



## Action 7

# Substituer des glucides par des lipides insaturés et utiliser un additif à base de nitrate dans les rations des ruminants pour réduire les émissions de méthane entérique

### **Auteurs**

**Michel Doreau** (INRA-PHASE)

Marc Benoit (INRA-SAE2)

### **Appui scientifique interne**

Philippe Chemineau (INRA-DEPE)

Philippe Faverdin (INRA-PHASE)

Michel Lherm (INRA-SAE2)

### **Extraction et traitement de données**

Lénaïc Pardon (INRA-DEPE)

### **Rellecteurs scientifiques externes**

Chaouki Benchaar (Agriculture et Agroalimentaire Canada)

Eric Froidmont (Centre wallon de Recherches agronomiques)

### **Rellecteur technique externe**

Jean-Baptiste Dollé (Institut de l'Élevage)

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

En France, 12% des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique proviennent du méthane, et 80% des émissions de méthane proviennent de l'élevage (CITEPA, 2010). Ce méthane est pour environ 2/3 d'origine entérique, et 1/3 provient de la fermentation des effluents d'élevage. Le méthane entérique est produit par la fermentation microbienne des glucides chez les ruminants (bovins, ovins, caprins) et les équidés. L'action concerne exclusivement les bovins. Les équidés ne seront pas considérés. En effet, ils produisent du méthane dans leur gros intestin, mais les nutriments non cellulosiques sont digérés en très grande partie au niveau de l'intestin grêle, et il est difficile d'imaginer pour l'espèce équine une méthode d'atténuation de la production de méthane. D'ailleurs, il n'y a à notre connaissance aucune étude sur l'effet potentiel de nutriments spécifiques ou d'additifs alimentaires sur la production de méthane chez les chevaux. Les petits ruminants (ovins et caprins) ne seront pas considérés. En effet, ils représentent seulement 7% des émissions entériques des ruminants (Vermorel et al., 2008), leurs systèmes de production sont nombreux et hétérogènes et les données techniques très limitées.

L'action consiste à 1) accroître fortement l'introduction de sources de lipides insaturés dans la ration, et 2) distribuer un additif alimentaire à base de nitrate, ces deux techniques permettant de réduire le méthane entérique produit par les ruminants. L'utilisation de la voie génétique animale pour réduire le méthane n'a pas été retenue. En effet l'augmentation de productivité des bovins relève d'une pratique actuelle ne nécessitant pas d'action nouvelle spécifique ; la sélection des bovins sur une efficacité alimentaire accrue est actuellement prématurée faute de recul et ne pourrait de toute manière pas débiter rapidement. Parmi les diverses possibilités de réduire la production de méthane en modifiant la composition de la ration, le choix a été fait de privilégier l'apport de lipides. Brièvement, l'accroissement du pourcentage de concentré dans la ration, souvent suggéré pour réduire le méthane, n'a pas été retenu car ne participant pas à un élevage de ruminants durable à base de fourrages, et parce que la baisse de méthane est partiellement compensée par une augmentation des autres GES.

La limitation de l'apport de lipides à des sources insaturées est expliquée aux paragraphes 3.1. et 7.c. L'apport de lipides saturés peut en effet entraîner un accroissement de leur teneur dans le lait ou la viande, ce qui va à l'encontre des recommandations nutritionnelles pour l'alimentation humaine. Concernant l'utilisation d'additifs, seul le nitrate est retenu. Nous avons exclu les additifs interdits dans l'Union Européenne (antibiotiques ionophores) et dont l'absence de toxicité n'est pas attestée (chloroforme...); le nitrate est le seul additif restant pour lequel une diminution de la production de méthane est attestée par des essais *in vivo* concordants, y compris à long terme. Comme les lipides insaturés et le nitrate sont les deux seules possibilités retenues pour réduire le méthane entérique, elles ont été regroupées en une seule action divisée en deux sous-actions. La justification et le cadre de leur emploi sont brièvement présentés dans les paragraphes suivants. Des commentaires détaillés sont fournis dans les Annexes 1 et 2.

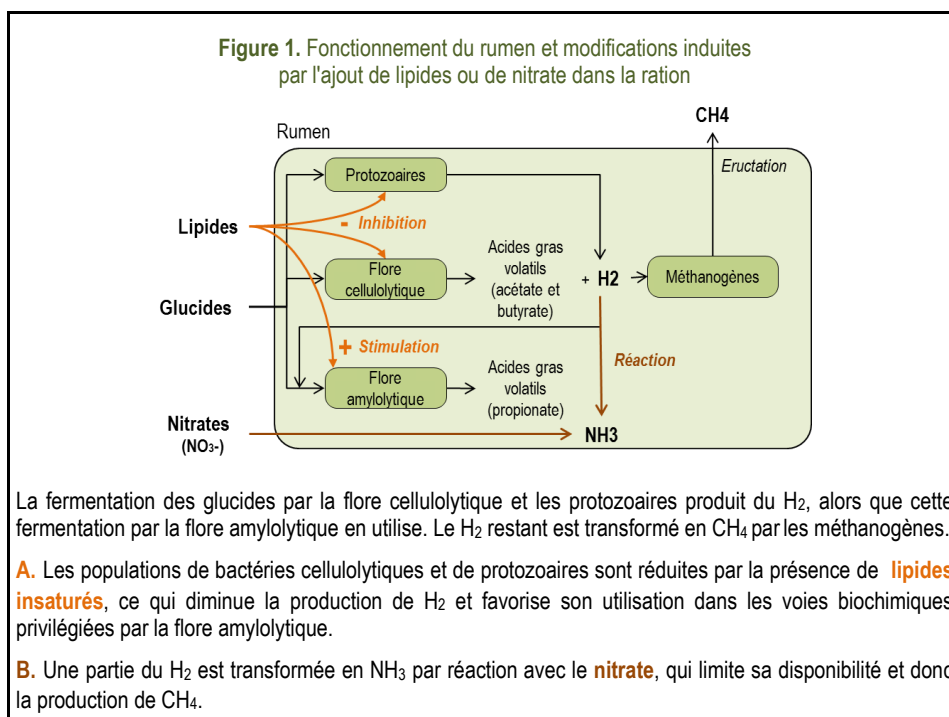
Actuellement, l'introduction de lipides insaturés dans la ration des ruminants est limitée au cas d'animaux forts producteurs auxquels on souhaite apporter un "concentré d'énergie" ou dans le cadre de cahiers des charges visant à accroître les acides gras oméga 3 dans les produits (initiative "Bleu-Blanc-Cœur"). D'une manière générale, l'introduction d'additifs alimentaires, malgré une forte promotion par les firmes d'aliments du bétail, est limitée aux animaux forts producteurs en vue d'améliorer leur efficacité alimentaire ou de réduire les risques de pathologie d'origine nutritionnelle. L'utilisation de nitrate en tant qu'additif n'est pas encore pratiquée.

## 2. Description de l'action

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

La fermentation des glucides dans le rumen est réalisée par un écosystème complexe de bactéries et de protozoaires. Elle produit des acides gras volatils, qui sont la principale source énergétique des ruminants, et également du gaz carbonique et de l'hydrogène. Le méthane est normalement produit dans le rumen par des archaea méthanogènes, micro-organismes qui convertissent l'hydrogène en méthane. La conversion de glucides en acides gras volatils se fait selon deux voies concomitantes : la première conduit à la formation de l'acétate et du butyrate et produit de l'hydrogène, la seconde conduit à la formation du propionate et consomme de l'hydrogène. Il y a production nette d'hydrogène, car la voie de l'acétate et du butyrate est plus importante que la voie du propionate. La production d'hydrogène dépend donc d'une part de la quantité de glucides digestibles, d'autre part de l'orientation des fermentations vers l'un ou l'autre des acides gras volatils. Cette orientation est liée à l'équilibre de la population bactérienne du rumen (flore cellulolytique ou amylolytique) et à la population de protozoaires. Les rations riches en cellulose (herbe, sous-produits riches en parois végétales) produisent préférentiellement de l'acétate, les rations riches en amidon (céréales) produisent préférentiellement du propionate. En outre, les protozoaires sont de gros producteurs d'hydrogène. Les lipides insaturés (surtout polyinsaturés) réduisent les populations bactériennes cellulolytiques et/ou les protozoaires, et donc la production d'hydrogène. Le mécanisme d'action du

nitrate est différent. L'hydrogène est capté par le nitrate, avec formation d'ammoniac, préférentiellement à la voie de formation du méthane. En bref, les lipides réduisent la production d'hydrogène, et le nitrate dévie son utilisation et évite la formation de méthane.



## 2.b. Sous-actions et éventuelles options techniques instruites dans la fiche

Pour les raisons énoncées ci-dessus, les deux sous-actions instruites dans la fiche seront : 1) apport de lipides insaturés dans la ration et 2) apport de nitrate dans la ration. Dans le cas des lipides, deux modalités techniques complémentaires sont retenues : l'utilisation de mélanges extrudés à base de graines oléagineuses et l'enrichissement des aliments concentrés avec des huiles. Ces deux modalités sont techniquement opérationnelles, et maîtrisées par plusieurs fabricants d'aliments du bétail. Dans le cas du nitrate, la seule option technique retenue est son incorporation dans des aliments composés, sous le contrôle de l'industrie de l'alimentation animale, excluant une utilisation directe par l'éleveur sous forme d'additif. La limitation pour les fabricants d'aliments du bétail est la protection d'une partie de la technique par un brevet.

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

Parmi les nombreuses synthèses sur les moyens de réduire la production de méthane entérique, on peut citer les plus récentes :

- Beauchemin K.A., McAllister T.A., McGinn S.M., 2009. Dietary mitigation of enteric methane from cattle. CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources. 4 (No. 035). CABI, Wallingford, Royaume-Uni, 1-18.
- Martin C., Morgavi D.P., Doreau M., 2010. Methane mitigation in ruminants: from microbe to the farm scale. *Animal*, 4, 351-365.
- Grainger C., Beauchemin K.A., 2011. Can enteric methane emissions from ruminants be lowered without lowering their production? *Anim. Feed Sci. Technol.*, 166-167, 308-320.
- Doreau M., Martin C., Eugène M., Popova M., Morgavi D.P., 2011. Leviers d'action pour réduire la production de méthane entérique par les ruminants. *INRA Prod. Anim.*, 24, 461-474.
- Hristov A.N., Oh J., Lee C., Meinen R., Montes F., Ott T., Firkins J., Rotz A., Dell C., Adesogan A., Yang W., Tricarico J., Kebreab E., Waghorn G., Dijkstra J., Oosting S. 2013. Mitigation of greenhouse gas emissions in livestock production – A review of technical options for non-CO<sub>2</sub> emissions. Edited by P. J. Gerber, B. Henderson and H. P.S. Makkar. FAO Animal Production and Health Paper No. 177. FAO, Rome, Italy.

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

### 3.1. Lipides

Les lipides, quels qu'ils soient, sont digérés dans l'intestin et ne sont pas producteurs de méthane dans le rumen, contrairement aux glucides auxquels ils se substituent dans la ration. En outre, certaines sources de lipides (insaturés entre autres) modifient l'écosystème microbien dans un sens allant vers une diminution des émissions de méthane (Popova et al., 2011).

Certaines sources de lipides ont en moyenne plus d'effet pour réduire le méthane que d'autres. Dans l'ordre du plus efficace au moins efficace : acides gras à chaîne moyenne, acide linoléique, acide linoléique, acides gras saturés à 16 et 18 carbones et acide oléique. Mais il n'a pas été montré que ces différences moyennes d'efficacité sont statistiquement significatives. L'importance de l'effet est liée aux modifications de l'écosystème microbien sous l'influence des lipides. Celles-ci sont les plus fortes pour les acides gras à chaîne moyenne et linoléique. Pour l'acide oléique, les résultats sont très variables. L'effet dose-réponse est mal connu. Selon un essai réalisé avec de la graine de lin, l'effet serait faible lorsque l'ajout de lipides est inférieur à 2% ; mais cela n'apparaît pas dans une analyse quantitative de la bibliographie (Doreau et al., 2011). Il est à noter que l'effet des lipides semble se maintenir sur le long terme (Grainger et Beauchemin, 2011). Cela a été en particulier vérifié pour l'acide linoléique de la graine de lin après une année de distribution, par Martin et al. (2011).

Une réflexion sur les sources de lipides utilisables pour réduire la production de méthane est présentée en Annexe 1. Elle est fondée sur la nature des acides gras (les insaturés présentant moins de risque pour la santé humaine), la disponibilité probable des produits et le développement de leur culture en France (cas du lin), leur coût actuel, leur mode de distribution (intérêt des produits extrudés pour assurer une bonne tenue de l'aliment), les contraintes technologiques (taux d'incorporation d'huiles dans les concentrés actuellement limité à 2,5% pour assurer une bonne tenue du produit). Nous avons retenu d'une part des graines oléagineuses (lin et colza pour moitié chacun) extrudées, d'autre part des huiles (soja et colza pour moitié chacun) incorporées dans un aliment concentré. En effet, nous avons considéré que la totalité de la sous-action ne pouvait pas être assurée par un apport de lin seul ; le colza a été préféré au tournesol en raison de surfaces cultivées actuellement plus importantes en France, et d'un nombre de références sur l'effet sur la production de méthane plus important pour le colza que pour le tournesol. Le choix du soja et du colza pour les huiles a été fait en raison de leur disponibilité actuelle sur le marché.

L'effet des lipides sur les autres GES est très mal connu. Le faible effet de l'apport de lipides sur la digestibilité des rations, lié à une digestibilité apparente seulement légèrement supérieure à celle de rations non supplémentées en lipides (Doreau et Ferlay, 1994) laisse penser que la matière organique non digestible varie peu, et donc que la production de méthane par les effluents est peu modifiée. De même, l'apport de lipides interférant peu avec la digestion de l'azote, les pertes azotées fécales ou urinaires sont peu modifiées. Une étude sur bovins à viande et une étude sur bovins laitiers viennent de montrer que l'introduction de graine de lin dans les rations n'avait qu'un effet faible sur les autres GES et les autres impacts environnementaux (Nguyen et al., 2012, 2013), mais à notre connaissance il n'y a pas eu d'étude avec d'autres graines oléagineuses. Dans l'état actuel des connaissances, on peut admettre que les lipides insaturés n'ont pas d'effet notable avéré sur les GES autres que le méthane, et sur d'autres impacts environnementaux. Les effets du remplacement de céréales et tourteaux par des sources de lipides sur l'ensemble des GES peuvent être appréciés par une approche en cycle de vie et seront détaillés au paragraphe 5.1.a.

### 3.2. Nitrate

Le nitrate est actuellement le seul additif dont l'effet atténuateur des émissions de méthane ait été démontré *in vivo* dans plusieurs essais, y compris sur le long terme (Van Zijderveld et al., 2011). Le niveau de réduction des émissions obtenu *in vivo* suite à un apport de nitrate est en outre assez similaire d'un essai à l'autre (Annexe 2), ce qui se comprend dans la mesure où l'effet du nitrate est proportionnel à la quantité d'hydrogène produit par les fermentations des glucides. Jusqu'à une date récente, tous les essais publiés provenaient de la même équipe, mais récemment un essai impliquant des chercheurs de différents pays a été réalisé avec des résultats concordants (Hulshof et al., 2012).

L'effet du nitrate sur les autres GES que le méthane entérique n'a pas été étudié pour l'instant. Il pourrait être dû à une modification éventuelle de digestibilité ou de pertes azotées urinaires, et au coût en CO<sub>2</sub> du processus de production. Les conditions d'emploi du nitrate que nous avons retenues (remplacement partiel de l'urée ou d'une fraction de tourteau, voir section 5.2.a) ne devraient pas entraîner de modification des pertes azotées. En l'absence d'études sur le coût en CO<sub>2</sub> du processus de production, et de la substitution partielle entre nitrate et urée, on considèrera que l'apport de nitrate a un effet négligeable sur les autres GES que le méthane entérique.

## 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

### 4.1. Méthode de calcul des facteurs d'émission

Actuellement, l'inventaire national concernant le méthane entérique est réalisé par le CITEPA pour le compte du ministère en charge de l'environnement, avec une méthode "tier 2 améliorée" tenant compte au mieux des spécificités de l'élevage français. Les facteurs d'émission retenus permettant d'évaluer les émissions de GES en France ont été détaillés dans une publication de Vermorel et al. (2008) suite à un rapport commandé par le ministère en charge de l'agriculture. Cette méthode ayant été critiquée par des experts de la CCNUCC<sup>1</sup>, il a été décidé que l'INRA propose une nouvelle méthode, dans le cadre du projet "Mondferent"<sup>2</sup> financé par le ministère en charge de l'Agriculture. Cette nouvelle méthode est définie en cohérence avec les systèmes d'alimentation renouvelés des ruminants, qui seront établis fin 2013. La méthode sera basée sur une relation entre émissions de méthane et matière organique digestible ingérée (Sauvant et al., 2011). Or l'apport de lipides dans les rations en substitution à des glucides ne modifie pas ou accroît légèrement la digestibilité des rations ; l'apport de nitrate en substitution à une autre source d'azote fermentescible ne modifie pas ou très peu la digestibilité des rations. L'effet de ces deux stratégies ne sera donc pas pris en compte dans les inventaires par la méthode proposée. Il sera nécessaire d'intégrer l'effet de ces stratégies de réduction du méthane par un coefficient de correction spécifique. Celui-ci pourrait être lié à la quantité de lipides ingérés ou à la dose de nitrate, et pourrait être proposé fin 2014, en concertation avec le CITEPA.

### 4.2. Méthode de calcul des effectifs

Les effectifs d'animaux sont ceux fournis par Agreste (2010). Les catégories d'animaux (au nombre de 15) diffèrent des catégories de facteurs d'émission décrits par Vermorel et al. (au nombre de 21) car les émissions ont été reliées pour ce dernier calcul au type de système de production, et non à l'âge des animaux. Les catégories y sont différenciées en fonction du système d'élevage, et sont donc différentes des catégories Agreste. Agreste a semblé préférable malgré l'intérêt de Vermorel et al. (2008) qui fournit les facteurs d'émission, parce que 1) l'actualisation des effectifs pour 2010 était difficile, et surtout, 2) il est souhaitable d'être homogène avec l'action "Réduire les apports protéiques dans les rations animales pour limiter les teneurs en azote des effluents et les émissions de N<sub>2</sub>O associées". On a affecté à chaque catégorie Agreste un facteur d'émission choisi d'après les données de Vermorel et al.

Dans nos calculs, les catégories Agreste ont été subdivisées, en fonction de la quantité d'aliment concentré reçue par les animaux. Sont ainsi distingués, les génisses d'élevage et de renouvellement, les jeunes bovins mâles de 1 à 2 ans destinés à l'abattage comme taurillons et comme bœufs, les vaches allaitantes en lactation ou de réforme. Il n'y a pas eu de distinction entre vaches laitières en production ou de réforme, car elles reçoivent des quantités voisines de concentré. Les facteurs d'émission ont été soit identiques pour les sous-catégories, soit différents ; dans ce cas, nous avons recherché une adéquation avec les systèmes de production définis par Vermorel et al. Le calcul des effectifs par sous-catégories a été fait en fonction de différents éléments connus : abattages de jeunes bovins, taux de renouvellement des troupeaux...

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

On peut définir l'atténuation potentielle comme le maximum techniquement envisageable, quel que soit le coût, en supposant donc que le surcoût de l'action ne freine pas son développement, et que l'éleveur est prêt à changer ses habitudes, par exemple en donnant un supplément alimentaire à des animaux qui n'en ont pas besoin pour améliorer leurs performances. L'atténuation est le produit de l'assiette maximale technique (nombre d'animaux concernés pendant une durée d'un an) par un coefficient d'atténuation lié au pourcentage de réduction de la production de méthane par unité de supplément (lipides ou nitrate) apporté ; dans le cas des lipides, ce coefficient dépend du type d'animal qui influe sur la proportion de lipides apportée dans la ration. Des variations de ce coefficient d'atténuation par rapport à la moyenne, sans changement de l'assiette, conduisent au calcul d'une atténuation potentielle haute et d'une atténuation potentielle basse.

---

<sup>1</sup> Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques, en anglais UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*)

<sup>2</sup> Projet INRA animé par M. Eugène, avec la participation de P. Faverdin, M. Lherm et M. Doreau entre autres, et en collaboration étroite avec le CITEPA.

## 5.1. Potentiel d'atténuation et du coût de la sous-action 1 - Lipides insaturés

### 5.1.a. Potentiel d'atténuation unitaire

En raison de la grande diversité des types de bovins présents dans les élevages, et des différences de mode de production (quantité d'aliment concentré distribuée en particulier), on a calculé le potentiel d'atténuation unitaire pour chacune des catégories d'animaux définies par Agreste, parfois subdivisées pour tenir compte de différences importantes de type d'alimentation entre les catégories.

- Inventaire des effets sur les émissions

#### Effets sur les émissions directes

Nous proposons de prendre une efficacité de réduction du méthane moyenne pour l'ensemble des sources de lipides pour deux raisons : d'une part la variabilité des données expérimentales et l'imprécision portant sur des estimations séparées pour chaque source de lipides, d'autre part une plus grande souplesse quant à l'utilisation de différentes sources de lipides en fonction de leur disponibilité sur le marché et de leur coût. Si on utilise les estimations de Grainger et Beauchemin (2011) et Doreau et al. (2011), cette valeur moyenne est de 4% de baisse de méthane par point de lipides ajoutés dans la ration, exprimé en % de la matière sèche. L'apport maximum de lipides insaturés est limité d'une part par le risque de diminution de la digestibilité de la ration en particulier de la fraction cellulosique (et donc des performances des animaux) lié aux modifications de l'écosystème microbien, d'autre part par le risque d'accroissement excessif d'acides gras monoinsaturés *trans* à possible effet délétère sur la valeur nutritionnelle du lait et de la viande. Si on fixe un accroissement raisonnable de 3,5 points de lipides (ration passant par exemple de 1,5 à 5% d'acides gras<sup>3</sup> dans la matière sèche), on peut exclure ces effets négatifs de l'apport de lipides. Cet accroissement entraîne une réduction moyenne de 14% de méthane. Les lipides ne peuvent en pratique être distribués en quantités contrôlées que lorsque les animaux sont à l'étable, ou au pâturage mais rentrent quotidiennement à l'étable (cas des vaches laitières). Lorsque les quantités de concentré distribuées sont faibles, les possibilités d'atteindre 3,5% de lipides supplémentaires sont difficiles ou impossibles à atteindre en pratique. Les mélanges extrudés contiennent environ 25% de lipides, les concentrés enrichis en huiles 4 à 5% de lipides. Le schéma choisi a été de distribuer en premier lieu le mélange à base de graines extrudées à concurrence de 10% de la ration, et de compléter si nécessaire par des concentrés enrichis en huiles. La contrainte est de ne pas dépasser 5% d'acides gras dans la ration.

La conversion de réduction d'émission de méthane en réduction d'émission de CO<sub>2</sub>e a été faite avec un pouvoir de réchauffement global (PRG) de 25 pour le méthane, comparé à 1 pour le CO<sub>2</sub>, ce qui correspond aux valeurs les plus récentes du GIEC (2006) faisant autorité dans la communauté scientifique. Comme les valeurs pour l'inventaire national sont basées réglementairement sur les anciennes valeurs du GIEC (1996) de 21 pour le méthane, comparé à 1 pour le CO<sub>2</sub>, une comparaison des valeurs obtenues avec ces deux valeurs (25 et 21) a été réalisée dans le paragraphe 7a.

#### Effets sur les émissions induites

Les calculs ci-dessus concernent uniquement la variation de méthane entérique. Comme cela a été précisé au paragraphe 3.1, on ne considèrera pas d'impact des stratégies sur les GES produits par les effluents. En revanche, la supplémentation avec des sources lipidiques entraîne une diminution de la part des céréales dans les aliments concentrés, et une modification de la part des tourteaux (en plus ou en moins selon qu'on utilise des huiles ou des graines). On a considéré que les matières premières affectées par la sous-action étaient un mélange correspondant à leur emploi actuel par l'industrie de l'alimentation animale (pour les céréales, 45% blé, 35% maïs, 20% orge, SNIA, 2010 ; pour les tourteaux, colza 45%, soja 40%, tournesol 15%, SNIA, 2007). Les variations de production de GES associées au changement de composition, liées au changement d'utilisation des sols (remplacement des céréales par les sources de lipides, variation de l'apport de tourteaux) peuvent être appréciées par des données d'impact de la production de différents aliments obtenus par analyse de cycle de vie, soit par l'INRA, soit par l'ADEME (qui s'appuie notamment sur le guide Ges'tim pour ce type de données) (Annexe 3). La solution retenue est de prendre les données utilisées dans Dia'terre® lorsqu'elles sont disponibles, les données INRA dans les autres cas. En pratique, on prend les valeurs utilisées dans Dia'terre pour les céréales, les tourteaux et le son<sup>4</sup>, les valeurs INRA pour les graines extrudées et les huiles (Mosnier et al., 2011 ; Nguyen et al., 2012b, 2013, et non publié ;

---

<sup>3</sup> Les lipides recouvrent une série de composés solubles dans différents solvants organiques : phospholipides, triglycérides, pigments... Les acides gras représentent une fraction importante des lipides. Ce sont eux qui réduisent la production de méthane. Pour des fourrages, une teneur de 2,5% de lipides correspond souvent à une teneur de 1,5% d'acides gras. Mais les huiles ou aliments riches en lipides comme les graines oléagineuses sont riches en triglycérides, eux-mêmes contenant 95% d'acides gras. Donc on assimilera les teneurs en lipides ajoutés aux teneurs en acides gras ajoutés.

<sup>4</sup> Pour le son, valeur corrigée dans le référentiel 1.37 par l'administrateur de Dia'terre® en raison d'une erreur dans la valeur publiée dans la version 1.33 (communication personnelle)



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...). Dans l'inventaire national des émissions de GES fait par le CITEPA, les valeurs sont attribuées à la section Agriculture, sous-section Cultures. En fait, il est difficile de traduire les émissions induites par cette action en modifications de l'inventaire national. En effet, nous n'avons pas d'élément permettant de savoir dans quelle mesure les modifications de nature de la ration (remplacement de céréales et de colza par des graines oléagineuses) se feront par des modifications des surfaces cultivées au niveau national ou par des importations. Par ailleurs, les émissions induites sont dues au N<sub>2</sub>O et au CO<sub>2</sub>; or les inventaires nationaux sont calculés réglementairement à partir d'un pouvoir de réchauffement global de 1 et 310 respectivement pour le CO<sub>2</sub> et le N<sub>2</sub>O (GIEC 1996) alors que les valeurs actuellement retenues par la communauté scientifique (GIEC 2006) sont de 1 et 298 pour ces deux gaz. Nous avons retenu dans nos calculs ces dernières valeurs. Un calcul complémentaire à partir des valeurs prises pour l'inventaire ne peut être fait car les données INRA et Dia'terre® utilisées pour le calcul des émissions induites ont été calculées avec les coefficients de 2006 et ne peuvent être recalculées avec les coefficients de 1996.

#### • Quantification de l'atténuation

Le calcul de l'apport de sources de lipides est réalisé pour chaque catégorie d'animaux, indépendamment de la nature de la ration (type de fourrage ou de concentré) :

- Evaluer la quantité de matière sèche moyenne ingérée (INRA, 2007) et la quantité d'acides gras ingérée par jour (hypothèse : 1,5% d'AG dans une ration classique, évaluation d'après Doreau et al., 2011) ;
- Evaluer la quantité de concentré ingérée par jour (Observatoire des Vaches Laitières, Institut de l'Elevage, pour les vaches laitières ; à dire d'experts (les auteurs du rapport) pour les autres catégories d'animaux) ;
- Si elle est inférieure à 1 kg, pas de supplément lipidique ; si elle est supérieure, apporter le mélange extrudé à raison de 10% de la ration maximum, et en quantité non supérieure à la quantité moyenne de concentré ingérée par jour ;
- Si avec ce supplément la teneur en acides gras de la ration est inférieure à 5%, substituer au concentré classique un concentré enrichi en huiles jusqu'à atteindre une valeur de 5% d'acides gras dans la ration ;
- Avec la formulation établie pour l'aliment concentré, calculer la variation de quantités de céréales et de tourteaux ;
- Calculer le supplément d'acides gras par rapport à la ration classique, et compter l'atténuation de méthane sur la base de 4% d'atténuation (valeur moyenne) pour 1% de lipides ajoutés. La limite basse et la limite haute sont de 3,2 et 4,8% d'atténuation pour 1% de lipides ajoutés ;
- Convertir le méthane économisé en CO<sub>2</sub>e sur la base d'un pouvoir de réchauffement global de 25.

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

Les émissions de méthane et de CO<sub>2</sub> chiffres par catégorie d'animaux figurent dans l'Annexe 4 :

- Pourcentage d'atténuation, lié à l'apport de lipides (de 12 à 15% pour la majorité des catégories, en fonction du niveau de distribution de lipides comme précisé ci-dessus) ;
- Atténuation moyenne d'émissions de méthane et de CO<sub>2</sub>e. Les valeurs sont par exemple de 401 kgCO<sub>2</sub>e/an pour une vache laitière, entre 240 et 320 kgCO<sub>2</sub>e/an pour les vaches allaitantes et les jeunes bovins de 1 à 2 ans, et inférieures à 240 kgCO<sub>2</sub>e/an pour les autres catégories ;
- Atténuations d'émission de CO<sub>2</sub>e aux limites basse et haute (mini et maxi) définies ci-dessus.

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

#### • Situation actuelle

Actuellement, comme précisé dans la section 1.a, la supplémentation lipidique concerne une faible partie des ruminants forts producteurs (vaches laitières fortes productrices et taurillons essentiellement). Cette proportion est estimée à moins de 5%. Dans l'avenir, sans incitation, l'évolution pourrait être faible du fait du surcoût engendré par ces produits. La suppression des quotas laitiers pourrait conduire certains éleveurs à accroître la productivité animale ; inversement d'autres éleveurs seront conduits à désintensifier leur production pour réduire les intrants. L'obtention d'un "projet domestique" relatif à l'utilisation de graine de lin extrudée pourrait accroître son utilisation à l'avenir, dans le cadre de contractualisation entre éleveurs et industriels laitiers ou de la viande.

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

Dans les conditions proposées, les sources de lipides peuvent être distribuées aux animaux sans danger pour leur santé et sans diminutions de leurs performances, sans atteinte négative sur la qualité des produits. Elle nécessitera toutefois une



formation particulière pour les éleveurs, qui devront changer de méthode de distribution des aliments concentrés. Cette formation pourra être assurée par les firmes d'alimentation animale, comme c'est déjà le cas actuellement.

- Assiette maximale technique (AMT)

Pour chaque catégorie d'animaux, l'assiette maximale technique a été calculée à partir de l'effectif total, en soustrayant un pourcentage de l'année correspondant aux périodes pendant lesquelles les animaux ne reçoivent pas de concentré, ou en reçoivent des quantités inférieures à 1 kg/jour (tarissement pour les vaches laitières, 4 mois de l'année pour 60% des vaches allaitantes avant réforme...). Ces chiffres ont été établis à dire d'experts (les signataires de ce rapport). L'AMT est donc exprimée en équivalents animaux.

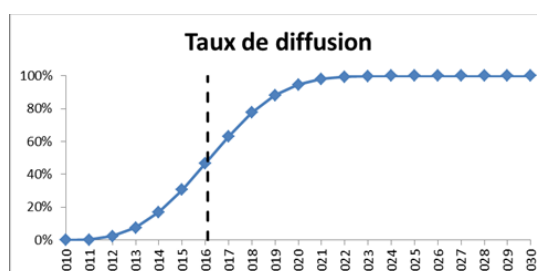
L'effectif total et l'AMT pour chaque catégorie d'animaux figurent dans l'Annexe 4. Pour l'ensemble du troupeau français, l'AMT est de **6 595 038** équivalents animaux, pour un effectif total de **18 716 055** animaux.

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

On peut considérer que l'apport de lipides insaturés est applicable dès maintenant (il est déjà pratiqué de manière marginale), et que l'objectif de 100% de l'assiette maximale technique peut être atteint dès 2022, avec un accroissement suivant une courbe sigmoïde, avec un point d'inflexion situé en 2016. En effet, l'utilisation de lipides insaturés dans la ration, sous forme extrudée ou incorporés dans des aliments concentrés, est opérationnelle dès maintenant au plan technique, et il n'existe pas de frein à leur emploi. L'objectif de 100% de l'assiette en **2022** semble à l'heure actuelle réaliste car il n'y a pas de segment de marché du lait ou de la viande qui interdise l'emploi des sources de lipides préconisées. On ne peut toutefois pas préjuger des évolutions sociétales futures pouvant conduire à limiter l'utilisation des lipides dans l'alimentation animale. Si une des sources lipidiques (colza, soja ou lin) devient d'accessibilité limitée pour une raison quelconque, il sera possible de reporter l'application de l'action sur une des autres sources (voir section 7.a).

Le scénario d'évolution peut être représenté d'après la courbe ci-dessous:

Figure 2. Cinétique de diffusion



### 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)

Le potentiel d'atténuation sans les émissions induites correspondant à l'AMT (PA-AMT) est calculé à partir du potentiel d'atténuation unitaire (PAU) et de l'AMT pour chaque catégorie d'animaux (i) :

$$PA-AMT = \sum_i PAU_i \times AMT_i$$

Les émissions induites (EI-AMT) liées aux changements de nature des aliments de la ration (substitution entre sources lipidiques, céréales et tourteaux) sont calculées à partir de l'émission induite unitaire (EIU) positive ou négative calculée à partir des coûts CO<sub>2</sub>e de chaque aliment et des variations de quantités apportés de chaque aliments, et de l'AMT pour chaque catégorie d'animaux (i) :

$$EI-AMT = \sum_i EIU_i \times AMT_i$$

Les calculs donnent les résultats suivants :

Le potentiel d'atténuation moyen annuel sans les émissions induites correspondant à l'AMT est de **1 892 978**MgCO<sub>2</sub>e (limites basse et haute **1 515 383**et **2 271 574** MgCO<sub>2</sub>e).

Les émissions induites liées au changement de nature des aliments de la ration sont de **863 210** MgCO<sub>2</sub>e (donc augmentation d'émission).

Le potentiel d'atténuation moyen annuel avec les émissions induites correspondant à l'AMT est de **1 029 768** MgCO<sub>2</sub>e (limites basse et haute **651 173**et **1 408 364** MgCO<sub>2</sub>e).

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

Le potentiel d'atténuation moyen cumulé sans émissions induites est de **26 973 366** MgCO<sub>2e</sub> (limites basse et haute **21 578 693** et **32 368 039** MgCO<sub>2e</sub>)

Le potentiel d'atténuation moyen cumulé avec émissions induites est de **14 673 340** MgCO<sub>2e</sub> (limites basse et haute **9 278 667** et **20 068 013** MgCO<sub>2e</sub>)

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

- **Inventaire des modifications induites par la sous-action**

Les substitutions d'aliments ont entraîné des modifications de coût.

- **Estimations des coûts/bénéfices**

Les coûts des matières premières ont été établis selon les données d'Agreste (2010) sauf pour les huiles (pas de données dans Agreste) pour lesquelles le coût a été donné par Valorex (communication personnelle). Le coût des mélanges extrudés a été calculé à dire d'experts (auteurs du présent rapport) en considérant une perte de 2% de matière première à l'extrusion, un coût d'extrusion de 70 €/t et un coût de transport de l'usine d'extrusion à l'usine de fabrication d'aliments de 15 €/t.

Le coût correspondant au potentiel annuel d'atténuation de l'AMT est de **505,9** M €

Le coût cumulé de l'atténuation entre 2010 et 2030 est de **7209,2** M €

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

On considère que pour l'apport de lipides, comme pour tout autre aliment ou additif modifiant la ration, le développement de la technique et la formation des éleveurs sont assurés par les firmes d'alimentation du bétail, qui jouent un rôle de conseil en élevage. En conséquence, il n'y a pas de coût de transaction public ou privé.

- **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 par animal dépend de la catégorie. Il est reporté dans l'Annexe 4 ; il atteint 109 € pour les vaches laitières, et est compris entre 47 et 78 € pour les autres animaux de plus de 12 mois ; il est bien sûr lié à la quantité de lipides apportée.

Le coût correspondant au potentiel annuel d'atténuation de l'AMT est de **505,9** M€.

Le coût cumulé de l'atténuation entre 2010 et 2030 est de **7209,2** M€.

### **5.1.e. Synthèse : récapitulatif de l'atténuation escomptée, du coût, et du coût de la tonne de CO<sub>2e</sub> évité**

L'assiette maximale technique (AMT) définie par catégorie d'animaux est précisée dans l'Annexe 4 et expliquée dans la section 5.1.b. Elle a été calculée en multipliant l'effectif Agreste pour chaque catégorie par un coefficient dépendant de la proportion de temps pendant lequel les animaux reçoivent une quantité d'aliment concentré suffisante pour qu'il soit possible de distribuer des quantités significatives de suppléments lipidiques.

L'atténuation unitaire définie par catégorie d'animaux est précisée dans l'Annexe 4 et la section 5.1.a. Le pourcentage d'atténuation des émissions varie de 7,2 à 15,6 en fonction du type d'animal, en raison de différences importantes dans les quantités d'aliment concentré consommées, et donc des possibilités d'inclusion de suppléments lipidiques.

L'atténuation annuelle sans émissions induites (valeur moyenne) pour l'AMT est de **1 892 978** MgCO<sub>2e</sub>. Les émissions induites liées au changement de nature des aliments de la ration sont de **863 210** MgCO<sub>2e</sub> (donc augmentation d'émission). L'atténuation annuelle avec émissions induites (valeur moyenne) pour l'AMT est de **1 029 768** MgCO<sub>2e</sub> (section 5.1.c).

Il est prévu d'atteindre 100% de l'AMT en 2022, en raison de l'absence de contraintes liées à la sous-action, et à l'acceptation probablement rapide par les éleveurs.

L'atténuation sans émissions induites escomptée entre 2010 et 2030 est de **26 973 366** MgCO<sub>2e</sub>. L'atténuation avec émissions induites escomptée entre 2010 et 2030 est de **14 673 340** MgCO<sub>2e</sub> (section 5.1.c). L'atténuation sans émissions induites est due à la réduction d'émissions sur la ferme (calculée par une méthode à proposer au CITEPA, suite au projet collaboratif "Mondferent" mentionné section 4.1). Le poste concerné de l'inventaire est le poste "fermentation entérique" de

la section Agriculture, sous-section Elevage. Les émissions induites, représentant **12 300 026** MgCO<sub>2e</sub> d'émissions supplémentaires, devraient être ajoutées à l'inventaire de la section Agriculture, sous-section Cultures si on suppose que les modifications des aliments constituant la ration des bovins ne se répercutent que sur les aliments produits en France. En fait, les modifications de consommation de tourteau de soja ne sont pas à répercuter sur l'inventaire français, et pour les autres aliments il n'est pas possible de savoir dans quelle mesure les changements proviendront de modifications de production au niveau français ou d'importations. Il n'est pas possible de distinguer dans ce chiffre la part du N<sub>2</sub>O et la part du CO<sub>2</sub> car les valeurs utilisées dans Dia'terre® ne le précisent pas.

Le coût annuel (valeur moyenne) pour l'AMT est de **505,9 M€** (section 5.1.d).

Le coût cumulé (valeur moyenne) entre 2010 et 2030 est de **7209,2 M€** (section 5.2.d).

Le coût par MgCO<sub>2e</sub> économisé est de **267,3 €** pour l'atténuation sans émissions induites, et de **491,3 €** pour l'atténuation avec émissions induites.

## 5.2. Potentiel d'atténuation et du coût de la sous-action 2 - Nitrate

### 5.2.a. Potentiel d'atténuation unitaire

Comme cela a été décrit dans la section 5.1.a., le potentiel d'atténuation unitaire a été calculé d'abord pour chaque catégorie de bovins. Mais comme l'utilisation de nitrate est circonscrite aux animaux recevant des rations à base d'ensilage de maïs, les seules catégories de bovins retenues sont les vaches laitières et les taurillons en finition (qui constituent un sous-ensemble de la catégorie jeunes bovins de 1 à 2 ans).

#### ● Inventaire des effets sur les émissions

Les différents essais réalisés ont montré qu'une dose de 2,2 à 2,6% de nitrate ajoutés à la ration (équivalents NO<sub>3</sub> sur la base de la matière sèche totale ingérée) entraînait une baisse de production de méthane de 16 à 31% (voir Annexe 2). En raison du risque de surdosage sur la santé de l'animal, nous préconisons pour le calcul d'atténuation moyenne et minimale un apport de nitrate égal à 1% de la ration (le maximum recommandable afin d'éliminer le risque est à notre avis de 1,5%), et seulement pour des animaux recevant des régimes carencés en azote fermentescible, essentiellement à base d'ensilage de maïs. La diminution de méthane attendue est de 10%, car la linéarité de la réponse est probable (on peut évaluer des limites basse et haute de la diminution de méthane à 8 et 12%). On a considéré que l'apport se ferait sous forme de nitrates de calcium et d'ammonium (nom commercial Calcinit®, comprenant 63% de nitrate), source utilisée comme fertilisant et employée majoritairement jusqu'ici dans les expérimentations sur ruminants, bien qu'on puisse penser qu'à l'avenir d'autres sources (nitrate de potassium déjà à l'étude, ammonitrate) puissent être utilisées.

Afin d'éviter un accroissement de l'azote fermentescible des rations, conduisant à une augmentation de l'excrétion azotée urinaire, l'apport de nitrate se substituera à un autre apport d'azote fermentescible de la ration. Il s'agit essentiellement de tourteau, excédentaire en azote fermentescible, de manière moins fréquente d'urée. Comme il nous est impossible de calculer la réduction d'apport de tourteau (le bilan de l'azote fermentescible dans le rumen étant très dépendant de la nature des aliments de la ration), nous ferons l'hypothèse d'une substitution entre nitrate et urée sur la base de leur valeur PDIN<sup>5</sup> (INRA, 2007). La valeur PDIN du kg d'urée est de 1472 g ; nous avons évalué celle du Calcinit® à 589 g par kg de matière sèche ou 489 g par kg brut, sur la base du nombre d'atomes d'azote qui seront intégrés dans des molécules d'ammoniac.

La conversion de l'atténuation du méthane en CO<sub>2e</sub> a été réalisée, comme pour la sous-action "Lipides insaturés", en considérant un pouvoir de réchauffement global du méthane égal à 25. Le coût CO<sub>2</sub> de la fabrication du nitrate sera considéré comme négligeable par rapport au coût CO<sub>2</sub> de l'alimentation, en particulier parce que le nitrate se substitue à une partie de l'urée de la ration, donc à une autre production industrielle d'additif, dont le coût CO<sub>2</sub> peut être considéré comme proche.

#### ● Quantification de l'atténuation

Le calcul des quantités de nitrate à distribuer et de l'atténuation est réalisé pour chaque catégorie d'animaux de la manière suivante :

- Distribuer du nitrate (équivalent NO<sub>3</sub>) à raison de 1% de la ration (limites basse et haute fixées à 1 et 1,5%) ;
- Estimer l'atténuation des émissions à 10% de l'émission de méthane (limites basse et haute évaluées à 8 et 12%) ;
- Convertir le méthane économisé en CO<sub>2e</sub> sur la base d'un pouvoir de réchauffement global de 25.

---

<sup>5</sup> PDIN : protéines digestibles dans l'intestin, lorsque la synthèse de protéines microbienne est limitée par l'apport d'azote fermentescible dans le rumen (système d'évaluation de la valeur azotée des aliments pour ruminants, INRA, 2007)

Les résultats fournis sont la moyenne, la limite basse correspondant à 1% de nitrate et 8% d'atténuation et la limite haute correspondant à 1,5% de nitrate et 12% d'atténuation. En conséquence, la limite basse du coût sera égale au coût moyen.

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

Une distribution de 1% de nitrate dans la ration correspond à 1,58% de Calcinit®. Elle correspond à une diminution de 0,53% d'urée. L'atténuation est considérée comme constante quelle que soit la ration de l'animal.

Par animal et par an, le potentiel d'atténuation exprimé en kg de CO<sub>2</sub> est de :

- 289 kgCO<sub>2</sub>e/an en moyenne pour une vache laitière (limites basse et haute de 232 et 521 kgCO<sub>2</sub>e/an) ;
- 203 kgCO<sub>2</sub>e/an en moyenne pour un jeune bovin issu du troupeau laitier ou du troupeau allaitant (limites basse et haute de 162 et 365 kgCO<sub>2</sub>e/an).

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

- **Situation actuelle**

Actuellement, il n'y a pas de nitrate commercialisé pour l'alimentation animale.

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

En raison du risque potentiel pour la santé de l'animal, il faut éviter une distribution trop élevée aux animaux, ou une mise à disposition en libre-service. Il semble indispensable que la distribution soit sous le contrôle des firmes d'alimentation du bétail, et que le produit soit inclus dans un aliment concentré et non vendu en l'état.

En raison de l'apport d'azote fermentescible par le nitrate, il est impératif de restreindre l'assiette aux animaux recevant habituellement (ou qui devraient recevoir) un supplément d'azote fermentescible sous forme d'urée, ou des quantités de tourteau permettant de combler le déficit d'azote fermentescible, soit une partie des vaches laitières et des jeunes bovins en finition du troupeau laitier ou du troupeau allaitant.

- **Assiette maximale technique (AMT)**

Pour les vaches laitières, l'assiette est calculée avec les étapes suivantes :

- Effectif de la catégorie selon Agreste ;
- On défalque 2/12<sup>e</sup> pour tenir compte de 2 mois de tarissement pendant lesquels les vaches ne reçoivent pas de concentré ;
- On prend uniquement la proportion d'animaux dans les élevages où l'ensilage de maïs représente plus de 15% de la surface fourragère principale (Institut de l'Élevage, 2012).

Pour les jeunes bovins (taurillons), l'assiette est calculée avec les étapes suivantes :

- Effectif des catégories "Mâles 1-2 ans" des troupeaux laitier et allaitant selon Agreste ;
- On considère qu'entre 1 et 2 ans on a 50% de jeunes bovins en finition (retenus pour la sous-action) et 50% de bœufs (non retenus). Les jeunes bovins sont 2 fois plus nombreux que les bœufs, mais ne restent que 6 mois.
- On considère que 80% des jeunes bovins en finition sont engraisés avec de l'ensilage de maïs.

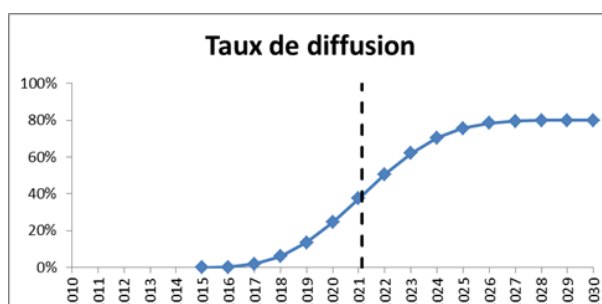
L'assiette maximale technique est de 2 990 000 vaches laitières, 200 000 taurillons du troupeau laitier et 279 000 taurillons du troupeau allaitant, soit un total de 3 469 000 bovins.

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

On peut considérer que l'apport de nitrate sera applicable dans 5 ans au plus tôt. Cet objectif pourra être atteint avec la contribution de firmes d'aliments, car il nécessite la mise en œuvre et l'application sur le terrain d'une technologie nouvelle. Une synthèse sur les conditions d'utilisation de nitrate dans l'alimentation des ruminants a été publiée en 2008 (Leng, 2008). Il est très probable que l'assiette maximale technique ne sera jamais atteinte en totalité. Nous avons retenu une couverture de l'assiette de 80% en 2030 (et un point d'inflexion de la sigmoïde en 2022), en raison du refus définitif probable de nombre d'agriculteurs d'utiliser une technique apparaissant comme industrielle, qui plus est lorsqu'il s'agit de nitrate, mot à connotation négative. Certes les firmes d'alimentation du bétail choisiront un nom commercial plus avenant, mais cela pourrait ne pas suffire. En outre, les produits issus de l'agriculture biologique et certaines AOP, dont l'importance va en croissant, ce qui est une tendance lourde, ou certains produits à label n'accepteront pas cette technique. Enfin, il n'est pas exclu que des accidents répétés en exploitation agricole liés à une mauvaise application du procédé conduisent à la limitation de son usage, voire à son interdiction. Nous ne retenons toutefois pas cette hypothèse dans le calcul.

Le scénario d'évolution peut être représenté d'après la courbe de la Figure 3.

Figure 3. Cinétique de diffusion



### 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 (et, s'il est différent de l'AMT, le % de l'AMT atteint en 2030)

Le potentiel d'atténuation correspondant à l'AMT (PA-AMT) est calculé à partir du potentiel d'atténuation unitaire (PAU) et de l'AMT pour chaque catégorie d'animaux (i):

$$PA-AMT = \sum_i PAU_i \times AMT_i$$

Le potentiel d'atténuation moyen annuel correspondant à l'AMT est de **601 690** MgCO<sub>2e</sub> (limites basse et haute : **481 352** et **1 083 041** MgCO<sub>2e</sub>).

En 2030, si 80% de l'AMT sont atteints, le potentiel d'atténuation moyen sera de **481 352** MgCO<sub>2e</sub> (limites basse et haute : **385 061** et **866 387** MgCO<sub>2e</sub>).

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

Le potentiel d'atténuation moyen cumulé est de **4 452 106** MgCO<sub>2e</sub> (limites basse et haute : **3 561 685** et **8 013 790** MgCO<sub>2e</sub>).

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

- Inventaire des modifications induites par la sous-action

Le coût du nitrate est difficile à évaluer car il n'est pas encore commercialisé pour une introduction dans la ration des animaux. Le produit commercialisé sous le nom de Calcinit® est importé de Chine, se trouve à des prix variant entre 230 et 2050 €/t pour des livraisons de 20 à 25 t (site [www.alibaba.com](http://www.alibaba.com)), sans qu'il soit possible d'avoir des précisions sur la qualité du produit. Un produit certifié a été récemment acheté par l'INRA en petite quantité à 1160 €/t. Nous avons retenu le prix de 500 €/t.

Il faut ensuite évaluer la quantité d'urée économisée sur la base de l'apport d'azote fermentescible exprimée en g PDIN. Le coût de l'urée a été pris à 860 €/t.

Les coûts calculés sont les coûts de l'apport de nitrate sous forme de Calcinit® moins les coûts évités d'urée.

- Estimations des coûts/bénéfices

Le coût correspondant au potentiel annuel d'atténuation de l'AMT est de **23,0** M€ (limites basse et haute : **23,0** et **34,5** M€).

Le coût correspondant à l'atténuation en 2030 (80% de l'AMT) est de **18,4** M€ (limites basse et haute : **18,4** et **27,6** M€).

Le coût cumulé de l'atténuation entre 2010 et 2030 est de **170,1** M€ (limites basse et haute : **170,1** et **255,1** M€).

- Autres coûts (coûts de transaction privés, publics)

On considère que pour l'apport de nitrate, comme pour tout aliment ou additif modifiant la ration, le développement de la technique et la formation des éleveurs sont assurés par les firmes d'alimentation du bétail, qui jouent un rôle de conseil en

élevage. Cette formation portera en particulier sur les risques relatifs à un surdosage des produits dans l'alimentation, et sur les économies possibles de tourteau ou d'urée. En conséquence, il n'y a pas de coût de transaction public ou privé.

- **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 annuel de la sous-action, par animal, est de 11,6 € pour une vache laitière, 6,8 € pour un jeune bovin du troupeau laitier et 5,7 € pour un jeune bovin du troupeau allaitant.

Le coût correspondant au potentiel annuel d'atténuation de l'AMT est de **23,0 M€** (limites basse et haute : **23,0** et **34,5 M€**).

Le coût correspondant à l'atténuation en 2030 (80% de l'AMT) est de **18,4 M€** (limites basse et haute : **18,4** et **27,6 M€**).

Le coût cumulé de l'atténuation entre 2010 et 2030 est de **170,1 M€** (limites basse et haute : **170,1** et **255,1 M€**).

### **5.2.e. Synthèse : récapitulatif de l'atténuation escomptée, du coût, et du coût de la tonne de CO<sub>2</sub>e évité**

L'atténuation unitaire (valeur moyenne) est de 289 kgCO<sub>2</sub>e/an pour une vache laitière et 203 kgCO<sub>2</sub>e/an pour un jeune bovin issu du troupeau laitier ou du troupeau allaitant (section 5.2.a).

L'assiette maximale technique (AMT) est de 1 810 600 vaches laitières, 160 000 taurillons du troupeau laitier et 223 300 taurillons du troupeau allaitant, soit un total de 2 193 900 bovins (section 5.2.b).

L'atténuation annuelle (valeur moyenne) pour l'AMT est de **601 690 MgCO<sub>2</sub>e** (section 5.2.c).

Il est prévu d'atteindre 80% de l'AMT en 2030, non pas en raison d'une diffusion lente mais en raison d'une non-admissibilité de la technique dans certains cahiers des charges (agriculture biologique...).

L'atténuation annuelle (valeur moyenne) pour l'AMT en 2030 est de **481 352 MgCO<sub>2</sub>e** (section 5.2.c).

L'atténuation escomptée entre 2010 et 2030 est de **4 452 106 MgCO<sub>2</sub>e** (section 5.2.c). Elle est entièrement due à la réduction d'émissions sur la ferme (calculée par une méthode à proposer au CITEPA). Le poste concerné de l'inventaire est exclusivement le poste "fermentation entérique" de la section Agriculture, sous-section Elevage.

Le coût annuel (valeur moyenne) pour l'AMT est de **23,0 M€** (section 5.2.d), ce qui représente **18,4 M€** pour un maximum atteint de 80% de l'AMT.

Le coût cumulé (valeur moyenne) entre 2010 et 2030 est de **170,1 M€** (section 5.2d).

Le coût par MgCO<sub>2</sub>e économisé est de **38,2 €**

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

Le potentiel d'atténuation sans les émissions induites pour l'ensemble de l'action est de **2 374 304 MgCO<sub>2</sub>e/an** pour la réalisation maximale de l'AMT (100% pour les lipides insaturés et 80% pour le nitrate) et de **31 425 472 MgCO<sub>2</sub>e** pour l'ensemble de la période 2010-2030.

Le potentiel d'atténuation avec les émissions induites pour l'ensemble de l'action est de **1 511 094 MgCO<sub>2</sub>e/an** pour la réalisation maximale de l'AMT (100% pour les lipides insaturés et 80% pour le nitrate) et de **19 125 446 MgCO<sub>2</sub>e** pour l'ensemble de la période 2010-2030.

Le coût par MgCO<sub>2</sub>e économisé est de **220,8 €** sans les émissions induites et de **347,0 €** avec les émissions induites.

Le coût de l'ensemble de l'action est de **524,3 M€/an** pour la réalisation maximale de l'AMT (100% pour les lipides insaturés et 80% pour le nitrate) et de **7379,3 M€** pour l'ensemble de la période 2010-2030.



## 7. Discussion

### 7.a. Sensibilité des résultats

Plusieurs analyses de sensibilité différentes ont été réalisées. Elles concernent la valeur du pouvoir de réchauffement global du méthane, la méthode de calcul des émissions induites, la nature des graines oléagineuses apportées et des tourteaux auxquels elles se substituent et le coût des matières premières. Le niveau d'atténuation des émissions directes par suite de l'apport de lipides n'a pas fait l'objet d'analyse de sensibilité. En effet, malgré une forte variabilité entre expérimentations dans la réponse des émissions de méthane à l'apport lipidique, il a été considéré qu'une variabilité similaire pourrait être observée sur le terrain, qui serait reflétée par la réponse moyenne utilisée ci-dessus.

#### Pouvoir de réchauffement global du méthane – sous-actions "Lipides insaturés" et "Nitrate"

Cette analyse a comparé la valeur la plus récente (25 selon le GIEC 2006) prise dans le calcul de référence de cette fiche avec la valeur plus ancienne (21 selon le GIEC 1996) prise réglementairement dans le calcul des inventaires (voir section 5.1.a).

**Tableau 1. Atténuation et coût des sous-actions calculés en fonction de deux valeurs de PRG**

	Atténuation des émissions directes* (MgCO <sub>2</sub> e/an)	Atténuation des émissions incluant les émissions induites* (MgCO <sub>2</sub> e/an)	Coût MgCO <sub>2</sub> e net économisé (€)
<b>Référence (PRG = 25)</b>			
Lipides insaturés	1 892 978	1 029 768	491,3
Nitrate	481 352	481 326	38,2
Total	2 374 304	1 511 094	347,0
<b>PRG = 21</b>			
Lipides insaturés	1 590 102	726 892	696,0
Nitrate	404 335	404 335	45,5
Total	1 994 437	1 131 227	434,0

\* En considérant 80% de l'AMT pour la sous-action Nitrate.

L'atténuation directe est plus faible avec un PRG de 21 (d'un rapport 21/25), mais la différence entre les deux modes de calcul est nettement plus marquée lorsqu'on considère l'atténuation incluant les émissions induites car ces dernières n'ont pas été modifiées (voir section 5.1.a). En conséquence, le coût du Mg de CO<sub>2</sub>e économisé (incluant les émissions induites) est fortement accru lorsqu'on considère un PRG de 21 pour le CH<sub>4</sub>. On peut toutefois tabler sur le fait que le PRG du méthane à considérer pour les inventaires nationaux sera réactualisé avant 2030.

#### Mode de calcul des émissions induites – sous-action "Lipides insaturés"

Par souci de cohérence avec les autres actions de l'étude, nous avons utilisé dans les calculs ci-dessus les valeurs d'émission par kg d'aliment utilisées par Dia'terre®, considérées comme la source principale des données agricoles de l'étude, et l'INRA lorsqu'il n'y avait pas de valeur dans Dia'terre®. Mais par souci de cohérence interne à l'action, nous avons fait le calcul avec uniquement les valeurs INRA, provenant de données publiées à partir de travaux utilisant la méthodologie de l'INRA-UMRSAS (Rennes), en particulier celles publiées par Nguyen et al. (2012b) et Mosnier et al. (2011). En effet, les valeurs d'émission pour les céréales sont nettement plus faibles selon l'INRA que selon les données présentées dans Dia'terre®, ce qui crée un biais.

**Tableau 2. Atténuation et coût de l'action, calculés en fonction de deux sources de références pour les émissions induites**

	Atténuation des émissions induites (MgCO <sub>2</sub> e/an)	Atténuation des émissions incluant les émissions induites (MgCO <sub>2</sub> e/an)	Coût MgCO <sub>2</sub> e net économisé (€)
<b>Référence (calculs Dia'terre® + INRA)</b>	863 210	1 029 768	491
<b>Calculs INRA seul</b>	298 160	1 594 818	317

Rappel : atténuation directe = 1 892 978 MgCO<sub>2</sub>e/an

Les résultats obtenus avec la méthode de calcul présentée dans la section 5 (Dia'terre® + INRA) sont très supérieurs à ceux qui auraient été obtenus en ne prenant que les valeurs INRA. Il y a actuellement des questionnements importants sur l'empreinte carbone de certaines matières premières, comme le tourteau de soja (comment prendre en compte l'effet de la déforestation), et il est possible que les empreintes carbone soient totalement modifiées d'ici quelques années. Il serait par ailleurs intéressant de savoir comment ont été calculées les valeurs Dia'terre®, qui sont issues de Ges'tim (Institut de l'Élevage, 2011), afin d'expliquer la différence avec les valeurs INRA.



### Nature des graines oléagineuses apportées et des tourteaux remplacés – sous-action "Lipides insaturés"

Indépendamment du prix relatif des graines de colza et de lin, différents facteurs peuvent faire varier leur proportion relative. Ainsi, leur disponibilité sur le marché peut être liée à l'utilisation des surfaces pour la culture des oléagineux, à une très forte demande d'une de ces graines pour d'autres usages que l'incorporation dans les aliments pour bovins. Cela ne changera pas l'atténuation par l'action, mais cela changera la substitution entre sources de matières grasses, céréales et tourteaux, donc les émissions induites, ainsi que les coûts de toutes les matières premières, donc les coûts de l'action. Nous avons fait des simulations entraînant respectivement l'utilisation exclusive de graine de colza puis l'utilisation exclusive de graine de lin dans le mélange extrudé, avec les deux modes de calcul des émissions induites (Dia'terre® + INRA ou INRA seul).

**Tableau 3. Atténuation et coût de l'action, calculés en fonction de la nature des graines oléagineuses et des références pour l'induit**

Apport de graines oléagineuses	Atténuation des émissions induites (MgCO <sub>2</sub> e/an)	Atténuation nette (MgCO <sub>2</sub> e/an)	Coût de l'action à 100% AMT (M€/an)	Coût MgCO <sub>2</sub> e net économisé (€)
<b>Calcul Dia'terre® + INRA</b>				
Référence (mélange de graines 50% colza, 50% lin)	- 863 210	1 029 768	505,9	491
100% graine de colza	- 887 338	1 005 641	437,9	435
100% graine de lin	- 839 083	1 053 896	573,9	545
<b>Calcul INRA</b>				
Référence (mélange de graines 50% colza, 50% lin)	- 298 160	1 594 818	505,9	317
100% graine de colza	-322 288	1 570 690	437,9	278
100% graine de lin	-274 032	1 618 946	573,9	355

Rappel : atténuation directe = 1 892 978 MgCO<sub>2</sub>e/an

Comme on pouvait s'y attendre, l'utilisation de la graine de colza est moins onéreuse pour une atténuation similaire. Ce dernier résultat est toutefois à considérer avec précaution puisque les données françaises (Martin et al., 2008) ont montré que le lin peut entraîner une atténuation de l'émission de méthane plus forte que celle qui a été prise dans cette étude ; un autre essai (Martin et al., 2011) a montré qu'à long terme la graine de lin était efficace pour réduire le méthane, mais pas la graine de colza. Enfin, les promoteurs de la graine de lin (filiale Bleu-Blanc-Cœur, Valorex) annoncent des conséquences positives de son emploi sur la production laitière et les performances de reproduction des vaches, mais nous n'en avons pas tenu compte car ce n'est pas attesté par des expérimentations.

Nous avons considéré que la nature des tourteaux consommés en moins suite à l'apport de graines oléagineuses était la même que celle des tourteaux initialement consommés, soit 40% de soja et 60% de tourteaux métropolitains (colza, tournesol). Une autre hypothèse, souhaitable *a priori* mais dont la mise en application est difficile à évaluer et dépendra des rapports de prix de différents tourteaux, consiste à supposer que la diminution de tourteaux affecte uniquement les tourteaux importés, donc le soja. Le calcul a été réalisé avec les deux modes de calcul des émissions induites (Dia'terre® + INRA ou INRA seul).

**Tableau 4. Atténuation et coût de l'action, calculés en fonction du type de tourteaux économisés et des références pour l'induit**

Tourteaux économisés	Atténuation des émissions induites (MgCO <sub>2</sub> e/an)	Atténuation nette (MgCO <sub>2</sub> e/an)	Coût de l'action à 100% AMT (M€/an)	Coût MgCO <sub>2</sub> e net économisé (€)
<b>Calcul Dia'terre® + INRA</b>				
Référence (mélange 40% soja, 45% colza, 15% tournesol)	- 863 210	1 029 768	505,9	491
100% tourteau de soja	- 94 079	1 798 899	406,6	226
<b>Calcul INRA</b>				
Référence (mélange 40% soja, 45% colza, 15% tournesol)	-298 160	1 594 818	505,9	317
100% tourteau de soja	440 338	2 333 316	406,6	174

Rappel : atténuation directe = 1 892 978 MgCO<sub>2</sub>e/an

La nature des tourteaux a un impact extrêmement élevé sur les émissions induites. En effet, l'émission liée au tourteau de soja est 3,5 fois plus élevée que celle liée au tourteau de colza, en raison de la prise en compte, admise par la communauté scientifique, de la déforestation de l'Amazonie, et donc du déstockage du carbone qui s'ensuit, liée à une partie de la production de soja importé par la France. Lorsque le calcul des émissions induites est réalisé par la méthode INRA, celles-ci sont réduites par la mise en place de l'action, et l'atténuation nette incluant les émissions induites est plus élevée que l'atténuation directe. Cela a un effet important sur le coût par Mg de CO<sub>2</sub>e économisé.

## Coût des matières premières – sous-action "Lipides insaturés"

Le prix de l'ensemble des matières premières peut varier très fortement ; l'exemple des dernières années l'a montré. Il y a de très nombreux scénarios, nous en avons sélectionné certains qui nous ont semblé plausibles et de nature à modifier sensiblement les résultats.

Nous avons testé de fortes variations du prix relatif des matières grasses, des céréales et des tourteaux, ainsi que l'effet d'une augmentation globale des prix de toutes les matières premières. Nous avons considéré que ces variations ne modifieraient pas les conditions de développement de l'action. En conséquence, l'atténuation globale n'est pas modifiée.

Tableau 5. Coût de l'action, calculé en fonction du prix des matières premières agricoles

	Coût de l'action à 100% AMT (M€/an)	Coût MgCO <sub>2e</sub> net économisé (€)
Référence (prix 2010)	505,9	491
Accroissement de prix de l'ensemble des sources de lipides de 20%	723,0	702
Accroissement de prix de l'ensemble des céréales de 20%	403,7	392
Accroissement de prix de l'ensemble des tourteaux de 20%	436,7	424
Accroissement de prix de l'ensemble des matières premières de 20%	551,6	536

Un accroissement de 20% du prix des céréales ou des tourteaux réduit le coût de la sous-action. Un accroissement de prix plus élevé est même possible, dans des conditions de spéculation, dans le cas d'utilisation de ces matières premières à d'autres fins (biocarburants) ou en cas de raréfaction (pression sur le soja en raison de la très forte demande liée à l'augmentation de consommation des produits animaux dans les pays émergents ; FAO, 2009). Le prix du colza et du lin pourrait être moins variable que celui des céréales. On remarque toutefois que les variations de prix ont un impact plus faible que l'incertitude sur l'empreinte carbone des matières premières.

## Coût des matières premières – sous-action "Nitrate"

On considère que le coût du kg d'urée variera peu dans l'avenir, car il s'agit d'un additif dont l'usage est établi depuis longtemps. Par contre pour le nitrate, l'hypothèse que nous avons faite est très discutable, dans la mesure où le produit n'est pas encore commercialisé et où le prix des additifs est souvent plus un coût d'opportunité qu'un coût dérivé du coût de production. Nous proposons une fourchette de prix comprise entre 230 € (prix minimum obtenu sur le web) et 860 € (prix de l'urée) par kg de Calcinit®.

Tableau 6. Coût de l'action, calculé en fonction du prix de l'additif utilisé

	Coût de l'action à 80% AMT (M€/an)	Coût MgCO <sub>2e</sub> net économisé (€)
Référence (Calcinit® à 500 €/t)	18,4	38,2
Calcinit® à 860 €/t	60,8	126,4
Calcinit® à 230 €/t	-13,4	-27,9

Un prix faible de la source de nitrate pourrait entraîner un gain financier pour l'éleveur, dans le cas où l'apport d'azote fermentescible dans la ration est moins cher avec le nitrate qu'avec l'urée. Dans le cas où la couverture de l'apport en azote fermentescible est assuré par du tourteau, ce qui est économiquement peu efficace mais très pratiqué, le gain (très difficile à chiffrer) pourrait être encore plus élevé. Mais dans l'hypothèse d'une formule-retard à diffusion lente dans le rumen, le surcoût entraînerait une augmentation de prix.

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

### ● Comptabilisation de l'effet

Tel qu'il est mis en œuvre actuellement (émissions forfaitaires par animal), le mode de calcul "CITEPA" ne permet pas de rendre compte de l'atténuation escomptée par cette action. Une concertation avec le CITEPA permettrait cependant une prise en compte au moins pour les lipides.

### ● Vérifiabilité de la mise en œuvre

Un suivi de la mise en œuvre peut se faire à partir de données fournies par les firmes productrices de suppléments lipidiques ou de nitrate. Toutefois, le contrôle ne sera possible que si ces fabricants différencient les quantités produites pour les ruminants de celles destinées aux monogastriques dans le cas des lipides, et le nitrate en tant qu'engrais et en tant qu'additif pour ruminants.

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

L'ajout de lipides insaturés, coûteux pour l'éleveur, pourrait être favorisé par une reconnaissance par le marché de la qualité spécifique du lait et de la viande produits (rémunération de l'amélioration de la composition en acides gras qui compenserait le surcoût). Une démarche de ce type valorise déjà l'incorporation de graine de lin *via* une allégation "santé" (produits présentant un profil lipidique enrichi en oméga 3, plus conforme aux recommandations nutritionnelles actuelles).

### 7.d. Vulnérabilité et adaptabilité de l'action au changement climatique

*A priori*, la mise en œuvre de cette action ne dépend pas du changement climatique, et le problème de vulnérabilité ne se pose pas pour un changement de composition de la ration.

### 7.e. Interactions entre sous-actions et avec les autres actions

A l'heure actuelle, aucun essai *in vivo* publié n'a combiné l'utilisation de lipides insaturés avec celle de nitrate. A notre connaissance, deux essais sont en cours (Nouvelle Zélande associée au Pays de Galles et INRA Clermont-Theix) mais les résultats seront disponibles dans quelques mois. En l'absence de tels résultats et à la lumière des connaissances sur les mécanismes d'action, on ne peut que faire l'hypothèse d'effets indépendants de ces deux stratégies. Nous proposons donc l'utilisation simultanée des deux stratégies, avec des effets cumulatifs, mais avec des assiettes différentes.

*A priori*, il n'y a pas d'interaction entre cette action et l'Action 8 portant sur les apports protéiques dans l'alimentation animale. Pour la sous-action "Lipides insaturés", la substitution entre matières premières a été calculée de manière à ne pas affecter l'apport protéique global des ruminants. Pour la sous-action "Additifs", l'apport de nitrate a été réalisé en substitution à une autre source d'azote fermentescible de manière à ne pas modifier l'apport protéique global.

Une interaction est possible avec l'Action 1 "Fertilisation des grandes cultures" en raison de la substitution entre matières premières pour lesquelles les réductions de fertilisation en azote minéral peuvent être différentes, mais celle-ci est impossible à calculer car on ne sait pas dans quelle mesure les modifications de composition des rations dans la sous-action "Lipides insaturés" affecteront la répartition des surfaces de grandes cultures en France. Pour sa part, la fertilisation des grandes cultures en azote organique ne sera pas affectée par l'action "méthane entérique" qui ne modifie pas sensiblement les quantités d'azote excrétées.

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

#### Lipides insaturés

L'effet des lipides sur la santé humaine est de mieux en mieux connu. Bien que des méta-analyses portant sur des études épidémiologiques aient montré que la consommation de lait n'avait pas d'effet négatif sur la santé humaine (Givens et al., 2010), il est souhaitable, par précaution, d'éviter l'incorporation dans la ration des ruminants de sources lipidiques entraînant un accroissement du risque cardio-vasculaire, à savoir les acides gras saturés à chaîne moyenne et l'acide palmitique. Bien que l'acide stéarique n'ait certainement pas d'effet délétère, son emploi pourrait être mal accepté au niveau du corps médical et du consommateur. Il en est de même des graisses animales, par ailleurs fortement saturées, même si leur innocuité était prouvée. Les sources d'acides gras insaturés que nous préconisons ne présentent donc pas d'effet négatif pour le consommateur.

Il n'existe pas d'effet connu négatif de l'utilisation de lipides dans la ration sur la santé animale.

#### Nitrate

Les freins à l'utilisation de nitrate pourraient être l'absence d'acceptabilité par l'éleveur ou le consommateur, en raison de la connotation négative du mot "nitrate". Le risque pour la santé de l'animal n'existerait, dans les conditions d'emploi que nous avons décrites, que si l'éleveur ne les respecte pas et dépasse très largement la dose proposée. Ce risque est toutefois réel et peut conduire à la mort de l'animal. En effet, il est établi que le non-respect par l'agriculteur de préconisations techniques est courant. Les causes en sont la négligence ou la non-transmission de consignes (cas du remplacement d'un agriculteur en congés), du désir de maximiser les performances du troupeau en dépassant les normes prescrites (cas peu probable pour le nitrate) ou d'expérimenter de nouvelles pratiques. Un risque particulier est le non-respect d'une période d'adaptation à la distribution de nitrate.

## 8. Conclusions

Ces résultats montrent en premier lieu la possibilité d'une atténuation importante des émissions suite à l'apport de lipides, trois fois plus élevée que celle avec le nitrate en atténuation cumulée, et en second lieu le coût très élevé de cette mesure, en particulier par rapport au nitrate. Toutefois, dans le cas de la sous-action "Lipides", il faut souligner la très grande sensibilité des résultats, d'une part aux variations de coût des matières premières, d'autre part aux émissions induites (empreinte carbone liée à la production de ces matières premières). Ces dernières, dans la plupart des modalités de calcul, compensent en partie les émissions directes. Il est à noter que l'atténuation directe des émissions de méthane est prise en compte dans le sous-secteur Elevage, mais que les atténuations (ou émissions supplémentaires) induites sont imputables au sous-secteur Cultures pour la partie non importée, et à des inventaires de pays étrangers pour les aliments importés (soja brésilien en particulier). La sous-action "Lipides" pourrait se développer rapidement, car des initiatives ont déjà été prises en ce sens par des acteurs industriels de la filière bovine, promouvant l'utilisation de la graine de lin.

Jusqu'à présent, la totalité des expérimentations réalisées avec utilisation de nitrate comme additif alimentaire a été concluante, dans le sens d'une atténuation des émissions de méthane. Ces résultats pourront être validés, ou non, dans un très proche avenir. Si le nitrate, dont l'autorisation de mise sur le marché n'est pas acquise en raison de risques pour l'animal liés à un surdosage, est commercialisé à un prix raisonnable, il pourrait constituer une technique efficace d'atténuation. Jusqu'à présent, les autres pistes d'atténuation du méthane entérique n'ont pas été retenues. Il est possible que dans quelques années un additif ou un mélange d'additifs se révèlent efficaces.

## Références bibliographiques citées

- ADEME, 2011. Guide des valeurs Dia 'terre ©.
- Agreste, 2010. La statistique, l'évaluation et la prospective agricole. Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt.
- CITEPA, 2010. Emissions dans l'air en France. Substances relatives à l'accroissement de l'effet de serre. Synthèse CITEPA, Paris, 24 p.
- Doreau, M., Ferlay A., 1994. Digestion and utilisation of fatty acids by ruminants. *Animal Feed Science and Technology* 45, 379-396.
- Doreau, M., Martin, C., Eugène, M., Popova, M., Morgavi, D.P., 2011. Leviers d'action pour réduire la production de méthane entérique par les ruminants. In : *Gaz à effet de serre en élevage bovin : le méthane*. Doreau M., Baumont R., Perez J.M. (Eds). Dossier, INRA Productions Animales 24, 461-474.
- Givens, D.I. (2010) Milk and meat in our diet: good or bad for health? *Animal* 4, 1941-1952
- Grainger, C., Beauchemin, K.A., 2011. Can enteric methane emissions from ruminants be lowered without lowering their production? *Animal Feed Science and Technology* 166-167, 308-320.
- Hulshof, R. B. A., Berndt, A., Gerrits, W. J. J., Dijkstra, J., Van Zijderveld, S. M., Newbold, J. R., Perdok, H. B. 2012. Dietary nitrate supplementation reduces methane emission in beef cattle fed sugarcane based diets. *Journal of Animal Science* 90, 2317-2323.
- Institut de l'Elevage, 2012. Observatoire de l'alimentation des vaches laitières.
- Leng, R.A., 2008. The potential of feeding nitrate to reduce enteric methane production in ruminants. Report, Commonwealth Government of Australia, Canberra.
- Martin, C., Rouel, J., Jouany, J.P., Doreau, M., Chilliard, Y., 2008. Methane output from dairy cows in response to dietary supplementation of crude linseed, extruded linseed or linseed oil. *Journal of Animal Science* 86, 2642-2650.
- Martin, C., Pomiès, D., Ferlay, A., Rochette, Y., Martin, B., Chilliard, Y., Morgavi, D.P., Doreau, M., 2011. Methane output and rumen microbiota in dairy cows in response to long-term supplementation with linseed or rapeseed of grass silage- or pasture-based diets. *Proceedings of the New Zealand Society for Animal Production* 71, 242-247.
- 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., 2012b. 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., 2012a. Effect of type of ration and allocation methods on the environmental impacts of beef-production systems. *Livest. Sci.*, 145, 239-251.
- Nguyen, T.T.H., Doreau, M., Corson, M.S., Eugène, M., Delaby, L., Chesneau, G., Gallard, Y., van der Werf, H.M.G., 2013. Effect of dairy production system, breed and co-product handling methods on environmental impacts at farm level. *Journal of Environmental Management*, accepté.
- Popova, M., Morgavi, D.P., Doreau, M., Martin, C., 2011. Production de méthane et interactions microbiennes dans le rumen. In : *Gaz à effet de serre en élevage bovin : le méthane*. Doreau M., Baumont R., Perez J.M. (Eds). Dossier, INRA Productions Animales 24, 447-460.
- Sauvant, D., Giger-Reverdin, S., Serment, A., Broudiscou, L., 2011. Influences des régimes et de leur fermentation dans le rumen sur la production de méthane par les ruminants. *INRA Productions Animales* 24, 433-446.
- SNIA 2007, cité par FranceAgrimer.
- SNIA 2010, cité par FranceAgrimer.
- Van Zijderveld, S.M., Gerrits, W.J.J., Dijkstra, J., Newbold, J.R., Hulshof, R.B. A., Perdok, H.B., 2011. Persistency of methane mitigation by dietary nitrate supplementation in dairy cows. *Journal of Dairy Science* 94, 4028-4038.
- Vermorel, M., Jouany, J.P., Eugène, M., Sauvant, D., Noblet, J., Dourmad, J.Y., 2008. Evaluation quantitative des émissions de méthane entérique par les animaux d'élevage en 2007 en France. *INRA Productions Animales* 21, 403-418.

## Annexe 1. Justification de l'emploi de lipides insaturés et des choix techniques réalisés

Annexe rédigée par M. Doreau, avec l'avis de plusieurs chercheurs de l'UMR Herbivores de l'INRA (J. Agabriel et A. Ferlay en particulier), et la contribution de C. Launay (INZO) et P. Weill (Valorex) pour les paragraphes 2 et 3.

### 1. Nature des acides gras et quantité de lipides à utiliser

Toutes les sources de lipides réduisent les émissions de méthane lorsqu'elles se substituent à des glucides dans la ration. Une méta-analyse (Grainger et Beauchemin, 2011) n'a pas permis de mettre en évidence de différence statistique entre sources de lipides, en raison d'une grande variabilité de réponse. Toutefois, la diminution moyenne de méthane est plus élevée pour les acides gras à chaîne moyenne et l'acide linoléique (Doreau et al., 2011). Ceci s'explique par l'effet spécifique de ces acides gras sur certaines populations bactériennes favorisant la production nette d'hydrogène dans le rumen (bactéries cellulolytiques, protozoaires). En moyenne, selon les analyses bibliographiques les plus récentes (Beauchemin et al., 2009 ; Martin et al., 2010 ; Grainger et Beauchemin, 2011 ; Doreau et al., 2011), la production de méthane diminuerait de 4% par point de lipides supplémentaire dans la ration, à mêmes quantités ingérées.

Nous préconisons l'emploi de sources de matières grasses insaturées. En effet, l'ajout de lipides saturés entraîne un léger accroissement de ces lipides dans les produits animaux, ce qui peut contribuer à détériorer la valeur "santé" des produits animaux. Et même si la détérioration de la valeur nutritionnelle du lait ou de la viande est marginale, cela contribue à donner une mauvaise image aux produits. Pour cela, les huiles de coprah et de palmiste, riches en acides gras à 12 et 14 carbones, sont rejetées bien que ces acides gras aient l'effet le plus négatif sur la production de méthane. Il en est de même de l'huile de palme, disponible sous forme de savons de calcium faciles d'emploi. Par ailleurs, l'empreinte GES de l'huile de palme est très élevée : 2800 gCO<sub>2</sub>e/kgMS, contre 2100 et 1500 pour l'huile de colza et l'huile de soja (Nguyen et al., 2012b ; Mosnier et al., 2011).

Il est classiquement admis qu'avec des rations contenant moins de 5% d'AG, le risque de perturbation de la digestibilité (diminution de la digestion des fibres) est faible (Doreau et al., 1987). Par ailleurs, les modifications peu souhaitables de la composition en acides gras du lait (excès d'acides gras *trans*) sont limitées à cette dose de lipides ajoutés. Si on considère que les rations classiques contiennent moins de 2% d'acides gras (la valeur 1,5% a été retenue dans l'étude), on peut envisager une supplémentation de 3,5% d'acides gras dans la ration totale, ce qui correspond à une baisse de production de méthane de 14% en moyenne selon la bibliographie. Le niveau de supplémentation de 3,5% d'acides gras présente l'inconvénient d'un risque d'excès d'acides gras *trans*<sup>6</sup>, en particulier en production de viande, si l'apport de lipides est réalisé uniquement à partir d'acides gras polyinsaturés (lin, soja, tournesol...). En conséquence, il est logique d'associer une source polyinsaturée à une source monoinsaturée comme le colza.

### 2. Contraintes d'utilisation des matières premières

Afin d'enrichir significativement la ration en lipides, on peut envisager différentes sources : huiles, graines oléagineuses crues ou extrudées, lupin, sous-produits d'agrocultures.

L'apport de lipides peut être fait sous forme de suppléments lipidiques seuls : graines extrudées, savons de calcium, drêches de maïs, tourteaux gras ; ou incorporés dans un concentré : huiles essentiellement. Dans le cas d'une vache laitière consommant 20 kg de matière sèche par jour et appelée à recevoir 500 g de supplément lipidique, cela correspond à 1,1 kg de graine de colza extrudée, 1,3 kg de graine de lin extrudée, 2,5 kg de graine de soja extrudée, 5 kg de drêches de maïs ou de lupin. Les drêches de maïs et le lupin contiennent de 25 à 35% de protéines, ce qui fait que dans la majorité des cas, même si ces aliments remplacent le tourteau de soja, la ration pourrait être excédentaire en azote s'ils constituaient la seule source de lipides ajoutés.

Actuellement, les concentrés enrichis en lipides ne comprennent pas plus de 2,5% de lipides ajoutés, pour des raisons de technologie de fabrication. Ce sont des huiles qui sont ajoutées. L'utilisation de graines crues ne permettrait pas un taux d'incorporation plus élevé. Ce serait possible avec des graines extrudées, plus coûteuses, mais à l'heure actuelle cela n'est pas réalisé en formulation pour des raisons de coût.

L'incorporation de lipides dans une pierre à lécher n'a semble-t-il pas été pratiquée. Cela nécessiterait une étude préalable, pour éviter que la pierre soit trop dure ou trop molle. La forte variabilité de consommation entre animaux rend en outre problématique l'utilisation de cette pratique, qui pourrait entraîner une surconsommation de lipides par certains animaux.

<sup>6</sup> Même s'il est très probable que les acides gras *trans* du lait, formés en majorité de l'isomère *trans* 11 dans le cas de l'apport de lin, n'ont pas d'effet négatif sur la santé humaine, contrairement à des sources d'origine industrielle (margarines).



### 3. Disponibilité des matières premières

En termes de sources oléagineuses, le lin est moins utilisé que d'autres sources, en raison de son coût plus élevé, qui est lui-même lié en partie à une faible productivité à l'hectare : 20 à 25 q/ha, contre 37 q/ha pour le colza et 25 pour le tournesol (CETIOM). A dire d'expert, les surfaces cultivées en lin en France pourraient passer sans problème de 14 000 ha à 200 000 ha. C'est une forte augmentation, mais cela ne semble pas irréaliste, et 200 000 ha ne représentent qu'une faible part des surfaces cultivées : 1,6 Mha pour le colza et 600 000 ha pour le tournesol actuellement (CETIOM). Le Canada pour sa part cultive 750 000 ha de lin, et 70% de sa production est exportée.

Actuellement en alimentation animale, ce sont les huiles qui sont les plus incorporées dans des aliments concentrés, surtout pour les aliments pour monogastriques : soja en premier, puis colza, et palme à un degré moindre. D'autres produits comme l'huile de colza hydrogénée ont été inclus dans les aliments concentrés, mais sont moins utilisés actuellement. Les graines crues en tant que telles sont moins employées car moins bien valorisées que l'huile et le tourteau séparément. Les graines extrudées, pour leur part, sont utilisées seules. Ce sont des produits à forte valeur ajoutée, qui dans le cas du lin et du colza, riches en matières grasses (40% ou plus), doivent pour des raisons technologiques, être co-extrudés avec au moins du son, parfois du son et du tourteau de tournesol, ce dernier ayant pour objectif d'accroître la teneur en azote de l'aliment. Les graines de soja, qui contiennent 20% de matières grasses, sont extrudées seules.

Les tourteaux gras peuvent être produits à la ferme par pression à froid (20 à 30% de lipides) ou en usine avec traitement thermique (10% de lipides). Cette dernière solution s'est pratiquée mais s'est arrêtée car non rentable, en partie parce que le produit passait mal en formulation ; un produit "polyvalent" (lipides + protéines) est moins recherché qu'un produit "spécialisé" (lipides ou protéines). Au niveau de la ferme, un certain nombre d'agriculteurs utilisent l'huile de colza brute dans leur tracteur, et distribuent les tourteaux gras aux animaux. Cette pratique est bien perçue au niveau des éleveurs qui renforcent l'autonomie protéique de leur exploitation et font des économies de carburant ; on soulignera toutefois la faible valeur PDI du tourteau, dont les protéines sont très dégradables dans le rumen car il n'a pas été traité thermiquement ; le risque d'oxydation avec les matières grasses polyinsaturées existe, et peut nécessiter la mise à l'abri de l'air. L'avenir de cette pratique semble quantitativement limité, en raison d'une faible valorisation de la graine de colza par l'éleveur ; en outre, l'utilisation d'huile dans le tracteur est une démarche individuelle qui ne peut pas être généralisée.

Certains aliments contiennent environ 10% de matières grasses. Les drêches de maïs sont disponibles en France actuellement dans 3 usines (une dans les Pyrénées Atlantiques, deux dans le Nord). Au niveau de l'UE, il existe d'autres sources (Espagne). L'évolution ultérieure est mal connue, et sera probablement liée aux choix politiques relatifs aux agrocarburants ; il est probable que leur utilisation sera limitée, en raison d'un avenir incertain des biocarburants de première génération. Il ne semble pas prudent de retenir cette source de lipides, même pour n'apporter qu'une partie du supplément lipidique pour les raisons évoquées plus haut. Le lupin est actuellement une production marginale : 5 000 ha en France (UNIP) ; il ne semble pas réaliste de le retenir pour les mêmes raisons.

Parmi les sources secondaires, il y a les tourteaux de germes de maïs, disponibles en faible quantité ; leur utilisation à grande échelle semble difficile.

A côté de ces ingrédients susceptibles d'entrer dans la composition d'aliments concentrés, il faut mentionner les lipides distribués purs. Les plus connus sont les savons de calcium d'huile de palme, mais des huiles végétales hydrogénées sont également disponibles. Ces matières premières riches en acides gras saturés ne sont pas retenues en raison de leur impact potentiel négatif pour la santé humaine. On peut par contre se demander si les savons de calcium d'huile de colza ne seraient pas une solution, mais ce type de produit, technologiquement envisageable, semble avoir été abandonné par les fabricants de savons de calcium. En l'état actuel des choses, il ne semble pas possible de le proposer. La société britannique commercialisant les savons de calcium d'huile de palme propose des mélanges entre ces savons de calcium et des lipides du lin, mais nous n'avons pas de référence sur ce produit.

### 4. Proposition : sources de lipides retenues

De ces différents éléments, il ressort qu'en pratique, l'enrichissement des concentrés en huiles insaturées, et la distribution de graines extrudées sont les deux solutions à retenir. Ne proposer qu'une seule de ces solutions manquerait de souplesse et ne permettrait pas d'obtenir dans tous les cas une supplémentation lipidique suffisante sans problèmes collatéraux.

Nous proposons donc un double apport de lipides, avec 3,5% de lipides ajoutés (ce qui devrait pouvoir se faire sans problème majeur) par des graines extrudées de colza et de lin (50/50) sous forme de mélanges extrudés contenant 70% de graines et 30% de son (technologie actuellement pratiquée), et en augmentant la teneur en lipides des concentrés, sous forme d'huile de soja et de colza (50/50).

L'utilisation des graines extrudées est proposée en priorité car elle est plus souple et permet un taux d'incorporation de lipides élevé avec une quantité totale de concentré limitée. En pratique, elle a été retenue pour tous les cas où les animaux reçoivent des quantités journalières de concentré faibles. L'apport de concentré enrichi en huile est proposé essentiellement pour les vaches laitières, les vaches de réforme et les jeunes bovins en engraissement ou finition. Il a été rendu nécessaire



par une contrainte que nous avons imposée : 10% maximum de graines extrudées dans la ration. Cette contrainte n'a pas de justification d'ordre scientifique mais est supposée permettre une acceptation plus facile de la part des éleveurs, et entraîne une moindre dépendance à un produit unique dans le cas d'une forte consommation journalière.

Dans ce cas des huiles incorporées dans le concentré, le colza et le soja ont été retenus car ce sont les deux sources de lipides insaturés actuellement les plus disponibles sur le marché. Dans le cas des graines extrudées, le lin et le colza ont été retenus. L'utilisation de graines de lin extrudées fait actuellement l'objet d'un "projet domestique" soutenu par le ministère chargé de l'environnement et d'un agrément au niveau des Nations Unies ; il est promu par la démarche Bleu-Blanc-Cœur visant à améliorer la valeur nutritionnelle des produits animaux. Le colza lui a été associé pour quatre raisons : 1) au niveau d'incorporation de lipides que nous préconisons, l'utilisation exclusive de lin pourrait conduire à une présence excessive d'acides gras *trans* dans le lait et la viande, alors que le colza n'en produit pas ; 2) l'utilisation exclusive du lin entraînerait un accroissement des surfaces cultivées en lin très supérieures à ce qui est raisonnablement envisageable. Les quantités de graine de lin nécessaires pour la mise en œuvre de l'action dans les conditions de cette étude nécessitent la mise en culture de lin de 400 000 ha supplémentaires, ce qui est bien supérieur aux prévisions les plus optimistes à l'heure actuelle pour le territoire français (voir paragraphe 3), et nécessitera selon toute probabilité des importations de graines ; 3) le coût de la graine de colza est plus faible que celui de la graine de lin, en partie en raison d'une productivité par ha supérieure (voir paragraphe 3) ; 4) l'utilisation de deux sources de lipides permet de s'affranchir des risques liés à l'accroissement de coût d'une matière première, ou de sa pénurie.

Malgré la forte probabilité d'un effet d'atténuation de la production de méthane plus élevé pour le lin que pour le colza<sup>7</sup>, le même niveau d'atténuation a été retenu pour les différentes sources utilisées. Les proportions relatives des différentes sources qui ont été retenues pour les calculs peuvent donc être modifiées sans conséquence pour le niveau d'atténuation potentielle, en fonction des fluctuations des coûts et des disponibilités des matières premières sur le marché.

### Références bibliographiques citées

- Beauchemin K.A., McAllister T.A., McGinn, S.M., 2009. Dietary mitigation of enteric methane from cattle. CAB Reviews: Persp. Agric. Vet. Sci. Nutr. Nat. Res. 4, CABI, Wallingford, Royaume-Uni, 4, 1-18.
- Doreau M., Martin C., Eugène M., Popova M., Morgavi D.P., 2011. Leviers d'action pour réduire la production de méthane entérique par les ruminants. In : Gaz à effet de serre en élevage bovin : le méthane. Doreau M., Baumont R., Perez J.M. (Eds). Dossier, INRA Prod. Anim. 24, 461-474.
- Grainger C., Beauchemin K.A., 2011. Can enteric methane emissions from ruminants be slowed without lowering their production? Anim. Feed Sci. Technol., 166-167, 308-320.
- Martin C., Morgavi D.P., Doreau M., 2010. Methane mitigation in ruminants: from microbe to the farm scale. Animal, 4, 351-365.
- 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.

---

<sup>7</sup> Voir paragraphe 1. L'article Doreau et al. (2011) montre toutefois la variabilité des résultats, et plusieurs publications (2 relevées dans cet article et 2 récentes) ne montrent pas d'effet atténuateur du lin sur la production de méthane.

## Annexe 2. Effets d'un additif à base de nitrate sur la production de méthane entérique

Annexe rédigée par Michel Doreau et Jessie Guyader, avec l'apport de Philippe Faverdin et Cécile Martin

Le méthane est produit dans le rumen à partir de l'hydrogène grâce à des enzymes produites par les archaea méthanogènes, un groupe bien spécifique de microorganismes (Popova et al., 2011,<sup>8</sup>). L'hydrogène est produit lors de la dégradation des glucides par les bactéries et protozoaires du rumen. Le nitrate constitue une voie alternative d'utilisation de l'hydrogène, très compétitive, ce qui fait qu'en présence de nitrate la production de méthane est réduite. Cet effet a été démontré *in vivo* dans quatre essais publiés (Van Zijderveld et al., 2010 ; Nolan et al., 2010 ; Van Zijderveld et al., 2011 ; Hulshof et al., 2012), deux sur bovins et deux sur ovins, trois avec du nitrate de calcium dont un à long terme, et un avec du nitrate de potassium. Une diminution de 16 à 31% de la production de méthane par kg de matière sèche ingérée a été observée pour une dose de nitrate (équivalent NO<sub>3</sub>) de 2,2 à 2,6% de la matière sèche de la ration, soit en moyenne 10% de réduction pour 1% de nitrate ajouté. Ces essais ont été réalisés pour trois d'entre eux avec la société Provimi (Cargill), qui a enregistré en 2010 un brevet sur l'association de nitrate et de sulfates pour réduire la production de méthane chez les ruminants. Lors du récent congrès international "Greenhouse gases and animal agriculture" (GGAA), tenu en juin 2013, quatre communications supplémentaires ont été présentées sur l'effet du nitrate sur les émissions de méthane entérique<sup>9</sup>. Toutes les quatre vont dans le même sens que les quatre publications citées ci-dessus (Tableau A2-1).

Tableau A2-1. Calcul de l'atténuation des émissions de CH<sub>4</sub> en fonction du type d'animal et de ration

Référence	Type d'animal	Type de ration	Forme de nitrate	% NO <sub>3</sub> dans la ration	Baisse de CH <sub>4</sub> /kgMS (%)	Baisse CH <sub>4</sub> /kgMS par % de nitrate
Nolan et al., 2010	Moutons à l'entretien	Foin	KNO <sub>3</sub>	2,6	23,1	8,9%
Van Zijderveld et al., 2010 <sup>‡</sup>	Agneaux en croissance	65% ensilage maïs 14% paille	Nitrate de Ca et NH <sub>4</sub>	2,55	31%	12,2%
Van Zijderveld et al., 2011 <sup>‡</sup>	Vaches laitières	53% ensilage maïs 34% concentré	Nitrate de Ca et NH <sub>4</sub>	2,24	16,5%	7,3%
Hulshof et al., 2012 <sup>‡</sup>	Bouvillons en croissance	60% canne à sucre 40% concentré	Nitrate de Ca et NH <sub>4</sub>	2,2	27%	12,3%
El-Zaiat et al., 2013	Agneaux en croissance	60% concentré 40% fourrage	Nitrate de Ca encapsulé	2,75	33%	12,0%
Sakhtivel et al., 2013	Buffles en croissance	50% paille 50% concentré	Nitrate de Na et K	2	15%	7,5%
Velazco et al., 2013 <sup>‡</sup>	Bouvillons à l'engrais	70% orge 8,5% ensilage maïs	Nitrate de Ca <sup>†</sup>	1,9	32%	16,8%
Veneman et al., 2013 <sup>‡</sup>	Vaches laitières	Ensilage maïs Foin luzerne Tourteau soja	Non précisé <sup>†</sup>	2	18,3%	9,1%

<sup>‡</sup> Essais réalisés en collaboration avec la société Cargill, codétentrice du brevet sur l'utilisation de nitrate comme additif

<sup>†</sup> En fait, il s'agit certainement de nitrate de Ca et NH<sub>4</sub>, produit étudié par Cargill

Le principe est la réduction du nitrate en nitrites, puis des nitrites en ammoniac. Si la production de nitrites est plus rapide que leur conversion en ammoniac, les nitrites s'accumulent dans le rumen sont absorbés dans le sang et se fixent à l'hémoglobine pour former de la méthémoglobine, complexe qui ne transporte plus l'oxygène contrairement à l'hémoglobine (Popova et al., 2011). Dans des cas extrêmes, la méthémoglobinémie peut conduire à la mort de l'animal. Dans l'essai de Veneman et al. (2013), une méthémoglobinémie jugée excessive a été observée chez certains animaux en alimentation restreinte, nécessitant l'utilisation de bleu de méthylène<sup>10</sup> à titre curatif (C.J. Newbold, communication personnelle). Par ailleurs, l'apport de nitrate dans une ration riche en azote fermentescible peut entraîner un excès d'ammoniac dans le rumen, dangereux dans les cas extrêmes. Dans tous les cas, l'apport de nitrate entraîne une augmentation de l'azote urinaire et donc de la production d'ammoniac et de protoxyde d'azote s'il n'est pas compensé par la diminution d'une autre source d'azote fermentescible.

<sup>8</sup> Les mécanismes en jeu ont été détaillés par Morgavi et al., 2010. Des aspects plus généraux sont fournis par Doreau et al., 2011.

<sup>9</sup> Communications d'une page dans *Advances in Animal Biosciences*, 2013, vol. 4, par Veneman et al. (p. 335), El Zaiat et al. (p. 346), Sakhtivel et al. (p. 414), Velazco et al. (p. 579).

<sup>10</sup> Le bleu de méthylène active la NADPH méthémoglobine réductase qui catalyse la transformation de méthémoglobine en hémoglobine.

Indépendamment du risque pour l'animal, il faut souligner la mauvaise image probable des nitrates en tant qu'additif alimentaire. Plusieurs cahiers des charges de production du lait refusent déjà l'utilisation de l'urée dans les rations de vaches laitières, qui semble pourtant moins risquée que celle des nitrates. Le mot nitrate est associé à la pollution des eaux ; son usage va en apparence à l'encontre de la préconisation de la réduction de l'utilisation des engrais azotés minéraux comme engrais. Il n'y a à notre connaissance pas d'étude du transfert dans le lait des nitrates consommés par la vache. Toutefois, l'introduction de nitrates (et même de nitrites) dans les denrées alimentaires comme la viande fumée ne pose pas de problème de santé publique, et plusieurs publications à caractère médical font état de l'effet favorable des nitrates sur la santé humaine (Benjamin, 2000). Une récente communication d'El-Zaiat et al. (2013) ne montre pas d'augmentation de résidus de nitrate dans la viande lorsque du nitrate est apporté dans la ration. Quoi qu'il en soit, l'utilisation de nitrate dans l'alimentation des ruminants risque de se heurter à de fortes réticences de la part des éleveurs et de l'ensemble de la société civile, en particulier s'il y a un risque potentiel pour l'animal.

L'idée retenue dans l'étude a néanmoins été de proposer le nitrate comme solution pour réduire la production de méthane, mais avec des garde-fous importants : 1) utilisation seulement dans les rations carencées en azote fermentescible, en remplacement de l'urée si celle-ci est apportée dans la ration ; 2) à une dose nettement inférieure à la dose la plus efficace, et pour laquelle les risques pour la santé animale sont très peu probables ; 3) ingestion étalée au cours de la journée. Cela devrait limiter les risques<sup>11</sup>, car il faut tenir compte d'une mauvaise utilisation ou d'un surdosage par l'éleveur.

Dans l'attente de connaissances précises sur l'effet de source de nitrate à diffusion lente (une première communication par El Zaiat et al. (2013) donne quelques informations), l'étalement de l'ingestion nécessite au minimum l'incorporation dans le concentré (et non la distribution en l'état), et que ce concentré ne soit pas consommé rapidement. Cette pratique devrait être adoptée par l'industrie de l'alimentation animale. Cela exclut l'utilisation pour les vaches allaitantes et les génisses d'élevage qui reçoivent ou recevraient au maximum 1 à 2 kg de concentré par jour, avec en outre une difficulté de mélange entre fourrage (foin ou ensilage d'herbe) et concentré. Pour les vaches laitières et les taurillons à l'engraissement, cibles de cette technique, il est préférable de limiter aux animaux recevant de l'ensilage de maïs (carencé en azote fermentescible), avec si possible une ration offerte en mélange. Une méthode envisageable pour étaler l'ingestion de nitrate serait leur incorporation directe dans l'ensilage lors de la confection du silo ; toutefois elle entraînerait certainement des pertes par lessivage ou action bactérienne, ce qui reste toutefois à vérifier.

La dose que nous préconisons est de 1% de la ration, ce qui peut entraîner une baisse de production de méthane de 10% (plage de 8 à 12% réaliste). Toutefois, une dose maximale de 1,5% peut être envisageable sous réserve d'acquisition d'expérience sur l'innocuité. Une dose plus élevée pourrait être admissible pour des sources à diffusion lente dans le rumen. Bien qu'il n'y ait pas eu d'étude de type dose-réponse, on peut penser à une linéarité de la réponse, dans la mesure où le nitrate peut utiliser l'hydrogène en proportion de sa concentration, en raison de sa plus haute affinité pour l'hydrogène que le CO<sub>2</sub>. La comparaison des études réalisées, publiées ou non (Van Zijderveld, 2011), le confirme. Bien qu'il n'y ait qu'un seul essai *in vivo* à long terme, on peut penser que le mode d'action du nitrate se poursuit sur le long terme car il est indépendant des modifications de l'écosystème microbien, bactéries et protozoaires. Toutefois, il est possible que le nitrate ait en plus une action directe sur l'écosystème microbien en réduisant le nombre d'archées méthanogènes. Ceci reste à confirmer. Nous préconisons aussi une utilisation exclusive dans des rations permettant une ingestion étalée. Enfin, il faut remarquer que la réduction de la production de méthane grâce au nitrate ne se traduit pas par une amélioration de l'efficacité d'utilisation de la ration, l'hydrogène capté n'étant pas utilisé par l'animal.

La source sur laquelle sont basées les estimations de coût est un produit commercialisé à des fins de fertilisation, le nitrate de calcium (Calcinit® de formule 5Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, 10H<sub>2</sub>O). Ce produit contient 75% de nitrate dans la matière sèche. A l'avenir, d'autres sources peuvent être envisagées, telles que l'ammonitrate ou le nitrate de potassium, mais l'expérience manque sur ces produits. Il est possible que dans l'avenir des produits avec des spécifications de pureté liées à un usage en alimentation animale soient commercialisés.

L'assiette (nombre d'animaux concernés) est définie à partir des estimations de l'Observatoire de l'Alimentation des vaches laitières, publiées par l'Institut de l'Élevage et réalisées à partir des enquêtes Agreste. Les cas-types OTEX sont répartis en "plus de 30% de maïs dans la SFP" et "10 à 30% de maïs dans la SFP". Les premiers correspondent à 40-45% de maïs dans la matière sèche ingérée, les seconds à 20-25% de maïs, selon les systèmes. Un calcul fait par Ph. Faverdin (comm. personnelle) montre que pour un système à 43% de maïs fourrage dans la SFP, l'ensilage de maïs représentait 61% de la consommation de fourrage, mais seulement 47% de l'ingestion totale, sur la base de la matière sèche (MS). Ce type de ration est généralement déficitaire en azote fermentescible, et nécessiterait en moyenne un apport de 1% d'urée dans la MS (évaluation approximative), ce qui correspondrait à 2,5% de nitrate<sup>12</sup>. Cela signifie que si la proportion maximum de nitrate dans la ration est fixée à 1% pour éviter tout risque pour l'animal, elle est adaptée aux systèmes ayant plus de 10% de maïs

<sup>11</sup> Les conditions d'emploi du nitrate dans l'alimentation des ruminants ont été détaillées dans un rapport très complet : Leng, 2008.

<sup>12</sup> Le produit actuellement commercialisé (pour d'autres fins) est du nitrate de calcium de formule 5Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, 10 H<sub>2</sub>O. Sa valeur azotée (azote fermentescible) en valeur PDIN a été estimée à 598 g/kg, contre 1472 g/kg pour l'urée qu'il remplacerait. En d'autres termes, 1 kg d'urée peut être remplacé par 2,5 kg de nitrate de calcium.

dans la SFP, et à certains systèmes mixtes lait et viande. Par sécurité, les systèmes ayant plus de 15% de maïs fourrage dans la SFP (ce qui correspondrait à 20% d'ensilage de maïs dans l'ingéré, exprimé en MS), ont été retenus.

### Références bibliographiques citées

- Benjamin, 2000. Nitrates in the human diet - good or bad? *Ann. Zootech.*, 49, 207-216.
- Doreau M., Martin C., Eugène M., Popova M., Morgavi D.P., 2011. Leviers d'action pour réduire la production de méthane entérique par les ruminants. In : *Gaz à effet de serre en élevage bovin : le méthane*. Doreau M., Baumont R., Perez J.M. (Eds). Dossier, INRA Prod. Anim., 24, 461-474.
- El-Zaiat HM, Patino HO, Soltan YA, Morsy AS, Araujo RC, Louvandini H, Abdalla AL., 2013. Additive effect of nitrate and cashew nut shell liquid in an encapsulated product fed to lambs on enteric methane emission and growth performance. *Advances in Animal Biosciences*, 2013, vol. 4: p. 346.
- Hulshof, R. B. A., Berndt, A., Gerrits, W. J. J., Dijkstra, J., Van Zijderveld, S. M., Newbold, J. R., Perdok, H. B. 2012. Dietary nitrate supplementation reduces methane emission in beef cattle fed sugarcane based diets. *Journal of Animal Science* 90: 2317-2323.
- Leng R.A., 2008. The potential of feeding nitrate to reduce enteric methane production in ruminants. Report, Commonwealth Government of Australia, Canberra.
- Morgavi D.P., Forano E., Martin C., Newbold C.J., 2010. Microbial ecosystem and methanogenesis in ruminants. *Animal*, 4, 1024-1036.
- Nolan, J. V., R. S. Hegarty, J. Hegarty, I. R. Godwin, and R. Woodgate. 2010. Effects of dietary nitrate on fermentation, methane production and digesta kinetics in sheep. *Animal Production Science* 50: 801-806.
- Popova M., Morgavi D.P., Doreau M., Martin C., 2011. Production de méthane et interactions microbiennes dans le rumen. In : *Gaz à effet de serre en élevage bovin : le méthane*. Doreau M., Baumont R., Perez J.M. (Eds). Dossier, INRA Prod. Anim., 24, 447-460.
- Sakhtivel PC, Kamra DN, Agarwal N, Chaudhary LC, Chaturvedi VB, 2013. Effect of nitrate and nitrate reducing bacteria on methane production in growing Murrah buffaloes. *Advances in Animal Biosciences*, 2013, vol. 4: p. 414.
- Van Zijderveld S.M., Gerrits W.J.J., Apajalahti J.A., Newbold J.R., Dijkstra J., Leng R.A., Perdok H.B., 2010. Nitrate and sulfate: Effective alternative hydrogen sinks for mitigation of ruminal methane production in sheep. *J. Dairy Sci.*, 93, 5856-5866.
- Van Zijderveld S.M., 2011. Dietary strategies to reduce methane emissions from ruminants. PhD, Université de Wageningen, Pays-Bas.
- Van Zijderveld S.M., Gerrits W.J.J., Dijkstra J., Newbold J.R., Hulshof R.B. A., Perdok H.B., 2011. Persistency of methane mitigation by dietary nitrate supplementation in dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 94,4028-4038.
- Velazco JI, Bremner G, Li L, Luijben K, Hegarty RS, Perdok H 2013. Short-term emission measurements in beef feedlot cattle to demonstrate enteric methane mitigation from dietary nitrate. *Advances in Animal Biosciences*, 2013, vol. 4: p. 579.
- Veneman JB, Muetzel S, Perdok HB, Newbold CJ, 2013. Dietary nitrate but not linseed oil decreases methane emissions in lactating dairy cows fed a maize silage based diet. *Advances in Animal Biosciences*, 2013, vol. 4: p. 335.

### Annexe 3. Calcul des émissions induites

L'apport de lipides en substitution à des céréales, comme source d'énergie, et à des tourteaux (puisque les graines oléagineuses sont également riches en protéines), se traduit par des modifications de l'empreinte carbone (émissions de GES) liée à la production de ces matières premières. Cette empreinte est calculée à partir de résultats acquis.

Le référentiel officiel en France est Dia'terre®, développé par l'ADEME, et les valeurs sont essentiellement issues des données du logiciel Ges'tim développé par l'Institut de l'Élevage. Les valeurs Dia'terre® (Tableau A3-1) sont publiées dans le manuel de référence Ges'tim (Gac et al., 2010). Toutefois, Dia'terre® fournit des valeurs pour les céréales et les tourteaux, mais pas pour les graines oléagineuses.

Parallèlement, l'INRA a effectué différentes analyses de cycle de vie et a calculé des empreintes carbone avec le logiciel SimaPro, la base de données de l'UMR SAS (INRA Rennes) et des données générales de la base Ecoinvent, à partir d'itinéraires techniques de référence. Les valeurs INRA (Tableau A3-1) sont la moyenne des résultats obtenus dans différentes publications scientifiques récentes (Nguyen et al., 2012a, 2012b, 2013) ou récapitulés dans des publications de synthèse (Mosnier et al., 2011, actualisé par Garcia-Launay et al., publication en cours). Les valeurs INRA et Dia'terre® sont voisines pour les tourteaux, mais les valeurs INRA sont plus élevées pour les céréales.

**Tableau A3-1. Empreinte carbone des aliments (en kgCO<sub>2e</sub>/kg) selon deux référentiels**

	Dia'terre®	INRA	
		Valeur	Source
Orge	320	490	Moyennes de résultats publiés par : Nguyen et al. (2012b, 2012, 2013), Mosnier et al. (2011) et Garcia-Launay et al. (en cours)
Blé	350	540	
Maïs	296	500	
Son de blé	140 *	250	
Tourteau de colza	460	450	
Tourteau de soja	1 580	1 530	
Tourteau de tournesol	295	310	
Huile de colza		2 070	Moyenne des données de Mosnier et al. (2011) et Garcia-Launay et al. (en cours)
Huile de soja		1 500	Nguyen et al. (2012b)
Graine de lin extrudée		1 080	Nguyen et al. (2013 et non publié)
Graine de colza extrudée		1 100	

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

Dans le cadre de l'étude, il a été décidé de prendre les valeurs Dia'terre® afin d'être homogène pour l'ensemble des actions de l'étude. Mais dans le cas de cette action pour laquelle les valeurs disponibles pour les huiles et graines oléagineuses sont seulement celles de l'INRA, le fait de prendre les valeurs Dia'terre® pour les céréales et tourteaux, et INRA pour les huiles et graines oléagineuses nuit à la cohérence intra-action, et introduit un biais dans la mesure où les deux référentiels donnent des valeurs différentes pour les céréales. Aussi, une analyse de sensibilité a comparé les deux modes de calcul, et a mis en évidence des émissions induites plus faibles avec le référentiel INRA.

#### Références bibliographiques citées

- Gac, A., Cariolle, M., Deltour, L., Dollé, J.B., Espagnol, S., Flénet, F., Guingand, N., Lagadec, S., Le Gall, A., Lellahi, A., Malaval, C., Ponchant, P. and Tailleur, A. 2010. GES'TIM. Guide méthodologique pour l'estimation des impacts des activités agricoles sur l'effet de serre. Version 1.2. Institut de l'Élevage, Paris, 156 p.
- 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., 2012b. 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., 2012a. Effects of type of ration and allocation methods on the environmental impacts of beef-production systems. *Livestock Science* 145, 239-251.
- Nguyen T.T.H., Doreau M., Corson M.S., Eugène M., Delaby L., Chesneau G., Gallard Y., van der Werf H.M.G., 2013. Effect of dairy production system, breed and co-product handling methods on environmental impacts at farm level. *Journal of Environmental Management*, 120, 127-137.

## Annexe 4. Assiette et atténuation d'émission par catégories d'animaux - sous-action Lipides insaturés

	Effectif Agreste	Assiette Maximale Technique	Emissions par animal (kgCH <sub>4</sub> /an)	Atténuation d'émissions					Coût unitaire (€)
				Moyenne			Mini	Maxi	
				%	kgCH <sub>4</sub> /an	kgCO <sub>2e</sub> /an	kgCO <sub>2e</sub> /an	kgCO <sub>2e</sub> /an	
<b>TROUPEAU LAITIER</b>									
Vaches LAITIÈRES	3 728 555	3 107 129	115,75	13,8	16,0	401	321	481	109
Génisses >24mois Renouveaulement	833 983	104 248	73,8	11,8	8,7	217	174	260	52
Génisses 12-24 mois Renouveaulement	1 160 303	483 460	55,74	13,0	7,3	181	145	218	47
Génisses 0-12 mois	921 670	0	24,25						
Mâles > 2 an	173 077	72 115	63,9						
dont bœuf fin d'hiver		28 846	63,9	7,2	4,6	115	92	138	47
dont bœuf finition		43 269	63,9	12,1	7,8	194	155	233	78
Mâles 1-2 ans	364 956	367 956	66,93						
dont Jeunes bovins		200 000	81,12	12,9	10,5	262	210	314	61
dont Bœufs		167 956	50,03						
Mâles 0-12 mois	631 231	0	38						
<b>TROUPEAU ALLAITANT</b>									
Vaches ALLAITANTES	4 230 666	820 749	81,36						
dont réformes		211 533	81,36	13,0	10,6	264	211	317	78
dont lactation		609 216	81,36	12,1	9,8	246	197	295	71
Génisses >24mois Renouveaulement	1 016 996	0	63,04						
Génisses >24mois Boucherie	251 289	150 773	66,28	12,4	8,2	205	164	246	54
Génisses 12-24 mois Renouveaulement	1 017 974	0	52,37						
Génisses 12-24 mois Boucherie	280 437	93 479	58,39	14,7	8,6	215	172	258	47
Génisses 0-12 mois	1 941 141	404 404	23,08	14,5	3,4	84	67	101	20
Mâles > 2 an	298 157	104 079	75,9						
dont taureaux service		45 000	92,0	12,5	11,5	288	231	346	73
dont bœufs		59 079	63,9	13,4	8,6	215	172	258	78
Mâles 1-2 ans	536 175	332 710	65,57						
dont JB		279 167	81,12	15,6	12,7	317	253	380	61
dont Bœufs		53 543	50,03	14,5	7,2	181	145	217	52
Mâles 0-12 mois	1 329 445	553 935	28,01	15,3	4,3	107	86	128	24
<b>TOTAUX</b>	<b>18 716 055</b>	<b>6 595 038</b>							