

Action 8

Réduire les apports protéiques dans les rations animales pour limiter les teneurs en azote des effluents et les émissions de N₂O associées

Auteurs

Philippe Faverdin (INRA-PHASE)
Florence Garcia-Launay (INRA-PHASE)
Marc Benoit (INRA-SAE2)

Appui scientifique interne

Michel Doreau (INRA-PHASE)
Katja Klumpp (INRA-EFPA)

Relecteurs scientifiques externes

Chaouki Benchaar (Agriculture et Agroalimentaire Canada)
Eric Froidmont (Centre wallon de Recherches agronomiques)

Relecteurs techniques externes

Jean-Baptiste Dollé (Institut de l'Élevage)
Didier Gaudré (IFIP)

1. Introduction : cadrage et description succincte de l'action

Les animaux d'élevage consomment beaucoup d'azote essentiellement sous forme de protéines végétales, mais ils les transforment avec un rendement assez faible, compris en général entre 10 et 30% de l'azote ingéré. De ce fait, les quantités d'azote alimentaire nécessaires pour produire du lait ou de la viande sont élevées, et conduisent à des rejets importants. Les composés azotés contenus dans les effluents animaux contribuent, après transformation, aux émissions de N₂O, en plus de leurs effets négatifs sur la qualité de l'air (cas du NH₃), la potabilité de l'eau, l'eutrophisation et l'acidification des milieux. Les quantités de N₂O associées à la gestion des effluents et émises à l'échelle de la France en 2010 s'élèvent à 16 660 Mg (CITEPA, 2012), soit 5 164 600 MgCO_{2e}/an pour l'ensemble du secteur de l'élevage. Les variations d'apports azotés chez les vaches laitières et les porcs expliquent en grande partie les variations d'azote excrété, en particulier urinaire, et les émissions associées de protoxyde d'azote (N₂O) et d'ammoniac (NH₃) en prenant en compte les modes de logement des animaux (Portejoie et al., 2004 ; Le et al., 2009). Ces émissions interviennent en bâtiment, au pâturage, ou encore pendant les phases de stockage et d'épandage des effluents. Pour réduire ces émissions, les niveaux d'azote ingéré et donc excrété peuvent être diminués conjointement en ajustant mieux la quantité de protéines apportées aux besoins des animaux, et en améliorant la qualité des protéines et donc leur rendement d'utilisation. D'autres réductions peuvent être obtenues par le biais de la gestion des effluents.

L'objectif de cette action est de réduire la quantité d'azote excrétée par les animaux d'élevage en modifiant le niveau et la qualité des apports alimentaires azotés, afin de réduire les émissions de N₂O associées avec des méthodes de rationnement qui affectent peu ou pas la production. L'action comparera donc les émissions de la situation actuelle avec celles associées à une alimentation protéique réduite grâce à un apport plus précis par rapport aux besoins et/ou par un meilleur équilibre en acides aminés. L'action porte sur les ateliers "bovins lait" et "porcs" de l'exploitation agricole.

Les volailles n'ont pas été incluses dans l'action. Les mécanismes sont pourtant voisins de ceux observés chez les porcs (Bouvarel et al., 2010), mais l'élevage de volailles dispose cependant de moins de marge de manœuvre. En effet, les pratiques de réduction des apports azotés sont soit déjà mises en œuvre, soit difficilement applicables parce que les performances peuvent être réduites de façon importante, l'indice de consommation dégradé et la composition corporelle altérée avec des carcasses plus grasses. Les bovins viande n'ont pas été inclus dans l'action par manque de références sur les pratiques d'alimentation des élevages. Les équidés et les petits ruminants n'ont pas été pris en compte, bien que les niveaux d'apports azotés soient importants en production d'agneaux de bergerie ou chez les chèvres laitières, en raison des effectifs faibles de ces filières au regard de l'élevage français, l'ensemble de toutes ces catégories ne représentant que 11% des excréments azotés des herbivores réparties en une très large diversité de systèmes de production.

L'action est organisée en deux sous actions, la première en élevage laitier et la seconde en élevage porcin. En élevage laitier, l'action porte exclusivement sur l'alimentation des vaches laitières. Elle consiste à réduire les apports azotés dans les rations hivernales, sans variation de production laitière. En élevage porcin, l'action concerne les pratiques d'alimentation des truies en production, des porcelets sevrés (dits en post-sevrage) et des porcs en engraissement. Elle consiste à améliorer l'efficacité de l'utilisation des protéines en améliorant l'équilibre en acides aminés des protéines *via* l'incorporation d'acides aminés de synthèse (Canh et al., 1998 ; Quiniou et al., 2011) et en ajustant en dynamique les apports aux besoins en acides aminés des porcs en engraissement *via* un plan d'alimentation multiphase.

2. Description de l'action

2.a. Mécanismes en jeu et émissions de GES associées

Les émissions intervenant sur l'exploitation (directes) ou dans les espaces physiquement liés (indirectes) sont influencées par les teneurs en azote des rations. L'azote est majoritairement excrété sous deux formes : l'azote fécal composé de protéines non digérées, de protéines endogènes et des résidus d'azote microbien, et l'azote urinaire composé principalement d'urée, déchet non toxique fabriqué pour éliminer l'ammoniaque issu du catabolisme des protéines. Si l'azote fécal est relativement stable, l'azote urinaire essentiellement ammoniacal est très instable et se volatilise facilement en ammoniac (Bussink et Oenema, 1998). L'évolution de l'azote ammoniacal des effluents dépend des conditions de stockage, en particulier si elles sont anaérobies (lisier) ou aérobies (fumier). 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 N₂O 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 N₂ et de N₂O. Ainsi l'azote urinaire conduit à des émissions de NH₃ et de N₂O. Une faible partie de l'ammoniac est secondairement transformée en N₂O 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 (N₂O), 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.

Les émissions induites en amont de l'exploitation concernent principalement les émissions associées à la production des matières premières des aliments. Les bovins viande ont des rendements faibles de transformation des protéines des aliments en protéines de la viande, mais ils consomment surtout des protéines "locales", majoritairement non consommables par l'homme, produites par les prairies qui peuvent stocker du carbone. A l'opposé, les vaches laitières, les porcs ou les poules présentent des rendements élevés, mais consomment beaucoup plus 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 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 MgCO_{2e}/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 induites associées à cette production.

2.b. Sous-actions et éventuelles options techniques instruites

Sous-action "Réduire la teneur en protéines des rations des vaches laitières"

Cette sous-action concerne potentiellement tous les ruminants qui reçoivent des quantités importantes de compléments protéiques, ce qui ne vise principalement que des vaches laitières et des jeunes bovins. Cependant, la connaissance des pratiques alimentaires et les possibilités de contrôle de cette information sont trop faibles pour imaginer une quantification des effets en jeunes bovins. Pour les ruminants, l'action ne va donc prendre en compte que les vaches laitières qui reçoivent des compléments protéiques spécifiques dont il est facile de maîtriser la distribution. L'alimentation hivernale peut être réduite en protéines pratiquement sans perte de production dans de nombreuses situations si l'on évite une suralimentation protéique. Vérité et Delaby (1998) ont montré que des teneurs de 100 g de PDIE/UFL dans les rations de vaches laitières permettaient une efficacité optimale de l'utilisation des protéines. Au-delà de ce seuil, les sécrétions de protéines dans le lait augmentent peu, l'efficacité alimentaire se dégradant (moins de lait/kg de MS ingéré), alors que l'excrétion d'azote dans l'urine par kg de lait produit augmente rapidement (Figure 8-1).

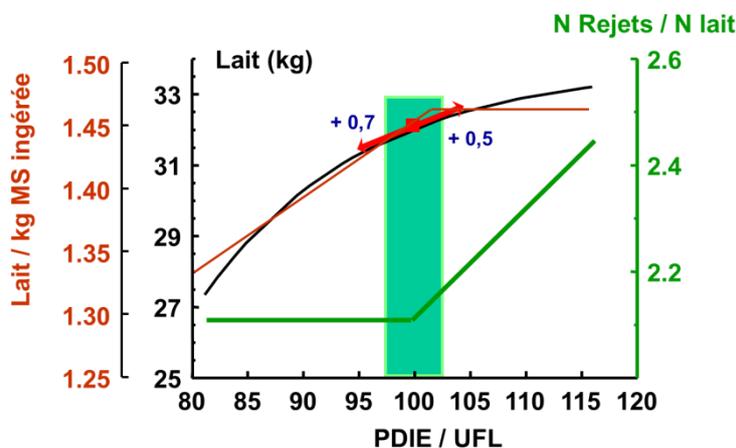


Figure 8-1. Evolution de la production de lait (courbe noire) et des indicateurs d'efficacité alimentaire (courbe rouge) et de rejet d'azote (courbe verte) montrant un optimum vers une densité protéique de la ration de 100 g de PDIE/UFL (en supposant PDIN=PDIE) (d'après Vérité et Delaby 1998).

L'action supposera donc un équilibre PDIE=PDIN des rations qui évite tout excès d'azote dégradable mal valorisé et tout risque de carence d'azote dégradable pour les microbes. Cet objectif est facilement réalisable avec des régimes à base d'ensilage de maïs en période hivernale.

L'utilisation des acides aminés de synthèse est également possible et permet d'accroître légèrement l'efficacité d'utilisation des sources protéiques. Cependant, ces actions étaient surtout connues à hauts niveaux protéiques auxquels la plupart des essais ont été réalisés et pour lesquels les préconisations de leur utilisation étaient faites. Un essai récent semble indiquer que cette pratique pourrait fonctionner même à bas niveau d'apport protéique (Haque et al., 2012), ce qui rendrait cette option envisageable à terme. L'impact en ruminants est plus réduit qu'en monogastriques et son adoption plus coûteuse en raison de la nécessité de protéger les acides aminés de la dégradation par les microbes dans le rumen.

Il est donc possible d'alimenter correctement des vaches laitières avec des rations hivernales à base d'ensilage de maïs en visant un objectif maximal de 14% de MAT. Ce chiffre correspond à la traduction d'une ration bien équilibrée pour les deux critères précédents (100 g PDIE/UFL et PDIE=PDIN). Si l'on fait l'hypothèse que des rations hivernales de vaches laitières ont une concentration énergétique de 0,90 à 0,95 UFL par kg de MS (parfois moins en systèmes plus économes) et sachant que la teneur PDIN des rations correspond en moyenne aux 2/3 de celle des matières azotées, on peut estimer la teneur en matières azotées de la ration en prenant $MAT=(0,925*100)/0,66$, soit 140 g de MAT. Cette teneur moyenne peut être modulée en pratique au sein du troupeau en fonction du stade de lactation, notamment par le biais de rations semi-complètes. On notera que s'il est possible d'équilibrer une ration avec 14% de MAT, toutes les rations avec 14% de MAT ne sont pas équilibrées pour autant, et le choix des matières protéiques doit être raisonné. Le recours à des matières protéiques à faible dégradabilité (tourteaux tannés) peut s'avérer nécessaire avec certains types de rations pour atteindre l'objectif recherché. Les possibilités d'aller en dessous de 14% ne seront pas étudiées faute de pouvoir les quantifier actuellement dans le scénario français.

Sous-action "Réduire la teneur en protéines des rations des porcs et des truies"

Les deux options techniques explorées dans cette sous-action sont : i) **Utilisation accrue des acides aminés avec alimentation biphasé des porcs à l'engrais (2PAA+)** et ii) **Utilisation accrue des acides aminés avec alimentation multiphasé des porcs à l'engrais (MPAA+)**. En effet, deux pratiques d'alimentation peuvent être mobilisées pour améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote par le porc et donc en réduire l'excrétion. La première consiste à ajuster l'apport de protéines et d'acides aminés au cours du temps en fonction de l'évolution du potentiel de croissance des animaux ou de leur état physiologique. Appliquée chez le porc en engraissement, cette approche consiste à pratiquer une alimentation dite "multiphasé" dans laquelle la composition de l'aliment distribué est modifiée régulièrement (au moins dix fois) pour adapter les apports de protéines (et d'acides aminés) et d'énergie selon le stade et le potentiel des animaux. La seconde pratique d'alimentation consiste à améliorer l'équilibre en acides aminés de la ration, afin de réduire sa 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 de synthèse permet de réaliser cette "économie" de protéines. Les pratiques actuelles correspondent très majoritairement à une alimentation biphasé des porcs à l'engrais avec des apports d'acides aminés permettant de respecter les niveaux de protéines édités par le CORPEN (Comité d'Orientation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'ENvironnement) en 2003. Une utilisation accrue des acides aminés pour toutes les catégories d'animaux, associée éventuellement à une formulation multiphasé de l'aliment distribué aux porcs à l'engrais, peut donc contribuer à réduire les émissions de GES en amont de l'exploitation mais aussi sur l'exploitation. Dans cette sous-action "porcs", l'utilisation accrue des acides aminés pour réduire les teneurs en protéines des aliments est appliquée aussi bien aux truies qu'aux porcs en post-sevrage et en engraissement.

2.c. Rapports et expertises majeurs ayant déjà examiné/évalué l'action

Bouvarel I., Dourmad J.Y., Gac A., 2010. Les stratégies d'alimentation des animaux au sein de l'exploitation et du territoire et leurs incidences environnementales. In "Elevages et Environnement", S. Espagnol et P. Leterme (Eds). Quae et Educagri Editions, 260 p.

Place S.E., Mitloehner F.M., 2010. Invited review: Contemporary environmental issues: A review of the dairy industry's role in climate change and air quality and the potential of mitigation through improved production efficiency. *Journal of Dairy Science*, 93, 3407-3416.

Peyraud J.L., Cellier P. (coord.), F. Aarts, F. Béline, C. Bockstaller, M. Bourblanc, L. Delaby, C. Donnars, J.Y. Dourmad, P. Dupraz, P. Durand, P. Faverdin, J.L. Fiorelli, C. Gagné, A. Girard, F. Guillaume, P. Kuikman, A. Langlais, P. Le Goffe, S. Le Perchec, P. Lescoat, T. Morvan, C. Nicourt, V. Parnaudeau, J.L. Peyraud, O. Réchauchère, P. Rochette, F. Vertes, P. Veysset, 2012. Les flux d'azote liés aux élevages, réduire les pertes, rétablir les équilibres. Expertise scientifique collective, rapport, INRA (France), 503 p.

Schils R.L.M., Eriksen J., Ledgard S.F., Vellinga Th.V., Kuikman P.J., Luo J., Petersen S.O., Velthof G.L., 2012. Strategies to mitigate nitrous oxide emissions from herbivore production systems. *Animal*
Available on CJO2011 doi:10.1017/S175173111100187X

Van Duinkerken G., Andre G., Smits M.C.J., Monteny G.J., Sebek L.B.J., 2005. Effect of Rumen-Degradable Protein Balance and Forage Type on Bulk Milk Urea Concentration and Emission of Ammonia from Dairy Cow Houses. *J. Dairy Sci.* 88, 1099-1112.

Vellinga T.V., de Haan M.H.A., Schils R.L.M., Evers A., van den Pol-van Dasselaar A., 2011. Implementation of GHG mitigation on intensive dairy farms: Farmers' preferences and variation in cost effectiveness. *Livestock Science* 137, 185-195.

L'expertise scientifique collective "Elevage et azote" vient très récemment d'étudier ces voies d'actions pour réduire les émissions d'azote et accroître l'efficacité. Une synthèse a également été présentée dans l'ouvrage du RMT "Elevages et Environnement" par Bouvarel et al. (2010). La synthèse de Place et Mitloehner (2010) propose de limiter les apports azotés pour réduire les rejets d'azote urinaire et les émissions associées, notamment en utilisant l'alimentation de précision dans les élevages. Ces effets sont validés par des mesures en fermes, y compris dans les émissions calculées par hectare lorsque l'on joue sur la complémentation protéique (Arriaga et al., 2009). La synthèse de Schils et al. (2012) propose une revue sur les pistes de réduction des émissions de N₂O, dont l'alimentation, avec une mise en avant très forte des bénéfices de l'utilisation de l'ensilage de maïs en remplacement de l'herbe. Il faut noter cependant que ce ne sont pas les émissions par ha qui sont réduites, mais celles par kg de lait, l'ensilage de maïs permettant d'intensifier la production par ha (Chatellier et Vérité, 2003). De plus, l'augmentation de temps passé en bâtiment s'il y a moins de pâturage tend à accroître les stockages d'effluents et les émissions d'ammoniac. Vellinga et al. (2011) ont étudié les options de réduction des émissions les plus acceptables pour les éleveurs laitiers aux Pays-Bas, parmi lesquelles figure l'utilisation d'aliments concentrés de manière plus ciblée. Toutes ces études convergent cependant pour conclure qu'une réduction des rejets azotés en bâtiments constitue une voie intéressante de réduction des émissions de gaz à effet de serre et d'ammoniac.

3. Etat des connaissances sur les phénomènes/mécanismes sous-jacents et leur quantification

Deux mécanismes sous-jacents quant aux émissions de GES peuvent être décrits quand on réduit les apports azotés des vaches laitières et des porcs. D'une part, la réduction des apports azotés affecte directement la quantité d'azote excrétée par les animaux et donc par voie de conséquence, les émissions de N₂O et de NH₃ en bâtiment, au stockage et à l'épandage. D'autre part, la réduction des apports azotés est susceptible d'influer sur les émissions de méthane entérique et les émissions de méthane lors du stockage des effluents.

3.1. Influence de l'alimentation azotée sur l'excrétion d'azote et les émissions de NH₃ et N₂O

Les émissions d'azote liées aux déjections animales en bâtiments, au stockage et lors des épandages sont surtout proportionnelles à l'azote ammoniacal total présent dans ces effluents (TAN), quelle que soit l'espèce animale considérée. Cette quantité d'azote ammoniacal est très liée à la quantité du principal déchet du métabolisme de l'azote des animaux que constitue l'urée chez les mammifères. Si cette quantité d'azote urinaire est élevée et varie assez peu chez les monogastriques (70-80% de l'azote total excrété), elle est beaucoup plus variable chez les ruminants, allant de 30 à 80% de l'azote total excrété suivant le type de ration (Faverdin et Peyraud, 2010).

L'alimentation protéique a fait l'objet de nombreuses études en alimentation animale, car c'est avec l'apport d'énergie l'un des facteurs clés de l'efficacité des rations pour les animaux d'élevage. Le fait d'augmenter le rapport protéine sur énergie permet en général d'améliorer les performances zootechniques, mais le supplément d'azote protéique animal ou dans le lait est excrété pratiquement totalement sous forme d'urée dans l'urine. Contrairement à l'azote fécal, cette forme d'azote est très instable et se transforme rapidement en azote ammoniacal qui peut évoluer, suivant le type de bâtiment et le mode de gestion des effluents, en ammoniac dans l'air ou en protoxyde d'azote. De même lors des épandages, cette forme reste très instable et peut être perdue sous forme d'ammoniac. Les dispositifs d'enfouissement rapides des lisiers ou d'injections directes dans le sol permettent de mieux conserver ces formes d'azote. Des coefficients d'atténuation sont disponibles pour quantifier les réductions possibles de ces émissions.

Dans le cas des ruminants, l'alimentation azotée est complexe, car elle concerne à la fois l'animal mais aussi l'écosystème microbien. En effet, pour leurs propres synthèses, les microbes fabriquent des protéines à partir de l'énergie et de l'azote qui peuvent être dégradés dans le rumen. Les microbes dégradent généralement les fractions rapidement digestibles de protéines pour utiliser l'énergie et libèrent de l'ammoniaque dans le milieu. Si les microbes utilisent l'azote des protéines de l'aliment, ils peuvent aussi partir d'azote ammoniacal apporté par de l'azote sous forme non protéique (urée, nitrate, ammoniaque) d'origine exogène (ration) ou endogène (animal). Les excès d'ammoniaque dans le milieu ruminal passent vers le sang où ils sont détoxiqués très rapidement en urée par le foie, l'ammoniaque étant très toxique pour l'organisme. Inversement, l'urée de l'organisme peut être réutilisée par les microbes *via* un recyclage par la salive ou directement au travers de la paroi ruminale, l'urée diffusant très facilement. Ces protéines synthétisées par les microbes constituent une part importante (50 à 80%) des protéines digérées par le ruminant, mais elles restent toujours proportionnelles à la quantité d'énergie fermentée dans le rumen par ces microbes. Si les besoins des ruminants sont élevés (cas des vaches laitières fortes productrices en particulier), il faut accroître la quantité de protéines qui vont pouvoir échapper à la digestion par les

microbes. Cela peut se faire en apportant soit des protéines moins dégradables (généralement suite à un traitement technologique de type tannage ou chauffage), soit plus de protéines globalement, mais avec un rendement plus faible.

Pour réduire les excréments d'azote sans trop dégrader les performances, il est donc possible en plus pour les ruminants :

- d'augmenter la proportion d'aliment peu dégradable dans le rumen pour accroître les apports de protéines directement à l'animal ;

- de créer une légère subcarence en azote dégradable pour les microbes de façon à ce qu'ils réutilisent une partie de l'urée endogène pour synthétiser leurs protéines. Ce mécanisme est particulièrement efficace sur le plan environnemental, car il peut conduire à réduire très fortement l'excrétion d'urée par l'animal.

Ce contrôle de la teneur et de la composition des matières protéiques chez les ruminants n'est cependant pas toujours possible. Au pâturage, la teneur en azote de l'herbe jeune est souvent élevée, voire très élevée à certaines périodes de l'année (printemps, automne) ou lorsque la proportion de légumineuses dans les pâtures est importante. Au pâturage, les restitutions ont lieu généralement en quasi-totalité à la pâture et ne sont pas stockées, ce qui limite les émissions gazeuses d'après les données expérimentales, même si la méthode IPCC 1996, qui attribue aux rejets azotés un facteur d'émission au pâturage très élevé, ne conduit pas à la même conclusion. En bâtiment, l'alimentation avec de l'herbe ensilée ou avec de l'affouragement en vert conduit à apporter des quantités importantes d'azote dégradable. Cependant, le changement de système fourrager sort du cadre défini pour cette étude car il modifie l'ensemble de la structure de l'exploitation bien au-delà du seul approvisionnement en aliments, et le remplacement de l'herbe par l'ensilage de maïs par exemple ne sera pas retenu ici. C'est avec des rations à base d'ensilage de maïs et avec des vaches laitières ou des jeunes bovins à l'engrais qu'il est le plus facile de modifier la complémentation pour réduire les quantités de TAN dans les effluents.

En pratique, il est possible d'éviter tout excès d'azote dégradable et de réduire à 14% la teneur en matières azotées totales (MAT=Nx6,25) des rations de vaches laitières par une complémentation adaptée lorsque les vaches en stabulation reçoivent de l'ensilage de maïs comme fourrage principal, sans affecter significativement les performances de production. Les excréments urinaires s'en trouvent directement modifiées (Vérité et Delaby, 1998).

Chez les porcs, de nombreuses études ont établi 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 modifie pas l'ingestion journalière si la teneur en énergie n'est pas modifiée. Si les teneurs en acides aminés essentiels sont maintenues, ces régimes à teneur abaissée en protéines ne modifient pas non plus le gain quotidien ou l'indice de consommation. Cette pratique est efficace puisqu'une diminution de la teneur en protéines de 20 à 12% peut diminuer de 67% les émissions d'ammoniac mesurées au stockage du lisier (pendant 18 jours, Portejoie et al., 2004). Plus récemment, Osada et al. (2011) ont conclu à une diminution de 39% des émissions de GES avec un régime à basse teneur en protéines. En compilant les résultats de plusieurs expérimentations quantifiant l'effet d'aliments à teneurs réduites en protéines sur l'excrétion d'azote (Canh et al., 1998 ; Portejoie et al., 2004 ; Leek et al., 2007 ; Le et al., 2009), on met en évidence un effet systématique du contenu en protéines de l'aliment ingéré sur les teneurs en azote total et en azote ammoniacal total des effluents (Figure 8-2).

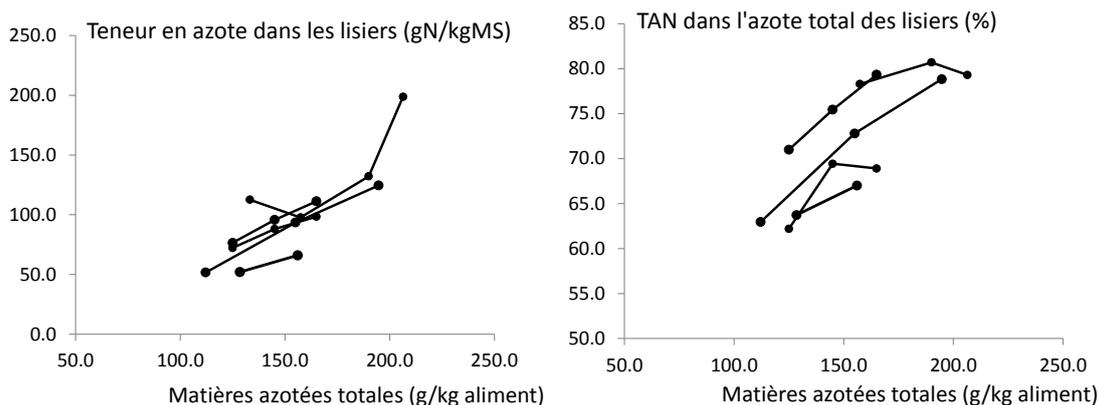


Figure 8-2. Variations des teneurs en azote total et de la proportion d'azote total ammoniacal (TAN) dans les lisiers en fonction de la proportion de matières azotées totales dans l'aliment ingéré. Les points relient chacun des niveaux d'une même publication (Canh et al., 1998 ; Portejoie et al., 2004 ; Leek et al., 2007 ; Le et al., 2009)

3.2. Impact indirect de l'alimentation azotée sur les émissions de CH₄

Au niveau entérique en ce qui concerne les ruminants, ce point pourrait être discuté à partir des travaux de modélisation de Bannink et al. (2010), portant sur l'incidence des rapports sucres et protéines des fourrages sur la production de méthane

(les herbes très fertilisées engendrant une moindre émission de CH₄), et/ou des résultats opposés de l'équipe de l'IBERS sur les variétés plus riches en sucres et moins en azote. Cependant, des données expérimentales récentes montrent que les émissions de CH₄ par kg de MS ingérée ne sont pas affectées par le seul changement de complémentation azotée (Edouard et al., 2011) des vaches laitières. Comme les travaux sur les fourrages sont contradictoires et que ceux sur la complémentation ne montrent pas d'effet, cette étude considèrera qu'il n'y a pas d'effet significatif sur les émissions entériques jusqu'à la publication de travaux convergents sur ce sujet. Le changement de rationnement azoté sera donc supposé ne pas modifier les émissions de méthane entérique.

Au niveau des émissions de méthane lors du stockage des effluents **des ruminants et des porcs**, on ne considère que des émissions forfaitaires pour les aspects relevant de la nutrition azotée. Il est cependant important de savoir s'il est pertinent de moduler ces émissions en fonction des pratiques de rationnement protéique. La question des modifications de CH₄ produit par les effluents peut se poser suivant deux mécanismes possibles :

- La réduction d'apport azoté, si elle est trop forte, peut modifier la digestibilité du régime et augmenter la quantité de MO non digérée (MOND) qui peut générer des émissions supplémentaires de CH₄. Il est néanmoins possible d'imaginer des pratiques qui n'affectent pratiquement pas la production et la digestion. Des mesures pour réduire les émissions d'ammoniac pourraient être plus ambitieuses et accepter ce risque, mais elles ne seront pas abordées dans ce scénario car l'assiette risque d'être faible, sauf mesure incitative forte.
- La diminution de la concentration d'ammoniac dans les lisiers peut accroître les émissions de CH₄ du lisier. La publication de Jarret et al. (2011) semble 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 (B0). Les teneurs en TAN, 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, ce qui est cohérent avec le retard à l'émission de CH₄ des lisiers riches en TAN. 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 effet n'a pas été rapporté pour des lisiers de bovins, mais ceux-ci sont plus dilués et la concentration en TAN devrait atteindre des seuils faibles à partir desquels ces effets ne semblent pas significatifs. Compte tenu du nombre encore réduit de données sur ces interactions et la difficulté de chiffrer l'impact sur les émissions, cet effet ne sera pas pris en compte dans les calculs, mais il est possible que l'estimation puisse être surévaluée en ce qui concerne les scénarios pour les porcs si ce phénomène se confirmait.

4. Degré et mode de prise en compte des principaux postes d'émissions concernés par l'action dans le cadre de l'inventaire national 2010 et perspectives d'évolution

La référence CITEPA pour le calcul des émissions pour l'inventaire national reste basée sur la méthodologie de l'IPCC 1996 (Figure 8-3). Les propositions de 2006 ne sont pas encore effectives, mais permettraient d'aller plus loin que les précédentes pour mieux prendre en compte les effets des émissions d'azote. Pour que les actions proposées puissent être prises en compte dans les inventaires, il faudra que le calcul des excréments d'azote des ruminants soit plus sensible aux pratiques de complémentation en aliments protéiques et que les normes CORPEN intègrent les effets de l'alimentation multiphase et de la supplémentation en AA en production porcine, ce qui est moins complexe car le biphasé est déjà pris en compte.

Par ailleurs, et de façon un peu étonnante, le CITEPA calcule les émissions d'ammoniac (Ngasm) pour les impacts GES (N₂O) avec la méthode (IPCC 1996) qui est une méthode différente de celle utilisée pour le calcul des émissions d'ammoniac dans le même inventaire (EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009, updated June 2010). Cette dernière méthode est beaucoup plus précise car elle prend mieux en compte les différentes formes de l'excrétion d'azote (TAN et non TAN) pour prévoir les émissions d'ammoniac. De plus, les coefficients utilisés sont beaucoup plus précis et récents, ils permettent également d'intégrer les effets des différentes méthodes d'épandage des effluents dans ces émissions. En gardant le principe actuel du CITEPA, cette étude calculera également les émissions en remplaçant les valeurs d'émissions d'ammoniac dans la méthode IPCC 1996 par celles calculées avec la méthode EMEP/EEA, qui est également la méthode retenue pour le calcul des émissions de NH₃ dans les inventaires nationaux, mais pas pour le calcul des GES et qui sera dénommée EMEP dans la suite de la fiche. Pour les vaches laitières, la méthode actuelle tend à sous-estimer les émissions annuelles de NH₃ et N₂O, avec en plus une forte surestimation des émissions au pâturage (20% de l'azote excrété est volatilisé) et une forte sous-estimation des émissions en bâtiment et à l'épandage. La méthode actuelle indique que toute excrétion d'azote au pâturage conduit à une émission de GES au moins aussi élevée que celle en bâtiment, ce qui semble

contraire à toutes les données et méthodes proposées actuellement (IPCC 2006 diminue ce coefficient qui passe de 20% à 7%). Pour le calcul avec la méthode actuelle CITEPA, le N₂O aura une valeur de 310 CO₂e, alors qu'il aura la future valeur proposée par l'IPCC pour la méthode EMEP.

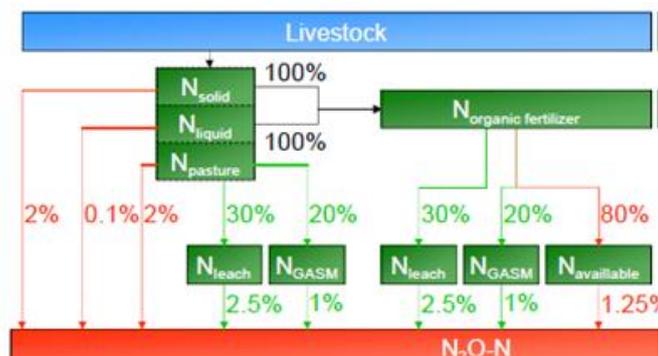


Figure 8-3. Schéma du calcul des émissions de N₂O dans la méthode actuelle du CITEPA (OMINEA 2012, Rapport des inventaires nationaux 2010)

4.1. Méthode de calcul des facteurs d'émission

Pour l'instant, les méthodes des inventaires appliquent des facteurs d'émission sur des facteurs d'excrétion calculés à partir des valeurs du CORPEN.

Pour les ruminants laitiers, les inventaires se basent sur les valeurs du CORPEN (1999) et ne détaillent pas très précisément les pratiques alimentaires de complémentation au cours de l'année et leurs impacts sur les émissions. Les valeurs utilisées sont plutôt calculées sur des apports proches des recommandations d'alimentation par l'INRA, qui ne sont pas toujours suivies en pratique, ce qui donne plus de poids dans les pratiques d'alimentation à la nature du fourrage qu'à celui de la complémentation protéique. Pour les bovins laitiers, qui passent le plus de temps en bâtiments, il serait possible d'utiliser l'urée du lait comme indicateur des pratiques azotées, comme cela a été montré dans le passé (Faverdin et Vérité, 1998, 2003 ; van Duinkerken et al., 2011). Il est possible de montrer que cet indicateur, couplé aux données de production de lait, permet de connaître avec une bonne précision les flux d'urée et d'estimer indirectement les teneurs en protéines des régimes. A défaut d'appliquer cette méthode de façon exhaustive, car les données ne sont pas accessibles actuellement pour toute la France et elle ne permet pas de chiffrer les changements d'utilisation d'aliments associés pour calculer les coûts, la présente étude reprendra les fiches de l'observatoire de l'alimentation des vaches laitières utilisées par le CITEPA, mais en les traduisant de façon beaucoup plus fine en rations au cours de l'année pour calculer les excréments azotés très précisément. Les excréments d'azote fécal et urinaire seront calculés à partir des équations issues de la méta-analyse d'essais de digestibilité sur vaches laitières réalisés à l'INRA (Maxin et Faverdin, 2006) et utilisées dans le modèle MELODIE (Chardon et al., 2012). Cette méthode précisera également les temps passés en bâtiment liés à chaque régime. Elle utilisera ensuite comme le CITEPA l'enquête "Bâtiments d'élevage" pour associer les % de fumier et lisier en fonction des régimes pour calculer les flux d'azote vers les différents effluents.

Pour les porcs, les valeurs forfaitaires d'excrétion d'azote (CORPEN, 2003) considèrent actuellement deux pratiques d'alimentation des porcs à l'engrais : l'utilisation d'un aliment unique ou l'alimentation biphasé (deux aliments). Chez les truies, deux situations sont également considérées : l'utilisation d'un aliment unique et l'utilisation d'un aliment gestation et d'un aliment lactation. Les teneurs en protéines des aliments sont fixes dans chacune de ces situations. Pour améliorer la prise en compte de l'alimentation azotée dans les calculs d'émissions, il faudrait considérer les situations d'alimentation multiphasé et prendre en compte la diminution possible des teneurs en protéines des aliments *via* l'incorporation accrue d'acides aminés industriels.

4.2. Méthode de calcul des effectifs

Les effectifs d'animaux sont ceux fournis par Agreste (2010). Les catégories d'animaux en élevage porcin sont : les porcelets, les jeunes porcs de 20 à 50 kg, les truies de 50 kg et plus, les verrats de 50 kg et plus, les porcs à l'engrais de 50 kg et plus. Ces effectifs correspondent à des effectifs instantanés, relevés au moment des enquêtes dans les élevages. Ils ne rendent donc pas compte de la production annuelle de porcs, un porc à l'engrais de 50 kg et plus étant présent pendant moins de 100 jours sur l'exploitation, et une place d'engraissement accueillant en moyenne environ 2,3 porcs par an. Pour contourner ce problème des effectifs instantanés pour les porcelets, jeunes porcs et porcs à l'engrais, nous avons

uniquement utilisé dans nos calculs les effectifs de truies productives. Les potentiels d'atténuation unitaires sont calculés par truie et par an et tiennent compte des émissions associées à l'élevage des porcelets et des porcs à l'engrais produits par truie et par an, selon les données de productivité des truies et de mortalité en post-sevrage et en engraissement issues des bases de données GTTT et GTE de l'IFIP (IFIP, 2010). Les calculs de potentiel d'atténuation à l'échelle du territoire français portent donc sur les effectifs de truies productives qui sont calculés à partir des données Agreste (2010) d'effectifs de truies présentes (facteur de correction 0,85), soit 951 459 truies. Les verrats et les truies non productives ne sont pas pris en compte car leurs effectifs apparaissent faibles, que les références existantes (notamment CORPEN, 2003) ne tiennent pas compte de ces catégories d'animaux et que ces animaux sont issus pour la plupart d'élevages de multiplication ou de sélection.

5. Calcul du potentiel d'atténuation et du coût de chaque sous-action

5.1. Potentiel d'atténuation et coût de la sous-action 1 – Vaches laitières

5.1.a. Potentiel d'atténuation unitaire

Les émissions de N₂O et de NH₃ ont été calculées uniquement pour les vaches laitières dont les rations dépassent 14% de MAT et en ramenant leur ration à 14% de MAT. La difficulté de la définition de la notion de potentiel d'atténuation unitaire vient de la diversité des pratiques alimentaires et de l'existence d'une grande variété de rations hivernales, probablement allant de 10 à 18% de MAT (valeurs extrapolées à partir des teneurs en urée des laits, cf. plus loin). Le potentiel unitaire est donc défini ici comme l'impact moyen pour ramener les rations des vaches laitières ayant plus de 14% de MAT à une valeur de 14%.

- Inventaire des effets sur les émissions

Estimation des impacts GES liés aux émissions issues de l'exploitation

L'inventaire des effets sur les émissions est réalisé *via* la méthodologie proposée par l'Agence européenne de l'environnement (EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009, updated June 2010). C'est une méthodologie de type Tier 2 qui tient compte des deux filières de gestion des effluents, lisier et fumier. Que ce soit pour les lisiers ou les fumiers, les émissions sont estimées en pourcentage de l'azote ammoniacal des effluents. La méthodologie de l'Agence européenne de l'environnement utilise en effet une approche de flux de masse basée sur le concept d'un flux d'azote ammoniacal parcourant le système de gestion des effluents. L'approche de flux de masse est menée sur la base des kg d'azote, eux-mêmes convertis en azote ammoniacal pour faire le calcul des émissions. Cela permet à la méthodologie de traduire les conséquences de changements de régimes alimentaires sur les émissions gazeuses azotées, puisque les excréments d'azote et d'azote ammoniacal répondent un peu différemment à ces changements.

Les quantités d'azote fécal et urinaire excrétées ont été finement calculées pour estimer au plus près les effets des options techniques retenues sur les émissions de N₂O et de NH₃. La réduction des quantités d'azote ammoniacal dans les effluents conduit à une réduction des réactions de nitrification et dénitrification et donc des émissions directes de N₂O en bâtiment, au stockage et à l'épandage, ainsi qu'à une réduction des émissions d'ammoniac et donc des émissions indirectes de N₂O.

Par contre, l'action substituant des aliments concentrés protéiques par des aliments concentrés de type énergétique, elle ne modifie pas les consommations totales d'aliments, ni le rapport fourrage-concentré, ni les temps en bâtiments ou à l'extérieur. Les volumes d'effluents ont donc été supposés inchangés, n'entraînant aucune modification des travaux d'épandage et des consommations d'énergie associées.

Effets en amont de l'exploitation

Les émissions amont liées à l'utilisation des aliments sont modifiées par l'utilisation d'aliments moins riches en protéines et utilisant moins de tourteaux de soja. On notera toutefois que ces émissions induites ne peuvent pas être comptabilisées dans le cadre des inventaires nationaux, car de nombreuses matières premières riches en protéines sont importées et que la modification d'utilisation de matières premières dans les formulations d'aliments peut ne pas modifier les productions de ces matières premières en France.

Les variations de production de GES associées au changement de composition des aliments et liées au changement d'utilisation des sols sont estimées par des données d'impact de la production des matières premières utilisées par analyse du cycle de vie. Les données utilisées ici pour les matières premières concentrées sont issues d'une synthèse bibliographique compilant les estimations faites dans des études d'Analyse du Cycle de Vie à l'INRA (Nguyen et al., 2012a,

2012b, non publié ; Mosnier et al., 2011 ; Garcia-Launay et al., en cours de publication) de même que les estimations de l'Ademe via le logiciel Dia'Terre. Les valeurs retenues sont celles de Dia'Terre lorsqu'elles sont disponibles, et les données INRA dans les autres cas. En pratique, on prend les valeurs de Dia'Terre pour les céréales, les tourteaux et le son, les aliments composés (VL18 et VL40), un concentré énergétique à base de céréales a été calculé à partir des valeurs unitaires de chaque céréale. 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.). Elles ont été ramenées au kg de matière sèche, car tous les calculs des rations vaches laitières ont été faits dans cette unité.

• Quantification de l'atténuation

Pour estimer le potentiel unitaire d'atténuation de la mesure considérée, l'étude de l'action a procédé tout d'abord à un recalcul plus complet des régimes de l'observatoire de l'alimentation des vaches laitières (Institut de l'élevage 2011, Observatoire de l'alimentation des vaches laitières (15 rations-types) pour aller plus loin sur l'alimentation des VL). Ces rations-types correspondent à des régimes moyens d'exploitations spécialisées bovins lait appartenant à des sous-catégories des Otex (orientation technico-économique des exploitations agricoles) du RICA basées sur les régions et les parts de surfaces de maïs dans le système fourrager. Un tableau propose une quantification de ces exploitations en termes d'effectif national (Institut de l'élevage, 2012). Pour les sous-catégories des Otex utilisées par l'IDELE qui n'ont pas de rations-types décrites, une des rations-types leur a été associée en fonction de leur similitude de composition de la surface fourragère principale (SFP) et de région. Chaque fiche d'alimentation a ensuite été traduite pour calculer les différents types d'aliments concentrés utilisés et pour représenter un calendrier annuel de rations permettant de faire correspondre globalement les quantités annuelles de ce calendrier d'alimentation aux données des fiches. Cette ration a ensuite été simulée grâce au module "troupeau" du modèle MELODIE (Chardon et al., 2012) qui utilise très largement le modèle développé pour Graz'in (Faverdin et al. 2011) pour calculer les consommations, productions et excréments associés à cette ration. La teneur moyenne de la ration hivernale a ainsi pu être estimée. Ensuite, les compositions des rations en bâtiments ont été ajustées pour obtenir des teneurs de 14%, 15% et 16% de MAT en modifiant les proportions des compléments protéiques et énergétiques de la ration. Les excréments correspondants à chaque situation ont alors été calculés par modélisation afin d'estimer l'impact de réduction de la complémentation dans chaque situation. Bien entendu, les situations les plus excédentaires et celles pour lesquelles les vaches reçoivent le plus longtemps des régimes conservés sont celles pour lesquelles les modifications d'excrétion sont les plus importantes.

Les calculs ont également permis de calculer le temps annuel passé en bâtiments en fonction de la ration-type. Cette durée a permis de calculer les quantités d'azote rejetées au pâturage et en bâtiments, en différenciant les formes urinaires (assimilées au TAN) et les formes fécales.

Le devenir de l'azote n'étant pas le même suivant les systèmes de gestion des effluents, la part en bâtiment a pris en compte les proportions de systèmes fumier et de systèmes lisier. Les données CITEPA issues de l'enquête "Bâtiments" de 2007 sur la partition lisier-fumier des effluents produits ont été utilisées. Elles ont cependant été adaptées pour les différents régimes types en utilisant des valeurs modulées en fonction des régions des Otex concernées. (Tableau 8-1). Les données moyennes pondérées sont équivalentes aux valeurs utilisées par le CITEPA.

Tableau 8-1. Répartition des effluents de type fumier ou lisier (%) en fonction des systèmes de production considérés
 xxx l'alimentation des bovins (Institut de l'Elevage, 2012).

N° cas-type	OTEX / système	Systèmes fourragers /		
		Région	% fumier	% lisier
1	Spécialisé de plaine	Lait >30% maïs – hors Ouest	49,4	50,7
2		Lait >30% maïs – Ouest	49,4	50,7
3		Lait 10-30% maïs – hors Ouest	47,9	52,1
4		Lait 10-30% maïs – Ouest	47,9	52,1
5		Lait <10% maïs – hors Ouest	49,7	50,4
6		Lait <10% maïs – Ouest	49,7	50,4
7	Spécialisé de montagne et piémont	Maïs	54,6	45,4
8		Herbagers Massif Central	61,4	38,6
9		Herbagers Alpes du Nord	65,1	35,0
10		Herbagers FC	59,3	40,8
11		Herbagers autres montagnes	51,9	48,1
12	Spécialisé de plaine Grande culture et PCE	Plaine GC >30% maïs	49,7	50,3
13		Plaine PCE >30% maïs	49,3	50,7
14		Plaine PCE 10-30% maïs	53,5	46,5
15		Plaine PCE <10% maïs	48,1	51,9

• Conclusion : potentiel d'atténuation unitaire de la sous-action

Les calculs des émissions ont pris en compte les deux méthodes présentées en partie 3, à savoir la méthode CITEPA, calée sur les méthodes GIEC 1996, et la méthode EMEP 2009 également utilisée par le CITEPA pour les émissions d'ammoniac. Pour cette seconde méthode, la connaissance des valeurs TAN excrétées grâce au calcul des rations a permis un calcul plus précis. Pour les données d'émissions à l'épandage, le calcul a intégré les données du CITEPA sur les différents modes d'épandage utilisés en France pour les effluents des bovins. Les résultats sont récapitulés dans le Tableau 8-2. Pour les systèmes concernés par l'application de la mesure, la réduction d'émissions de GES de ce poste N₂O des effluents varie de 7 à 11% pour le calcul avec la méthode EMEP suivant les cas-types.

Tableau 8-2. Récapitulatif des estimations des atténuations potentielles unitaires de la sous-action "Vaches laitières"

	CO ₂ (kgCO ₂ e/VL/an)	N ₂ O (kgCO ₂ e/VL/an)		NH ₃
Références sur lesquelles s'appuient les quantifications	Dia'Terre	CITEPA	EMEP	
Emissions sur l'exploitation				
Emissions N ₂ O directes et indirectes		70,1	123,6	
Emissions amont				
Production des matières premières des aliments	171,1			
Sous-totaux	171,1	70,1	123,6	

On notera que la méthode actuelle CITEPA sous-estime fortement les gains possibles de GES. Il est important de remarquer que cette action réduit de façon importante les émissions de NH₃. Elle présente l'intérêt de ne pas cibler qu'un gain sur les GES. La méthode CITEPA actuelle ne met en évidence qu'un effet moyen de 0,3 kgNH₃/VL/an, alors que la méthode **EMEP prévoit une réduction de 4,3 kgNH₃/VL/an.**

Pour les ruminants, les effets sont ceux attendus et largement décrits dans la synthèse récente de l'expertise collective "Elevage et azote" (Peyraud, Cellier et al., 2012). Les effets de la réduction de la teneur en azote des régimes vaches laitières sur les émissions d'ammoniac ont été démontrés (van Duinkerken et al., 2005, 2011 ; Aguerre et al., 2010). L'économie vient en grande partie du fait que l'on substitue en moyenne 150 kg de tourteaux de soja par vache et par an par 150 kg de concentré production et de concentrés énergétiques moins onéreux. Cette action induit une baisse également des émissions indirectes de GES en amont au niveau de la production des matières premières, car le soja a une valeur GES très supérieure à celle des autres aliments.

5.1.b. Ligne de base et conditions de développement de l'action

Potentiellement, toutes les vaches laitières (3 743 390 en 2010) sont éligibles à l'adoption de cette action pendant les périodes d'alimentation en bâtiments. Cependant, un nombre important de vaches laitières ne sont pas suralimentées en azote pendant ces périodes. La difficulté vient donc de l'estimation des vaches alimentées actuellement avec des régimes plus riches en matières azotées que les 14% préconisés dans cette étude pour obtenir le meilleur compromis entre production et environnement, pour lesquelles un changement de pratique serait souhaitable.

En fonction de cette teneur moyenne, une distribution moyenne a été simulée pour calculer la part des vaches qui dans ce type de ration pouvait atteindre soit 15% de MAT, soit 16% de MAT ou plus en phase hivernale. Cette distribution était centrée sur la teneur moyenne hivernale calculée de cette ration et sur un écart-type relatif de 0,1 estimé à partir de la distribution des courbes de concentration en urée des laits des vaches en phase hivernale qui traduit indirectement l'alimentation azotée des vaches laitières. Ensuite, trois rations ont été calculées à partir de cette ration-type en modulant la complémentation protéique des rations conservées : une ration-objectif à 14%, une ration à 15% et une ration à 16%. Pour chacune de ces 3 rations, le logiciel MELODIE a ensuite été réutilisé pour calculer les consommations, productions et excréments associés afin d'appliquer sur les excréments la méthode d'inventaire CITEPA et la méthode EMEP. Une atténuation moyenne pondérée à partir des proportions estimées des vaches suralimentées a été calculée. Plusieurs rations-types partageaient de concentrations moyennes des régimes hivernaux inférieurs à 14% de MAT avec des quantités faibles de tourteaux de soja ou de concentrés protéiques utilisés. Il a donc été considéré qu'il n'était pas possible en moyenne de réduire les apports protéiques de ces rations-types sans affecter significativement la production. Ces rations-types concernaient à chaque fois des systèmes très herbagers (<10% de maïs dans la SFP).

Les données d'urée récupérées auprès des contrôles laitiers de trois départements par élevage (Doubs, Orne (Figure 8-4), Territoire de Belfort, communication personnelle) par mois d'hiver (décembre et janvier), sur plusieurs années récentes ont

permis d'avoir une autre vision des vaches ayant un taux de MAT des régimes supérieurs à 14% (taux d'urée supérieur à 210-200 mg/L). A défaut d'être représentatif de toute la France, cela montre la diversité des situations et permet donc d'estimer les gains possibles avec une approche qui ne passe pas par l'utilisation des données des cas-typés et donne une idée de la dispersion statistique des pratiques. Dans ces deux cas, environ 50% des élevages dépassent le seuil recommandé de 14% (48 à 55%) en période hivernale et que l'on peut généralement atteindre sans perte de production. Ce chiffre est cohérent avec celui des simulations effectuées en partant des rations qui indiquent que 52% des effectifs sont affectés par une réduction possible de la complémentation protéique de la ration.

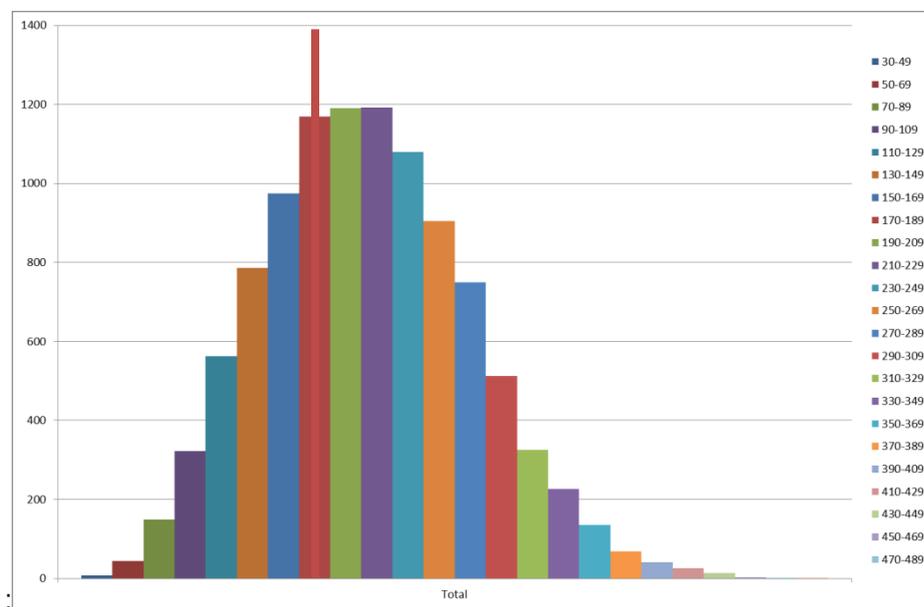


Figure 8-4. Fréquences de concentrations en urée des laits (mg/l) de tank des élevages de l'Orne, toutes rations confondues (n = 10491) sur 2 années successives pendant les mois de décembre et janvier (hivernage). (Faverdin et Vérité, 1998)

Le trait rouge indique des concentrations supérieures à 210 mg d'urée/L, correspondant en première approximation à des teneurs de rations supérieures à 14% de MAT.

L'hypothèse faite suppose que les rations des vaches au-dessus de 14% sont affectées dans la même proportion par la stratégie de réduction pour une ration donnée, et que les vaches rationnées en dessous de 14% ne voient pas augmenter leur complémentation azotée.

Développement de l'action

Pour cette action, il est probable qu'à défaut de contraintes sur les bilans N des exploitations ou de mesure fortes pour réduire les émissions d'ammoniac, l'adoption de cette mesure sera surtout dépendante des coûts des matières premières protéiques, en particulier du tourteau de soja, mais les autres sources alternatives ont un prix très corrélé à ce tourteau. Ceci peut paraître curieux car les éleveurs concernés auraient le plus souvent un intérêt économique à adopter cette mesure. Cependant, la prise en compte d'une marge de sécurité sur ce facteur reste une stratégie dominante chez beaucoup d'éleveurs qui ne veulent pas prendre le moindre risque (mauvaise estimation de la valeur des aliments, par exemple). Il est également possible que dans certaines situations, cela puisse compliquer un peu les pratiques de rationnement, mais il n'est pas possible de généraliser ce problème ni de le quantifier. L'hypothèse prend en compte qu'une sensibilisation importante et un contexte économique lié au renchérissement des matières premières favoriseront cette tendance. Cependant, en fonction du contexte, l'adoption de cette mesure peut être plus ou moins rapide.

Pour les vaches laitières, il n'est possible d'estimer les gains potentiels qu'en les déclinant par grand type de ration. La situation initiale prend en compte le fait que 48% des vaches appliquent déjà la mesure proposée. Le choix global d'une sigmoïde d'adoption rapide a été fait, car il n'y a pas de frein technologique à l'adoption de cette mesure. La cinétique d'adoption a donc utilisé la formule :

$$\alpha(t) = \alpha(0) + (\alpha_{max} - \alpha(0)) \times e^{\left[\frac{-(t-t_0)}{\tau}\right]^{1/\beta}}$$

avec $\tau=8$, $\alpha_{max}=100\%$, $t_0=2010$, $\beta=12$, et $\alpha(0)$ propre à chaque ration-type en fonction de la teneur moyenne des rations hivernales calculées (arrondies à 0,5% près). Les rations en moyenne à moins de 13,5% de MAT n'ont pas été considérées comme potentiellement concernées par l'action.

Tableau 8-3. Tableau des valeurs de $\alpha(0)$ de la cinétique d'adoption en fonction des teneurs en MAT des rations de départ

% MAT	$\alpha(0)$
14.0	68.2%
14.5	50.0%
15.0	31.8%
15.5	17.2%

La réduction totale estimée pour la France entre 2010 et 2030 est de 1 842 440 MgCO_{2e} avec la méthode actuelle CITEPA (sous réserve de bien moduler le calcul des excréments d'azote en fonction de rations) et de 3 247 140 MgCO_{2e} avec la méthode de calcul "expert" EMEP.

La cinétique proposée ci-dessus est donc la moyenne des cinétiques d'adoption des différents régimes-types. En moyenne, en 2010, 1 785 836 vaches laitières (près de 48%) sont déjà au seuil ou en dessous du seuil recommandé.

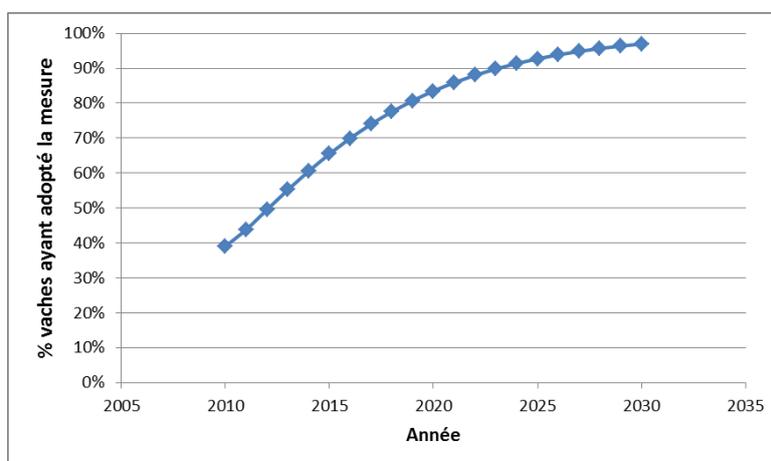


Figure 8-4. Représentation de la cinétique d'adoption choisie pour la réduction des apports de matières azotées aux vaches laitières entre 2010 et 2030.

5.1.c. Potentiel d'atténuation à l'échelle du territoire français

- Potentiel d'atténuation de l'année 2030 en appliquant la sous-action sur l'AMT (et, s'il est différent de l'AMT, le % de l'AMT atteint en 2030)

L'assiette maximale technique est de 100% pour cette action. Le potentiel d'atténuation en 2030 est pratiquement celui de l'AMT, l'application de la cinétique d'adoption proposée conduisant à 98,2% des vaches supposées avoir adopté la mesure en 2030. Le potentiel d'atténuation de l'année 2030 est de 132,5 MgCO_{2e} pour la méthode CITEPA, et de 233,6 MgCO_{2e} pour la méthode EMEP.

- Potentiel d'atténuation cumulé sur la période 2010-2030 en appliquant le scénario de diffusion

Le potentiel d'atténuation cumulé sur la période 2010-2030 en appliquant le scénario de diffusion est de 1 842 447 MgCO_{2e} pour l'estimation par la méthode CITEPA et de 3 247 142 MgCO_{2e} par la méthode EMEP.

Tableau 8-4. Impact de la réduction des apports de matières azotées aux vaches laitières au cours de la cinétique d'adoption sans et avec les émissions induites

Année	2011	2015	2020	2025	2030
Effectifs vaches laitières (Millions)	3.743	3.743	3.743	3.743	3.743
Taux adoption, %	51.9	70.8	86.5	94.5	98.2
Nouvelles vaches adoptant la mesure (Millions) depuis 2010	0.157	0.863	1.451	1.752	1.890
Effectif total ayant adopté la mesure (millions)	1.943	2.645	3.237	3.538	3.676
Atténuation unitaire CITEPA (kgCO ₂ e/VL)	70.1	70.1	70.1	70.1	70.1
Atténuation échelle France CITEPA (milliers de MgCO ₂ e)	11.0	60.5	101.7	122.8	132.5
Atténuation unitaire EMEP (kgCO ₂ e/VL)	123.6	123.6	123.6	123.6	123.6
Atténuation échelle France EMEP (milliers de MgCO ₂ e)	19.5	106.7	179.3	216.5	233.6
Atténuation unitaire CITEPA avec les émissions induites par les aliments (kgCO ₂ e/VL)	241.2	241.2	241.2	241.2	241.2
Atténuation échelle France CITEPA avec les émissions induites par les aliments (milliers de MgCO ₂ e)	37.8	208.1	349.8	422.4	455.8
Atténuation unitaire EMEP avec les émissions induites par les aliments (kgCO ₂ e/VL)	294.7	294.7	294.7	294.7	294.7
Atténuation échelle France EMEP avec les émissions induites par les aliments (milliers de MgCO ₂ e)	46.4	254.3	427.5	516.2	557.027

5.1.d. Coûts et bénéfices induits par la sous-action

- Inventaire des modifications induites par la sous-action

En fait, cette action pour les vaches laitières a normalement peu de coûts induits et il s'agit principalement de coûts de substitution entre matières premières alimentaires ; il n'y a pas de coûts d'équipements spécifiques à prévoir. Une légère perte de production en période hivernale (0,3 €/L en 2010) ainsi qu'une baisse du taux protéique (0,1 à 0,3 g suivant les situations de départ avec un coût marginal de 0,006 € du g/L de taux protéique) sont possibles et ont été chiffrées en utilisant le modèle MELODIE (Chardon et al., 2012), basé sur le modèle GRAZIN (Faverdin et al., 2011) et sur la courbe de réponse de Vérité et Delaby (1998). Avec ce même modèle, il a été possible de quantifier les variations d'ingestion associées. Les coûts des aliments retenus dans l'étude à partir des données Agreste ont été ramenés au kg de MS.

- Estimations des coûts/bénéfices

Le coût moyen de l'adoption de la mesure est légèrement négatif (-11,6 €/VL/an), mais varie suivant les rations de 8 € à -84 € par vache et par an. Sous réserve de bien cibler les élevages où il faut appliquer cette mesure, il n'y a *a priori* pas de frein économique à l'adoption de cette mesure.

Pour une modification moyenne de ration sur l'ensemble des systèmes français concernés, les simulations de rations arrivent à des variations faibles des consommations d'aliments concentrés (+24 kg d'aliments concentrés par an en moyenne, généralement pour compenser la densité énergétique plus forte du tourteau de soja), mais à une réduction du coût de l'achat des aliments concentrés d'environ 25,1 € par vache/an (Tableau 8-5).

Tableau 8-5. Variation de coût du coût de la ration en fonction de la variation de consommation et du prix des aliments

Aliment	Coût aliment (€/kg MS)	Variation de consommation (kg MS)	Variation de coût (€)
Tourteaux de soja	0.407	-170	-69
Orge	0.180	72	13
VL18	0.314	66	21
Concentré Energétique	0.200	59	12
Concentré Protéique	0.364	-6	-2
Blé	0.200	2	0
Total		24	-25

Cependant, les légères modifications de revenus liées aux productions de lait et de taux protéique du lait induites par les réductions d'apports de protéines (-13,5 €/vache/an) réduisent cette économie à 11,6 €/vache/an (Tableau 8-6).

Tableau 8-6. Coût de la mesure de réduction des apports de matières azotées aux vaches laitières par animal ayant adopté la mesure et au total de la période 2010-2030

Coût de la mesure (€/VL/an)	-11,6
Coût Investissement (€/VL/an)	0
Coût Total (€/VL/an)	-11,6
Coût Total cumulé (Millions €)	-304,79

- **Autres coûts (coûts de transaction privés, publics)**

Pour réduire des apports de compléments protéiques, il n'y a pas de besoin de formation particulière *a priori*, et certains conseils insistent déjà sur ce point, d'autres moins lorsqu'ils privilégient la production maximale de lait sans prendre le moindre risque. Cependant, si cette option technique n'est pas appliquée partout aujourd'hui malgré son avantage économique (modeste, mais réel d'environ 700 € par an pour un élevage de 60 vaches laitières), il est possible qu'elle ne sera réellement généralisée qu'avec un effort de communication important sur le côté gagnant-gagnant (économie et environnement) de la gestion des apports azotés dans les exploitations, et sur le fait que les enjeux environnementaux ne sont pas opposés à une optimisation économique.

- **Conclusions : coût unitaire de la sous-action, coût annuel pour l'AMT (ou le % atteint) en 2030 et coût cumulé sur la période 2010-2030**

Le coût unitaire, exprimé par vache ayant adopté la mesure et par an, est de -11,6 €/vache/an. Le coût en 2030 est de -21,93 M€. Le coût cumulé entre 2010 et 2030 est de -304,79 M€.

5.1.e. Synthèse : récapitulatif de l'atténuation escomptée, du coût, et du coût de la tonne de CO₂e évité

Pour la sous-action "alimentation des vaches laitières" :

- L'atténuation unitaire est de 70,1 kgCO₂e/vache/an avec la méthode actuelle CITEPA, et de 123,6 kgCO₂e/vache/an avec la méthode EMEP pour le calcul des émissions de NH₃.
- L'assiette maximale technique est de 3,743 millions de vaches laitières (cf. section 5.1.b.), avec 98,2% atteints en 2030, mais avec 48% des vaches déjà concernées par la mesure en 2010.
- L'atténuation annuelle potentielle en 2030 est de 132 548 MgCO₂e/an avec l'estimation CITEPA, et de 233 604 MgCO₂e/an avec la méthode EMEP.
- L'atténuation cumulée sur la période 2010-2030 est de :
 - 3 247 142 MgCO₂e avec la méthode EMEP (et 1 842 440 MgCO₂e selon la méthode CITEPA 2010) pour les émissions intervenant sur l'exploitation agricole et sur les espaces qui lui sont physiquement liés. Le poste concerné de l'inventaire est le poste "gestion des déjections" de la section Agriculture, sous-section Elevage.
 - et 4 495 649 MgCO₂e pour les émissions induites amont.
- Le coût total annuel moyen pour l'AMT est de -23,08 M€/an.
- Le coût cumulé entre 2010 et 2030 est de -304,79 M€ et le coût moyen escompté sur les 20 années est de -15,2 M€/an.
- Le coût par MgCO₂e économisé est de -165,43 €/Mg pour la méthode CITEPA et de -93,87 €/Mg pour la méthode EMEP.

5.2. Potentiel d'atténuation et coût de la sous-action 2 - Porcs

5.2.a. Potentiel d'atténuation unitaire

Les émissions directes de N₂O et indirectes de N₂O à partir des émissions de NH₃ ont été calculées pour 3 catégories d'animaux, à savoir les truies, les porcs en post-sevrage et les porcs en engraissement, puis le potentiel d'atténuation unitaire a été calculé par truie et par an en additionnant les émissions produites par les truies, les porcs 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 seront donc 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 produits 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).

● Inventaire des effets sur les émissions

Les deux options techniques explorées dans cette sous-action ont les mêmes effets attendus sur les émissions des différents gaz, avec des différences attendues dans l'ampleur de ces effets.

Effets liés aux émissions directes et indirectes issues de l'exploitation

Comme pour la sous-action "vaches laitières", l'inventaire des effets sur les émissions est réalisé *via* la méthodologie actuelle du CITEPA et également avec celle proposée par l'Agence européenne de l'environnement (EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009, updated June 2010) pour mieux prendre en compte les émissions liées aux fractions azotées des effluents. Des quantités par défaut d'azote excrété et des proportions par défaut d'azote ammoniacal sont proposées, mais nous avons calculé ces quantités pour estimer au plus près les effets des options techniques retenues sur les émissions de N₂O et de NH₃. Les quantités d'azote excrété sont calculées par différence entre les quantités ingérées (par animal pour les porcs en post-sevrage et en engraissement et par animal et par an pour les truies) et les quantités fixées par les animaux, comme préconisé dans le rapport CORPEN (2003). Les proportions d'azote ammoniacal ont été calculées sur la base d'une petite synthèse bibliographique rassemblant des expérimentations portant sur des porcs de 50 kg et plus (Canh et al., 1998 ; Portejoie et al., 2004 ; Leek et al., 2007 ; Le et al., 2009) en système lisier (section 3.1). Ce travail de synthèse a permis de moduler la proportion d'azote ammoniacal en fonction de la teneur en matières azotées totales de l'aliment distribué. Les aliments des truies, porcs en post-sevrage et porcs en engraissement sont formulés (2 aliments par catégorie) à moindre coût, avec la teneur en protéines libres, et avec des niveaux minimums d'apports en acides aminés digestibles en accord avec les références existantes (INRAPorc, 2006 ; Ajinomoto Eurolysine, 2011). Ces niveaux minimums d'apports en acides aminés digestibles sont différents pour les porcs en engraissement selon que l'on suit un plan d'alimentation biphasé ou un plan d'alimentation multiphasé. Les teneurs en matières azotées totales des aliments formulés sont disponibles dans le Tableau 8A-2, en annexe.

La réduction des quantités d'azote ammoniacal dans les effluents conduit à une réduction des réactions de nitrification et dénitrification et donc des émissions directes de N₂O en bâtiment, au stockage et à l'épandage, ainsi qu'à une réduction des émissions d'ammoniac et donc des émissions indirectes de N₂O.

Effets en amont de l'exploitation

Les émissions amont liées à la formulation des aliments sont modifiées par la formulation d'aliments moins riches en protéines dans les deux options techniques explorées. On notera toutefois que ces émissions induites ne peuvent pas être comptabilisées dans le cadre des inventaires nationaux, car de nombreuses matières premières riches en protéines sont importées et que la modification d'utilisation de matières premières dans les formulations d'aliments peut ne pas impacter les productions de ces matières premières en France. Ainsi, la formulation des aliments avec utilisation accrue des acides aminés et avec plan d'alimentation biphasé ou multiphasé entraîne une modification de la composition des aliments. L'incorporation du tourteau de soja en particulier est réduite, au profit des céréales et des acides aminés de synthèse.

Les variations de production de GES associées au changement de composition des aliments et liées au changement d'utilisation des sols sont estimées par des données d'impact de la production des matières premières utilisées par analyse du cycle de vie. Les données utilisées ici pour les matières premières concentrées sont issues d'une synthèse bibliographique compilant les estimations faites dans des études d'Analyse du Cycle de Vie à l'INRA (Nguyen et al., 2012a, 2012b, non publié ; Mosnier et al., 2011 ; Garcia-Launay et al., en cours de publication), de même que les estimations de l'Ademe *via* le logiciel Dia'Terre. Un certain nombre de matières premières sont apparues indisponibles dans Dia'Terre, telles que l'huile de soja, la graine de soja extrudée et les acides aminés industriels. **Les valeurs retenues sont celles de Dia'Terre lorsqu'elles sont disponibles, les données INRA dans les autres cas.** En pratique, on prend les valeurs de Dia'Terre pour les céréales, les tourteaux et le son, les valeurs INRA pour les huiles et les acides aminés industriels (Mosnier et al., 2011 ; Nguyen et al. 2012a, 2012b et non publié ; Garcia-Launay et al., publication en cours). 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.

• Quantification de l'atténuation

Les deux options techniques seront explorées sur la base d'un élevage-type qui représente l'élevage "moyen" en France et qui permet donc de calculer les émissions moyennes par truie environnée et par an en France. Il correspond aux performances et aux pratiques moyennes d'un élevage porcin en France. Pour cela, cet élevage a les caractéristiques suivantes :

- 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. Cela permet donc de tenir compte de la production de porcelets et de porcs par truie et par an.

- La gestion des effluents se fait sous 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 GT, IFIP, 2010) à l'exception des quantités d'aliments consommées, obtenues par enquête dans des élevages conventionnels (Durmad et al., 2012 et soumis).

Pour calculer la situation 2010, on utilise cet élevage-type et on considère que 20% des porcs sont engraisés avec un aliment unique et que 80% des porcs sont engraisés selon un plan d'alimentation biphasé. Pour cette situation 2010, on considère également que les niveaux de protéines des aliments sont conformes aux valeurs édictées par le CORPEN (CORPEN, 2003). Pour estimer les émissions sur l'exploitation selon les deux options techniques explorées (2PAA+ et MPAA+), c'est cet élevage-type qui est utilisé (pas de variations de proportions lisier *versus* fumier, ni des performances des animaux). Les options techniques sont supposées ne pas entraîner de variation des performances des animaux, conformément à ce qui a été observé expérimentalement quand on réduit la teneur en protéines des aliments (Bourdon et al., 1995 ; Portejoie et al., 2004). L'ensemble de la démarche des calculs est représenté à la Figure 8-5.

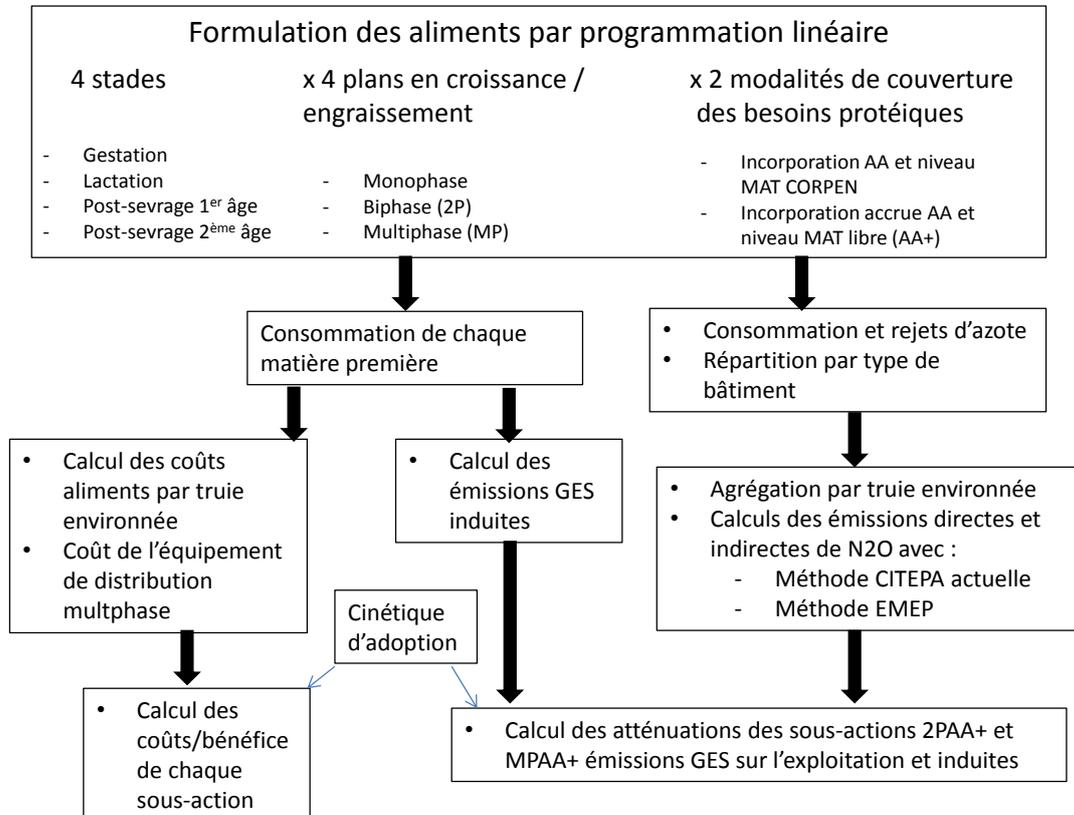


Figure 8-5. Schéma représentant les différentes étapes du calcul de l'action alimentation protéiques des porcs pour le calcul de l'atténuation (AA : acides aminés de synthèse ; MAT : matières azotées totales).

Dans tous les cas (situation 2010 et options techniques 2PAA+ et MPAA+), le calcul des émissions est réalisé selon les étapes suivantes :

- Formulation des aliments à moindre coût, dans le respect des teneurs minimums en acides aminés essentiels définies pour couvrir les besoins des différents stades physiologiques et de croissance des animaux (INRAPorc, 2006 ; Ajinomoto Eurolysine, 2011).
- Calcul des teneurs en matières azotées totales des différents aliments formulés, et des quantités d'azote ingéré par animal (pour les porcs en post-sevrage et en engraissement) et par animal et par an (pour les truies).
- Calcul des quantités d'azote fixé et d'azote excrété (différence entre azote ingéré et azote fixé) par animal (pour les porcs en post-sevrage et en engraissement) et par animal et par an (pour les truies).
- Calcul du pourcentage d'azote ammoniacal dans l'azote excrété en fonction de la teneur en matières azotées totales moyenne des aliments pour chaque catégorie d'animal ; puis calcul des quantités d'azote total et d'azote ammoniacal déposées en bâtiment (cumul des quantités calculées pour les truies, les porcs en post-sevrage et les porcs en engraissement). Partition des quantités d'azote ammoniacal entre les quantités gérées en lisier et les quantités gérées en fumier, selon les proportions moyennes nationales de chaque filière pour chaque catégorie (Agreste, 2008).

L'ensemble des calculs suivants ont repris la démarche CITEPA et EMEP, comme pour la sous-action "vaches laitières", pour calculer les quantités de N₂O et de NH₃ issues des quantités d'azote excrété sous forme fécale et urinaire avec les différentes étapes :

- Calcul des pertes de N-NH₃ en bâtiment par multiplication des quantités d'azote ammoniacal avec le facteur d'émission pour les filières lisier et fumier, en incluant l'immobilisation de l'azote dans la litière des animaux pour la filière fumier.
- Calcul des quantités d'azote total et d'azote ammoniacal au début du stockage des effluents, par différence entre les quantités initiales et les quantités perdues lors des émissions en bâtiment.
- Calcul des émissions de NH₃, N₂O, NO et N₂ au stockage en fonction des facteurs d'émission et des quantités d'azote ammoniacal en début de stockage.
- Calcul des quantités d'azote total et d'azote ammoniacal épandues en soustrayant les émissions pendant le stockage.
- Calcul des émissions à l'épandage en utilisant les facteurs d'émission et les quantités d'azote ammoniacal épandues.
- Somme de toutes les émissions aux différentes étapes du système de gestion des effluents et conversion des valeurs en poids des composés : N₂O et NH₃.

● Conclusion : potentiel d'atténuation unitaire de la sous-action

Tableau 8-7. Atténuation potentielle unitaire : Sous-action "Réduire la teneur en protéines des rations des porcs et des truies" / Option "2PAA+"

	CO ₂ (kgCO ₂ e/truie/an)	N ₂ O (kgCO ₂ e/truie/an)		NH ₃ (kgNH ₃ /truie/an)	
		CITEPA	EMEP	CITEPA	EMEP
Emissions sur l'exploitation Emissions directes + indirectes		275,9	510,3	6,28	21,27
Emissions amont Production des matières premières des aliments	306,3				
Sous-totaux	306,3	275,9	510,3		

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.

Tableau 8-8. Atténuation potentielle unitaire : Sous-action "Réduire la teneur en protéines des rations des porcs et des truies" / Option "MPAA+"

	CO ₂ (kgCO ₂ e/truie/an)	N ₂ O (kgCO ₂ e/truie/an)		NH ₃ (kgNH ₃ /truie/an)	
		CITEPA	EMEP	CITEPA	EMEP
Emissions sur l'exploitation Emissions directes + indirectes		380,7	691,7	8,68	29,36
Emissions amont Production des matières premières des aliments	374,1				
Sous-totaux	374,1	380,7	691,7		

Avec la méthode "expert" EMEP pour les calculs des émissions, sans les émissions induites, l'atténuation potentielle est de 510 kgCO₂e/truie/an pour l'option technique 2PAA+, et de 692 kgCO₂e/truie/an pour l'option technique MPAA+.

L'utilisation des acides aminés de synthèse et l'alimentation en plusieurs phases sont des stratégies nutritionnelles de réduction de l'excrétion d'azote chez les porcs et donc de réduction des émissions d'ammoniac et de protoxyde d'azote qui sont bien identifiées dans la bibliographie (Ball et Möhn, 2003 ; Aarnink et Verstegen, 2007). Nos résultats d'estimation des émissions sur l'exploitation et en amont de l'exploitation montrent que l'incorporation d'acides aminés industriels dans des régimes à teneur réduite en protéines réduit à la fois les émissions directes de N₂O et les émissions de GES associées à la production des matières premières des aliments pour porcs. Les émissions directes et les émissions induites sont minimisées avec l'option MPAA+, ce qui suggère que les effets d'une incorporation accrue d'acides aminés dans les aliments et ceux d'une alimentation multiphase des porcs charcutiers sont partiellement additifs. Cela peut s'expliquer par le fait que ces deux pratiques d'alimentation (MP et AA+) cherchent à ajuster au mieux les apports alimentaires aux besoins des animaux, en termes d'énergie et d'acides aminés avec des approches complémentaires.

Plusieurs facteurs d'incertitude peuvent influencer ces estimations d'atténuation potentielle. Ce sont en particulier les niveaux de performance des animaux (productivité des truies, indices de consommation), qui ont un impact important sur les émissions (Garcia-Launay et al. en cours de publication). Cela étant, ces facteurs de variation ont un impact comparable sur la situation de référence et sur les deux options techniques, ce qui aboutit à une sensibilité faible du potentiel d'atténuation.

5.2.b. Ligne de base et conditions de développement de l'action

• Situation actuelle

Les effectifs porcins s'élèvent en 2010 à 13 860 000 dont 1 119 000 truies présentes (Agreste, 2010), mais dont seulement 85% en moyenne sont productives, soit 951 450 truies. Actuellement, la plupart des élevages gèrent leurs effluents sous forme de lisier (92% et 88% des places en post-sevrage et en engraissement, 87% des places en gestation et 94% des places en maternité ; Agreste, 2008) et l'alimentation se fait à plus de 80% en biphase pour les truies et le post-sevrage. Chez les porcs charcutiers, 83% des effectifs sont alimentés en biphase, et encore 17% des porcs avec un seul aliment. L'utilisation d'un plan d'alimentation multiphase reste à ce jour très marginale.

Les niveaux de matières azotées totales des aliments suivent aujourd'hui les références éditées par le CORPEN (2003). Les aliments sont donc formulés avec incorporation d'acides aminés industriels mais avec une teneur en matière azotée totale minimale qui est supérieure à celle que l'on peut obtenir dans les options 2PAA+ et MPAA+.

• Conditions nécessaires à la mise en place de l'action (critères de détermination de l'assiette maximale technique)

Pour les porcs, il est clair que le conseil va vite, et si l'intérêt économique est présent, la diffusion peut être aussi bonne que pour l'aliment biphase aujourd'hui très répandu. La mise en place de ces mesures nécessitera d'avoir accès à des acides aminés de plus en plus compétitifs et nombreux, et de pouvoir intégrer ces types d'alimentation dans les normes CORPEN.

Des investissements sont nécessaires au niveau de l'exploitation pour mettre en œuvre l'option technique MPAA+. Les équipements nécessaires en multiphase sont en effet un mélangeuse, un ensemble de gestion (ordinateur + logiciel), un groupe d'entraînement, des canalisations et des nourrisseurs adaptés.

• Assiette maximale technique (AMT)

Compte-tenu de l'intérêt économique d'incorporer des acides aminés de synthèse dans les aliments, on peut considérer que pour l'option technique 2PAA+ qui consiste, par rapport à la situation actuelle, à avoir un recours accru aux acides aminés, l'assiette maximale technique est de 100% des effectifs. Quasiment toutes les truies et les porcelets sont alimentés en biphase en France, et 83% des porcs en engraissement le sont également. Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi une assiette maximale technique de 100% en MPAA+, équivalente à celle de l'option 2PAA+, qui permet de comparer ces deux options sur une base identique. Cela suppose que tous les élevages en biphase passent au multiphase ce qui semble réaliste, mais également que ceux qui actuellement ne sont pas en biphase adoptent également le multiphase. Ainsi l'assiette maximale technique porte sur les effectifs totaux de truies productives en élevage (cf. section 4.2).

• Scénario de diffusion (% de l'AMT atteint en 2030 et cinétique)

On peut supposer, malgré les larges fluctuations observées ces dernières années, que les prix des matières premières vont continuer à être élevés dans les prochaines décennies, et que le tourteau de soja va rester structurellement plus cher que le blé ou les autres céréales métropolitaines. Cette tendance devrait favoriser une utilisation accrue des acides aminés de synthèse et donc une réduction des teneurs en protéines des aliments.

Concernant le passage à l'alimentation multiphase, les coûts d'investissement sont non négligeables, et en conséquence la mise en œuvre de cette action dépendra de l'éventuel soutien financier des pouvoirs publics à l'investissement. Le passage au biphasé des 17% de porcs charcutiers alimentés aujourd'hui avec un seul aliment devrait résulter d'une évolution spontanée.

Les cinétiques de diffusion proposées sont très différentes pour les deux options techniques considérées. Pour l'option technique 2PAA+, il n'y a pas d'obstacle particulier à l'adoption de cette mesure, et l'on peut s'attendre à ce que son adoption soit rapide. En effet, l'augmentation de la disponibilité en certains acides aminés comme la valine, et le niveau élevé de coût des matières premières protéiques devraient inciter les fabricants d'aliments à incorporer des teneurs plus importantes d'acides aminés et à réduire donc les teneurs en protéines des aliments. La mise en œuvre de l'option technique MPAA+ nécessite quant à elle un investissement sur l'exploitation. Elle implique également un suivi plus rapproché des performances des animaux qu'en biphasé, et un ajustement régulier du mélange distribué. On peut donc supposer que sa cinétique de diffusion soit plus tardive, et en partie fonction des éventuelles incitations publiques. Ces deux cinétiques (Figure 8-6) reposent sur l'utilisation de l'équation présentée pour la sous-action précédente :

$$\alpha(t) = \alpha(0) + (\alpha_{max} - \alpha(0)) \times e^{\left[\frac{-(t-t_0)}{\tau}\right]^{1/\beta}}$$

avec $\alpha_{max}=100\%$, $t_0=2010$, et $\alpha(0) = 0.1\%$ pour les 2 scénarios, mais avec $\tau=4.4$, $\beta=1.1$, pour l'adoption de la mesure 2PAA+, et avec $\tau=15.8$ et $\beta=7.67$ pour l'adoption de la mesure MPAA+.

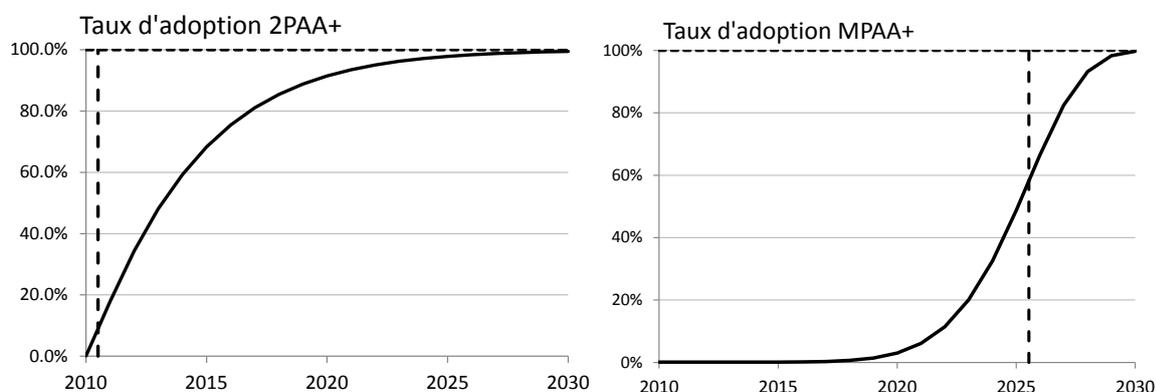


Figure 15.6. Cinétiques de diffusion des options techniques 2PAA+ et MPAA+ entre 2011 et 2030

5.2.c. Potentiel d'atténuation à l'échelle du territoire français

- Potentiel d'atténuation de l'année 2030 en appliquant la sous-action sur l'AMT, sans les émissions induites

L'atténuation potentielle en 2030 porte sur 99,3% de l'AMT et donc sur un effectif de 944 987 truies pour chacune des deux options techniques. Ainsi, l'atténuation à l'échelle du territoire français, sans prise en compte des émissions induites, est avec la méthode CITEPA de 260 750 MgCO_{2e}/an pour l'option 2PAA+ et de 361 372 MgCO_{2e}/an pour l'option MPAA+, alors qu'avec la méthode EMEP elle est de 482 202 MgCO_{2e}/an pour l'option 2PAA+ et de 656 584 MgCO_{2e}/an pour l'option MPAA+.

- Potentiel d'atténuation cumulé sur la période 2010-2030 en appliquant le scénario de diffusion

Si l'on prend en compte la cinétique de diffusion des deux options techniques entre 2010 et 2030, les résultats s'inversent par rapport à la situation en 2030, quelle que soit la méthode de calcul. Avec la méthode EMEP, on trouve une atténuation moyenne à l'échelle du territoire français de 370 413 MgCO_{2e}/an en 2PAA+ et de 185 965 MgCO_{2e}/an en MPAA+. Cette différence de résultat au profit de l'option 2PAA+ (alors que l'option MPAA+ correspond à une atténuation potentielle unitaire plus élevée qu'en 2PAA+, cf. section 4.b.) résulte des différences de cinétique de diffusion des deux options, la cinétique de diffusion de l'option 2PAA+ étant beaucoup plus précoce que celle de MPAA+.

Cumulées sur 20 ans, les atténuations potentielles à l'échelle du territoire sont estimées avec la méthode CITEPA à 4 006 008 MgCO_{2e} avec 2PAA+ et 2 047 039 MgCO_{2e} avec MPAA+ d'ici à 2030 et avec la méthode EMEP à 7 408 259 MgCO_{2e} avec 2PAA+ et 3 719 301 MgCO_{2e} avec MPAA+.

Tableau 8-9. Sous-action "Réduction des apports protéiques chez les porcs" : évolution des atténuations de GES (sans et avec les émissions induites en amont) pour les options "2PAA+" et "MPAA+" avec les deux méthodologies de calcul, CITEPA et EMEP

	2011	2015	2020	2025	2030
Effectif « 2PAA+ »	951	564 579	845 435	924 588	944 987
Atténuation unitaire "2PAA+" (kgCO₂e/truie/an) CITEPA	275.9	275.9	275.9	275.9	275.9
Atténuation échelle France « 2PAA+ » (milliers de MgCO₂e/an) CITEPA	0.263	155.784	233.280	255.121	260.750
Atténuation échelle France « 2PAA+ » avec émissions induites (milliers de MgCO₂e/an) CITEPA	0.554	328.702	492.217	538.301	550.177
Atténuation unitaire « 2PAA+ » (kgCO₂e/truie/an) EMEP	510.3	510.3	510.3	510.3	510.3
Atténuation échelle France « 2PAA+ » (milliers de MgCO₂e/an) EMEP	0.486	288.090	431.403	471.793	482.202
Atténuation échelle France « 2PAA+ » avec émissions induites (milliers de MgCO₂e/an) EMEP	0.777	461.007	690.339	754.972	771.629
Effectif « MPAA+ »	951	1 091	28 813	463 278	949 214
Atténuation unitaire « MPAA+ » (kgCO₂e/truie/an) CITEPA	381	381	381	381	381
Atténuation échelle France « MPAA+ » (milliers de Mg de CO₂e) CITEPA	0.362	0.415	10.969	176.373	361.372
Atténuation échelle France « MPAA+ » avec émissions induites (milliers de Mg de CO₂e) CITEPA	0.718	0.823	21.747	349.670	716.440
Atténuation unitaire « MPAA+ » (kgCO₂e/truie/an) EMEP	692	692	692	692	692
Atténuation échelle France « MPAA+ » (milliers de Mg de CO₂e) EMEP	0.658	0.754	19.931	320.456	656.584
Atténuation échelle France « MPAA+ » avec émissions induites (milliers de Mg de CO₂e) EMEP	1.014	1.162	30.709	493.752	1 011.651

5.2.d. Coûts et bénéfices induits par la sous-action

- Inventaire des modifications induites par la sous-action

Les modifications de composition des aliments induites par les deux options techniques entraînent des modifications de coût d'alimentation. Les coûts des matières premières ont été établis selon les données de l'IFIP (2010) qui sont spécifiques de l'alimentation porcine sauf pour l'huile de colza et la graine de soja extrudée (issus de La Dépêche, 2010). 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. Le Tableau 8-10 indique que la variation de coût de l'aliment est de -49,2 €/truie/an pour l'option technique 2PAA+ et de -81,0 €/truie/an pour l'option technique MPAA+.

Tableau 8-10. Quantités d'aliments, d'azote, coûts alimentaires et GES induits associés 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 des variations induites pour les 2 scénarios, biphasé enrichi en acides aminés (2PAA+) et multiphasé enrichi en acides aminés (MPAA+).

	Réf 2010	Variation	
		2PAA+	MPAA+
Matières premières (kg/truie environnée/an)			
Blé	4015.8	+7.8	-85.4
Maïs_Ouest	1703.1	-595.8	-816.1
Orge	542.4	+1331.6	+1800.6
Triticale	0.0	0.0	0.0
Son de blé tendre	120.4	+37.6	+170.9
Pois	292.1	-292.1	-292.1
Tourteau de colza	1010.7	-170.7	-472.5
Tourteau de soja 48 CW BR	0.0	0.0	0.0
Tourteau de soja 48 Moyenne BR	753.8	-342.6	-333.2
Huile de colza	27.7	-1.0	-1.0
Graine de soja extrudée CW BR	0.0	0.0	0.0

Graine de soja extrudée Moyenne BR	0.0	0.9	0.9
L-Lysine HCL	23.3	+13.3	+10.7
L-thréonine	6.4	+5.8	+4.9
DL-méthionine	1.3	+1.7	+1.6
L-tryptophane	0.8	+1.0	+0.6
Valine	0.3	-0.3	-0.3
Phytase	0.9	0.0	0.0
P monocalcique	22.0	-1.2	+2.4
Sel	35.2	0.0	0.0
Carbonate de calcium	150.8	+4.1	+8.3
COV	44.0	0.0	0.0
Lactosérum déshydraté	56.7	0.0	0.0
Quantité d'aliment ingéré (kg/truie environnée/an)	8807.7	0.0	0.0
N ingéré (kg/truie environnée/an)	225.4	-25.9	-35.7
MAT aliment (g/kg)	160.0	-18.4	-25.4
Coût aliment (€/t)	221.5	-5.6	-9.2
Coût aliment (€/truie environnée/an)	1950.6	-49.2	-81.0
GES aliment (gCO ₂ eq/kg)	466.3	-34.8	-42.5
GES aliment (kgCO ₂ eq/truie environnée/an)	4107.2	-306.3	-374.1

L'option technique 2PAA+ ne nécessite pas d'équipement particulier, l'essentiel des élevages étant déjà équipés pour l'aliment biphase. Concernant les coûts d'investissement liés au passage en multiphase, l'annuité équivalente constante a été estimée à 29,46 €/truie/an sur la base de devis estimatifs établis auprès des professionnels du secteur pour un élevage comportant 6 salles d'engraissement de 210 places chacune, conduisant à un coût de 276,5 €/truie réparti sur 12 ans.

Les coûts unitaires de l'option technique 2PAA+ sont de de -49,2 €/truie/an, car seules les variations de prix des aliments sont concernées. Les coûts de l'option technique MPAA+ sont de -81 €/truie/an pour l'aliment et de +29,46 €/truie/an pour le matériel, soit un coût net de -51,6 €/truie/an.

● Estimations des coûts/bénéfices

Pour l'option technique 2PAA+, le coût correspondant au potentiel annuel d'atténuation de l'AMT est de -46,78 M€/an. Le coût cumulé de l'atténuation entre 2010 et 2030 est de -713,9 M€.

Pour l'option technique MPAA+, le coût correspondant au potentiel annuel d'atténuation de l'AMT est de -49,09 M€/an. Le coût cumulé de l'atténuation entre 2010 et 2030 est de -277,4 M€.

● Autres coûts (coûts de transaction privés, publics)

On considère que pour l'augmentation des niveaux d'incorporation des acides aminés industriels, il n'y a pas de besoin de formation particulier. Concernant la mise en place d'un plan d'alimentation multiphase, le développement et la formation des éleveurs sont assurés par les fournisseurs de ces équipements, qui proposent des outils (notamment logiciels) pour piloter ces systèmes.

● Conclusions : coût unitaire de la sous-action, coût annuel pour l'AMT (ou le % atteint) en 2030 et coût cumulé sur la période 2010-2030

Le coût unitaire est exprimé par truie et par an, en considérant qu'une truie produit 28,2 porcelets sevrés par an. Il est de -49,2 €/truie/an pour l'option technique 2PAA+ et de -51,6 €/truie/an pour l'option technique MPAA+.

Pour l'option technique 2PAA+, le coût correspondant au potentiel annuel d'atténuation de l'AMT est de -46,78 M€/an. Le coût cumulé de l'atténuation entre 2010 et 2030 est de -713,9 M€.

Pour l'option technique MPAA+, le coût correspondant au potentiel annuel d'atténuation de l'AMT est de -49,09 M€/an. Le coût cumulé de l'atténuation entre 2010 et 2030 est de -277,4 M€.

5.2.e. Synthèse : récapitulatif de l'atténuation escomptée, du coût, et du coût de la tonne de CO₂e évité

Option technique 2PAA+ :

- L'atténuation unitaire est respectivement de 275,9 et 510,3 kgCO₂e/truie/an avec les méthodes CITEPA et EMEP.

- L'assiette maximale technique est de 951 459 truies productives (cf. section 5.2.b).
- L'atténuation annuelle potentielle à l'AMT sans prise en compte des émissions induites est respectivement de 262 536 et 485 504 MgCO_{2e}/an avec les méthodes CITEPA et EMEP.
- L'atténuation totale cumulée sur la période 2010-2030 est respectivement de 8 452 597 et 11 854 848 MgCO_{2e} avec les méthodes CITEPA et EMEP,
 - dont respectivement 4 006 008 et 7 408 259 MgCO_{2e} avec les méthodes CITEPA et EMEP pour les émissions intervenant sur l'exploitation agricole et sur les espaces qui lui sont physiquement liés. Le poste concerné de l'inventaire est le poste "gestion des déjections" de la section Agriculture, sous-section Elevage ;
 - et 4 446 589 MgCO_{2e} pour les émissions induites amont.
- Le coût total annuel moyen pour l'AMT est de -46,8 M€.
- Le coût cumulé entre 2010 et 2030 est de -713,9 M€.
- Le coût par Mg de CO_{2e} économisé (hors émissions induites) est respectivement de -178,2 et -96,4 € avec les méthodes CITEPA et EMEP.

Option technique MPAA+ :

- L'atténuation unitaire est respectivement de 380,7 et 691,7 kgCO_{2e}/truite/an avec les méthodes CITEPA et EMEP.
- L'assiette maximale technique est de 951 459 truies productives (cf. section 5.2.b).
- L'atténuation annuelle potentielle à l'AMT sans prise en compte des émissions induites est respectivement de 362 227 et 658 136 MgCO_{2e}/an avec les méthodes CITEPA et EMEP.
- L'atténuation cumulée sur la période 2010-2030 est respectivement de 4 058 365 et 5 730 628 MgCO_{2e} avec les méthodes CITEPA et EMEP,
 - dont respectivement 2 047 039 et 3 719 301 MgCO_{2e} avec les méthodes CITEPA et EMEP pour les émissions intervenant sur l'exploitation agricole et sur les espaces qui lui sont physiquement liés. Le poste concerné de l'inventaire est le poste "gestion des déjections" de la section Agriculture, sous-section Elevage ;
 - et 2 011 327 MgCO_{2e} pour les émissions induites amont.
- Le coût total annuel moyen pour l'AMT est de -49,09 M€.
- Le coût cumulé entre 2010 et 2030 est de -277,4 M€.
- Le coût du Mg de CO₂ évité (hors émissions induites) est respectivement de -135,51 et -74,58 €/MgCO_{2e} avec les méthodes CITEPA et EMEP.

6. Synthèse : potentiel d'atténuation et coût annuels et cumulés pour l'ensemble de l'action

La méthodologie prévoit de retenir les sous-actions les plus efficaces sur l'ensemble de la période pour établir l'action globale de la fiche, donc ici les sous-actions vaches laitières et porcs biphase +AA. On notera cependant, qu'en toute logique, la sous-action multiphase avec AA devrait progressivement prendre la place de l'action biphase+AA dans le courant de la période 2010 à 2030, au fur et à mesure que la technologie et les équipements seront bien maîtrisés, l'atténuation potentielle annuelle à l'AMT de la sous-action multiphase+AA étant plus importante.

Tableau 9-11. Récapitulatif des effets de l'action "Réduction des apports protéiques dans l'alimentation des vaches laitières et des porcs"

	Effet moyen annuel	Effet cumulé sur la période 2010-2030
Emissions GES à partir de l'exploitation (MgCO_{2e})		
- Méthode CITEPA	292 422	5 848 447
- Méthode EMEP	532 770	10 655 400
Emissions GES en amont de l'exploitation (MgCO_{2e})		
- Méthode Dia'Terre	447 111	8 942 220

7. Discussion

7.a. Sensibilité des résultats aux hypothèses retenues pour les calculs

Les scénarios à effectifs et prix constants retenus pour ce calcul sont bien entendu très discutables pour le chiffrage de cette action. S'il est possible d'imaginer que la réduction des effectifs de vaches laitières sur la période 2010-2030 limite la portée de cette action, l'augmentation du différentiel de prix entre les aliments protéiques et énergétiques peut à l'opposé rendre cette action plus attractive et son adoption plus rapide. L'évolution des effectifs de vaches laitières comme de truies peut être très rapide en France dans les prochaines années. La fin des quotas laitiers pourrait permettre d'imaginer de produire plus, voire même d'accroître les effectifs laitiers comme cela est envisagé dans certains pays. Les analyses en France sont actuellement moins optimistes, et la possibilité de convertir des exploitations mixtes d'élevage en exploitations de grandes cultures suite à une évolution attractive des prix des céréales peut accélérer la réduction des effectifs laitiers et porcins en France.

Les effets sur les émissions indirectes amont liées à l'utilisation des matières premières sont supérieurs aux effets de réduction de GES liés aux excréments d'azote, mais ils sont très sensibles à la méthode retenue pour le calcul de changement d'usage des sols (Middelhaar et al., 2013). Les méthodes actuelles qui ont été retenues dans ce travail pénalisent beaucoup le soja brésilien. Il est possible que ces méthodes évoluent pour répartir plus largement l'impact de l'usage des sols et de la déforestation avec des méthodes conséquencielles et non plus attributionnelles. Cette alternative modifie considérablement les valeurs GES des aliments et pourrait réduire fortement l'effet positif obtenu sur les effets induits dans le calcul pour cette étude.

L'analyse d'incertitude n'a pas été réalisée pour ce calcul compte tenu de sa complexité. Néanmoins, il est possible de considérer que les erreurs sur les calculs des excréments d'azote sont faibles, aussi bien en porcs qu'en bovins, par rapport à celles liées aux facteurs d'émissions directes et indirectes des émissions de N₂O. Ces incertitudes pour le N₂O sont généralement considérées comme très élevées, et le document de l'EMEP/EEA (2010) considère un intervalle d'incertitude compris entre -50 et +100%, sans que l'on sache si l'agrégation à l'échelle nationale peut réduire ou non cette incertitude. Cette incertitude étant la plus grande, elle sera considérée comme celle des émissions calculées dans cette étude, aussi bien en porcs qu'en bovins, faute de pouvoir étudier plus spécifiquement l'ensemble des incertitudes et de leur propagation dans les calculs de cette étude. Si on applique cette incertitude à la méthode EMEP qui évalue plus précisément les émissions de N₂O, on peut estimer les réductions des émissions globales de GES de cette action comprises entre 5 327 700 et 21 310 800 MgCO₂e sur la période 2010 à 2030. En appliquant cette incertitude en 2030, l'atténuation serait comprise entre 116 800 et 467 200 MgCO₂e/an pour la sous-action "vaches laitières", et entre 241 100 et 964 400 MgCO₂e/an pour la sous-action "porcs". Concernant l'incertitude des effets induits en amont, l'incertitude est difficile à indiquer car elle se double d'une controverse méthodologique actuellement pour l'allocation des émissions liées aux changements d'usage des sols qui modifie beaucoup les valeurs du tourteau de soja et donc les conclusions sur les effets induits qui pourraient presque s'annuler.

7.b. Les conditions d'une prise en compte de l'action dans l'inventaire national

• Comptabilisation de l'effet

La méthode EMEP/EEA est déjà utilisée par le CITEPA pour le calcul des émissions de NH₃ dans le cadre d'un autre inventaire. Il suffirait de faire valider son utilisation pour la comptabilisation des émissions gazeuses d'azote pour le calcul des GES.

En ce qui concerne l'alimentation multiphase, la méthode du CITEPA permettrait sa prise en compte dans l'absolu. Mais les données de référence CORPEN, utilisées par le CITEPA pour faire les calculs, ne traduisent pas son effet.

• Vérifiabilité de la mise en œuvre

La principale difficulté pour la prise en compte dans l'inventaire national, quelle que soit la méthode, concerne la disponibilité de données fiables concernant les pratiques d'alimentation, en particulier pour les ruminants. Dans le cas des vaches laitières, les teneurs en urée du lait pourraient constituer un indicateur des pratiques de complémentation azotée lorsque les animaux sont en bâtiments sous réserve de mieux valider son interprétation. Pour l'alimentation en porcs, les données techniques sont plus fiables et doivent permettre de prendre en compte plus rapidement cet effet.

7.c. Les contextes et mesures susceptibles de favoriser le déploiement de l'action

Pour les vaches. L'augmentation du prix des matières premières protéiques (tourteau de soja) peut favoriser le développement de l'action, qui est freiné par une stratégie fréquente chez les éleveurs, consistant à prendre une marge de sécurité sur le contenu en azote des rations pour éviter tout risque de limitation de la production.

Pour les porcs. La diffusion du biphasé a été rapide, parce qu'elle a été favorisée par le conseil agricole, et que son adoption permettait à l'éleveur de réduire les quantités d'azote organiques dans le cadre de la directive "Nitrates" (limités à 170 kg/ha). Il devrait en être de même pour le multiphasé, étant donné son intérêt pour l'éleveur. L'augmentation du différentiel de prix entre les aliments protéiques et énergétiques peut rendre cette technique plus attractive. Son adoption nécessitera toutefois d'avoir accès à des acides aminés industriels plus compétitifs et nombreux (ex. valine) et de pouvoir intégrer ces types d'alimentation dans les normes CORPEN, mais aussi de mettre en place un soutien à l'investissement et un suivi plus rapproché des performances des animaux.

7.d. Interactions entre sous-actions et avec les autres actions

Les deux sous-actions ne présentent pas réellement d'interactions potentielles entre elles, mais il peut être intéressant de les comparer en raison de leurs similitudes. La sous-action sur les porcs conduit à une réduction plus forte des émissions de GES que celle sur les vaches laitières, alors qu'environ moitié moins de truies sont concernées. Cet effet provient du fait que les truies et leur suite sont concernées et ce pratiquement pendant toutes les phases de production, alors que pour les vaches, la distribution de compléments protéiques n'intervient principalement que pendant les périodes où les animaux sont en bâtiments, ce qui réduit considérablement l'importance de l'action par rapport aux porcs. Les écarts de consommations annuelles d'aliments induits par les actions en truies et vaches laitières montrent bien des réductions beaucoup plus fortes de l'utilisation des tourteaux pour les truies environnées. De plus, les fractions d'azote urinaire sont plus importantes en porcs qu'en vaches, ce qui accroît les émissions gazeuses.

En matière d'interaction avec d'autres actions, la réduction de l'excrétion d'azote *via* les pratiques d'alimentation explorées peut diminuer la valeur fertilisante des effluents épandus (Sorensen et Fernandez, 2003). L'action a comptabilisé toutes les émissions avec les méthodes actuelles de stockage et d'épandage et en supposant qu'il n'y a pas de substitution avec les pratiques d'apports de fertilisants minéraux azotés. La réduction des apports protéiques diminue non seulement l'azote total dans les effluents, mais aussi la proportion d'azote ammoniacal dans l'azote total, qui est aussi la fraction la plus rapidement disponible pour les plantes (cf. section 2.a. et Canh et al., 1998 ; Portejoie et al., 2004 ; Leek et al., 2007 ; Le et al., 2009). Cependant, la disponibilité mesurée de l'azote pour les plantes reste élevée même avec une teneur réduite en protéines du régime (Gerdemann et al., 1999 ; Sorensen et Fernandez, 2003), ce qui semble indiquer que la réduction des teneurs en protéines des aliments pour porc a peu d'impact sur la valeur fertilisante de l'effluent. Néanmoins, des évolutions visant à mieux conserver l'azote ammoniacal dans les effluents et mieux prendre en compte l'apport réel d'azote organique pour ajuster les apports de fertilisants minéraux pourraient contribuer à réduire les émissions calculées et peut-être à accroître les coûts.

Une action non étudiée visant à une meilleure conservation de l'azote ammoniacal au stockage et à l'épandage conduirait possiblement à un moindre effet de cette action (moindres pertes de NH_3) si et seulement si les pratiques de fertilisation minérale associées étaient ajustées en conséquence.

7.e. Autres effets attendus de l'action, synergies/antagonismes avec l'adaptation au changement climatique et avec d'autres objectifs de politique publique

Sous-action "Réduction des apports protéiques chez les vaches laitières"

Le principal effet associé à cette sous-action est de réduire globalement les émissions d'ammoniac en élevage. La mise en place du protocole de Göteborg sur les réductions d'ammoniac doit inciter à regarder cette sous-action avec d'autant plus d'intérêt qu'elle est multi-impacts. L'ammoniac intervient à la fois dans les processus d'acidification, d'eutrophisation (*via* la redéposition et la transformation en nitrate), de toxicité terrestre, de réchauffement climatique (*via* la transformation en N_2O), et sur la santé humaine (particules fines). En vaches laitières, cette réduction pour les rations concernées par une réduction des apports protéiques, allait de 10 à 25% des émissions annuelles comprises entre 23 et 40 kg d'azote ammoniacal par vache et par an suivant les rations (-6,2 kg de NH_3 en moyenne). Cette réduction des apports protéiques conduit également à réduire les quantités d'azote excrété d'un peu moins d'une dizaine de kg d'azote par vache et par an, et donc les risques de lessivage de nitrate soit par les quantités d'azote épandu, soit par la retombée d'ammoniac, la volatilisation de l'azote supplémentaire est importante (sous forme de NH_3).

Bien entendu, le second effet de cette mesure est d'accroître l'autonomie protéique des exploitations. Cela peut conduire à une moindre importation des aliments riches en protéines et à favoriser l'utilisation des ressources produites en métropole. Cela se reflète également dans les gains de GES liés à l'utilisation des matières premières dans l'alimentation et qui s'expliquent essentiellement par une réduction de l'importation de tourteaux de soja brésilien.

Sous-action "Réduction des apports protéiques chez les porcs"

Les deux options techniques explorées dans cette étude réduisent sensiblement les émissions de N₂O sur l'exploitation et les émissions de GES associées à la production des matières premières des aliments. Outre ces résultats sur le changement climatique, les deux options réduisent de façon substantielle les émissions de NH₃ sur l'exploitation comme pour les vaches laitières, avec les mêmes impacts associés. Des travaux récents d'Analyse de Cycle de Vie (Garcia-Launay et al., 2013) ont par ailleurs montré l'efficacité de ces pratiques d'alimentation pour réduire l'impact de la production porcine sur le changement climatique et sur l'eutrophisation mais également sur l'acidification, et dans une moindre mesure sur l'écotoxicité terrestre. L'efficacité de ces pratiques d'alimentation apparaît robuste, quelle que soit la filière de gestion des effluents ou les niveaux de prix des matières premières. Dans cette étude, les deux options permettent une réduction de 27 et 37 kg d'azote par truie environnée et par an et sont donc de nature à réduire aussi fortement les risques de lessivage de nitrate.

Ces pratiques contribuent par ailleurs à la compétitivité des élevages puisqu'elles permettent une réduction intéressante des coûts d'alimentation. On peut raisonnablement penser que l'application de l'une ou l'autre des deux options techniques explorées ne modifiera pas la production porcine puisqu'alimenter des porcs à l'engrais avec des régimes à teneur abaissée en protéines mais équilibrés en acides aminés essentiels (Bourdon et al., 1995 ; Portejoie et al., 2004 ; Osada et al., 2011 ; Quiniou et al., 2011) ne modifie pas l'ingestion journalière, le gain quotidien et l'indice de consommation si la teneur en énergie n'est pas modifiée. Si les ratios entre les teneurs en acides aminés et la teneur en énergie nette restent optimaux, ces régimes à teneur réduite en protéines ne modifient pas la composition des carcasses (Le Bellego et al., 2002 ; Quiniou et al., 2011).

Ces deux actions présentent donc des effets bénéfiques sur la qualité de l'air et sur celle de l'eau, sans transfert de pollution de l'eau vers l'air ou inversement. Si leur impact en termes de GES reste limité, elles prennent toute leur place dans un dispositif global de réduction des émissions à risques pour l'environnement, sans altérer la production.

8. Conclusions

Cette action fait partie des actions de type gagnant-gagnant dont on peut penser qu'il est facile de les mettre en œuvre. Il faut cependant considérer que des freins existent, difficiles à quantifier, au moins pour les vaches laitières, car autrement la quasi-totalité des vaches laitières aurait probablement déjà adopté cette mesure. Le renchérissement des protéines alimentaires favorisera clairement le développement de cette action. Elle reste cependant d'une ampleur limitée globalement en termes d'impacts sur les GES, mais la prise en compte d'une méthode plus précise dans le calcul des inventaires suffirait à en augmenter la portée. Pour les vaches laitières, la teneur en urée des laits permettrait probablement d'estimer l'évolution des pratiques d'alimentation azotée. En porcs, les suivis techniques permettront probablement de quantifier l'évolution de ces pratiques.

On notera qu'en porc comme en vache laitière, les coûts par Mg de CO₂e épargné sont très proches entre les sous-actions étudiées, de l'ordre de -80 à -90 €/MgCO₂e pour les émissions calculées avec la méthode EMEP, ce qui semble cohérent car les mécanismes des deux sous-actions sont assez voisins et peuvent expliquer cette convergence.

En prenant en compte les chiffres issus de la méthode EMEP, les effets globaux sont de plus de 10,7 millions de Mg de CO₂e pendant la période cumulée de l'étude 2010-2030 avec une forte incertitude liée aux émissions de N₂O, auquel il faudrait éventuellement ajouter les 9 millions de Mg de CO₂e induits en amont par les sources d'aliments utilisées, même si ces effets pourraient ne pas concerner les inventaires français et être remis en cause par des méthodes de calcul différent des changements d'usage des sols.

Références bibliographiques citées

- Aarnink, A.J.A., Verstegen, M.W.A., 2007. Nutrition, key factor to reduce environmental load from pig production. *Livestock Science* 109, 194-203.
- 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>
- Aguerre, M.J.; Wattiaux, M.A.; Hunt, T.; Larget, B.R., 2010. Effect of dietary crude protein on ammonia-N emission measured by herd nitrogen mass balance in a freestall dairy barn managed under farm-like conditions. *Animal*, 4 (8): 1390-1400.
- Arriaga H., Pinto M., Calsamiglia S., Merino P., 2009. Nutritional and management strategies on nitrogen and phosphorus use efficiency of lactating dairy cattle on commercial farms: An environmental perspective. *Journal of Dairy Science*, 92, 204-215.
- 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>
- Ball, R.O., Möhn, S., 2003. Feeding strategies to reduce greenhouse gas emissions from pigs. *Advances in Pork Production* 14, 301-311.
- Bannink A., Smits M.C.J., Kebreab E., Mills J.A.N., Ellis J.L., Klop A., France J., Dijkstra J., 2010. Simulating the effects of grassland management and grass ensiling on methane emission from lactating cows. *Journal of Agricultural Science*, 148, 55-72.
- Bourdon, D., Doumad, 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 de la Recherche Porcine*, Paris, pp. 269-278.
- Bouvarel I., Doumad J.Y., Gac A., 2010. Les stratégies d'alimentation des animaux au sein de l'exploitation et du territoire et leurs incidences environnementales. In « Elevages et Environnement », S. Espagnol et P. Leterme (Eds). Quae et Educagri Editions, 260pp.
- Bussink D.W., Oenema O., 1998. Ammonia volatilization from dairy farming systems in temperate areas: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 51, 19-33.
- 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.
- Chardon X., Rigolot C., Baratte C., Espagnol S., Raison C., Martin-Clouaire R., Rellier J.-P., Le Gall A., Doumad J.Y., Piquemal B., Leterme P., Paillat J.M., Delaby L., Garcia F., Peyraud J.L., Poupa J.C., Morvan T., Faverdin P., 2012. MELODIE: a whole-farm model to study the dynamics of nutrients in dairy and pig farms with crops. *Animal*, 6, 1711-1721.
- Chatellier, V.; Vérité, R., 2003. L'élevage bovin et l'environnement en France : le diagnostic justifie-t-il des alternatives techniques ? *Productions Animales*, 16 (4): 231-249.
- CITEPA, 2012. Rapport National d'inventaire pour la France au titre de la convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et du protocole de Kyoto. 1364pp.
- CORPEN, 1999. Estimation des flux d'azote, de phosphore et de potassium associés aux vaches laitières et à leur système fourrager. Influence de l'alimentation et du niveau de production. Groupe "Alimentation animale" Sous groupe Vaches laitières".
- CORPEN, 2003. Estimation des rejets d'azote - phosphore - potassium - cuivre et zinc des porcs. Influence de la conduite alimentaire et du mode de logement des animaux sur la nature et la gestion des déjections produites. In: Ministère de l'agriculture, de la pêche et des affaires rurales, durable, M.d.l.é.e.d.d. (Eds.), p. 41 pp.
- Doumad J.Y., Ryschawy J., Trousson T., Bonneau M., Gonzalez J., 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. *Soumis dans Animal*.
- Doumad, 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.
- Edouard, N., Hassouna, M., Robin, P., Faverdin, P. 2011. Effect of diet protein level on nitrogen excretion and greenhouse gases emissions in lactating dairy cows. 8th International Symposium on the Nutrition of Herbivores, Aberystwyth, Wales UK, p534.
- EMEP/EEA, 2010. Emission inventory guidebook 2009, updated June 2010. 4.B Animal husbandry and manure management. 73 pp.
- Faverdin, P., C. Baratte, R. Delagarde, and J. L. Peyraud. 2011. GrazIn: a model of herbage intake and milk production for grazing dairy cows. 1. Prediction of intake capacity, voluntary intake and milk production during lactation. *Grass and Forage Science* 66:29-44.
- Faverdin, P. and J. L. Peyraud. 2010. Nouvelles conduites d'élevage et conséquences sur le territoire : cas des bovins laitiers. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France* (1):89-100.
- Faverdin P., Vérité R., 1998. Utilisation de la teneur en urée du lait comme indicateur de la nutrition protéique et des rejets azotés chez la vache laitière. *Renc. Rech. Ruminants.*, 5, 209-212.
- Faverdin P., Vérité R. 2003. Modèle dynamique de simulation des flux d'azote et de l'urémie chez la vache laitière. *Renc. Rech. Ruminants*, 10, 159-162.
- France Agrimer (2009). Filière porcine : cheptel / abattages / consommation / échanges. Les cahiers de FranceAgriMer 2009. Téléchargé sur http://www.franceagrimer.fr/content/download/3130/17002/file/porcs_20103.pdf
- Garcia-Launay, F., van der Werf, H., Nguyen, T.T.H., Le Tutour, L., Doumad, JY. 2013. L'incorporation d'acides aminés dans les aliments permet de réduire les impacts environnementaux de la production porcine. 45^{èmes} Journées de la Recherche Porcine, 5-6 février 2013.
- Garcia-Launay, F., van der Werf, H., Nguyen, T.T.H., Le Tutour, L., Doumad, JY. Evaluation of the environmental implications of the utilization of feed-use of amino acids in pig production using Life Cycle Assessment. *Soumis à Livestock Science*.
- Gerdemann, M.M., Machmüller, A., Frossard, E., Kreuzer, M., 1999. Effect of different pig feeding strategies on the nitrogen fertilizing value of slurry for *Lolium multiflorum*. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 162, 401-408.
- Haque M.N., Rulquin H., Andrade A., Faverdin P., Peyraud J.L., Lemosquet S., 2012. Milk protein synthesis in response to the provision of an "ideal" amino acid profile at 2 levels of metabolizable protein supply in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 95, 5876-5887.

- IFIP (2010). Gestion Technico-économique : Evolution des résultats moyens nationaux - naisseurs-engraisseurs. Téléchargé le 10/10/2012 sur <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 sur <http://www.itp.asso.fr/PagesStatics/resultat/pdf/retro/00gqtt.pdf>
- 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
- Institut de l'Elevage, 2012. Alimentation des bovins : rations moyennes et autonomie alimentaire. Collection résultats. <http://idele.fr/recherche/publication/idelesolr/recommends/alimentation-des-bovins-rations-moyennes-et-autonomie-alimentaire.html>
- Institut de l'Elevage, 2011. Observatoire de l'alimentation des vaches laitières (15 rations-types) pour aller plus loin sur l'alimentation des VL (données 2007). <http://idele.fr/recherche/publication/idelesolr/recommends/observatoire-de-l'alimentation-des-vaches-laitieres.html>
- IPCC, 1996. Revised 1996, IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Workbook. Module 4. Agriculture. 65 pp.
- 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.
- Maxin G., Faverdin P., 2006. Modélisation des bilans entrées/sorties des éléments carbone, azote, eau et minéraux chez la vache laitière. Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur. ESITPA.
- Middelhaar C., Cederberg C., Vellinga T., Werf H.G., Boer I.M., 2013. Exploring variability in methods and data sensitivity in carbon footprints of feed ingredients. *Int J Life Cycle Assess*, 18, 768-782.
- 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, 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.
- 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.), F. Aarts, F. Béline, C. Bockstaller, M. Bourblanc, L. Delaby, C. Donnars, J.Y. Dourmad, P. Dupraz, P. Durand, P. Faverdin, J.L. Fiorelli, C. Gagné, A. Girard, F. Guillaume, P. Kuikman, A. Langlais, P. Le Goffe, S. Le Perchec, P. Lescoat, T. Morvan, C. Nicourt, V. Parnaudeau, J.L. Peyraud, O. Réchauchère, P. Rochette, F. Vertes, P. Veysset, 2012. Les flux d'azote liés aux élevages, réduire les pertes, rétablir les équilibres. Expertise scientifique collective, rapport, Inra (France), 503 pages.
- Place S.E., Mitloehner F.M., 2010. Invited review: Contemporary environmental issues: A review of the dairy industry's role in climate change and air quality and the potential of mitigation through improved production efficiency. *Journal of Dairy Science*, 93, 3407-3416.
- 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. *Livestock Production Science*, 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. Annual Meeting of the European Association of Animal Production, Stavanger, p. 17.
- Schils R. L. M., Eriksen J., Ledgard S. F., Vellinga Th. V., Kuikman P. J., Luo J., Petersen S. O. and Velthof G. L., 2012. Strategies to mitigate nitrous oxide emissions from herbivore production systems. *animal*, Available on CJO2011 doi:10.1017/S175173111100187X
- Sørensen, P., Fernandez, J.A., 2003. Dietary effects on the composition of pig slurry and on the plant utilization of pig slurry nitrogen. *The Journal of Agricultural Science* 140, 343-355.
- van Duinkerken G., Andre G., Smits M. C. J., Monteny G. J. and Sebek L. B. J., 2005. Effect of Rumen-Degradable Protein Balance and Forage Type on Bulk Milk Urea Concentration and Emission of Ammonia from Dairy Cow Houses. *J. Dairy Sci.* 88, 1099-1112.
- van Duinkerken, G.; Smits, M.C.J.; Andre, G.; Sebek, L.B.J.; Dijkstra, J., 2011. Milk urea concentration as an indicator of ammonia emission from dairy cow barn under restricted grazing. *Journal of Dairy Science*, 94 (1): 321-335.
- 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.
- Vellinga, T.V., de Haan, M.H.A., Schils, R.L.M., Evers, A., van den Pol-van Dasselaar, A., 2011. Implementation of GHG mitigation on intensive dairy farms: Farmers' preferences and variation in cost effectiveness. *Livestock Science* 137, 185-195.
- Vérité R., Delaby L., 1998. Conduite alimentaire et rejets azoté chez la vache laitière. Interrelations avec les performances. *Renc. Rech. Ruminants*, 5, 185-192.

Annexe

Tableau 8A-1. Empreintes carbone des matières premières des aliments, en gCO₂e/kg

	Dia'Terre	INRA
Orge	320	490
Blé	350	540
Maïs	296	500
Son de blé	140	250
Tourteau de colza	460	450
Tourteau de tournesol	295	310
Tourteau de soja	1580	1530
Pois	123	370
Pulpe de betterave déshydratée	307	
VL18	616	
VL40	1046	
Concentré énergétique céréale	331	
Huile de colza		2070
Huile de soja		1500
Graine de soja extrudée		1670
l-lysine / l-threonine		4300
l-tryptophan / l-valine		8540
dl-méthionine		3050

Mode de calcul des valeurs INRA : logiciel SimaPro, base de données ecoinvent + base INRA UMRSAS, Rennes

Les valeurs INRA proposées sont :

- pour les céréales, le son, le pois et les tourteaux de soja et colza : une moyenne de résultats publiés par Nguyen et al., 2011 ; Mosnier et al., 2011 ; Nguyen et al., 2012 ; Nguyen et al., 2013 ; Garcia-Launay et al., en cours ;
- pour l'huile de soja : la valeur de Nguyen et al., 2011 ;
- pour l'huile de colza : la moyenne des données de Mosnier et al., 2011 et Garcia-Launay et al., en cours ;
- pour la graine de soja extrudée : la valeur de Garcia-Launay et al., en cours ;
- pour les acides aminés : les valeurs de Garcia-Launay et al., en cours.

La valeur Dia'Terre pour le son de blé n'est pas celle qui figure dans le document disponible, mais une valeur modifiée ultérieurement.

Tableau 8A-2. Teneurs en matières azotées totales et incorporation de tourteau de soja dans les aliments formulés pour la sous-action "porcs"

Aliments	MAT (g/kg)			Incorporation tourteau soja (kg/t)		
	Situation actuelle	Option 2PAA+	Option MPAA+	Situation actuelle	Option 2PAA+	Option MPAA+
Gestation	140.0	115.5	115.5	58.1	0.0	0.0
Lactation	165.0	175.1	175.1	85.0	126.3	126.3
Post-sevrage 1 ^{er} âge	200.0	205.7	205.7	298.7	300.0	300.0
Post-sevrage 2 ^e âge	180.0	175.5	175.5	200.0	200.0	200.0
Croissance	165.0	147.7	150.0	103.9	29.9	36.6
Engraissement	150.0	127.4	105.9	18.8	5.1	0.0