



L'élevage contribue à la production durable de protéines

La contribution réelle des animaux d'élevage à la production de protéines doit s'évaluer en tenant compte des protéines végétales qu'ils consomment et qui pourraient être directement consommées par l'homme

Mots-clés : Elevage, Protéines, Efficience

Auteur : Jean-Louis Peyraud^{1,2}

¹ INRA, UMR Pegase, 35590 St-Gilles, France ; ² Agrocampus Ouest, UMR Pegase, 35590 St-Gilles, France

* E-mail de l'auteur correspondant : jean-louis.peyraud@inra.fr

L'affirmation selon laquelle l'alimentation animale est en compétition avec l'alimentation humaine, doit être fortement nuancée par le fait qu'une grande partie des protéines consommées par les animaux ne peuvent pas être consommées directement par l'homme et que les protéines animales ont une valeur nutritionnelle plus élevée. La production de viande valorisant beaucoup d'herbe est peu en compétition avec l'alimentation humaine voire même peut contribuer positivement à la sécurité protéique. Les marges de progrès pour accroître l'efficience des productions animales sont discutées dans cet article.

Résumé :

Les productions animales sont souvent remises en cause pour leur inefficacité à utiliser les protéines végétales, ce qui est en apparence confirmé par des chiffres bruts. Il faut ainsi entre 2 et 10 kg de protéines végétales pour faire 1 kg de protéines animales. Mais ces chiffres globaux ignorent que les protéines de viande ou de lait ont une meilleure valeur nutritionnelle que les protéines végétales et qu'il faut donc en manger 20 à 25% de moins pour couvrir les besoins protéiques journaliers. Ils ignorent surtout que les animaux consomment des protéines non valorisables directement en alimentation humaine et des fourrages produits sur des surfaces sur lesquelles il n'est pas possible de produire des cultures annuelles. La contribution réelle des animaux à la sécurité protéique doit donc s'évaluer par la comparaison entre les protéines produites et les protéines d'origine végétales qui seraient consommables en alimentation humaine mais sont consommées par les animaux. La production de viande bovine valorisant beaucoup d'herbe est globalement neutre, c'est-à-dire qu'elle produit autant de protéines consommables par l'homme qu'elle ne consomme de protéines végétales qui auraient pu être directement consommées par l'homme, tandis que les systèmes bovins viande utilisant beaucoup de concentrés pour extérioriser le potentiel de production produisent en général un peu moins de protéines qu'ils ne consomment de protéines valorisables en alimentation humaine. Ces résultats, mettent en évidence une tension forte entre la nécessité d'avoir des croissances des animaux rapides pour satisfaire un besoin de production de volumes importants pour satisfaire à la demande croissante de protéines animales et la nécessité de limiter la compétition entre l'animal et l'homme pour l'accès aux protéines. Des marges de progrès existent pour améliorer l'efficience de l'utilisation des protéines, notamment par le recours à des sources alternatives de protéines et par une complémentarité bien organisée entre production animale et végétale à l'échelle des territoires pour maximiser la production de protéines consommables. L'ensemble de ces points est discuté dans cet article.

Abstract: Farming contributes to the sustainable production of proteins

Animal production is often incriminated for its inefficacy in using plant proteins, which seems to be confirmed by raw statistics. It takes about 2 and 10 kg of plant proteins to make up about 1 kg of proteins of animal origin. But these overall numbers ignore that proteins from meat or milk have a greater nutritional value than plant proteins and that it is necessary to eat 20 to 25% more to cover daily protein needs. They ignore that animals eat plant proteins that cannot be used in human foods and they graze on surfaces that cannot be used to produce annual cultures. The real contribution of animals to protein safety must therefore be evaluated by comparing the proteins produced and the plant proteins that can be consumed by humans but which are consumed by animals. Meat production with grazing cattle is overall neutral; that is to say it produces as much proteins consumable by human it consumes vegetable proteins that could have been directly used as human food. When cattle are fed large amounts of concentrate in order to attain their full production potential they generally produce slightly less protein than they consumed valuable protein for human food. These results underline an important tension between the necessity to have animals with rapid growth to satisfy a growing need for animal proteins and the necessity to limit competition between animals' and human's need for proteins. There is still room for progress to improve the efficiency of protein use notably by using alternative protein sources and by well-organized complementarity between plant and animal production on the regional scale in order to maximize the production of proteins that can be consumed. These points are discussed in this article.

INTRODUCTION

La production animale procure un tiers des protéines consommées par l'homme à l'échelle de la planète (Herrero *et al.*, 2009) et beaucoup plus dans les pays développés mais elle utilise 75% des surfaces agricoles (Foley *et al.*, 2011), consomme 35% des grains produits (Alexandratos et Bruinsma, 2012) et émet 14,5% des gaz à effet de serre d'origine anthropique (les émissions de la faune sauvage ne sont pas considérées) (Gerber *et al.*, 2013). Dans le même temps, toutes les perspectives tablent sur un fort accroissement de la demande mondiale en produits carnés et laitiers (FAO, 2009 ; Alexandratos et Bruinsma, 2012). De nombreux auteurs proposent de réduire la demande pour les protéines animales (Garnet, 2013 ; Eisler *et al.*, 2014) principalement dans les pays développés où la consommation est élevée (Bonhommeau *et al.*, 2013) au double titre de la réduction de la dégradation de l'environnement et d'une amélioration de la santé des populations. Cette solution simple en apparence, outre le fait qu'elle passe rapidement sur nombre d'enjeux d'occupation

et de vitalité des territoires et d'échanges commerciaux entre pays, suppose que les protéines animales soient facilement substituables par des protéines végétales ce qui n'est pas le cas dans l'état actuel des technologies.

Face à ce constat, l'enjeu de la ressource en protéines apparaît comme crucial. Une idée récurrente part du principe que les animaux d'élevage consomment toujours beaucoup plus de protéines végétales qu'ils n'en restituent sous forme de protéines animales et que, de ce fait, la production animale exerce une pression importante sur la disponibilité des ressources (Stehfest *et al.*, 2009). Qu'en est-il réellement de la compétition entre alimentation animale et humaine ? Est-ce que l'affirmation selon laquelle les productions animales sont inefficaces s'applique partout et tout le temps ? La réalité n'est-elle pas plus complexe qu'il n'apparaît de prime abord ? Quelles sont les voies pour accroître l'efficacité des productions animales ? Voilà autant de questions sur lesquelles ce texte tente d'apporter un éclairage.

I. LE CHALLENGE DE LA NUTRITION HUMAINE : QUALITE DES PROTEINES ANIMALES

Les protéines remplissent des fonctions vitales dans l'organisme : protéines de structure, muscles, enzymes, hormones, récepteurs etc. Elles sont renouvelées en permanence ce qui conduit à des besoins protéiques élevés (0,8 g/kg poids vif et par jour, AFSSA, 2007). Parmi les 22 acides aminés constitutifs des protéines, 9 ne peuvent pas être synthétisés par l'organisme humain et doivent être apportés par l'alimentation. Il s'agit des acides aminés indispensables (AAI : Histidine, Isoleucine, Leucine, Lysine, Méthionine, Phénylalanine, Thréonine, Tryptophane, Valine).

Les sources de protéines alimentaires se distinguent en conséquence par leur aptitude à satisfaire quantitativement et qualitativement nos besoins en AAI. Les produits animaux se caractérisent par leur richesse en protéines. Les viandes et abats contiennent, dans leur matière sèche, 70% de protéines ce qui est très supérieur aux teneurs des graines oléagineuses ou protéagineuses (32% et 25% respectivement), aux céréales et pâtes (15% au maximum) et aux pommes de terre ou légumes verts (10%). Les protéines de viande se distinguent aussi par leur teneur élevée en AAI (43 à 45% de l'ensemble des AA) qui est supérieure à celle des graines protéagineuses (40%) et surtout des céréales et pomme de terre (moins de 35%). Globalement, la composition en AAI de la viande correspond aux besoins de l'homme tels qu'ils ont pu être estimés par l'AFSSA (2007). Les végétaux ont pour leur part une composition plus déséquilibrée en AAI, les céréales présentant des teneurs limitantes pour l'alimentation de l'homme notamment en Lysine et les légumineuses en acides aminés soufrés (méthionine + cystine). Les protéines de viande se distinguent aussi par leur digestibilité élevée qui est de 94% ou plus (Gaudichon *et al.*, 2002), ce qui est très supérieur à celle des protéines des graines qui est de 90% pour le blé, le pois et le soja (Mariotti *et al.*, 1999) et de 84% pour le colza. En outre, les protéines de viande n'induisent pas de réaction notable au niveau du tractus digestif susceptible d'accroître les pertes de protéines endogènes comme cela peut se produire avec certaines protéines végétales dont les fibres augmentent les pertes endogènes par desquamation des cellules de la paroi

intestinale et qui peuvent contenir des facteurs « antinutritionnels » tels que les lectines qui stimulent la synthèse et la sécrétion de protéines intestinales.

L'évaluation de la qualité nutritionnelle des protéines alimentaires est évaluée par un indice le DIAAS (Digestible Indispensable Amino Acid Score) qui a été proposé par la FAO (2013). Cet indice est calculé à partir de la composition en AAI et de la digestibilité dans l'intestin grêle de chacun des acides aminés indispensables. Toutefois, la digestibilité iléale réelle étant encore très rarement mesurée pour les acides aminés individuels, on utilise souvent la digestibilité iléale globale de la protéine comme valeur moyenne pour tous les acides aminés. Pour chaque AAI, le calcul est effectué en exprimant la teneur en AAI digestible de la protéine en proportion de la teneur du même AAI dans la protéine de référence et l'index DIAAS d'une protéine correspond à la valeur la plus faible de l'ensemble de ses AAI.

Compte tenu de ces différences, les protéines animales se caractérisent par des valeurs nutritionnelles (Tableau 1) beaucoup plus élevées que les protéines végétales, les protéines de soja étant celles qui se rapprochent le plus des protéines animales. Des mélanges de céréales et protéagineux permettent de rééquilibrer partiellement le profil des AAI des sources végétales mais jamais d'atteindre celui des produits animaux.

Ces données montrent, qu'en l'état actuel de la technologie des graines, il faudrait manger des quantités beaucoup plus importantes de protéines végétales que de protéines animales pour couvrir les besoins en acides aminés indispensables de l'organisme humain. Ce facteur nutritionnel doit donc être pris en compte lorsqu'on souhaite comparer les surfaces nécessaires à la couverture des besoins humains, en fonction de l'origine animale ou végétale des protéines. Les protéines de viande ont une meilleure valeur nutritionnelle que les protéines végétales et il faut donc en manger 20 à 25% de moins pour couvrir les besoins journaliers, alors que ces comparaisons ont jusqu'à présent toujours été réalisées sur une base purement volumique.

Tableau 1 : Valeur nutritionnelle des protéines de différentes sources alimentaires pour l'alimentation humaine (indice DIAAS, plus l'indice est élevé, meilleure est la valeur nutritionnelle)

	DIAAS	Premier AA limitant
Viande	134	Leucine
Lait	139	AA soufrés
Œuf	128	Histidine
Soja	102	Lysine
Blé	65	Lysine
Pois	82	AA soufrés

Rappelons aussi que l'apport de protéines animales s'accompagne de celui de plusieurs micronutriments qu'il est difficile de trouver en quantité suffisante dans des aliments végétaux ou qui y sont présents sous des formes moins disponibles en raison de la présence d'inhibiteurs de l'absorption comme les phytases dans le cas du phosphore d'origine végétale. La vitamine A, la vitamine B12, la

riboflavine, le calcium, le fer et le zinc sont des éléments peu présents dans une alimentation végétarienne (sauf utilisation de compléments). En particulier, le fer de la viande présent sous forme hémique est bien mieux absorbé que celui présent dans les végétaux (25% vs moins de 5-10%, AFSSA-CNERNA-CNRS, 2001).

II. LE CHALLENGE DE L'UTILISATION DES RESSOURCES : EFFICIENCE DE LA PRODUCTION DE PROTEINES ANIMALES

II.1. Quelle unité fonctionnelle utiliser pour exprimer l'efficacité protéique des animaux ?

En production de viande, les auteurs rapportent les quantités de protéines consommées au poids de carcasse ou au poids de viande mais aucune de ces unités ne traduit précisément la quantité de protéines valorisables.

La carcasse comprend la viande mais aussi des os et du gras. En donnée moyenne des abattoirs français, elle représente 70% du poids vif à l'abattage pour le porc (carcasse sans la tête et les pieds) et le poulet et 55% chez les ruminants où elle varie notablement selon les races et l'âge à l'abattage. La viande représente 77% du poids de la carcasse chez le porc et 70% pour les bovins soit respectivement 59 et 37% du poids vif chez le porc et les bovins (données France Agri Mer, 2013).

Mais l'abattage des animaux conduit aussi à de nombreux sous-produits (os, viscères, sang, pattes...) regroupés dans le « cinquième quartier » qui représentent des flux importants de protéines (France Agri Mer, 2013). Une partie du cinquième quartier (sang, des abats blancs et rouges, la langue, le museau, etc.) bien que non

comptabilisée dans le poids de la carcasse entre également dans la chaîne alimentaire. Cette fraction peut représenter jusqu'à 35% du poids des protéines du cinquième quartier dans le cas des porcs (charcuterie...) soit 4% du poids vif. Les autres composants du cinquième quartier génèrent des protéines animales transformées (PAT) qui n'entrent pas dans la chaîne alimentaire. Les PAT sont un gisement important de protéines (400 000 t produites par an soit plus de 230 000 t de protéines) qui représente presque 25% de la quantité totale de protéines produites sous forme de viande à l'échelle nationale. Ces protéines sont valorisées dans les aliments pour chiens et chats (73% des débouchés), comme fertilisant (16%) et dans les aliments des animaux terrestres et poisson essentiellement à l'export. Cette fraction échappe à toute évaluation du rendement protéique lorsque celui-ci est rapporté à la carcasse. Ce dernier ne prend pas non plus en compte la production de cuir qui représente 5 à 6% du poids vif chez les bovins.

II.2. L'efficacité globale de la production de protéines animales : un élément qui a créé le débat

L'efficacité azotée (protéique) globale d'un animal correspond au ratio entre les protéines contenues dans les produits et les protéines ingérées. Le reste de l'azote de la ration est rejeté dans l'urine et les fèces. Cette efficacité est aussi parfois exprimée dans les publications par l'inverse du ratio précédent c'est-à-dire par la quantité de protéines végétales consommées pour produire un kg de protéines animales.

Les données d'efficacité azotée globale ont été synthétisées lors de l'expertise collective « Elevage et Azote » (Peyraud et al., 2012). Un porc à l'engraissement recevant une ration à base de céréales et de tourteau de soja, retient environ 30 à 35% de l'azote qu'il ingère ce qui signifie qu'il faut en moyenne 3 kg de protéines végétales pour produire 1 kg de protéine de porc. L'efficacité protéique est plus élevée dans le cas des poulets de chair (40% et même 45% pour les souches les plus productives). Chez ces animaux, il faut donc 2,2 kg de protéines végétales pour faire 1 kg de protéine animale en moyenne.

L'efficacité est beaucoup plus faible dans le cas des poulets label ou bio car ces poulets sont élevés durant 82 j et non 40 j comme les poulets de batterie. Il faut alors 3,4 kg de protéines végétales pour faire 1 kg de protéines animale. L'efficacité est beaucoup plus faible chez les ruminants. Elle est minimale chez l'animal à l'entretien tel que la vache adulte tarie, varie de 10% (génisse laitières) à 20% (jeune bovin viande) en croissance et en finition. Elle est plus élevée chez les vaches laitières en lactation (28 à 30%). Il faut donc entre 5 et 10 kg de protéines végétales pour faire un kg de protéines de bovins. Ces différences s'expliquent avant tout par le fait que les ruminants sont alimentés avec des produits végétaux moins digestibles que les monogastriques car beaucoup plus riches en constituants pariétaux. En effet, du fait de la présence du rumen et des microorganismes qu'il abrite, les ruminants sont capables de digérer des produits végétaux riches en constituants pariétaux non (ou très peu) digestibles par les

monogastriques (comme les fourrages). Le rendement plus faible s'explique par cette étape.

Les progrès de la génétique orientés vers l'accroissement de la productivité des animaux associés aux progrès de la formulation des rations ont conduit à un accroissement important et continu de l'efficacité. Il fallait ainsi en élevage commercial 2,5 kg de protéines végétales pour faire 1 kg de protéines animale dans le cas du poulet standard) dans les années 1980, il en faut seulement 1,9 kg aujourd'hui (SNIA, 2014). De même en élevage porcin, sur la même période la quantité de protéines végétales nécessaire pour faire 1 kg de

protéine animale a diminué de 3,2 à 2,7 kg. Les gains d'efficacité sont quasi linéaires depuis plus de 40 ans. Les marges de progrès sont encore importantes. Ainsi chez le porc à l'engrais, la rétention azotée pourrait s'accroître jusqu'à 60% (soit 1,6 kg de protéines végétales pour faire 1 kg de protéine animale) grâce à une alimentation de précision et multi phases régulant les apports au plus juste avec des régimes parfaitement équilibrés en acides aminés et contenant peu d'acides aminés non indispensables comme le montrent les travaux de nutrition animale (Dourmad *et al.*, 1993 ; Bourdon *et al.*, 1995).

II.3. L'efficacité de la production animale exprimée par rapport aux protéines comestibles

La concurrence entre alimentation animale et humaine pour la production de protéines ne porte en fait que sur les protéines consommées par les animaux et qui pourraient l'être directement en alimentation humaine. C'est la quantité de protéines animales comestibles produites par kg de protéines végétales consommables par l'homme et consommées par les animaux qui doit être utilisée pour avoir une vision réaliste de la contribution de l'élevage à la sécurité alimentaire. C'est « l'efficacité brute » de la production animale. Si cette efficacité est supérieure à 1, le système contribue positivement à la sécurité alimentaire, puisque celui-ci produit plus de protéines animales qu'il n'utilise de protéines végétales. De surcroît, si l'on prend en compte, les différences de valeur nutritionnelle des protéines (voir ci-dessus partie 1) on peut calculer que 1,2 kg de protéines végétales est nécessaire pour produire 1 kg de protéines animales. Dans ce cas, « l'efficacité nette » telle qu'indiquée ci-dessus et qui permet d'assurer la « neutralité de la contribution de l'élevage » s'établit non plus à une valeur de 1,0 mais à un ratio de 0,83 kg de protéines animales produites par kg de protéines végétales.

Pour réaliser ces calculs d'efficacité, la première question est de connaître la proportion de protéines comestibles contenue dans les végétaux. A titre d'exemple, la farine comprend environ 80% des protéines de la graine

initiale et donc la fraction de protéines comestibles par l'homme est en moyenne de 80%. Les données sont très variables entre matières premières mais aussi pour une même matière première. Ces différences résultent en partie du fait que les évaluations ne sont pas encore standardisées mais aussi que ces fractions peuvent être très variables selon les pays (aspects culturels, traditions culinaires) et selon les procédés technologiques utilisés, ceux-ci pouvant eux-mêmes évoluer dans le temps. Ertl *et al.* (2015a, Tableau 2) ont ainsi exprimé cette proportion comestible selon plusieurs scénarios : un scénario faible qui correspond à une utilisation faible, un scénario moyen qui correspond aux données moyennes de la littérature et un scénario élevé correspondant aux valeurs les plus hautes de la littérature et potentiellement atteignables avec des technologies innovantes ou des changements d'habitudes alimentaires (accroissement de la consommation de grains entiers par exemple). Les fourrages et les coproduits des céréales (son, gluten feed, drèches de brasserie...) et de la betterave (pulpes) ne contiennent pas de protéines comestibles. En revanche, une partie des protéines des tourteaux pourraient potentiellement être extraites pour la production de concentrés et d'isolats de protéines à destination de l'alimentation humaine.

Tableau 2 : Pourcentage de protéines contenues dans les produits et éco-produits végétaux et qui sont consommables par l'homme

	Ertl <i>et al.</i> (2015a)		
	Bas	Moyen	Haut
Herbe	0	0	0
Ensilage de maïs	19	29	45
Blé	60	80	100
Orge	40	65	80
Triticale	60	80	100
Son de blé	0	10	20
Drèches	-	-	-
Pulpes de betterave	0	0	0
Pois	70	80	90
Tourteau Colza	30	59	87
Tourteau Soja	50	71	92
Tourteau de Tournesol	14	30	46
Tourteau Coton	-	-	-

Steinfeld *et al.* (1997) ont calculé dans le cadre de la FAO, qu'à l'échelle mondiale, à la fin des années 90, les animaux consommaient 74 millions de tonnes de protéines consommables par l'homme et produisaient 54 millions de tonnes de protéines animales ce qui correspond à une efficacité brute de 0,7 kg de protéines animales pour 1 kg de protéines végétales consommables par l'homme. Comme

indiqué ci-dessus, si l'on prend aussi en compte que la valeur biologique des protéines animales est plus élevée que celles des protéines végétales ce qui conduit à une efficacité nette de 0,9 kg de protéine animale par kg de protéine végétale, il apparaît que du point de vue de la nutrition protéique de l'homme les productions animales seraient

probablement beaucoup moins impactantes qu'il est souvent rapporté dans la littérature.

Bradford *et al.* (1999) ont évalué la contribution des productions animales à la production de protéines alimentaires à partir de plusieurs cas d'étude correspondant à différents pays ayant des systèmes de production très contrastés en terme de niveau d'intensification, de génétique animale et de types d'alimentation (Tableau 3). L'efficacité brute est très variable selon les situations, les productions animales pouvant être en forte compétition avec l'alimentation humaine mais pouvant aussi avoir une contribution très positive à la sécurité alimentaire des populations locales. La production de viande bovine peut avoir une contribution très positive (Argentine, Mexique, Corée, USA) alors même que son efficacité globale est très faible (*cf.* 3.2). Selon les auteurs, cela s'explique par le fait que la phase d'engraissement des animaux basée sur une ration plus riche en concentrés à base de maïs et tourteau de soja (les feedlots) ne dure qu'une période relativement

courte de la vie de l'animal et que ces animaux valorisent du pâturage une grande partie de leur vie, voire essentiellement de l'herbe comme en Argentine. Globalement l'efficacité des animaux est d'autant plus élevée qu'ils valorisent des rations plus pauvres (mais ils sont alors moins productifs). En Egypte et au Kenya, les rations distribuées aux bovins laitiers et aux bovins viande sont essentiellement à base de fourrages de moindre qualité et les ruminants ont une contribution déterminante, l'efficacité tend alors vers l'infini car ces animaux ne mangent pratiquement pas de protéines consommables par l'homme. La FAO (2011) rapporte aussi des efficacités de l'ordre de 20 pour les élevages au Kenya et en Éthiopie. Ce rôle très positif de l'élevage se retrouve aussi dans quelques situations avec les monogastriques. En Égypte et au Kenya, la contribution des volailles à la production locales de protéines est ainsi positive. Les élevages de porcs ont une efficacité qui reste un peu plus faible dans les cas étudiés dans ce travail.

Tableau 3 : Efficacité brute* de conversion des protéines végétales en protéines animales (en kg de protéine animale produite par kg de protéine végétale consommée) calculée en intégrant toutes les protéines ingérées (PT) ou que la fraction consommable par l'homme (PC) – (adapté de Bradford *et al.*, 1999)

	Porcs		Poulets		Bovins viande	
	PT	PC	PT	PC	PT	PC
Argentine	0,07	0,11	0,30	0,69	0,02	6,12
Egypte	0,09	0,43	0,24	1,63	0,02	-
Kenya	0,10	0,39	0,38	2,24	0,01	-
Mexique	0,08	0,21	0,33	0,83	0,02	4,39
Corée du Sud	0,16	0,51	0,34	1,04	0,06	6,57
USA	0,19	0,29	0,31	0,62	0,08	1,19
Californie	0,19	0,30	-	-	-	nd
Nebraska	0,17	0,29	-	-	0,08	0,37

* La quantité de protéines végétales nécessaire pour produire 1 kg de protéines animales correspond à l'inverse des données présentées dans le tableau
nd : non déterminé

Des premiers travaux ont concerné l'évaluation de la contribution des divers types de systèmes d'élevage en Europe. Selon Wilkinson (2011) qui a considéré les principaux systèmes d'élevage anglais, les systèmes laitiers sont les plus efficaces et permettent de produire 1,4 kg de protéines de lait par kg de protéines végétales consommables par l'homme. La production de viande bovine valorisant beaucoup d'herbe est globalement neutre (efficacité de 0,95 rapportée au poids de carcasse) tandis que les systèmes bovins viande utilisant beaucoup de concentrés ont une contribution négative (efficacité brute de 0,3). Les systèmes d'élevage de monogastriques sont intermédiaires avec une efficacité brute de 0,47 pour le poulet, 0,38 pour le porc et 0,43 pour les œufs. Ainsi, les animaux à croissance rapide (monogastriques, bovins avec des rations riches en concentrés) et les poules pondeuses, qui nécessitent des alimentations de plus haute valeur nutritionnelle pour extérioriser leur potentiel de production et donc l'introduction dans leurs rations des sources protéiques qui sont plus en compétition avec celles consommées par l'homme ne sont pas nécessairement plus efficaces que les ruminants valorisant beaucoup de fourrages lorsque l'on considère la contribution à la production de protéines. Ces résultats, mettent en évidence une tension forte entre la nécessité d'avoir des croissances rapides pour satisfaire un

besoin de production de masse et la nécessité de limiter la compétition entre l'animal et l'homme pour l'accès aux protéines, compromis qui apparaît plus facile à réaliser en élevage de bovins lait valorisant des prairies de bonne qualité.

Un des atouts majeurs des ruminants est qu'ils ont la capacité de produire des protéines de haute valeur nutritionnelle à partir de ressources non utilisables par l'homme. Dans un souci de sécurité alimentaire, cette aptitude est à maximiser. Ainsi dans les conditions d'élevage très extensives d'Australie, Wiedemann *et al.* (2015) ont montré qu'avec une finition à l'herbe, la production bovine et ovine produisaient respectivement 7,9 et 2,9 kg de protéines de viande désossée par kg de protéines végétale ingérée par les animaux et consommable par l'homme alors que les systèmes avec finition à l'aliment concentré étaient en compétition pour l'accès aux ressources protéiques végétales (respectivement 0,5 et 0,3 kg protéines animale / kg de protéine végétale consommable). Ces données montrent clairement que la production de viande bovine peut avoir une contribution très positive à la sécurité alimentaire pourvu qu'elle soit réalisée à l'herbe ; alors qu'à l'inverse les systèmes intensifs seront en forte compétition avec l'alimentation humaine pour l'utilisation des céréales.

III. LE CHALLENGE DE L'UTILISATION EFFICIENTE DES SURFACES

La recherche d'une contribution plus importante de l'élevage à la sécurité alimentaire doit intégrer non seulement l'efficacité de conversion des protéines végétales

en protéines animales mais aussi les types de surfaces utilisées et les synergies éventuelles entre productions animales et productions végétales sur les territoires.

III.1. La question de la production de protéines sur les surfaces valorisées par les animaux

Les besoins en surface pour la production animale a fait l'objet de peu de travaux. Quelques travaux synthétisés par de Vries et De Boer (2010) ont calculé les surfaces totales nécessaires pour la production animale par des approches de type analyse de cycle de vie. Dans les systèmes conventionnels, les valeurs moyennes varient de 5 à 6,5 m² pour produire un kg de poulet ou de porc (soit une efficacité brute d'environ 180 à 220 kg de protéines de viande par ha), 4,5 à 6 m² pour un kg d'œuf (soit 210 à 280 kg de protéines d'œuf/ha), 1,2 à 1,5 m² par litre de lait (soit 200 à 250 kg protéines/ha) et 20-25 m²/kg de poids vif de bovin à l'engraissement (soit 30 à 80 kg de protéines de viande/ha). Les systèmes alternatifs nécessitent 15 à 20% de surface en plus pour produire du porc label rouge vs du conventionnel (Basset-Mens et Van der Werf (2005) ou un poulet sur parcours vs un conventionnel (Williams et al., 2006). Les surfaces nécessaires varient presque du simple au double selon les systèmes de production bovine, les systèmes naisseurs nécessitant le plus de surface (Williams et al., 2006). Plus récemment Ermgassen et al. (2016) ont calculé la surface utilisée pour la production porcine sur l'ensemble du cycle de production (élevage des truies, des porcelets et engraissement) pour 5 pays européens qui représentent les deux tiers de la production européenne (Allemagne, Espagne, Danemark, France et Pologne). Ces auteurs arrivent à des surfaces plus faibles que dans l'article de De Vries et De Boer et qui sont peu variables entre les pays. Il faut en moyenne 4 m²/kg porc (variation de 3,6 à 4,3), ce qui correspond à une production d'environ 300 kg de protéines consommables/ha (viande et une fraction du cinquième quartier – voir 2.1) auquel il convient d'ajouter une trentaine de kg de protéines qui seront valorisées sous forme de PAT (voir 2.1 concernant la valorisation des différentes protéines du porc).

Par comparaison 1 ha de blé produisant 8 t de MS à 12% protéines ou 1 ha de pois destiné à la conserverie produisant 3 t MS à 22% de protéines produisent respectivement 780 et 540 kg de protéines consommables par l'homme/ha car en moyenne 20% des protéines produites n'entrent pas dans la chaîne alimentaire (c'est le cas des protéines du son notamment qui ne sont pas comestibles). Cette différence de productivité est également à pondérer par le fait que ce sont des protéines ayant une valeur nutritionnelle de 20 à 25% plus faible (Tableau 1), ce qui conduirait à une efficacité nette de 585 et 405 kg de protéines consommables/ha pour le blé et le pois, respectivement. Au final, le potentiel nourricier des surfaces reste plus élevé en terme de rations homme-jour pour les cultures que pour l'élevage de monogastrique mais les différences sont beaucoup plus faibles que ne le laisse apparaître des calculs sommaires.

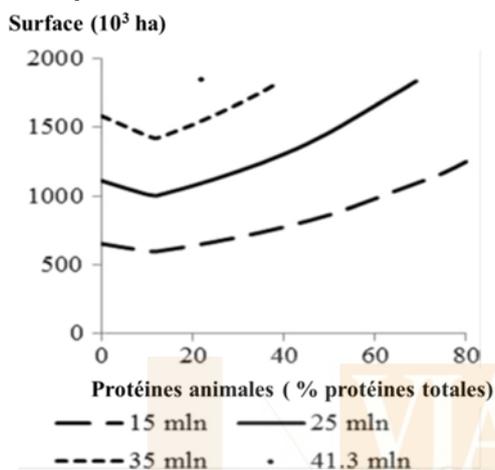
Dans le cas des ruminants, les calculs précédents prennent en compte toutes les surfaces, y compris celles sur lesquelles il n'est pas possible de produire des cultures annuelles alors que les ruminants peuvent contribuer à la sécurité alimentaire en valorisant des surfaces herbagères non utilisables pour d'autres productions alimentaires ou qui conduiraient à des rendements très faibles pour des cultures annuelles. Dans ce cas, ils ne sont pas en compétition avec la production de protéines végétales. A l'échelle de la planète, 3,35 milliards d'ha sont ainsi valorisés (Serré et Steinfeld, 1996) par plus de 360 millions de bovins et 600 millions de petits ruminants qui fournissent 25% des produits animaux. Dans les conditions européennes, les prairies permanentes et les landes et parcours couvrent 73 millions d'hectares soit 40% de la surface agricole utile (Eurostat, 2009). En France, les prairies permanentes représentent plus de 11 millions d'ha et sont notamment à la base de l'activité agricole de toutes les zones de montagne humides.

III.2. Complémentarité entre production animale et végétale à l'échelle des territoires

Au-delà de la comparaison de la productivité des surfaces, il convient d'analyser à l'échelle des territoires les complémentarités entre productions animales et végétales pour accroître la conversion de la biomasse totale produite en protéines comestibles. Van Kernebeck et al. (2014) ont simulé par programmation linéaire la surface nécessaire pour nourrir une population donnée en fonction de la proportion de protéines animales dans l'alimentation dans le contexte des Pays Bas avec un régime typique du pays à base de blé, de tubercules (pomme de terre, betterave), de haricot, de lait et viande de ruminant et de porc. Les résultats (Figure 1) montrent que la surface est utilisée plus efficacement lorsque les productions animales couvrent 12% des apports protéiques totaux journaliers pour nourrir une population de 15 ou 25 millions d'habitants. En d'autres termes, une alimentation sans aucun produit animal conduit à réduire l'efficacité d'utilisation du territoire notamment du fait que les coproduits des végétaux ne sont pas valorisés pour produire des protéines utilisables en alimentation humaine.

Au-delà de 12% de protéines animale dans l'alimentation de la population, des cultures supplémentaires doivent être produites pour nourrir les animaux ; à 25% de protéines animales dans la ration on retrouve le besoin en surface nécessaire pour alimenter une population végétalienne et à 50% de protéines animales dans l'alimentation de la population le besoin en surface s'accroît de 25%. Par contre, si la population s'accroît fortement (40 millions d'habitants) les besoins alimentaires ne peuvent être couverts qu'en utilisant en plus des terres les plus fertiles, des surfaces non valorisables par des productions végétales, et qui ne peuvent être valorisées que par des animaux (ruminants) sans compétition avec les cultures. De façon contre intuitive, la couverture des besoins de la population importante conduit alors à accroître légèrement la part de protéines animales dans l'alimentation. D'autres travaux ont aussi rapporté que des régimes végétariens pouvaient nécessiter plus de surface pour nourrir la population que des systèmes comportant une proportion limitée de viande (Peters et al., 2007).

Figure 1 : Surface nécessaire pour nourrir une population donnée (respectivement 15, 25, 35 et 41,3 millions d’habitants) en fonction de la part de protéines animales dans l’alimentation (Van Kernebeek et al., 2014)



Ces simulations montrent que l’évaluation de la contribution de l’élevage à la sécurité alimentaire dépasse la seule évaluation de son efficacité et il y a lieu de rechercher les conditions d’une meilleure complémentarité entre les filières de productions pour valoriser au mieux les terres agricoles à des fins de production alimentaires tout en minimisant les

impacts de la production sur l’environnement. Les équilibres et modalités de production doivent être raisonnés à l’échelle locale pour prendre en compte les spécificités en termes de potentiel de production des milieux, des infrastructures de communication et la présence de bassins de consommation.

III.3. Complémentarité entre production animale et végétale à l’échelle des territoires

Nourrir les animaux essentiellement à partir de ressources non utilisables en alimentation humaine peut être vu comme une évolution intéressante d’un point de vue de la sécurité alimentaire mondiale. Les données de Ertl et al. (2015b) montrent qu’il est techniquement possible de produire du lait uniquement à partir d’herbe conservée et de coproduits de céréales sans utiliser d’amidon pour des vaches à niveau de production modéré (27 kg/jour). C’est beaucoup plus difficile en élevage de monogastrique. La question est alors de déterminer quel niveau de production animale peut être atteint compte tenu de la disponibilité des ressources, quel type de production animale peut se développer, avec quel type de système de production et les limites d’un tel scénario.

Dans le cadre d’une étude pour la FAO, Schader et al. (2015) ont simulé au niveau mondial différents scénarii correspondant à des parts croissantes de protéines issues de coproduits non utilisables en alimentation humaine dans l’alimentation des animaux avec l’objectif de maintenir les apports énergétiques et protéiques moyens de la population (Tableau 4). Comparativement à un scénario tendanciel qui

maintiendrait en l’état l’alimentation des animaux, un scénario maximisant l’utilisation des coproduits conduirait en 2050 à une diminution très forte de la production animale et de la part des protéines animales dans l’alimentation, les protéines animales ne représentant plus que 15 à 20% des protéines consommées. Cette diminution est liée à celle du nombre d’animaux qu’il est possible de nourrir avec la biomasse disponible et à une réduction de 20% des performances individuelles du fait de rations moins bien équilibrées. Dans ce scénario, la production de protéine animale serait majoritairement assurée par les ruminants car ces animaux sont les seuls à pouvoir valoriser des ressources pauvres pour produire des protéines de haute valeur nutritionnelle. Même si les systèmes de ruminants sont plus émetteurs de GES par unité de produit que les systèmes intensifs ou les élevages de monogastriques, les émissions de GES totales de l’élevage seraient diminuées du fait de la baisse importante des effectifs animaux et du fait que la baisse du besoin en surfaces arables pour nourrir les animaux fait plus que compenser l’accroissement des émissions du secteur des ruminants dans ce scénario.

Tableau 4 : Effet de deux scénarii d’utilisation de la biomasse végétale pour produire des protéines animales sur les effectifs d’animaux, la teneur en protéines animale dans l’alimentation de la population et l’impact de la production animale sur l’environnement (adapté de Schader et al., 2015)

	Actuel	tendanciel 2050	Utilisation exclusive de coproduits
Part de la viande dans l’alimentation (% protéines)	34	38	11
Effectifs de bovins (milliards)	1,39	1,85	1,45
Buffles	0,18	0,27	0,26
Ovins	1,10	1,60	1,34
Caprins	0,86	1,39	1,18
Porcins	0,92	1,17	0,11
Poulets	17,6	33,9	5,2
Emissions de GES (Gt eq CO ₂)	11,0	12,8	10,4
Terres arables utilisées (milliard ha)	1,54	1,63	1,20

III.4. Une production de viande valorisant des sources alternatives de protéines

L'accroissement de la demande en viande sera couvert en grande partie par des élevages hors sol qui permettent une forte intensité de production avec des cycles relativement courts. Par contre, ces élevages sont en partie en compétition avec l'alimentation humaine et des sources alternatives de protéines seront nécessaires pour couvrir la demande mondiale. Une voie de progrès consiste à utiliser de nouvelles ressources protéiques pour l'alimentation des animaux. Parmi les pistes envisageables, il y a le recyclage des déchets alimentaires et l'utilisation des protéines d'insectes pour les élevages de monogastriques.

Les restes alimentaires étaient historiquement recyclés par les animaux, principalement les porcs qui sont une espèce omnivore et restaient même la principale ressource alimentaire des porcs au début du vingtième siècle. Leur utilisation a diminué avec l'intensification de la production bien que ce soient des aliments de bonne valeur et qui ne nécessitent pas de surface pour leur production. L'utilisation des déchets de restaurants, des cuisines centrales et des particuliers a finalement été interdite en Europe pour des raisons sanitaires (EC, 2002). Suite à la crise de l'ESB et sur une biomasse estimée à environ 100 million de tonnes en Europe, seuls 3 millions de tonnes de produits secs issues des industries agro-alimentaires (biscuiteries....) sont recyclés en alimentation animale et 2 millions de tonnes supplémentaires pourraient l'être dans l'état de la réglementation (EFFPA, 2014). Pourtant dans le même temps, le Japon promouvait l'utilisation des résidus alimentaires dans l'alimentation animale au même titre que la Corée du Sud ou Taiwan en mettant en place des règlements stricts pour la collecte et le stockage. Aujourd'hui au Japon, 40% de ces déchets alimentaires sont convertis par les animaux (Kim et Min, 2010). Ermgassen et al. (2016) ont mis en évidence une diminution linéaire du besoin en surface nécessaire pour la production porcine avec l'accroissement de la teneur en résidus alimentaires dans la ration (-10% de surface par tranche de 10% d'incorporation) car cette ressource se substitue à 1:1 avec l'aliment classique sans modifier la vitesse de croissance des porcs ni l'indice de consommation. L'incorporation de déchets alimentaires n'a par ailleurs pas d'effets décelables sur la qualité des carcasses et de la viande, y compris lors de tests organoleptiques réalisés en aveugle par des jurys.

L'utilisation de cette ressource soulève des questions. Elle impose des traitements à la chaleur et la détection préalable de contaminants mais surtout elle pose un problème réglementaire car les PAT sont toujours interdites dans l'alimentation des monogastriques ce qui, de fait, exclu l'utilisation de restes alimentaires contenant de la viande.

CONCLUSION

La contribution des productions animales à la sécurité alimentaire ne peut pas s'évaluer simplement à l'aulne de consommation totale de protéines par les animaux comme c'est trop souvent le cas dans la littérature. Elle doit l'être à la triple condition de comparer la quantité de protéines végétales utilisée par les animaux à celle effectivement consommable par l'homme, de tenir compte des valeurs nutritionnelles des protéines consommées et d'intégrer les synergies qui apparaissent entre production de protéines végétales et protéines animales à l'échelle des systèmes de production et des territoires.

Elle pose aussi un problème d'acceptabilité par le public. Il faut toutefois noter que l'éducation des consommateurs sur les enjeux de ce recyclage a eu des effets bénéfiques sur l'acceptation de cette pratique qui aujourd'hui ne soulève plus de débats.

Les insectes, tout au moins une partie d'entre eux, pourraient être une source protéique alternative en élevage, notamment dans le cas des volailles qui sont naturellement des animaux insectivores, des poissons et peut-être aussi pour les porcs. Ils peuvent être produits à partir de résidus organiques (Makkar et al., 2014) avec un bon taux de conversion, un kg d'insecte pouvant être produit à partir de 2 kg de biomasse (Collavo et al., 2005) et ils sont riches en composés de bonne valeur nutritionnelle. Les teneurs en protéines varient selon les espèces, les stades de développement (larves ou nymphe) et l'alimentation, de 40% pour les termites à plus de 60% du poids sec pour les criquets, et grillons (Rumold et Schlüter, 2013 ; Makkar et al., 2014). Les insectes accumulent aussi des acides gras en quantité variable (de 8 à 36% de la MS) et la poudre d'insecte dégraissée peut ainsi être un aliment très riche en protéines, plus que le tourteau de soja. Certains diptères (mouche commune, mouche « soldat noir ») et larves de scarabées semblent avoir un bon potentiel de valorisation des déchets organiques et ont de ce fait été les plus étudiés en alimentation animale. Les quelques données disponibles et synthétisées par Velkamp et Bosh (2015) laissent penser que la digestibilité des protéines des larves de mouches chez le porc ou le poulet est au moins égale à celle des protéines de tourteau de soja et le profil en AAI est proche de celui des protéines de soja. Il est possible d'introduire jusqu'à 15% de poudre d'asticot dans les aliments des poulets et pondeuses (10% chez le porc) ou 10% de poudre de scarabée sans affecter la croissance. Ces taux d'incorporation pourraient sans doute être accrus par un apport d'acides aminés de synthèse visant à corriger la composition en AA des différents insectes en fonction des besoins des animaux (les AA les plus limitants étant la méthionine, la thréonine et l'arginine).

Aujourd'hui la principale limite d'utilisation de protéines d'insectes dans l'alimentation animale reste le prix (2 à 10 fois plus élevé que le tourteau de soja) et cette limite ne pourra être dépassée que par l'industrialisation de l'élevage des insectes. Rappelons enfin que pour être intéressants en alimentation animale, les productions d'insectes ne doivent pas entrer en compétition avec l'alimentation humaine ce qui va dans le sens d'un élevage valorisant des résidus de récolte, des déchets organiques, ou des effluents d'élevage plutôt que des produits nobles (farine de blé par exemple).

En effet, si la productivité de protéines par hectare mobilisé reste plus faible pour les productions animales que pour les productions végétales, les effets des associations entre les types de production sont souvent beaucoup plus subtils que ne peut le laisser penser une approche comparative trop simpliste. Les comparaisons doivent aussi tenir compte du fait que les ruminants valorisent des prairies permanentes qui pour l'essentiel sont des surfaces inutilisables pour faire des productions végétales et qui représentent 66% de la surface agricole des terres émergées (Zabel et al., 2014).

Il apparaît que la compétition entre alimentation animale et humaine est plus nuancée qu'il n'est souvent énoncé et ce pour quatre raisons particulières. (i) Selon les filières et les méthodes de production, la production animale peut être en compétition avec l'alimentation humaine ou au contraire contribuer de manière importante à la fourniture de protéines. (ii) Bien que souvent mis en cause pour leur émission de méthane, les ruminants peuvent avoir une contribution très importante à la production de protéines lorsqu'ils valorisent des ressources cellulosiques qui ne sont pas utilisables en alimentation humaine. (iii) Il y a une tension forte entre la nécessité d'avoir une production de porc et volaille intensive pour satisfaire un besoin de production de masse et la nécessité, dans le même temps, de limiter la compétition entre l'animal et l'homme pour l'accès aux protéines. (iv) Le besoin en surface pour nourrir une population ne semble pas varier fortement entre 0 et 25-30% de protéines animales dans l'alimentation du fait de l'aptitude des animaux à recycler beaucoup de coproduits et à valoriser des surfaces non utilisables pour les cultures ; ce n'est qu'au-delà de 25-30% de protéines animales dans l'alimentation que le besoin en surface pour nourrir une population semble s'accroître. Cette valeur reste toutefois à

mieux préciser selon les situations, notamment selon la proportion de terres arables dans la SAU totale. Un apport de 25-30% de protéines animales reste par ailleurs faible en regard des recommandations du PNNS (2011) qui préconisent 50% et il faut admettre qu'un régime équilibré (dans l'état actuel des connaissances) nécessite un peu plus de surface.

Deux stratégies complémentaires permettront d'accroître la contribution de l'élevage à la sécurité alimentaire au plan mondial. Il s'agit de (i) continuer à accroître l'efficacité de la production par l'amélioration de l'alimentation des animaux avec des apports calculés au plus juste en fonction des besoins et la sélection d'animaux plus efficaces mais aussi plus robustes pour limiter l'apparition des pathologies et les inefficacités zootechniques telles que les chutes de fertilité et la mortalité en élevage (Gerber *et al.*, 2011) et (ii) la valorisation maximale des coproduits des filières alimentaires, des prairies et dans la mesure du possible de nouvelles sources de protéines, elles-mêmes produites à partir de substrats non utilisables en alimentations humaine (résidus de culture, de cantines collectives, d'effluents d'élevage...). Cette voie présente des difficultés d'ordre technique, réglementaire ou social qu'il convient de lever.

Références :

- AFSSA (2007). Apports en protéines : consommation, qualité, besoins et recommandations.
- AFSSA/CNERNA/CNRS (2001). Apports nutritionnels conseil les pour la population française Tec & Doc, 3ème édition, Paris.
- Alexandratos N., Bruinsma J. (2012). World Agriculture Towards 2030/2050: The 2012 Revision (No. 12-03). ESA Working paper, Rome, FAO.
- Basset-Mens C., Van der Werf H.M.G. (2005). Scenario-based environmental assessment of farming systems: the case of pig production in France. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 105, 127-144.
- Bonhommeau S., Dubroca L., Pape O.L., Barde J., Kaplan D.M., Chassot E., Nieblas A.-E. (2013). Eating up the world's food web and the human trophic level. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 110, 20617-20620.
- Bourdon D., Dourmad J.Y., Henry Y. (1995). Réduction des rejets azotes chez le porc en croissance par la mise en œuvre de l'alimentation multiphase, associée à l'abaissement du taux azote. *J. Rech. Porc.*, 27, 269-278.
- Bradford E., Baldwin R.L., Blackburn H., Cassman G., Crosson P.R., Delgado C.L., Fadel J.G., Fitzhugh H.A., Gill M., Oltjen J.W., Rosegrant M.W., Vavra M., Wilson R.O. (1999). Animal Agriculture and food supply. Task Force report, 135, 99 pp.
- Collavo A., Glew R.H., Huang Y.S., Chuang L.T., Bosse R., Paoletti M.G. (2005). House cricket small-scale farming. In M.G. Paoletti, editor, Ecological implication of mini livestock: potential of insects, rodents, frogs and snails. Science Publisher, Enfield, NH. 519-544.
- De Vries M., de Boer L., J., M. 2010. Comparing environmental impacts for livestock products: a review of life cycle assessments. *Livest. Sci.*, 128, 1-11.
- Dourmad J.Y., Henry Y., Bourdon D., Quiniou N. (1993). Effect of growth potential and dietary protein input on growth performance, carcass characteristics and nitrogen output in growing-finishing pigs. EAAP Publication, 69, 206-212.
- EC. (2002). Regulation (EC) No. 1774/2002 of the European Parliament and of the Council of 3 October 2002 laying down health rules
- Eisler M.C., Lee M.R.F., Tarlton J.F., Martin G.B., Beddington J., Dungait J.A.J., Greathead H., Liu J., Mathew S., Miller H., Misselbrook T., Murray P., Vinod V.K., Van Saun R., Winter M. (2014). Agriculture: steps to sustainable livestock. *Nature* 507, 32-34.
- EFFPA. (2014). European Former Foodstuff Processors Association. <<http://www.fffpa.eu/>>. <<http://www.fffpa.eu/>> (accessed 9.15.14).
- Ermgassen E. K.H.J., Phalan B., Green R.E., Balmford A. (2016). Reducing the land use of EU pork production: where there's swill, there's a way. *Food policy*, 58, 35-48.
- Ertl P., Klocker H., Hörtenhuber S., Knaus W., Zollitsch W. (2015a). The net contribution of dairy production to human food supply: the case of Austrian dairy farms. *Agric. Syst.*, 137, 119-125
- Ertl P., Zebeli Q., Zollitsch W., Knaus W. (2015b). Feeding of by-products completely replaced cereals and pulses in dairy cows and enhanced edible feed conversion ratio. *J. Dairy Sci.*, 98 (2), 1225-1233.
- Eurostat (2009). Agricultural statistics edition 2010: main results 2007-2008: 126 p.
- FAO (2009). La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture. Le point sur l'élevage. 186pp.
- FAO (2013). Dietary protein quality evaluation in human nutrition: Report of an FAO Expert Consultation, FAO Food and Nutrition Paper 92. Rome: FAO.
- Foley J.A., Ramankutty N., Brauman K.A., Cassidy E.S., Gerber J.S., Johnston M., Mueller N.D., O'Connell C., Ray D.K., West P.C., Balzer C., Bennett E.M., Carpenter S.R., Hill J., Monfreda C., Polasky S., Rockstrom J., Sheehan J., Siebert S., Tilman D., Zaks D.P.M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature* 478, 337-342.
- France Agri Mer. (2013). Etude sur la valorisation du cinquième quartier des filières bovine, ovine et porcine en France, 211 pp.
- Garnet T. (2013). Food sustainability: problems, perspectives and solutions. *Proc. Nutr. Soc.*, 72, 29-39.
- Gaudichon C., Bos C., Morens C., Petzke K.J., Mariotti F., Everwand J., Benamouzig R., Dare S., Tome D., Metges C.C. (2002). Ileal losses of nitrogen and amino acids in humans and their importance to the assessment of amino acid requirements. *Gastroent.*, 123, 50-59.
- Gerber P., Vellinga T., Opio C., Steinfeld H. (2011). Productivity gains and greenhouse gas emissions intensity in dairy systems. *Livest. Sci.* 139, 100-108.
- Gerber P.J., Steinfeld H., Henderson B., Mottet A., Opio C., Dijkman J., Falcucci A., Tempio G. (2013). Tackling Climate Change Through Livestock – A Global Assessment of Emissions and Mitigation Opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.

- Herrero M., Thornton P.K., Gerber P., Reid, R.S. (2009). Livestock, livelihoods and the environment: understanding the trade-offs. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 1, 111–120.
- Kim M.H., Kim J.W. (2010). Comparison through a LCA evaluation analysis of food waste disposal options from the perspective of global warming and resource recovery. *Sci. Total Environ.* 408, 3998–4006.
- Makkar H.P., Tran G., Heuzé V., Ankers P. (2014). State of the art on use of insects as animal feed. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 197, 1-33
- Mariotti F, et al. (1999). Nutritional value of [15N]-soy protein isolate assessed from ileal digestibility and postprandial protein utilization in humans. *J. Nutr.* 129(11): 1992-7.
- Peters C.J., Wilkins J.L., Fick G.W. (2007). Testing a complete-diet model for estimating the land resource requirements of food consumption and agricultural carrying capacity: the New-York State example. *Renew. Agric. Food Syst.*, 22, 145-153.
- Peyraud J.L., Cellier P., Aarts F., Béline F., Bockstaller C., Bourblanc M., Delaby L., Dourmad J.Y., Dupraz P., Durand P., Faverdin P., Fiorelli J.L., Gagné C., Kuikman P., Langlais A., Le Goffe P., Lescoat P., Morvan T., Nicourt C., Parnaudeau V., Rochette P., Vertes F., Veysset P., Rechauchere, O., Donnars, C. (2014). Nitrogen flows and livestock farming: lessons and perspectives. *Advance in Anim. Bioscienc.* 5, special issue 1, 59-69.
- PNNS. (2011). Ministère du Travail, de l'Emploi et de la Santé / Programme national nutrition santé 2011/2015, juillet 2011.
- Rumpold B.A., Schlüter O.K. (2013). Nutritional composition and safety aspects of edible insects. *Mol. Nutr. Food Res.*, 57, 802-823.
- Schader C., Muller A., El-Hage Scialabba N., Hecht J., Isensee A., Erb K.H., Smith P., Makkar H.P.S., Klocke P., Leiber F., Schwegler P., Stolze M., Niggli U. (2015). Impacts of feeding less food-competing feedstuffs to livestock on global food system sustainability. *J. R. Soc. Interface* 12: 20150891.
- Séré C., Steinfeld H. (1996). *World Livestock Production Systems. Animal Production and Health Paper 127.* FAO, Rome.
- SNIA. (2014). Syndicat National de l'Industrie de la Nutrition Animale, Rapport d'activité 55pp.
- Stehfest E., Bouwman L., van Vuuren D.P., den Elzen M.G.J., Eickhout B., Kabat P. (2009). Climate benefits of changing diet. *Clim. Change* 95, 83–102. (doi:10. 1007/s10584-008-9534-6).
- Steinfeld H., de Haan C., Blackburn H. (1997). *Livestock-Environment Interactions: Issues and Options. Report of a Study coordinated by the Food and Agriculture Organization of the United Nations, the U.S. Agency for International Development and the World Bank, Brussels.* 115 pp. Available from FAO, Rome.
- Van Kernebeek H.R.J., Oosting S.J., Van Ittersum M.K., Bikker P., De Boer I.J.M., (2014). Saving land to feed a growing population: consequences for consumption of crop and livestock products. *Int. J. Life Cycle Assess.* Publish on line. DOI 10.1007/s11367-015-0923-6.
- Velkamp T., Bosch G. (2015). Insects: a protein-rich feed ingredient in pig and poultry diet. *Anim. Front.*, 5 (2), 45-50
- Wiedemann S., Mc Gaham E., Murphy C., Yan M.J., Henry B., Thoma G., Ledgard S. (2015). Environmental impacts and resource use or Australian beef and lamb exported to the USA determined using life cycle assessment. *J. Clean. Prod.*, 94, 67-75.
- Wilkinson J. M. R. (2011). Re-defining efficiency of feed use by livestock. *Animal*, 5, 1014-1022.
- Williams A.G., Audsley E., Sandars D.L. (2006). Determining the environmental burdens and resource use in the production of agricultural and horticultural commodities. *Main Report Defra Research Project ISO205*, Bedford: Cranfield University and Defra.
- Zabel F., Putzenlechner B., Mauser W. (2014). Global agricultural land resources—a high resolution suitability evaluation and its perspectives until 2100 under climate change conditions. *PLoS ONE* 9, e107522. (doi:107510.101371/journal.pone.0107522).