



HAL
open science

Réduire les émissions de gaz à effets de serre des élevages porcins en diminuant les apports protéiques: stratégies et perspectives

Florence Garcia-Launay, Jean-Yves Dourmad, Philippe Faverdin, Sandrine Espagnol

► To cite this version:

Florence Garcia-Launay, Jean-Yves Dourmad, Philippe Faverdin, Sandrine Espagnol. Réduire les émissions de gaz à effets de serre des élevages porcins en diminuant les apports protéiques: stratégies et perspectives. *Innovations Agronomiques*, 2014, 37, pp.39-52. hal-01210719

HAL Id: hal-01210719

<https://hal.science/hal-01210719>

Submitted on 27 May 2020

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

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



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

Réduire les émissions de gaz à effets de serre des élevages porcins en diminuant les apports protéiques: stratégies et perspectives

Garcia-Launay F.¹, Dourmad J.Y.¹, Faverdin P.¹, Espagnol S.²

¹INRA, UMR1348 Physiologie, Environnement, Génétique pour l'Animal et les Systèmes d'Elevage (PEGASE), F-35590 Saint-Gilles

²IFIP, La Motte au vicomte BP35104, F-35651 Le Rheu cedex

Correspondance : florence.garcia-launay@rennes.inra.fr

Résumé

Parmi les GES émis en production porcine, les émissions de N₂O peuvent être réduites sans perte de performance animale en diminuant les apports en protéines dans les aliments. Pour cela, deux approches complémentaires peuvent être utilisées : améliorer la composition en acides aminés des aliments en apportant des acides aminés alimentaires, et ajuster en dynamique les apports en acides aminés à l'évolution des besoins des animaux. Dans cette étude, nous avons exploré deux options de réduction des émissions GES : l'utilisation accrue des acides aminés alimentaires avec soit une alimentation biphasée des porcs à l'engrais (2PAA+), soit une alimentation multiphasée (MPAA+). Ces options permettent de réduire les émissions sur l'exploitation de 510 kg CO₂e/truie/an pour 2PAA+ et de 692 kg CO₂e/truie/an pour MPAA+, soit respectivement une réduction de 29% et 40% par rapport à la situation initiale. Entre 2010 et 2030 et à l'échelle de la France, ces options réduiraient les émissions de 7,4 et 3,7 MTCO₂e, pour 2PAA+ et MPAA+, respectivement, soit 22% et 11% relativement à la situation initiale. Avec les efforts de formation et d'aide à la décision engagés, la mise en œuvre de ces pratiques devrait permettre de réduire les émissions de GES et les coûts d'alimentation, de même que les émissions de NH₃ et NO₃⁻ associées à l'acidification et l'eutrophisation.

Mots-clés : gaz à effet de serre, production porcine, alimentation azotée, azote excrété, acides aminés alimentaires, alimentation par phases.

Abstract: Mitigating GHG emissions by reducing nitrogen feeding in pig production systems: strategies and perspectives

Among GHG emitted in pig production, N₂O emissions can be mitigated without loss of animal performance by reducing crude protein content of feeds. Two complementary approaches can be adopted: improving amino acids composition by incorporating feed-use amino acids and timely adjusting amino acids content of pig feeds to animal requirements. In this study, we investigated two options for mitigating GHG emissions: improved utilisation of feed-use amino acids with either two-phase feeding (2PAA+) or multiphase feeding of growing-finishing pigs (MPAA+). These options mitigate on-farm emissions by 510 kg CO₂e/sow/year for 2PAA+ and 692 kg CO₂e/sow/year for MPAA+ (i.e. 29% and 40% respectively of the emissions of the control). From 2010 to 2030 at the whole country level, these options would mitigate the emissions by 7.4 and 3.7 MTCO₂e, for 2PAA+ and MPAA+ (i.e. 22% and 11% respectively of the emissions of the control situation), respectively. With already engaged actions of training and decision support, the adoption of these practices should allow mitigation of GHG emissions and feeding costs, as well as NH₃ and NO₃⁻ emissions involved into eutrophication and acidification processes.

Keywords: Greenhouse gas, pig production, nitrogen feeding, nitrogen excreted, industrial amino acids, phase feeding.

Introduction

La production porcine a des impacts sur l'environnement. Elle est associée à l'émission de gaz à effets de serre, mais aussi à l'eutrophisation des eaux, à l'acidification des sols,... Ces impacts sont notamment liés aux déjections des animaux (en bâtiment) qui dépendent de la composition des régimes alimentaires et des performances des animaux.

Sur l'exploitation, la part des aliments à teneur élevée en protéines non valorisée par les animaux conduit à une excrétion d'azote importante. L'azote est majoritairement excrété sous deux formes, l'azote fécal composé de protéines non digérées et de protéines microbiennes, et l'azote urinaire composé principalement d'urée rapidement converti en azote ammoniacal. Cet azote ammoniacal conduit à des émissions d'ammoniac (NH_3) et de protoxyde d'azote (N_2O), en bâtiment, au stockage et à l'épandage. Ce sont les émissions directes. Une faible partie de l'ammoniac est secondairement transformée en N_2O sur les surfaces liées à l'exploitation. Ce sont les émissions indirectes. En parallèle, les animaux émettent du méthane entérique en bâtiment et les déjections produisent des émissions de méthane en bâtiment et pendant la phase de stockage.

En amont de l'exploitation, l'utilisation d'aliments à teneur élevée en protéines repose sur l'incorporation de matières premières riches en protéines (Mosnier *et al.*, 2011). Le tourteau de soja en particulier, qui est principalement importé du Brésil, est incorporé dans les formules et est cultivé en partie sur des surfaces déforestées de la forêt amazonienne. Les émissions de gaz à effet de serre (GES) associées à la formulation d'aliments riches en protéines intervenant en amont de l'exploitation sont donc tout aussi importantes à prendre en compte que les émissions directes et indirectes consécutives à l'excrétion d'azote. Ceci peut se faire dans une Analyse de Cycle de Vie (ACV).

Réduire l'excrétion d'azote est un levier important pour réduire les émissions de N_2O en élevage porcin. De nombreuses études ont montré qu'alimenter des porcs à l'engrais avec des régimes à teneur abaissée en protéines réduit l'excrétion d'azote (Bourdon *et al.*, 1995 ; Portejoie *et al.*, 2004 ; Osada *et al.*, 2011 ; Quiniou *et al.*, 2011) mais ne dégrade pas l'ingestion journalière ni l'indice de consommation si les teneurs en énergie nette et en acides aminés essentiels sont maintenues. Associée à une alimentation biphasé ou multiphasé, la réduction des teneurs en protéines des aliments permet de diminuer l'excrétion d'azote (Dourmad *et al.*, 2011) et les émissions associées de NH_3 et de N_2O (Portejoie *et al.*, 2004 ; Osada *et al.*, 2011).

Au cours des 15 dernières années, les élevages porcins se sont déjà engagés dans la mise en œuvre de ces pratiques. Les recommandations du CORPEN (1996, 2003) de teneurs en protéines des aliments pour truies reproductrices, en post-sevrage et en engraissement, ainsi que le conseil en élevage ont contribué à l'adoption de l'alimentation biphasé et à la réduction des apports azotés par l'incorporation d'acides aminés de synthèse dans les formules (lysine, méthionine, thréonine), entraînant une réduction significative de l'excrétion d'azote. Ainsi en 2008, 81% des places de truies et 83% des places d'engraissement (vs. 65% et 59% en 2001) étaient en alimentation biphasé (Agreste, 2008). On considère également que les niveaux de protéines des aliments sont conformes aux recommandations CORPEN de 2003 (e.g. 16,5% en aliment croissance et 15% en engraissement). Ainsi, au cours des 30 dernières années, les quantités d'azote excrété par porc ont été fortement réduites. Aujourd'hui, les expérimentations et modélisations montrent que les teneurs en protéines des aliments peuvent être encore diminuées, à performances constantes, notamment en incorporant des acides aminés dont la disponibilité est plus récente (tryptophane et valine) (e.g. Osada *et al.*, 2011) et en utilisant des plans d'alimentation multiphasé (Pomar *et al.*, 2014). Les connaissances accumulées sur les besoins en acides aminés des truies, porcelets et porcs charcutiers et sur la valeur des aliments autorisent donc à explorer des voies d'amélioration de ces pratiques, pour aller plus loin dans la réduction de l'excrétion azotée et des émissions associées.

L'objectif de cette communication est d'illustrer le potentiel actuel de réduction des émissions de GES sur l'exploitation, en amont de l'exploitation, et à l'échelle de l'élevage porcin français. Les résultats

présentés ici sont issus de l'Etude « Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? » (Pellerin *et al.*, 2013) et d'une étude précédente (Garcia-Launay *et al.*, 2014) estimant les impacts environnementaux des élevages porcins pour différents scénarios d'incorporation des acides aminés alimentaires, par ACV. Cette communication discute les marges de manœuvre existant en élevage porcin pour aller plus loin dans la réduction des émissions de N_2O et d'ammoniac et les moyens mis en œuvre pour faciliter l'adoption de ces pratiques.

1. Evaluation des émissions de gaz à effet de serre en élevage porcin

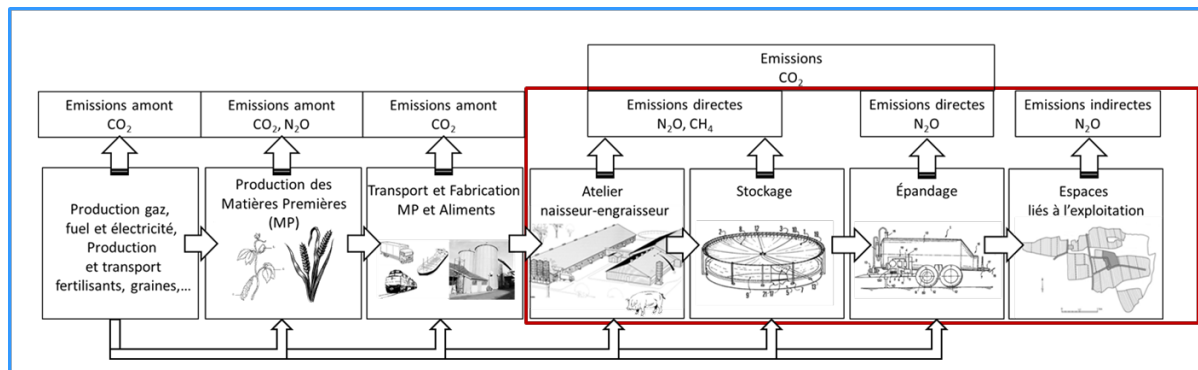


Figure 1 : Evaluation des émissions de gaz à effet de serre et de l'impact de la production de porcs sur le changement climatique selon une approche « inventaire national » (encart rouge) et selon une approche « Analyse du Cycle de Vie » (encart bleu).

1.1 Emissions directes et indirectes

Les émissions intervenant sur l'exploitation (directes) ou dans les espaces physiquement liés (indirectes) sont influencées par les teneurs en azote des rations (Figure 1). L'azote est majoritairement excrété sous deux formes, l'azote fécal composé de protéines non digérées, de protéines endogènes et des résidus azotés microbiens, et l'azote urinaire composé principalement d'urée, déchet non toxique produit par l'animal pour éliminer l'ammoniac issu du catabolisme des protéines. Si l'azote fécal est relativement stable, l'azote urinaire très rapidement converti en ammoniac est très instable et se volatilise facilement. L'évolution de l'azote ammoniacal des effluents dépend des conditions de stockage. Dans le cas d'une gestion sous la forme de lisier, donc en conditions anaérobies, les pertes d'azote ont lieu principalement sous la forme d'ammoniac. Des émissions de N_2O peuvent également avoir lieu à la surface du caillebotis par nitrification en conditions aérobies. Dans le cas des litières, les réactions de nitrification et de dénitrification entraînent des émissions importantes de N_2 et de N_2O . L'azote urinaire conduit alors à des émissions de NH_3 et de N_2O . Une faible partie de l'ammoniac est secondairement transformée en N_2O (émissions indirectes) et son émission contribue donc également à un effet de serre. Les mesures de réduction des apports azotés et donc de l'excrétion d'azote pourraient être utilisées à la fois pour réduire les émissions de GES (N_2O) mais aussi et en priorité pour abattre les émissions d'ammoniac vers l'air, compte tenu de ses effets sur la santé humaine, l'acidification et l'eutrophisation.

1.2 Emissions en amont de l'exploitation

Les émissions induites en amont de l'exploitation concernent principalement les émissions associées à la production des matières premières des aliments. Les porcs présentent des rendements élevés d'utilisation des protéines (comparés aux bovins viandes), mais consomment beaucoup de tourteaux par animal, notamment de soja dont le coût GES lié au changement d'usage des terres est généralement important. La production du tourteau de soja brésilien utilisé majoritairement en France,

en particulier, est associée à 70% à la conversion récente de la forêt brésilienne en cultures (Prudêncio da Silva *et al.*, 2010) dont le coût GES est estimé dans les références les plus récentes à 740 Mg CO₂e/ha (PAS2050, 2011). Des mesures de réduction des apports azotés devraient permettre de réduire l'incorporation de matières premières riches en protéines, et de tourteau de soja en particulier, et de réduire par voie de conséquence les émissions de GES indirectes associées à cette production.

2. Stratégies alimentaires de réduction des émissions directes et indirectes de N₂O en élevage porcin

2.1 Des stratégies visant à réduire l'excrétion d'azote

Deux approches complémentaires permettent de réduire l'excrétion d'azote :

- **La première consiste à ajuster l'apport de protéines et d'acides aminés** à l'évolution des besoins au cours du temps en fonction de l'évolution du potentiel de croissance ou de l'état physiologique des animaux. Chez la truie, l'excrétion est ainsi réduite de 20 à 25% lorsque des aliments spécifiques sont distribués pendant la gestation et la lactation. Cette pratique déjà appliquée dans les élevages peut être améliorée (réduction supplémentaire) avec l'utilisation de plusieurs aliments différents pendant la gestation, les besoins protéiques étant plus faibles au début qu'à la fin de la gestation. Chez le porc en croissance, l'excrétion azotée est réduite d'environ 10% lorsque l'on utilise en phase de finition un régime à teneur réduite en protéines, plus en accord avec les besoins des animaux pour la croissance (Peyraud *et al.*, 2012).

- **La seconde consiste à améliorer l'équilibre en acides aminés** de l'aliment distribué afin de s'approcher au plus près du profil de la protéine idéale. Cela permet de réduire la teneur en protéines tout en apportant les acides aminés essentiels en quantité suffisante. La mise en œuvre de cette approche permet d'améliorer la valorisation des acides aminés par les animaux et donc leur efficacité d'utilisation. Ceci peut être réalisé grâce à une combinaison judicieuse des matières premières et/ou la substitution de protéines par des acides aminés de synthèse sous forme pure. Chez le porc à l'engrais, Dourmad *et al.* (1993) ont ainsi mesuré une réduction de 35% de l'excrétion d'azote à la suite d'une amélioration de l'équilibre en acides aminés (valeur biologique) du régime, sans que, ni l'appétit, ni l'efficacité alimentaire ou la composition corporelle des animaux ne soient affectés.

Différentes études ont confirmé la réduction des émissions de N₂O et de NH₃ par la mise en œuvre de ces approches. La réduction la plus importante des rejets est obtenue avec une alimentation « multi-phase » combinée avec des régimes parfaitement équilibrés en acides aminés (d'une composition proche de celle de la protéine idéale) et à teneur réduite en acides aminés non indispensables. Une telle stratégie a été testée avec succès par Bourdon *et al.* (1995). Dans cette étude, un régime unique contenant 17% de protéines utilisé sur toute la période d'engraissement est comparé à une stratégie « multi-phase » qui consiste à mélanger en proportions variables au cours de la croissance deux régimes parfaitement bien équilibrés en acides aminés et correspondant aux besoins des animaux en début (13,0% protéines) et en fin de croissance (10,7% de protéines). Alors que les performances de croissance et la qualité des carcasses sont identiques pour les deux traitements, l'excrétion azotée est réduite de près de 50% pour la stratégie multi-phase (1,83 versus 3,56 kg N / porc, soit une efficacité de 34% vs. 50% de l'azote ingéré) tout en maintenant le niveau de performances des animaux pour les différents traitements.

2.2 Interactions avec le fonctionnement du système

Si les apports en acides aminés indispensables couvrent les besoins des animaux lors de la mise en œuvre de ces stratégies, alors les performances ne sont pas affectées. Différentes études ont montré que des régimes à teneur abaissée en protéines équilibrés en acides aminés ne réduisent pas le gain

moyen quotidien et n'augmentent pas non plus l'indice de consommation (Bourdon *et al.*, 1995 ; Canh *et al.*, 1998 ; Portejoie *et al.*, 2004 ; Osada *et al.*, 2011). Il est néanmoins important de noter que le développement de telles stratégies de réduction des rejets d'azote nécessite une très bonne connaissance de la valeur des matières premières, en particulier la digestibilité des acides aminés, et de l'évolution des besoins des animaux en fonction de la croissance ou du stade physiologique. Leur estimation est maintenant réalisable grâce au développement de modèles, tel InraPorc® (www.rennes.inra.fr/inraporc/), de prédiction des besoins (Dourmad *et al.*, 2008 ; van Milgen *et al.*, 2008) et de tables de valeurs de digestibilité iléale des acides aminés (Sauvant *et al.*, 2004).

Lors de la mise en œuvre de telles stratégies, la diminution de la concentration en ammoniac dans les lisiers peut toutefois accroître les émissions de CH₄ du lisier. Les travaux de Jarret *et al.* (2011) semblent confirmer ce phénomène pour le lisier de porc. Cela reviendrait à augmenter le facteur de conversion du méthane (MCF) lorsque la teneur en protéines des régimes diminue. La publication citée calcule une augmentation du MCF de 44% à 55% dans l'essai (valeurs plus faibles que celles de l'IPCC), sans modification significative de biodégradabilité de l'effluent (BO). Les teneurs en azote ammoniacal total (TAN) et les modifications de pH associées pourraient expliquer ce phénomène cité par ailleurs dans la bibliographie (Vedrenne *et al.*, 2008). Cet effet peut varier avec la durée de stockage et perdre de son importance avec des stockages longs. Néanmoins, ce point est important car il peut être de nature à réduire les effets espérés de la réduction de protéines sur les GES, avec un transfert de pollution de N₂O vers CH₄. Cet inconvénient pourrait toutefois constituer un avantage dans le cas des filières de gestion des effluents avec méthanisation.

3. Construction et évaluation des options de réduction des émissions

3.1 Système et options explorés

Le système considéré est une exploitation conventionnelle qui représente l'élevage « moyen » en France. Il correspond donc aux performances et aux pratiques moyennes d'un élevage porcin en France. Il s'agit d'un élevage naisseur-engraisseur (environ 70% des élevages en France en 2010) qui élève donc des truies avec leurs porcelets, des porcs en post-sevrage et des porcs en engraissement. La gestion des effluents se fait sous la forme de lisier et de fumier, en proportions équivalentes aux moyennes nationales rapportées dans l'enquête bâtiments d'élevage porcins (Agreste, 2008) pour les différents stades physiologiques (truies gestantes, truies allaitantes, post-sevrage, porcs charcutiers). Les performances des animaux correspondent aux performances moyennes des animaux en France en 2010 (bases de données GTTT et GTE, IFIP, 2010) à l'exception des quantités d'aliments consommées, obtenues par enquête dans des élevages conventionnels (Dourmad *et al.*, 2012).

Sur la base de cet élevage-type, les émissions de GES ont été calculées en considérant les pratiques moyennes des éleveurs en 2010 à savoir :

- 20% des porcs engraisés avec un aliment unique et 80% des porcs engraisés selon un plan d'alimentation biphasé et
- des teneurs en protéines des aliments conformes aux valeurs éditées par le CORPEN (CORPEN, 2003).

Deux options de réduction des émissions de GES ont été explorées avec cet élevage-type. Elles visent la réduction des teneurs en protéines des aliments distribués à tous les stades physiologiques et reposent notamment sur une utilisation accrue des acides aminés alimentaires par rapport aux pratiques actuelles. Ces deux options sont :

- **une utilisation accrue des acides aminés et une alimentation biphasé** des porcs à l'engrais (2PAA+). Cette option consiste à généraliser l'alimentation biphasé et à améliorer l'équilibre en acides aminés des aliments afin de réduire leur teneur en protéines tout en apportant chacun des acides

aminés indispensables en quantité suffisante. La substitution de matières premières riches en protéines par des céréales associées à des acides aminés permet de réaliser cette « économie » de protéines sans affecter les performances.

- **une utilisation accrue des acides aminés avec une alimentation multiphase** des porcs à l'engrais (MPAA+). Cette option consiste à la fois à améliorer l'équilibre en acides aminés des aliments par l'utilisation d'acides aminés et à ajuster l'apport de protéines et d'acides aminés au cours du temps en fonction de l'évolution du potentiel de croissance des porcs à l'engrais. Cette approche revient à pratiquer une alimentation dite « multiphase » dans laquelle la composition de l'aliment distribué est modifiée régulièrement pour adapter les apports au potentiel des animaux.

Pour chacune des options étudiées et pour la situation de référence en 2010, les aliments ont été formulés à moindre coût, dans le respect des teneurs en acides aminés essentiels définies pour couvrir les besoins des différents stades physiologiques et de croissance des animaux (InraPorc, 2006 ; Ajinomoto Eurolysine, 2011) et sans contrainte sur la teneur en protéine totale.

3.2 Calcul des émissions et de leur potentiel d'atténuation unitaire

Les émissions de N₂O directes, et indirectes à partir des émissions de NH₃, ont été calculées pour 3 catégories d'animaux, à savoir les truies, les porcelets en post-sevrage et les porcs en engraissement, puis le potentiel d'atténuation unitaire (Pellerin *et al.*, 2013) a été calculé par truie et par an en additionnant les émissions produites par les truies, les porcelets en post-sevrage et les porcs en engraissement en accord avec la productivité des truies et les taux de mortalité en post-sevrage et en engraissement de la GTTT et de la GTE (IFIP, 2010). Tous les calculs ont donc été faits sur la base de la truie environnée, c'est-à-dire d'une truie productive moyenne en lui associant toute sa suite en termes d'animaux sevrés par an (28,2 porcelets/truie/an) avec leur évolution au stade post-sevrage (27,6 porcelets/truie/an), puis en croissance-finition (26,6 porcs/truie/an).

L'inventaire des émissions directes et indirectes a été réalisé via la méthodologie proposée par l'agence européenne de l'environnement (EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009, updated June 2010) pour prendre en compte les émissions liées aux fractions azotées des effluents. Les teneurs en matières azotées totales des aliments, les quantités d'azote ingéré, fixé et excrété par animal (pour les porcs en post-sevrage et engraissement) et par animal et par an (pour les truies) ont été calculées (Sauvant *et al.*, 2004 ; Rigolot *et al.*, 2010). Les quantités de TAN et d'azote total ont été calculées en fonction de la teneur moyenne en matières azotées totales des aliments pour chaque catégorie d'animal (Canh *et al.*, 1998 ; Portejoie *et al.*, 2004 ; Leek *et al.*, 2007 ; Le *et al.*, 2009). Les émissions en bâtiment, au stockage et à l'épandage ont ensuite été calculées séparément pour les effluents gérés en lisier et en fumier, selon la méthodologie EMEP. Pour cela, les calculs ont été réalisés en considérant à chaque étape la teneur initiale en azote total et en azote ammoniacal de l'effluent puis en retirant de l'azote contenu dans l'effluent l'azote perdu par les émissions gazeuses pour l'étape suivante.

Les variations de production de GES associées au changement de composition des aliments et liés au changement d'utilisation des sols (émissions amont) ont été estimées par des données d'impact de la production des matières premières utilisées par ACV. Les données utilisées ici pour les matières premières concentrées sont issues d'une synthèse bibliographique compilant les estimations faites dans des études ACV réalisées à l'INRA (Nguyen *et al.*, 2012a, 2012b, non publié ; Mosnier *et al.*, 2011 ; Garcia-Launay *et al.*, 2014) et des estimations de l'Ademe via le logiciel Dia-Terre. En pratique, pour les céréales, les tourteaux et le son, les valeurs de Dia-Terre ont été retenues. Pour les huiles et les acides aminés alimentaires, les valeurs INRA ont été utilisées (Mosnier *et al.*, 2011 ; Nguyen *et al.* 2012a, 2012b et non publié ; Garcia-Launay *et al.*, 2014). Ces valeurs comprennent l'ensemble des émissions nécessaires à la production des aliments et à leur acheminement jusqu'à l'usine de

production d'aliments composés, et incluent l'ensemble des émissions liées à la production d'intrants pour les cultures (engrais, pesticides, etc.) et au changement d'usage des sols.

3.3 Estimation du potentiel d'atténuation à l'horizon 2030 à l'échelle de la France

L'estimation des émissions à l'échelle de la France a été faite en utilisant les effectifs de truies reproductrices (Agreste, 2010) et en considérant que 85% en moyenne sont productives. Les émissions par truie environnée et par an ainsi que les potentiels d'atténuation unitaire correspondants pour les deux options techniques ont ainsi été multipliés par cet effectif pour connaître les valeurs à l'échelle de la France. Pour chaque option étudiée, le potentiel d'atténuation à l'horizon 2030 a été calculé en faisant l'hypothèse d'une adoption complète en 2030. Nous avons fait l'hypothèse d'un passage rapide à l'option technique 2PAA+ compte tenu de l'intérêt économique de substituer les matières premières issues du soja par des céréales et des acides aminés. Pour l'option MPAA+, nous avons fait l'hypothèse d'une adoption progressive plus tardive (après 2020) compte tenu des investissements et des modifications de pratiques nécessaires à sa mise en œuvre.

4. Des stratégies de réduction multiobjectifs et à moindre coût

4.1 Potentiel de réduction des émissions directes et indirectes

L'utilisation d'aliments à teneur abaissée en protéines permet de réduire de façon substantielle les émissions de N₂O sur l'exploitation (Tableau 1). Par rapport à la situation de 2010 avec des teneurs en protéines des aliments conformes aux valeurs éditées par le CORPEN (CORPEN, 2003), l'option 2PAA+ permet de réduire les émissions de N₂O sur l'exploitation de 510,3 kg CO₂e/truie/an ce qui représente 29% de réduction. Le scénario MPAA+ permet d'aller plus loin dans la réduction des émissions de N₂O car l'alimentation multiphase permet d'utiliser des aliments avec des teneurs réduites en protéines par rapport à 2PAA+.

Tableau 1 : Quantités de protéines dans les aliments, d'azote ingéré et excrété, et émissions sur l'exploitation associées à la production d'une truie productive et de sa suite pendant un an pour le scénario 2010 de référence (20% monophasé et 80% biphasé) et variations induites pour les deux scénarios, biphasé enrichi en acides aminés (2PAA+) et multiphase enrichi en acides aminés (MPAA+) (d'après Faverdin *et al.*, 2013).

	Référence 2010	2PAA+	MPAA+
Teneurs moyennes en matières azotées totales des aliments (g/kg)	160,0	-18,4	-25,4
N excrété (kg/truie environnée/an)	143,7	-25,9	-35,7
Emissions N ₂ O sur l'exploitation (kgCO ₂ e/truie environnée/an)	1750,3	-510,3	-691,7
Emissions NH ₃ sur l'exploitation (kg/truie environnée/an)	97,6	-21,4	-29,4

¹ Les estimations par truie et par an tiennent compte des émissions associées à l'élevage des porcelets et des porcs à l'engrais produits par truie et par an.

Ainsi, la réduction des émissions atteint près de 692 kg CO₂e/truie/an en MPAA+ soit plus de 39% des émissions. La diminution des teneurs moyennes en matières azotées totales des aliments se traduit par une diminution sensible des quantités d'azote excrété, correspondant à une réduction de 18% et de 25% en 2PAA+ et MPAA+, respectivement. Dans le même temps, les émissions d'NH₃ sont également drastiquement réduites, de 22% et 30% en 2PAA+ et MPAA+ respectivement. Ces estimations montrent qu'il existe encore des marges de manœuvre en élevage porcin pour réduire les émissions de N₂O et

de NH₃, malgré la diminution déjà observée des teneurs en matières azotées totales des aliments grâce à la généralisation des plans d'alimentation biphase et au respect des recommandations de teneurs en matières azotées totales des aliments (CORPEN, 2003).

Ces potentiels d'atténuation unitaires se traduisent par des réductions des émissions de GES substantielles à l'horizon 2030 (Tableau 2). L'atténuation cumulée entre 2010 et 2030 est plus importante pour l'option 2PAA+ (-22%) que pour l'option MPAA+ (-11%). En effet, l'hypothèse d'un développement plus tardif que l'option 2PAA+ réduit l'atténuation attendue avec le potentiel d'atténuation unitaire.

Tableau 2: Potentiel d'atténuation à l'horizon 2030 des émissions sur l'exploitation (d'après Favardin *et al.*, 2013)

	2PAA	MPAA+
Atténuation échelle France en 2030 (MtCO ₂ e/an)	0,48	0,66
Atténuation cumulée échelle France entre 2010 et 2030 (MtCO ₂ e/an)	7,4	3,7

4.2 Potentiel de réduction des émissions amont

Les modifications de composition des aliments induites par les deux options techniques entraînent des modifications de coût d'alimentation. Dans le contexte actuel des prix des matières premières, les deux options techniques permettent de réduire sensiblement le coût des aliments, via la diminution d'incorporation du tourteau de soja (Tableau 3) et plus généralement des ingrédients riches en protéines.

Tableau 3 : Coût alimentaire, quantités de tourteau de soja et d'acides aminés alimentaires incorporés dans les aliments et émissions de GES en amont de l'exploitation associées à la production d'une truie productive et de sa suite pendant un an pour le scénario 2010 de référence (20% monophasé et 80% biphase) et variations induites pour les 2 scénarios, biphase enrichi en acides aminés (2PAA+) et multiphasé enrichi en acides aminés (MPAA+) (d'après Favardin *et al.*, 2013).

	Référence 2010	2PAA+	MPAA+
Coût aliment (€/t)	221,5	-5,6	-9,2
Consommation moyenne de tourteau de soja (kg/truie environnée/an)	753,8	-342,6	-333,2
Consommation moyenne de céréales (blé tendre et orge) (kg/truie environnée/an)	4558,2	1339,4	1715,2
Emissions amont (production des matières premières des aliments) (kgCO ₂ e/truie environnée/an)	4107	-306	-374

¹ Les estimations par truie et par an tiennent compte des émissions associées à l'élevage des porcelets et des porcs à l'engrais produits par truie et par an.

La variation de coût de l'aliment est de -49 €/truie/an pour l'option technique 2PAA+ et de -81€/truie/an pour l'option technique MPAA+. Les résultats montrent que la mise en œuvre des options techniques explorées permet de réduire les émissions de GES associées aussi bien à la production des aliments qu'à leur utilisation et devenir en élevage (excrétion par les animaux, stockage et épandage des effluents). Ainsi la substitution de matières premières riches en protéines, telles que le tourteau de soja, par des céréales et des acides aminés alimentaires, permet de réduire les émissions amont de GES de 7,5 et 9% pour les options 2PAA+ et MPAA+, respectivement (Tableau 3).

L'atténuation totale à l'échelle de la France (émissions sur l'exploitation et émissions amont) en 2030 (Tableau 4) est environ 1,5 fois supérieure à l'atténuation des seules émissions sur l'exploitation. Comme pour les émissions sur l'exploitation, l'atténuation cumulée entre 2010 et 2030 est plus importante pour l'option 2PAA+ que pour l'option MPAA+, en raison de l'hypothèse de l'adoption plus tardive de l'option MPAA+.

Tableau 4 : Potentiel d'atténuation total (émissions sur l'exploitation et émissions amont) à l'horizon 2030 (d'après Faverdin *et al.*, 2013)

	2PAA+	MPAA+
Atténuation échelle France en 2030 (MtCO ₂ e/an)	0,77	1,01
Atténuation cumulée échelle France entre 2010 et 2030 (MtCO ₂ e/an)	11,9	5,7

4.3 Des stratégies « gagnant-gagnant »

La réduction des émissions de GES sur l'exploitation se fait à coût négatif pour les options 2PAA+ et MPAA+. En effet, l'option 2PAA+ ne nécessite pas d'équipement particulier, l'essentiel des exploitations étant déjà équipé pour l'aliment biphasé. Concernant les coûts d'investissement liés au passage en multiphasé, l'annuité équivalente constante a été estimée à 29,46€/trouille/an (d'après Faverdin *et al.*, 2013) sur la base de devis estimatifs établis auprès des professionnels du secteur. Ainsi, le coût de la tonne de CO₂-e évitée est de -96,4€ pour l'option 2PAA+ et de -71,7€ pour l'option MPAA+.

Les options 2PAA+ et MPAA+ ont par ailleurs été explorées dans le cadre d'une étude ACV pour quantifier leur potentiel de réduction de plusieurs impacts environnementaux majeurs : changement climatique, mais aussi eutrophisation, acidification, écotoxicité terrestre, demande en énergie, et utilisation des surfaces (Garcia-Launay *et al.*, 2013 et 2014). Les résultats obtenus ont permis de démontrer que la formulation des aliments pour porcs à moindre coût en incorporant des acides aminés alimentaires pour couvrir les besoins en acides aminés indispensables, et avec des teneurs en matières azotées totales libres, permet de réduire les impacts de la production porcine sur le changement climatique, l'eutrophisation et l'acidification. L'étude réalisée a permis également de vérifier le maintien de l'effet positif de ces deux options, quel que soit le système de gestion des effluents (lisier vs. fumier) ou le nombre d'aliments offerts aux porcs à l'engrais. Les options explorées permettent également de réduire les impacts, mais dans une moindre mesure, sur la demande en énergie, l'écotoxicité terrestre et l'occupation des surfaces. L'analyse de sensibilité réalisée dans cette étude ACV montre que la réduction des impacts changement climatique, acidification et eutrophisation est peu sensible aux différents contextes de prix des matières premières et que les émissions associées à la production des acides aminés impactent de façon très marginale les résultats (Garcia-Launay *et al.*, 2013 et 2014).

La présente étude montre que l'utilisation accrue des acides aminés alimentaires et l'utilisation d'un plan d'alimentation biphasé ou multiphasé sont des stratégies de réduction des GES de type « gagnant-gagnant ». Elles permettent de réduire les émissions de GES, mais aussi d'autres impacts environnementaux importants associés à la production porcine. Adopter ces pratiques nécessite cependant une très bonne maîtrise technique qui peut être facilitée par des outils pour l'aide à la décision. Les logiciels développés au cours des dernières années visent à apporter les supports de formation et d'aide à la décision pour la mise en œuvre opérationnelle de ces pratiques.

5. Vers plus d'opérationnalité et une meilleure estimation des émissions

Les études précédemment présentées démontrent l'intérêt d'une utilisation accrue des acides aminés industriels dans des plans d'alimentation biphasé ou multiphasé des porcs. Pour accompagner et favoriser ces pratiques, il est important de fournir à la filière des outils permettant de mesurer les améliorations au fur et à mesure de leur mise en œuvre dans les élevages. Cette lisibilité est motivante et permet d'attester des progrès réalisés.

Trois échelles de formalisation apparaissent pertinentes : (1) celle de l'atelier porcin où ont lieu les émissions azotées directes (N_2O et NH_3) et indirectes (N_2O lié aux émissions de NH_3) lors de la gestion des animaux et de leurs effluents, (2) celle de la formulation des aliments qui détermine le choix des matières premières et par conséquent les émissions de GES en amont lors de la production des intrants, et enfin (3) celle des inventaires nationaux qui quantifient les émissions françaises par secteur et leur évolution.

A l'échelle de l'atelier porcin, respectivement 46% et 43% des éleveurs sont impliqués dans les programmes nationaux de Gestion Technico Economique (GTE) et de Gestion Technique des Troupeaux de Truies (GTTT) (IFIP, 2012). Les indicateurs suivis tels le gain moyen quotidien (GMQ) ou l'indice de consommation (IC), en complément de la composition des aliments (MAT), rend possible un calcul de l'excrétion azotée dont découlent ensuite les émissions gazeuses de N_2O et NH_3 . Les équations du bilan réel simplifié du Corpen (2003) permettent de calculer l'excrétion azotée par différence entre l'azote ingéré et l'azote retenu par les animaux. Les émissions gazeuses sont ensuite déduites de facteurs d'émissions de N_2O et NH_3 appliqués aux quantités excrétées (N et TAN) (EMEP/EEA, 2010). L'enchaînement des différents postes (bâtiment, stockage et épandage) est abordé par bilan massique où l'azote entrant dans un poste est la différence entre l'azote entré dans le poste précédent et les pertes azotées y ayant eu lieu. Des modèles sont donc disponibles pour faire le lien entre les performances techniques des animaux et les flux environnementaux comme les émissions azotées directes. Deux outils mettent en jeu ce savoir pour lier performances techniques et flux environnementaux :

- **GEEP** (Espagnol, 2012) est un outil technique de Gestion Environnementale des Elevages porcins complémentaire de la gestion technico-économique (GTE/GTTT). Il propose aux éleveurs des indicateurs de performance environnementale et quantifie notamment les rejets azotés, les émissions de N_2O et de NH_3 en fonction de l'alimentation des porcs, de leur performances techniques et de leur configuration d'élevage (type de sol, modalités de gestion des effluents). Les valeurs individuelles servent au calcul de moyennes qui peuvent servir de références à l'échelle de collectifs d'éleveurs et à l'échelle nationale.

- **ENGELE** est un simulateur pédagogique des flux environnementaux d'élevages porcins en lien avec le type d'élevage et les pratiques (Dourmad *et al.*, 2013). L'outil, destiné à l'enseignement et à la formation, tient sa spécificité de son format immersif dans un environnement 3D avec une visualisation immédiate d'incidences environnementales de choix techniques (jusqu'au calcul d'indicateurs ACV). A l'échelle de l'atelier porcin, des outils existent donc d'ores et déjà pour permettre à la filière de suivre et d'attester de progrès sur la réduction de GES en diminuant les apports azotés.

Pour l'étape de formulation des aliments du bétail, les acteurs mobilisent actuellement des données sur les prix et les caractéristiques nutritionnelles des matières premières. L'objectif est de formuler des aliments qui répondent aux besoins des porcs à moindre coût. Si des études montrent le bénéfice environnemental d'une prise en compte de critères environnementaux dans l'exercice de la formulation (Nguyen *et al.*, 2012a ; Mosnier *et al.*, 2011, Garcia-Launay *et al.*, 2014), la mise à disposition de données permettant à des formulateurs d'utiliser ces critères requiert un travail complémentaire. Les données doivent être homogènes (même méthodologie ACV). Elles doivent par ailleurs permettre de renseigner une formulation complète et de spécifier un transport. Enfin, l'unique donnée ACV moyenne nationale par matière première semble insuffisante car des différences d'impacts peuvent être plus

importantes pour une même culture, en fonction de différents itinéraires de production, qu'entre cultures. Concernant le soja brésilien, cette prise en compte des différents itinéraires de production a permis d'arriver à des estimations reconnues des émissions GES (Prudencio da Silva *et al.*, 2010). Avec cet objectif, l'initiative ECOALIM (Espagnol, 2013) soutenue par le CASDAR et l'ADEME propose de produire et de fournir à la filière ces références. Le travail se veut en continuité avec la production de références ACV homogènes de produits agricoles au portail de la ferme d'Agribalyse (Colomb *et al.*, 2014).

Au niveau des inventaires nationaux réalisés par le CITEPA (2014), les méthodes de calcul s'améliorent pour prendre en compte les évolutions des élevages. De l'utilisation de simples facteurs d'émissions à l'animal ne permettant pas d'attester de progrès de réduction de GES par la diminution des apports azotés, les méthodes se sont progressivement affinées jusqu'à PACRETE (Programme Access pour le Calcul Régionalisé des Emissions aTmosphériques de l'Elevage). Le système PACRETE permet d'harmoniser des données régionales issues de différentes sources. Les excréments azotés y sont modulés en fonction :

- **Du stade physiologique** : Ces catégories basées sur les stades physiologiques ont été adaptées aux catégories de la statistique agricole annuelle grâce à des données techniques de la filière. Le nombre de porcs par place et par an a ainsi pu être calculé à partir des poids d'entrée et de sortie, du gain moyen quotidien et de la durée de vide sanitaire à chaque stade physiologique.

- **De la part de la population porcine en alimentation biphasé** : L'évolution du nombre d'animaux en alimentation biphasé est connue grâce à l'enquête bâtiments d'élevage du SCEES de 2001 (60% des porcs) et 2008 (83%).

Les modalités actuelles de calcul des inventaires nationaux des émissions gazeuses sont donc sensibles à une évolution des rejets des porcs. La prise en compte effective est toutefois jalonnée à la parution d'enquêtes SCEES nationale ponctuelles (enquête bâtiment). De nouvelles évolutions sont prévues pour prendre en compte l'utilisation de pratiques telles que l'évacuation fréquente des déjections ou la couverture de fosse et leur effet sur les émissions gazeuses.

Conclusion

Les stratégies de réduction des apports azotés en élevage porcin apparaissent comme des approches efficaces pour réduire les émissions de GES sur les exploitations, mais aussi en amont des exploitations. Cette atténuation s'accompagne d'une réduction d'un certain nombre d'autres impacts environnementaux importants, comme l'eutrophisation et l'acidification. Il faut cependant noter que ces estimations sont entachées d'une incertitude, associée principalement aux incertitudes sur les facteurs d'émissions, en particulier du N₂O en bâtiment et au stockage.

Les élevages porcins se sont déjà largement engagés dans cette voie au cours des 15 dernières années, et les quantités d'azote ingéré et excrété par truie et par an ont déjà été réduites. Cette étude montre néanmoins qu'une marge de manœuvre intéressante existe encore, à moindre coût pour les éleveurs.

Les efforts engagés en termes de formation et d'aide à la décision au cours des dernières années doivent se poursuivre et devraient contribuer à l'adoption de ces pratiques au cours de la prochaine décennie. Les méthodes d'inventaire des émissions de GES pour l'agriculture française doivent par ailleurs poursuivre leur amélioration pour permettre la prise en compte de ces progrès dans les instances internationales.

Références bibliographiques

AGRESTE, 2008. Enquête sur les bâtiments d'élevage porcin de novembre 2008. Téléchargé le 12/10/2012 sur http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf_porcin2010T5.pdf

AGRESTE, 2010. Statistique Agricole Annuelle Bovins – Porcins – Ovins – Caprins. <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/saa2012T9.pdf>

Ajinomoto Eurolysine S.A.S., 2011. Formulating pig grower diets with no minimum crude protein - Essential amino acids requirements; energy systems and low protein diets. Go to essentials, Information N°37, 39 p. Téléchargeable sur <http://ajinomoto-eurolysine.fr/telechargement-bulletins-techniques.html>

Bourdon D., Dourmad J.Y., Henry H., 1995. Réduction des rejets azotés chez le porc en croissance par la mise en oeuvre de l'alimentation multiphase, associée à l'abaissement du taux azoté. Journées Rech. Porcine Fr., 27, 269-278.

Canh T.T., Aarnink A.J.A., Schutte J.B., Sutton A., Langhout D.J., Verstegen M.W.A., 1998. Dietary protein affects nitrogen excretion and ammonia emission from slurry of growing-finishing pigs. Livestock Production Science 56, 181-191.

CITEPA, 2014. Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France, 11^{ème} édition – OMINEA – rapport national d'inventaire. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 1365p.

Colomb V., Aït-Amar S., Basset-Mens C., Dollé J.B., Gac A., Gaillard G., Koch P., Lellahi A., Mousset J., Salou T., Tailleux A., van der Werf H., 2014. AGRIBALYSE®: bilan et enseignements. Version 1.1, Mars 2014. Ed ADEME. Angers, France. pp 54. Disponible sur : www.ademe.fr/agribalyse

CORPEN, 1996. Estimation des rejets d'azote et de phosphore des élevages de porcs. CORPEN (Ed) Paris, 23p.

CORPEN, 2003. Estimation des rejets d'azote, phosphore, potassium, cuivre et zinc des porcs. CORPEN (Ed) Paris, 41p.

Dourmad J.Y., Henry Y., Bourdon D., Quiniou N., Guillou D., 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.

Dourmad J.Y., Le Mouel C., Rainelli P., 1995. Réduction des rejets azotés des porcs par la voie alimentaire : évaluation économique et influence des changements de la Politique Agricole Commune. Productions Animales 8 (2), 135-144.

Dourmad J.-Y., Étienne M., Valancogne A., Dubois S., van Milgen J., Noblet J., 2008. InraPorc: A model and decision support tool for the nutrition of sows. Animal Feed Science and Technology 143, 372-386.

Dourmad J.Y., Brossard L., van Milgen J., Noblet J., 2011. InraPorc®, EvaPig® : des modèles et des logiciels pour optimiser la nutrition des porcs et réduire les rejets. Innovations Agronomiques 12, 87-96.

Dourmad J.Y., Ryschawy J., Trousson T., Bonneau M., Gonzalez A.M., Houwers H.W.J., Hviid M., Zimmer C., Nguyen T.L.T., Morgensen L., 2012. Evaluation of the environmental sustainability of different European pig production systems using life cycle assessment. . 8th International Conference on LCA in the Agri-Food Sector, Saint-Malo, France, p. 98.

Dourmad J.Y., Adjil K., Boulestreau-Boulay A-L., Emeraud L., Espagnol S., 2013. A 3D-serious game for teaching the environmental sustainability of pig farming systems. EAAP 2013.

EMEP/EEA, 2010. Emission inventory guidebook 2009, updated June 2010. 4.B Animal husbandry and manure management. 73 pp.

Espagnol S., 2012. Mise en place d'un réseau environnemental d'élevages porcins. Techporc, 3, 20-23.

Espagnol S., 2013. ECOALIM : Améliorer le bilan environnemental des élevages porcins, avicoles et bovins français en optimisant les aliments composés. Séminaire de lancement des projets REACTIF, ADEME, 9-10 avril 2013.

Faverdin P., Garcia-Launay F., Benoît M., 2013. Réduire les apports protéiques dans les rations animales pour limiter les teneurs en azote des effluents et réduire les émissions de N₂O associées. In :

Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoît M., Butault J.P., Chenu C., Colnenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M.H., Klumpp K., Metay A., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., Pardon L., 2013. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Rapport d'étude, INRA (France), 454 p.

Garcia-Launay F., van der Werf H., Nguyen T.T.H., Le Tutour L., Dourmad J-Y., 2013. L'incorporation des acides aminés industriels dans les aliments permet de réduire l'impact environnemental de la production porcine. Journées de la Recherche Porcine 45, 123-128.

Garcia-Launay F., van der Werf H.M.G., Nguyen T.T.H., Le Tutour L., Dourmad J.Y., 2014. Evaluation of the environmental implications of the use of amino acids in pig production using Life Cycle Assessment. *Livestock Science* 161, 158-175.

IFIP, 2010. Gestion Technico-économique : Evolution des résultats moyens nationaux - naisseurs-engraisseurs. Téléchargé le 10/10/2012. <http://www.itp.asso.fr/PagesStatics/resultat/pdf/retro/gte03.pdf>

IFIP, 2010. Gestion Technique des troupeaux de truies: Evolution des résultats moyens nationaux de 1970 à 2011. Téléchargé le 10/10/2012. <http://www.itp.asso.fr/PagesStatics/resultat/pdf/retro/00gttt.pdf>

IFIP, 2012. Porc Performances 2012 : GTE, GTTT. 32p.

InraPorc, 2006. Un outil pour évaluer des stratégies alimentaires chez le porc. Version 1.0.4.0. INRA-UMR SENAH, www.rennes.inra.fr/inraporc

Jarret G., Martinez J., Dourmad J.Y., 2011. Pig feeding strategy coupled with effluent management - fresh or stored slurry, solid phase separation - on methane potential and methane conversion factors during storage. *Atmospheric Environment* 45, 6204-6209.

Le P.D., Aarnink A.J.A., Jongbloed A.W., 2009. Odour and ammonia emission from pig manure as affected by dietary crude protein level. *Livestock Science* 121, 267-274.

Leek A.B.G., Hayes E.T., Curran T.P., Callan J.J., Beattie V.E., Dodd V.A., O'Doherty J.V., 2007. The influence of manure composition on emissions of odour and ammonia from finishing pigs fed different concentrations of dietary crude protein. *Bioresource Technology* 98, 3431-3439.

Mosnier E., van der Werf H.M.G., Boissy J., Dourmad J.Y., 2011. Evaluation of the environmental implications of the incorporation of feed-use amino acids in the manufacturing of pig and broiler feeds using Life Cycle Assessment. *Animal*, 5(12), 1972-1983.

Nguyen T.T.H., Bouvarel I., Ponchant P., van der Werf H.M.G., 2012a. Using environmental constraints to formulate low-impact poultry feeds. *Journal of Cleaner Production* 28, 215-224.

Nguyen T.T.H., van der Werf H.M.G., Eugène M., Veysset P., Devun J., Chesneau G., Doreau M., 2012b. Effects of type of ration and allocation methods on the environmental impacts of beef-production systems. *Livestock Science* 145, 239-251.

Osada T., Takada R., Shinzato I., 2011. Potential reduction of greenhouse gas emission from swine manure by using a low-protein diet supplemented with synthetic amino acids. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 166-67, 562-574.

Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benpoît M., Butault J.P., Chenu C., Clnenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz M., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M.H., Klumpp K., Metay A., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., Pardon L., 2013. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 92p.

PAS2050, 2011. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. British Standard, Department for Environment Food and Rural Affairs and Carbon Trust. British Standards Institute, London, 45 pp.

Peyraud J.L., Cellier P., (coord.), Aarts F., Béline F., Bockstaller C., Bourblanc M., Delaby L., Donnars C., Dourmad J.Y., Dupraz P., Durand P., Faverdin P., Fiorelli J.L., Gaigné C., Girard A., Guillaume F., Kuikman P., Langlais A., Le Goffe P., Le Perchec S., Lescoat P., Morvan T., Nicourt C., Parnaudeau V., Réchauchère O., Rochette P., Vertes F., Veysset P., 2012. Les flux d'azote liés aux élevages, réduire les pertes, rétablir les équilibres. Expertise scientifique collective, rapport, Inra (France), 527 pages.

Portejoie S., Dourmad J.Y., Martinez J., Lebreton Y., 2004. Effect of lowering dietary crude protein on nitrogen excretion, manure composition and ammonia emission from fattening pigs. *Livest. Prod. Sci.*, 91, 45-55.

Prudêncio da Silva V., van der Werf H.M.G., Spies A., Soares S.R., 2010. Variability in environmental impacts of Brazilian soybean according to crop production and transport scenarios. *Journal of Environmental Management* 91, 1831-1839.

Quiniou N., Primot Y., Peyronnet C., Quinsac A., 2011. Interest of using synthetic amino acids, including L-Valine, for formulating low crude protein pig diets based on rapeseed meal. In : Proc of the 62nd Annual Meeting of the European Association of Animal Production, Stavanger, Norvège, 17.

Rigolot C., Espagnol S., Pomar C., Dourmad J.Y., 2010. Modelling of manure production by pigs and NH₃, N₂O and CH₄ emissions. Part I: animal excretion and enteric CH₄, effect of feeding and performance. *Animal* 4, 1401-1412.

Sauvant D., Perez J.M., Tran G., 2004. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage : porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons. Versailles : Inra Editions-AFZ, 293 p.

van Milgen J., Valancogne A., Dubois S., Dourmad J.-Y., Sève B., Noblet J., 2008. InraPorc: A model and decision support tool for the nutrition of growing pigs. *Animal Feed Science and Technology* 143, 387-405.

Vedrenne F., Beline F., Dabert P., Bernet N., 2008. The effect of incubation conditions on the laboratory measurement of the methane producing capacity of livestock measurement wastes. *Bioresource Technology* 99, 146-155.