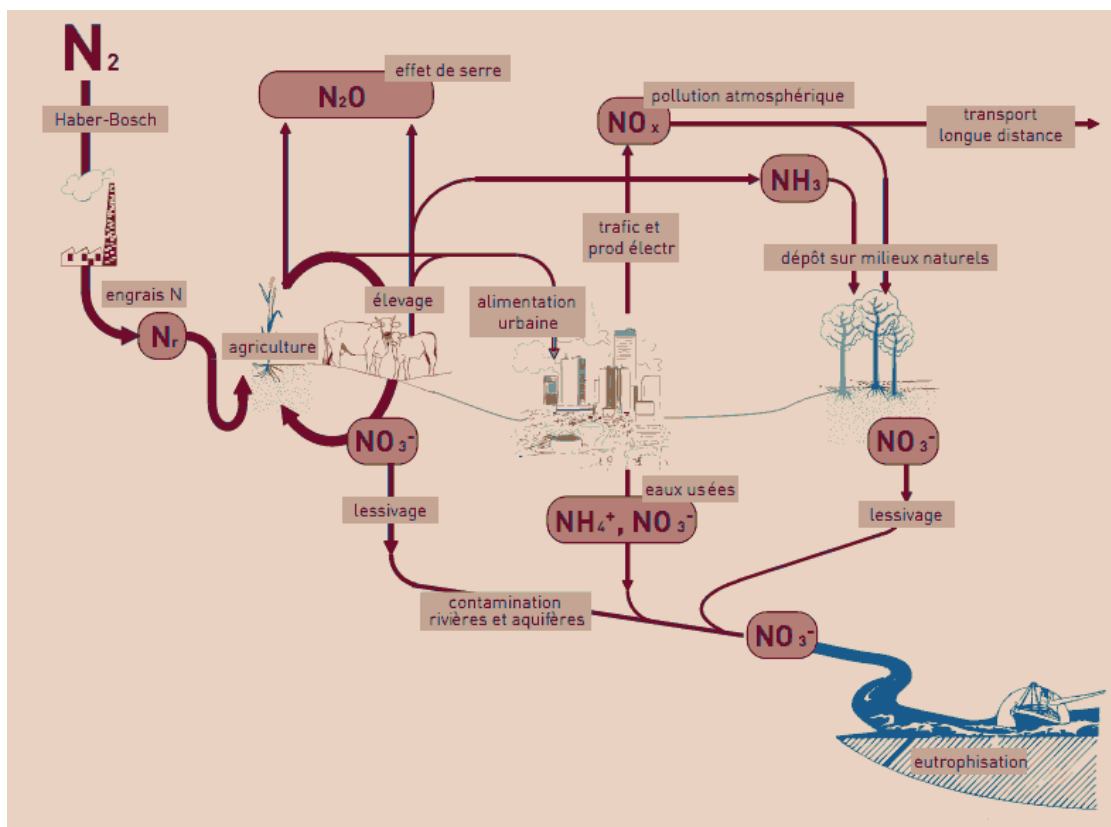


Figure 2

Schéma de la cascade des effets de l'azote d'origine agricole

 (Source : www.haute-marne.chambagri.fr/kit/environnement-energie/directive-nitrates/cascade-de-lazote-dans-le-bassin-de-la-seine.html)


ENCADRÉ 2

La bio-économie, un terme à préciser

La bio-économie est un terme devenu largement polysémique, ce qui peut être source de confusion. En fait, il est utilisé dans trois grandes acceptions :

- ◆ La bio-économie vue comme l'activité économique basée sur la production biologique et agricole. On rencontre cette utilisation dans certains textes de la Commission européenne. C'est une acception que l'on peut qualifier de pauvre car elle se contente de renommer une réalité.
- ◆ La bio-économie vue comme l'utilisation de matières premières agricoles à des fins non alimentaires. Cet usage a été fréquent, en France, lors du développement des agro-carburants et des biomatériaux. Il est plus adéquat de parler de bio-raffinerie, voire de bio-raffinerie environnementale quand il s'agit de recyclage de déchets organiques d'origines agricoles, agro-alimentaires ou alimentaires (cf. *les travaux de J.P. Steyer, LBE, Inra Narbonne*).
- ◆ La bio-économie, dans une acception plus large, proposant une conception générale de l'économie mobilisant largement la biologie et l'écologie pour considérer les filières de production et les territoires et cherchant à limiter les pertes. Ceci conduit notamment aux concepts de cascade et d'économie circulaire. C'est cette dimension qui fonde le rapport des chercheurs de l'équipe Mathijs et al. (2015) pour le SCAR (Standing Committee for Agricultural Research) auprès de la DG Recherche de la Commission européenne.

Il convient dès lors de proposer une approche largement revisitée et élargie de la question des protéines – de leur production à leur utilisation – en termes de performance productive et de performance environnementale. Pour ce faire, le cadre de la bio-économie² peut être utilisé car, parmi les six principes qu'elle propose, plusieurs s'appliquent particulièrement : le caractère prioritaire de l'alimentation humaine, la recherche impérative de modes de production respectueux de l'environnement, le développement de valorisations circulaires (notamment des effluents) ou la diversité comme source de résilience (*Encadré 2*). Mais on peut également considérer qu'une valorisation en cascade, un concept initialement élaboré pour la valorisation de la biomasse³, puisse s'appliquer utilement.

2. DES CRISES ET DES PLANS POUR ACCROÎTRE L'AUTONOMIE PROTÉIQUE

La dimension stratégique de l'approvisionnement en protéines se traduit par des réactions très fortes à des pénuries potentielles. Cette situation résulte d'accords internationaux signés entre l'Europe et les États-Unis après la Seconde Guerre mondiale et qui ont favorisé le développement de la production communautaire de céréales. C'est l'embargo sur les exportations américaines de soja – décidé par Washington en raison de la sécheresse de 1973 – qui a fait prendre conscience aux Européens de leur dépendance en protéines, en particulier en matières premières riches en protéines utilisées pour l'alimentation animale. L'embargo a provoqué une très forte hausse des prix, mais sans réduction réelle des livraisons. Pourtant, les tensions ont persisté lors des négociations multilatérales ultérieures⁴. Elles ont aussi conduit – en réponse à des demandes professionnelles soutenues⁵ – à mettre en place plusieurs plans, français et européens, prônant le renforcement de l'autonomie protéique des exploitations, des territoires ou des pays. En réaction à l'embargo de 1973, le président de la République, Georges Pompidou, a ainsi demandé à Jean-Claude Sabin, agriculteur et responsable professionnel, d'élaborer un plan protéagineux qui a permis de mettre en place ou de renforcer les programmes de sélection variétale sur le pois, le soja, la féverole ou le lupin et de créer, en

1983, Sofiprotéol, la structure financière de l'association française des producteurs d'oléo-protéagineux (F.O.P.) devenue en 2015 le groupe Avril. Aujourd'hui propriétaire de Lesieur et Sanders, opérateur dans l'aval des filières animales (porcs et volailles) et acteur mondial de l'oléo-chimie, l'entreprise compte 8 000 salariés et réalise 7 milliards d'euros de chiffre d'affaires annuel. Le dernier plan en date, intitulé *Innovation 2030* ou *plan Lauvergeon*, remonte à 2013 et plaçait les protéines végétales et la chimie du végétal parmi les sept ambitions pour l'innovation.

Tous ces plans soulignent l'importance d'améliorer l'auto-suffisance protéique de l'Europe en basant leurs calculs sur les besoins de complémentation des rations animales. Autrement dit, il s'agit de trouver des alternatives aux importations de tourteaux de soja et, par conséquent, de concentrer la recherche de solutions sur les légumineuses, essentiellement à graines. Ils prennent donc très peu en compte les autres sources de protéines : légumineuses fourragères, oléagineux ou céréales. De plus, ils privilégient la dimension productive, c'est-à-dire le rendement, car il conditionne la performance économique de la production. La question de la performance environnementale n'a été prise en compte que tardivement, pour identifier le problème de soutenabilité engendré par la convergence des régimes alimentaires asiatiques et européens⁶.

Tous ces plans visaient à faire face rapidement à une pénurie majeure. Or, cette pénurie ne s'est jamais réalisée. Certes, les cours des matières premières riches en protéines (MRP) pour l'alimentation animale ont pu fortement varier. Mais les mises en marché et les échanges mondiaux ont pleinement répondu aux demandes. Pourquoi faudrait-il donc se soucier aujourd'hui de cette question ? L'hypothèse que nous allons documenter dans ce dossier est que le système *protéines* est en fait résilient dans sa dimension *production* (contrairement aux craintes) parce que les systèmes agricoles et alimentaires reposent sur des pools de protéines beaucoup plus larges que celui des seules *matières riches en protéines* et que les niveaux d'auto-suffisance sont donc plus élevés que le seul calcul à partir des *matières riches en protéines* : le large pool joue en quelque sorte un rôle d'amortisseur.

2 - Proposé par Mathijs et al., 2015.

3 - Fraanje, 1997 ; Dornburg, 2004 ; Keegan et al., 2013.

4 - En 1992, dans le cadre de l'Uruguay round du GATT, l'Union européenne a cédé aux pressions américaines et accepté de limiter ses surfaces en oléagineux à 5,13 millions d'hectares (accords de Blair House).

5 - Mouillet, 2002.

6 - Rapport Lauvergeon, 2013.

3. UNE REPRÉSENTATION SCHEMATIQUE POUR UNE ANALYSE GLOBALE

Pour construire notre raisonnement et documenter l'ensemble de la problématique, nous allons nous appuyer sur la schématisation présentée en *Figure 3* car elle permet d'appréhender la totalité de notre champ de réflexion. Deux unités de compte – les *protéines brutes* et les *quantités d'azote consommées ou échangées* – seront utilisées pour analyser la production et l'utilisation de protéines.

Dans ce cadre, notre réflexion se déroule comme suit, au fil des articles :

1. La demande mondiale en protéines pour l'alimentation humaine

Les protéines utilisées à des fins d'alimentation humaine sont d'origines végétales et animales. La consommation a profondément évolué ces dernières décennies, avec la forte augmentation de la

consommation des protéines d'origine animale. Il est donc essentiel de documenter cette évolution, en particulier le ratio protéines végétales / animales. En se basant sur les projections de l'Organisation des Nations unies pour l'agriculture et l'alimentation (FAO) et compte tenu des efficacités de conversions de protéines végétales en protéines animales, il est possible de mesurer le défi considérable que représente la ressource de protéines végétales au cours des prochaines décennies.

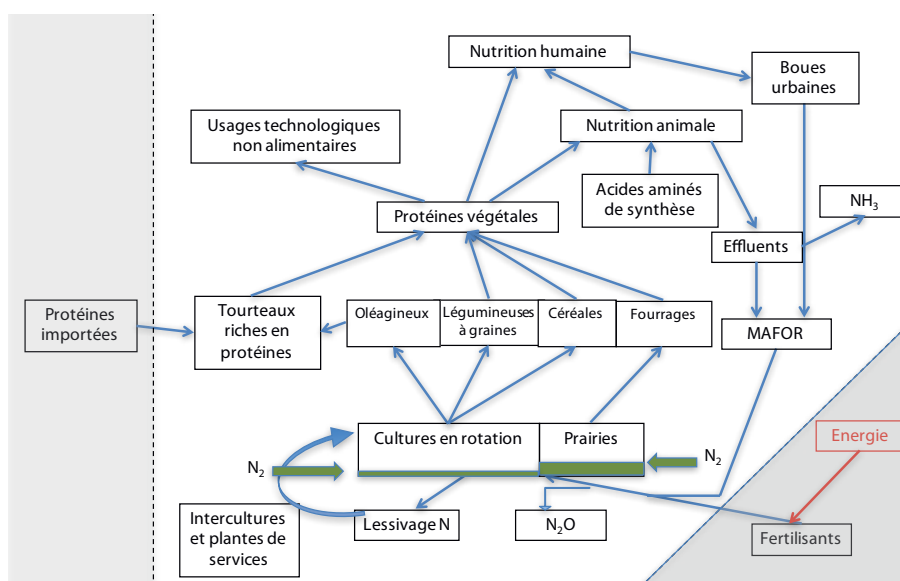
2. Le marché mondial des protéines végétales

Sur les marchés mondiaux, des changements majeurs se sont produits, en termes d'exportations comme d'importations. Les volumes de protéines échangés ont régulièrement augmenté sous forme soit de tourteaux de soja, soit de céréales. La Chine est désormais l'acheteur majeur sur le marché du soja avec 73,8 Mt de fèves équivalant à 27 Mt de protéines brutes et elle achète aussi d'autres produits riches en protéines comme les foins et la

Figure 3

Représentation schématique de la production de protéines utilisées en nutrition humaine et en alimentation animale, ainsi que des impacts environnementaux liés à la cascade de l'azote

La zone centrale de la figure représente la production de protéines sur le territoire national à partir de cultures en rotation ou de prairies, leur utilisation en alimentation animale et humaine et, potentiellement, pour des usages non-alimentaires. Après consommation, les protéines sont métabolisées et produisent des effluents et des boues dont une partie, les matières fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR), peut être utilisée comme amendement organique, avec possibilité de pertes d'ammoniac. Lors de l'épandage d'engrais azoté d'origine organique ou chimique, une partie de l'azote peut être perdue par émission de protoxyde d'azote. Les pertes par lessivage peuvent être limitées grâce à l'ajustement de la fertilisation aux besoins des cultures et à l'utilisation d'intercultures et de plantes de service. Les zones grisées du graphique représentent les entrées exogènes d'azote dans le système.



luzerne déshydratée. Ceci est lié à l'explosion des productions animales nationales, en particulier laitière depuis une quinzaine d'années. L'Amérique du Nord et l'Amérique latine sont les grandes régions exportatrices de tourteaux de soja, mais, là aussi, les évolutions sont fortes en lien avec le développement des productions animales.

3. France : les ressources protéiques végétales utilisées en alimentation humaine et animale

En France, l'analyse des ressources protéiques utilisées en nutrition humaine et en alimentation animale révèle que 1,5 Mt de protéines brutes est issu de tourteaux de soja, essentiellement importé, 0,21 Mt de protéagineux métropolitains, 1,51 Mt d'oléagineux métropolitains et 4,34 Mt de céréales produites et consommées sur le territoire national. Enfin, les prairies et cultures fourragères constituent un pool de presque 9 Mt de protéines végétales dont une partie n'est pas totalement exploitée. Une part importante de toutes ces protéines végétales est utilisée pour alimenter des animaux dont les produits sont ensuite essentiellement destinés à l'alimentation humaine⁷. Toutes ces sources de protéines végétales peuvent alors être caractérisées quant à leur potentiel de production de biomasse et de protéines par hectare, ainsi que par la teneur moyenne en protéines de la biomasse produite qui définit leur utilisation possible. L'analyse prouve aussi que, via l'exportation massive de ses céréales, la France est en fait exportatrice nette de protéines végétales. Cela est totalement contraire à l'idée reçue, mais il faut noter que la production de ces protéines repose largement sur la fertilisation à l'aide d'engrais azotés minéraux.

4. Les systèmes de culture métropolitains : fourniture de protéines et coût environnemental

Les évolutions des systèmes de culture métropolitains sont au cœur de l'exploitation du potentiel de production de protéines. Les changements d'allocation des sols, en particulier en relation avec les légumineuses à graines dont les surfaces ont régulièrement diminué en Europe depuis une vingtaine d'années, mais aussi la place des systèmes de polyculture – élevage offrent des clés pour comprendre la situation actuelle. Les dernières décennies se sont caractérisées par la simplification des rotations (avec la réduction des légumineuses à

graines dans les grands bassins céréaliers) et par la séparation spatiale des zones de productions animales et végétales qui rend délicate la valorisation des effluents d'élevage et le bouclage des cycles de l'azote, du phosphore et du potassium. Cette séparation conduit, d'une part, à de fortes importations d'aliments et à la concentration des effluents dans les zones d'élevage et, d'autre part, à un besoin important d'engrais azotés dans les zones de grandes cultures annuelles.

Le processus de production végétale conduit à coupler les cycles du carbone (C) et de l'azote (N), puisque ces deux atomes se trouvent liés dans les mêmes molécules que sont les protéines. Sous cette forme, C et N présentent une grande stabilité et n'ont pas d'impact sur le milieu. À l'inverse, la consommation des produits végétaux par les animaux et les humains conduit massivement à découpler le carbone et l'azote puisqu'il y a, d'une part, émission de gaz carbonique du fait de la respiration et, d'autre part, rejet d'azote sous différentes formes, soit dans l'urine, soit dans les matières fécales. Ceci rend l'azote plus labile, avec des impacts potentiels sur le milieu.

Parmi les grandes options fréquemment évoquées pour corriger les conséquences des changements de la localisation des productions agricoles figure la réintroduction des productions animales dans les grandes plaines céréalières car elle permettrait de recoupler les cycles C et N⁸. Toutefois, elle pose de nombreuses questions concernant l'acceptabilité sociale de la présence d'animaux et d'élevages dans des zones qui en sont aujourd'hui totalement dépourvues.

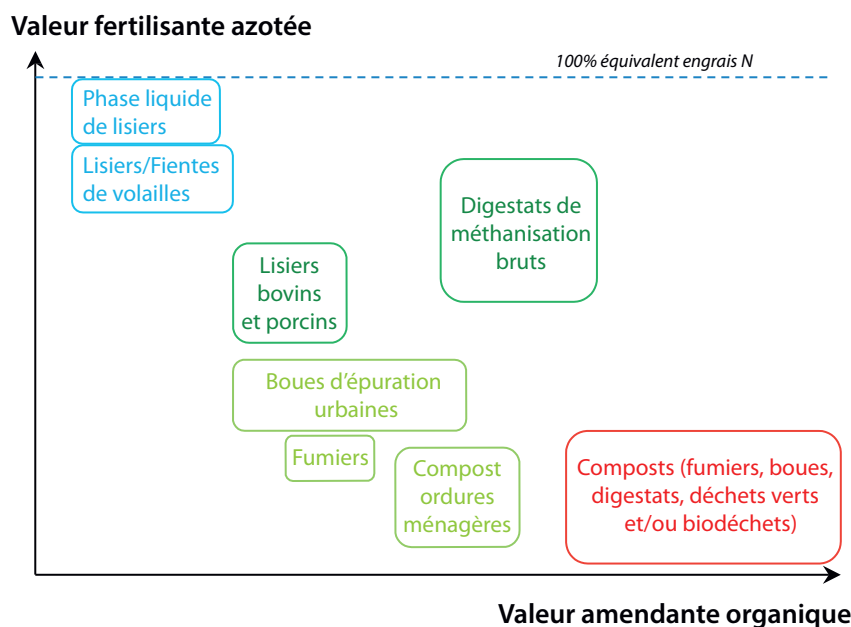
Au cœur des changements se trouve aussi la place des légumineuses, fourragères et à graines, qui jouent un rôle essentiel à la fois par leur capacité à produire des protéines, dans les feuilles et les graines, mais aussi par cette caractéristique unique de fixation symbiotique de l'azote, par symbiose avec des bactéries du sol (*Rhizobium* et *Bradyrhizobium*). Ces espèces constituent un atout majeur pour des systèmes agricoles et alimentaires durables⁹. Au regard de l'alimentation animale, elles permettent de construire des rations équilibrées tant pour les ruminants laitiers ou allaitants que les monogastriques. En alimentation humaine, leur composition présente plusieurs avantages diététiques, mais leur retour dans les assiettes se fera au prix d'innovations technologiques sensibles, sous

7 - Nous ignorons ici les quantités de protéines utilisées en alimentation pour les animaux de compagnie (*pet foods*). Cette utilisation est assez limitée (mais non négligeable) car elle est essentiellement couverte à partir de co-produits animaux, évitant ainsi des pertes alimentaires.

8 - Garnier et al., 2014 ; Bonaudo et al., 2014.

9 - Schneider et Huyghe, 2015.

Figure 4
Valeur agronomique relative des matières fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR)
 (Source : Houot et al., 2014)



forme d'ingrédients ou de produits entiers éloignés de l'image traditionnelle et adaptés à une cuisine rapide ou à la restauration hors foyer. Au regard du cycle de l'azote, les légumineuses permettent de se passer d'engrais azotés et un moindre recours en cas d'association avec une graminée ou une céréale et, pour les cultures suivantes, grâce aux reliquats. Elles permettent aussi de réduire les émissions de protoxyde d'azote qui se produisent lors de l'épandage d'engrais ou d'amendements azotés. En effet, seul l'enfouissement des résidus, riches en azote, conduit à l'émission de N_2O .

Dans ce contexte, le changement d'allocation des sols offre donc un levier pour accroître la capacité à produire des protéines, tout en réduisant l'impact environnemental. Le développement des cultures intermédiaires et des plantes de service¹⁰ consti-

tue une option nouvelle puisqu'elles permettent à la fois de limiter les lessivages de nitrates en excès et de faire entrer de l'azote symbiotique dans les successions culturales. Cette analyse des systèmes de production permet d'illustrer les différentes sources de fertilisation azotée (minérale, organique, symbiotique) et de documenter les impacts environnementaux potentiels liés à celles-ci : à savoir la mobilisation d'énergie fossile pour la synthèse et, d'autre part, les émissions de N_2O liées à l'épandage d'engrais ou l'enfouissement d'un couvert végétal riche en azote. Une attention particulière doit être portée aux *produits résiduaire organiques* (PRO), aussi appelés *matières fertilisantes d'origine résiduaire* (MAFOR). L'expertise scientifique collective menée par l'Institut national de la recherche agronomique (INRA), le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) et l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (IRSTEA)¹¹ permet de caractériser l'importance de ce gisement, mais aussi d'en illustrer la très grande diversité à la fois entre catégories et au sein de chacune d'entre elles (Figure 4). La meilleure caractérisation des valeurs fertilisante et amendante

10 - Le terme *Plantes de service* est encore peu utilisé. Il recouvre l'ensemble des usages où les végétaux sont utilisés pour assurer des services environnementaux (protection des sols contre le lessivage de nitrates, contre l'érosion, lutte contre les mauvaises herbes, apport alimentaire aux pollinisateurs, fixation d'azote). On identifie trois grandes catégories : 1) les cultures intermédiaires sont des cultures implantées entre deux cultures de rente 2) les plantes compagnes sont semées en association avec une culture de rente pour apporter un ou plusieurs services spécifiques comme, par exemple, des légumineuses gélives semées avec du colza d'hiver pour lutter contre les mauvaises herbes en automne et apporter de l'azote au printemps 3) les mulchs, vivants ou morts, qui sont un couvert ou un paillage dans lequel on sème la nouvelle culture. Les principales espèces utilisées en plantes de service sont des crucifères (moutarde et radis), des graminées (avoine rude), la phacélie ou des légumineuses (vesces, fenugrec, serradelle).

11 - Houot et al., 2014.

constitue un enjeu important pour l'avenir et la gestion globale de l'azote.

5. Des protéines pour nourrir les hommes ou nourrir les animaux : Besoins alimentaires humains et besoins spécifiques de certaines catégories de population

Le schéma global proposé dans cet article permet de consolider les flux entre productions animales et végétales et à destination de l'alimentation humaine. La *Figure 5* illustre le fait qu'aux niveaux mondial comme nationaux, la quantité de protéines entrant dans l'alimentation humaine est limitée au regard de l'ensemble des protéines et de l'azote circulant. Il est donc essentiel de considérer les particularités des protéines utilisées en alimentation humaine et d'analyser leurs sources et leurs utilisations au regard de leurs spécificités nutritionnelles. Ceci différencie la question des protéines de la problématique de l'énergie. En effet, en alimentation humaine, l'énergie peut être apportée par une large diversité d'aliments : glucides (sucres et amidon), lipides (huile et acides gras) et même protéines. Ces caractéristiques uniques des protéines permettent de comprendre les apports des protéines d'origine animale et végétale, les besoins spécifiques de certaines catégories de populations, et de cerner comment des innovations technologiques offrent des solutions originales.

6. L'élevage contribue à la production durable de protéines

La transformation des protéines végétales en protéines animales constitue l'un des points clés de notre problématique. Cette étape permet de produire des protéines laitières ou carnées de très haute valeur alimentaire, avec notamment une concentration en acides aminés essentiels (acides aminés soufrés, lysine, tryptophane) proche des besoins optima pour l'alimentation humaine. Mais cette étape induit une forte augmentation des besoins en protéines végétales car les efficacités de conversion sont faibles, voire très faibles selon les types de produits animaux. De nombreux travaux sont conduits dans le monde pour estimer avec précision les efficacités de conversion entre les différents produits animaux et entre systèmes de production pour un même produit¹². Des marges de manœuvre et de progrès existent qu'il convient de bien caractériser.

12 - Peters et al., 2014.

7. Et si la France passait au régime « bio, local et demitarien » ? Un scénario radical d'autonomie protéique et azotée de l'agriculture et de l'élevage et de sobriété alimentaire

L'analyse globale proposée par des chercheurs¹³, basée sur la compilation des données nationales de production et des échanges issues de la FAO, montre l'importance des flux entrants, en particulier en provenance des engrais azotés produits par l'industrie chimique, des pertes considérables vers les hydrosystèmes et l'importance des échanges mondiaux (*Figure 5*). Sur la base de cette même approche, d'autres experts¹⁴ ont évalué les efficacités globales d'utilisation de l'azote¹⁵ à l'échelle de plusieurs pays depuis 1961, date de première disponibilité des données de la FAO. Leurs travaux montrent que la situation française s'est globalement améliorée puisque l'efficacité globale a progressé de moins de 30 % en 1980 à plus de 60 % à la fin des années deux mille. L'importance d'opérations comme Ferti-Mieux, lancées en 1991 par l'Association nationale pour le développement agricole (ANDA) à la demande du ministère de l'Agriculture, ont permis aux agriculteurs, souvent en groupes, de mieux raisonner leurs apports en les ajustant aux besoins des cultures. *A contrario*, dans les pays en voie d'intensification en particulier de leur élevage comme l'Inde et surtout la Chine, la situation se dégrade, avec des efficacités globales inférieures à 40 % à la fin des années deux mille. La clé de voûte de l'ensemble du dispositif est bien la quantité de protéines consommées quotidiennement par habitant de la planète et sa répartition entre protéines animales et protéines végétales. Comme le disait l'historien Fernand Braudel en 1979 à propos de l'alimentation durant l'ère pré-industrielle « *Céréales ou viande, l'alternative dépend du nombre des hommes* ». Les modèles alternatifs explorés ont l'avantage de fournir de grands repères : qu'il s'agisse de la prospective AgriMonde produite en 2010 par l'Inra et le Cirad¹⁶ et de son prolongement, la prospective AgriMonde - Terra produite en 2016 (intégrant l'usage des terres dans les scénarii d'évolution de

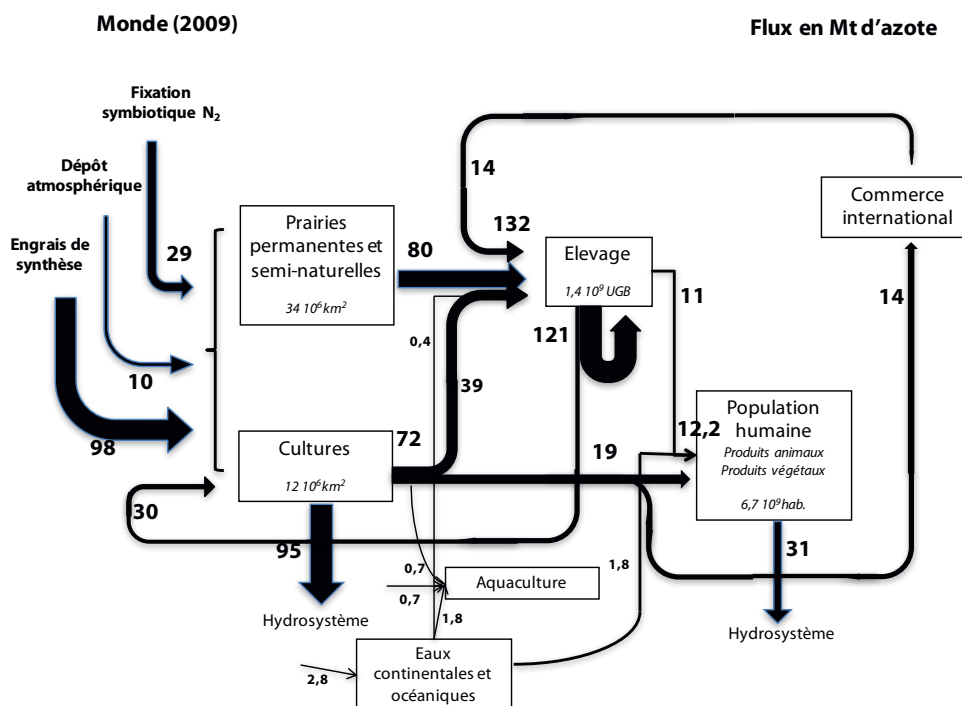
13 - Billen et al., 2014.

14 - Lassaletta et al., 2014.

15 - Dans le papier de Lassaletta et al. (2014), l'efficacité d'utilisation de l'azote est calculée à partir de la quantité de protéines végétales récoltées (Y, exprimée en kg N / ha / an) et de la quantité totale d'intrants azotés sur les surfaces cultivées, hors prairies permanentes, apportée par les engrais de synthèse, les amendements organiques, la fixation symbiotique et les dépôts atmosphériques (F, exprimée également en kg N / ha / an). L'efficacité d'utilisation de l'azote est alors Y / F.

16 - Paillard et al., 2010.

Figure 5
 Représentation des flux d'azote au sein des systèmes agricoles et alimentaires
 (Source : adapté d'après Billen et al., 2014)



la sécurité alimentaire mondiale) ou du modèle *bio – local – demitarian*, ce scénario non prescriptif présenté dans un article spécifique du dossier, qui permet d'analyser les conséquences d'un modèle alimentaire très différent sur l'ensemble des composants du système que nous avons considéré.

8. Perspectives pour des systèmes protéiques et azotés plus durables

La problématique des innovations pertinentes par rapport à la question des protéines peut être considérée au travers de cette analyse globale. Ceci constitue l'article de conclusion de notre dossier. Il faut s'interroger sur les progrès possibles au sein du système tel que décrit ici. Le fractionnement de la matière première agricole, avec une valorisation économique optimale des différentes fractions, notamment la fraction protéique, doit être analysé. De même, modifier le cycle des cultures constitue une option fertile en possibilités, en particulier les cultures intermédiaires et plantes de service ou de nouvelles cultures si elles peuvent faire l'objet d'une valorisation de la biomasse par fractionnement. Ainsi, le quinoa (*Chenopodium quinoa*) fait-il l'objet de travaux en France et à

l'étranger en raison de la qualité de ses graines pour une utilisation en alimentation humaine¹⁷. De nouvelles sources de protéines pourraient être exploitées. La production à partir d'insectes fait l'objet d'une certaine fascination médiatique et, surtout, de nombreux travaux de recherche¹⁸. La production de protéines à partir d'algues¹⁹ aurait pour conséquence de modifier profondément la contrainte posée par la limitation des terres arables disponibles. Ceci reste un champ ouvert, mais très intéressant pour la France qui bénéficie d'un espace maritime considérable. Les possibilités d'amélioration en alimentation animale ont déjà été évoquées. Au niveau de la transformation des protéines, de nombreuses innovations permettent de reconsidérer l'ensemble du périmètre et d'en améliorer l'efficacité globale. Ainsi, l'exemple des protéines souligne-t-il à quel point il est indispensable de travailler la synergie entre le secteur de la production agricole et des industries agro-alimentaires.

17 - Graf et al., 2015 ; Ruiz et al., 2014.

18 - FAOWUR, 2013 ; Ooninck et al., 2010.

19 - Bennamoun et al., 2015 ; Viganì et al., 2015.

Références bibliographiques

- Bennamoun L., Afzal M.T., Leonard A., 2015. Drying of alga as a source of bioenergy feedstock and food supplement - a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50, 1203-1212.
- Billen G., Lassaletta L., Garnier J., 2014. A biogeochemical view of the global agro-food system : Nitrogen flows associated with protein production, consumption and trade. *Global Food Security* 3, 209–219.
- Bonaudo T., Bendahan A.B., Sabatier R., Ryschawy J., Bellon S., Léger F., Magda D., Tichit M., 2014, Agroecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems. *European Journal of Agronomy* 57, 43-51.
- Dornburg V., 2004. Multi-functional biomass systems. Utrecht University. The Netherlands. PhD Dissertation.
- FAO/ Wur, 2013. Edible insects: future prospects for food and feed security. Rome, FAO.
- Fraanje P.J., 1997. Cascading of pine wood. *Resources, Conservation and Recycling* 19: 21-28.
- Garnier J., Passy P., Anglade J., Billen G., Benoit M., Schott C., Lassaletta L., Silvestre M., 2014, Reconnecting crop farming and cattle breeding for a reduction of nitrogen losses in an intensive agricultural watershed, Proceedings of the 18th Nitrogen Workshop – The nitrogen challenge : Building a blueprint for nitrogen use efficiency and food security, Lisboa. Portugal, pp. 427-428.
- Graf B.L., Rojas-Silva P., Rojo L.E., Delatorre-Herrera J., Baldeon M.E., Raskin I., 2015. Innovations in health value and functional food development of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 14, 431-445. DOI: 10.1111/1541-4337.12135.
- Houot S., Pons M.N., Pradel M. Savini I., Tibi A., 2014. Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier. Impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques. Expertise scientifique collective INRA-CNRS-Irstea. Synthèse du rapport d'expertise. 108 pages.
- Keegan D., Kretschmer B., Elbersen B., Panoutsou C., 2013. Cascading use: A systematic approach to biomass beyond the energy sector. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 7, 193-206.
- Lassaletta L., Billen G., Grizzetti B., Anglade J., Garnier J., 2014. 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland. *Environmental Research Letters* 9, 10, Article Number : 105011, DOI: 10.1088/1748-9326/9/10/105011.
- Lauvergeon A. (Commission sous la présidence de), 2013. Un principe et sept ambitions pour l'innovation. 58 pages. http://www.social-sante.gouv.fr/IMG/pdf/_doc25_Lauvergeon_entier.pdf
- Mathijs E., Griffon M., Carus M., Last L., 2015. Sustainable agriculture, forestry and fisheries in the bioeconomy. A challenge for Europe. 4th Scar Foresight. 141 pages.
- Mouillet Y, 2002. Désintensification et autonomie en protéines. *Dossier de l'Environnement* 24, 125-128.
- Oonincx, D.G.A.B., van Itterbeeck J., Heetkamp M.J.W., van den Brand H., van Loon J., van Huis A., 2010. An exploration on greenhouse gas and ammonia production by insect species suitable for animal or human consumption. *Plos One*, 5(12): e14445.
- Paillard S., Treyer S., Dorin B., 2010. Scénarios et défis pour nourrir le monde en 2050. Éditions Quae, 296 pages.
- Ruiz K.B., Biondi S., Oses R., Acuna-Rodriguez I.S., Antognoni F., Martinez-Mosqueira E.A., Coulibaly A., Canahua-Murillo A., Pinto M., Zurita-Silva A., Bazile D., Jacobsen S.E., Molina-Montenegro M.A., 2014. Quinoa biodiversity and sustainability for food security under climate change. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 34, 349-359.
- Schneider A., Huyghe C., 2015. Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables. Quae Editions, Versailles, 425 pages.
- Vigani M., Parisi C., Rodriguez-Cerezo E., Barbosa M.J., Sijtsma L., Ploeg M., Enzing C., 2015. Food and feed products from micro-algae : market opportunities and challenges for the EU. *Trends in Food Science & Technology* 42, 81-92. DOI: 10.1016/j.tifs.2014.12.004.