

Cet article de la revue **Fourrages**,  
est édité par l'Association Française pour la Production Fourragère

Pour toute recherche dans la base de données  
et pour vous abonner :

**[www.afpf-asso.org](http://www.afpf-asso.org)**

# Réduire les émissions de méthane et les rejets d'azote et améliorer la qualité nutritionnelle du lait par l'alimentation des vaches

M. Focant<sup>1</sup>, E. Froidmont<sup>2</sup>, Q.C. Dang Van<sup>1</sup>, A. Vanlierde<sup>3</sup>,  
Q. Archembeau<sup>1</sup>, Y. Larondelle<sup>1</sup>

**L'alimentation de la vache laitière influence la qualité du lait et l'impact environnemental de sa production. Le type d'alimentation ici expérimenté (sans tourteau de soja et avec apport de graines de lin) permet de produire un lait de haute valeur nutritionnelle associée à une réduction des émissions de méthane entérique et des rejets azotés.**

## RÉSUMÉ

L'expérience compare une ration proche de la pratique (CTL) à une ration durable (DUR) sur 2 lots de 10 vaches produisant 30 l de lait par jour. Ces rations, de même valeur énergétique (0,9 UFL/kg MS), diffèrent par la nature de l'énergie apportée et leur teneur en matières azotées totales (16,4 vs 13,5 %, respectivement). Formulée sans soja, la ration DUR contenait des graines de lin extrudées (8,4 % MS) ; elle a permis d'améliorer simultanément la qualité nutritionnelle du lait (+34 % d'acides gras insaturés, +120 % d'oméga-3) et l'impact environnemental du troupeau (-10 à -20 % de méthane émis par jour et amélioration de l'efficacité azotée de 16 %). La production laitière n'a pas été influencée par la ration mais les taux butyreux et protéique du lait étaient plus faibles avec DUR (de -8 % et -3 % respectivement).

## SUMMARY

### Using diet to increase milk nutritional quality and reduce cow methane and nitrogen release

Diet affects the nutritional quality and environmental impact of the milk produced by dairy cows. This study examined how diet impacted milk and waste production in cows producing 30 litres of milk per day. The control group (CTL, n=10) received a conventional diet, while the experimental group (DUR, n=10) received a more sustainable diet. The sustainable diet contained no soy and incorporated extruded linseeds (8.4% DM). The diets had the same energetic value (0.9 French feed units for lactation [UFL]/kg DM), but differed in their energy sources and crude protein content (CP; 16.4% vs. 13.5% in the control vs. sustainable diet). The cows fed the sustainable diet produced milk of greater nutritional quality (+34% unsaturated fatty acids, +120% omega-3 fatty acids) and had a smaller environmental impact at the herd level (-10% to -20% methane emitted per day and 16% improved nitrogen efficiency). Diet did not affect milk yield, but cows given the sustainable diet produced milk with a lower fat and protein content (-8% and -3%, respectively).

Les productions bovines, et en particulier l'élevage laitier, sont souvent remises en cause en raison de leur faible efficacité, de leur production de méthane (CH<sub>4</sub>) entérique et des rejets azotés élevés, en partie transformés en émissions d'ammoniac (NH<sub>3</sub>) et de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O). De plus, la pertinence

nutritionnelle du lait de vache et son impact sur la santé donnent lieu à un discours médical souvent négatif (PEYRAUD *et al.*, 2013). La matière grasse du lait, trop saturée, pose notamment question. Certains acides gras (AG) du lait peuvent en effet avoir des effets négatifs lorsqu'ils sont consommés en excès. En particulier, les acides laurique

## AUTEURS

1 : Université catholique de Louvain, Institut des Sciences de la Vie, Croix du Sud, 2, L7.05.08, B-1348 Louvain-la-Neuve (Belgique) ; michel.focant@uclouvain.be

2 : Centre wallon de Recherches Agronomiques, Département productions et filières, Unité nutrition animale et durabilité, 8, rue de Liroux, B-5030 Gembloux (Belgique)

3 : Centre wallon de Recherches Agronomiques, Département valorisation des productions, Unité technologies de la transformation des produits, 24, chaussée de Namur, B-5030 Gembloux (Belgique)

**MOTS CLÉS** : Acide gras essentiel, bovin, complémentation, efficacité alimentaire, environnement, lin, production laitière, ration de base, ration alimentaire, qualité du lait, vache laitière.

**KEY-WORDS** : Basic diet, cattle, dairy cow, dairying, diet, environment, essential fatty acid, feed supplementation, feeding efficiency, linseed, milk quality.

**RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE** : Focant M., Froidmont E., Dang Van Q.C., Vanlierde A., Archembeau Q., Larondelle Y. (2017) : «Réduire les émissions de méthane et les rejets d'azote et améliorer la qualité nutritionnelle du lait par l'alimentation des vaches», *Fourrages*, 232, 297-304.

(12:0), myristique (14:0) et palmitique (16:0) peuvent favoriser les maladies cardio-vasculaires (MENSINK *et al.*, 2003 ; PARODI, 2005). D'autres AG du lait ont en revanche des effets potentiellement positifs pour la santé humaine. C'est le cas notamment de l'acide alpha-linolénique (18:3 n-3) ou oméga-3, de l'acide oléique (c9-18:1) et de l'acide ruménique (c9,t11-CLA) (SHINGFIELD *et al.*, 2008).

**L'alimentation est un levier d'action pour réduire les émissions de CH<sub>4</sub> entérique, limiter les rejets d'azote (N) et faire varier la composition en AG du lait des vaches** (DOLLÉ *et al.*, 2011 ; CHILLIARD *et al.*, 2001). Les moyens alimentaires pour réduire les nuisances environnementales des vaches laitières et pour améliorer la valeur nutritionnelle du lait sont bien documentés.

**L'enrichissement de la ration en sources de lipides insaturés, et en particulier la graine de lin, permet une diminution moyenne de 3,8% des émissions de CH<sub>4</sub> pour 1% de lipides supplémentaires dans la ration** (MARTIN *et al.*, 2008 ; DOREAU *et al.*, 2011). **L'enrichissement de la ration en amidon réduit aussi les émissions de méthane** (DOREAU *et al.*, 2011 ; PIRONDINI *et al.*, 2015).

Dans la formulation azotée des rations destinées aux vaches laitières, le premier objectif est de couvrir les besoins des micro-organismes du rumen et le second consiste à compléter l'apport duodénal de protéines microbiennes par des protéines alimentaires (*bypass*) afin d'assurer les besoins en protéines digestibles (PDI) des vaches au regard de leur potentiel de production. Dans le but d'optimiser l'efficacité protéique et de limiter les rejets azotés, le troisième objectif qui est parfois moins considéré est d'éviter un excès de rejets azotés en ajustant au mieux les apports aux besoins. En effet, la réduction des pertes d'azote fécales et urinaires représente une piste intéressante pour limiter les émissions de NH<sub>3</sub> et de N<sub>2</sub>O liées à la gestion des déjections animales, de même que les émissions de CO<sub>2</sub> associées à la production des intrants (KEBREAB *et al.*, 2001). **Une bonne adéquation des apports aux besoins constitue donc une voie intéressante et simple pour réduire la consommation de concentrés et les pertes azotées** (DOLLÉ *et al.*, 2011). Il est en effet bien établi que la quantité de protéines dégradées en NH<sub>3</sub> dans le rumen augmente proportionnellement à la teneur de la ration en protéines brutes (VÉRITÉ et DELABY, 2000). Lorsque la production de NH<sub>3</sub> dépasse les besoins des micro-organismes, l'excès est absorbé dans le sang, converti en urée dans le foie et excrété dans l'urine. Après excrétion dans l'étable ou épandage sur les champs, les micro-organismes présents dans le milieu transforment l'azote urinaire en ammonium (NH<sub>4</sub>OH), en nitrate et enfin en N<sub>2</sub>O (DIJKSTRA *et al.*, 2013). En raison de son coût élevé et de la faible efficacité de l'utilisation du N alimentaire, un apport excessif de suppléments protéiques diminue par ailleurs la marge bénéficiaire de la production laitière (BRODERICK, 2003). Pour des vaches laitières au-delà du pic de lactation, la littérature nous indique que ni la production laitière, ni les teneurs du lait en matières grasses (MG) et en protéines ne sont influencées significativement pour des rations contenant entre 12 et 14% de matières azotées totales (MAT) dans la matière sèche (MS), par rapport à des

rations contenant jusque 19% de MAT (KALSCHER *et al.*, 1999 ; OLMOS COLMENERO et BRODERICK, 2006 ; EDOUARD *et al.*, 2016). En revanche, les rejets de N urinaire et le coût de la ration sont réduits pour les rations les moins riches en protéines.

**L'un des principaux moyens de modulation de la composition des AG du lait est l'apport de suppléments lipidiques dans la ration** (CHILLIARD *et al.*, 2001). Par rapport aux graines de colza, les graines de lin sont plus efficaces pour augmenter la teneur en acides linoléiques conjugués (CLA) et en acide alpha-linolénique (oméga-3 : 18:3 n-3) dans le lait (DANG VAN *et al.*, 2008b). Cependant, l'association de graines de colza et d'un concentré protéique de luzerne utilisé comme source d'oméga-3 est aussi efficace que la graine de lin pour augmenter la proportion d'AG insaturés et d'oméga-3 dans le lait (DANG VAN *et al.*, 2011b). DANG VAN *et al.* (2008a, 2011a) ont aussi montré que plus la fibrosité de la ration est élevée, plus grande est la bio-hydrogénation des AG insaturés alimentaires dans le rumen et plus le taux de transfert de ces AG dans le lait est faible. Les suppléments lipidiques sont donc plus efficaces pour améliorer la composition en AG insaturés du lait lorsqu'ils sont ajoutés à des rations à base de maïs plutôt qu'à des rations à base de fourrages plus fibreux.

Les principaux moyens pour réduire les émissions de CH<sub>4</sub> entérique et les rejets d'azote d'une part, et pour améliorer la composition du lait en AG sont donc bien étayés. Cependant, à notre connaissance, ces leviers d'action n'ont jamais été testés ensemble à l'échelle d'un troupeau de vaches laitières pour vérifier s'ils étaient compatibles entre eux. C'est pourquoi, l'objectif de notre étude a été de **tester, dans une même ration, à l'échelle d'un troupeau**, toutes les recommandations pour la production d'un lait plus durable : **l'ajustement strict des apports azotés aux besoins moyens du troupeau**, selon les normes de l'INRA, **l'augmentation des apports d'amidon et la supplémentation en graines de lin**. La production de lait et sa composition en protéines, matière grasse et acides gras ont été analysées. Les émissions de méthane et les rejets d'azote ont été estimés.

## 1. Matériel et méthodes

### ■ Les animaux

Deux lots homogènes de 10 vaches de race Pie-Noir Holstein, issues du troupeau laitier du Centre wallon de Recherches Agronomiques (Gembloux-Belgique), ont été élaborés sur base de la production laitière (27,5 ± 8,1 kg/j), des jours en lactation (157 ± 122 j), de la parité (1,9 ± 1,2 lactations) et du poids vif (579 ± 65 kg). Ils ont été utilisés pour tester une ration expérimentale basée sur les recommandations de durabilité (DUR) par rapport à une ration contrôle (CTL) correspondant aux pratiques en usage dans les élevages de Wallonie. Les vaches étaient hébergées sur litière paillée durant toute la durée de l'expérience et traitées deux fois par jour.

## ■ Les rations

Les deux rations de base (tableau 1), distribuées à volonté, ont été conçues pour couvrir les besoins énergétiques (normes INRA) pour l'entretien d'une vache de 600 kg de poids vif et pour une production de 27,5 kg de lait standard par jour. Dans le régime DUR, les apports de PDI correspondaient aux normes INRA tandis que dans la ration CTL, les MAT et PDI étaient apportées en excès pour correspondre à l'usage courant des fermes commerciales. Les deux rations avaient la même composition fourragère sur la base de la MS. Elles se différençaient uniquement par la nature du complément énergétique, par les proportions de tourteaux de colza et de soja et par un supplément lipidique à base de graines de lin extrudées. Les vaches des deux lots ont reçu un mélange de minéraux et de vitamines (CMV) à raison de 200 g de produit frais par jour et 70 g de sel pour compenser le déficit en sodium dans les rations. Un concentré de production (Lactotop 20<sup>®</sup>, Voeders Depré, Schoten, Belgique), dosant 1,1 UFL et 213 g de MAT par kg de MS, a été distribué à raison de 1 kg par 2,5 kg de lait aux vaches des deux groupes produisant plus de 27,5 kg de lait par jour.

Ingrédients (% de la MS)	CTL	DUR
Ensilage de maïs	39,9	38,9
Ensilage d'herbe préfanée	25,7	26,2
Luzerne déshydratée (Rumiluz <sup>(1)</sup> )	6,9	7,1
Tourteau de colza	5,5	7,8
Tourteau de soja	14,0	-
Pulpes de betteraves déshydratées	5,1	-
Orge aplatie	-	10,3
Maïs - grains ensilés	1,6	-
Extrudé à base de graines de lin (Nutex 68 <sup>(2)</sup> )	-	8,4
NaCl	0,3	0,3
Complexe minéraux et vitamines (CMV <sup>(3)</sup> )	1,0	1,0

1 : Rumiluz<sup>®</sup>, Desialis, France : luzerne déshydratée en brins longs.  
 2 : Nutex 68<sup>®</sup>, Dumoulin, Belgium : aliment extrudé composé de 63,6% de graines de lin, 25,4% de remoulage, 10% de blé et 1% de BHT 1,7%.  
 3 : CMV : 12,48% Ca, 6,80% P, 6,81% S, 7,72% Na, 1,97% K, 96 mg I/kg, 2,877 mg Fe/kg, 620 mg Cu/kg, 2,520 mg Mn/kg, 3,777 mg Zn/kg, 83 mg Co/kg, 628,000 IU vitamine A/kg, 81,000 IU vitamine D/kg, 3,739 IU vitamine E/kg, et 27,8 mg Se/kg.

TABLEAU 1 : Composition des 2 rations de base comparées.

TABLE 1 : Composition of the 2 diets compared.

## ■ Schéma expérimental et mesures

L'expérience a été menée selon un schéma expérimental en cross-over comprenant 2 périodes de 4 semaines (3 semaines d'adaptation à la ration et une semaine de mesures). Pendant la dernière semaine de chaque période, des échantillons des concentrés et des fourrages ont été collectés quotidiennement lors de la préparation des rations. Ces échantillons ont été séchés en étuve à 60°C avant d'être moulus (grille 1 mm) puis analysés pour en déterminer les teneurs en MS, matière organique (MO), MAT, fibres NDF et MG par les méthodes de l'AOAC (1995). La composition en AG a été analysée par chromatographie gazeuse selon la procédure décrite par DANG VAN *et al.* (2011a). Les teneurs

en unité fourragère (UFL) et protéines digestibles dans l'intestin (PDIA, PDIN, PDIE) ont été estimées sur base de la composition des matières premières évaluées par spectrométrie proche infra-rouge (Foss-Perstorp NIRSSystems 5000, auto sampler, Danemark ; logiciel Winisi, Foss, Danemark).

Les rations ont été distribuées par lot. Les refus ont été pesés et échantillonnés quotidiennement lors de la quatrième semaine de chaque période afin de calculer l'ingestion de MS moyenne des vaches. Les refus ont été analysés comme les aliments.

Les vaches ont été pesées deux jours consécutifs en début et fin d'expérience, ainsi qu'au changement de régime alimentaire.

La production laitière individuelle a été mesurée lors de chaque traite. Des échantillons de lait ont été collectés les jours 2, 3 et 4 de la dernière semaine de chaque période. Le dosage des taux butyreux (TB), protéique (TP) et d'urée et la détermination de la composition en AG (SOYEURT *et al.*, 2011) ont été réalisés par le Comité du lait (Battice, Belgique) par spectrométrie en moyen infrarouge (MIR) après analyse des échantillons de laits représentatifs des traites par un spectromètre MilkoScan FT6000 (Foss, Hillerod, Danemark). Des échantillons moyens par lot ont été élaborés pour l'analyse de la composition en AG, par chromatographie gazeuse (DANG VAN *et al.*, 2011a).

Les émissions de CH<sub>4</sub> ont été estimées par deux méthodes prédictives : i) sur base des spectres MIR des laits individuels analysés par le Comité du lait (VANLIERDE *et al.*, 2016) ; ii) sur base de la composition en AG à 18 carbones, par l'équation : CH<sub>4</sub> (g/j) = (-8,72 × %C18) + 729 (CHILLIARD *et al.*, 2009).

L'efficacité d'utilisation du N ingéré a été calculée par le rapport entre le N moyen excrété dans le lait et l'ingestion de N. Le rejet d'azote urinaire a été estimé par l'équation : N urinaire (g/j) = N ingéré - N sécrété dans le lait - N fécal,

le N fécal étant calculé à partir de la relation :

N fécal (g) = -28 + 9,9 MSing (HUHTANEN *et al.*, 2008).

Les données individuelles ont été traitées par analyse de la variance (ANOVA) selon le modèle Mixed de SAS (version 9.3., SAS institute, Cary ; NC, USA). Le modèle statistique comporte des effets fixes (période et régime) et des effets aléatoires (vache, lot). Les différences entre les valeurs sont considérées comme significatives quand la P-valeur est inférieure à 0,05.

## 2. Résultats

### ■ Ingestion de matière sèche et composition chimique des rations

**Les vaches recevant la ration DUR ont ingéré en moyenne 770 g/jour de MS en moins que celles recevant la ration CTL.** La consommation du concentré de production Lactotop20<sup>®</sup> a représenté 10% de l'ingestion totale de

	CTL	DUR
Ingestion (moyenne ± écart type)		
Ration de base (kg MS/j)	19,54 ± 0,76	18,89 ± 0,78
Lactotop20® <sup>(1)</sup> (kg MS/j)	2,20 ± 0,15	2,09 ± 0,28
MS totale (kg/j)	21,75 ± 1,44	20,98 ± 1,21
Composition chimique des rations de base		
MO (% MS)	93,7	92,4
MAT (% MS)	16,4	13,5
NDF (% MS)	38,3	38,4
Amidon (% MS)	15,1	21,4
MG (% MS)	2,2	4,4
UFL (/kg MS)	0,89	0,91
PDIA (g/kg MS)	50,5	38,7
PDIN (g/kg MS)	117,5	88,1
PDIE (g/kg MS)	101,6	88,2
PDIE/UFL (g)	114,2	96,9
Rmic <sup>(2)</sup> (g/UFL)	17,9	-0,1
Composition en acides gras (g/100 g AG totaux)		
16:0	14,8	9,9
18:0	2,7	2,0
cis-9 18:1	17,4	18,6
cis-11 18:1	2,2	1,7
18:2n-6	45,3	28,0
18:3n-3	11,9	36,3

1 : Le concentré de production Lactotop 20® a la composition suivante (en MS) : 21,3% MAT ; 24,9% NDF ; 21,3% amidon ; 6,1% MG ; 1,1 UFL/kg MS ; 65 g PDIA/kg MS ; 137,1 g PDIN/kg MS ; 121,6 g PDIE/kg MS

2 : Rmic = (PDIN - PDIE)/UFL

**TABEAU 2 : Ingestion par les vaches et composition chimique des 2 rations de base comparées.**

**TABLE 2 : Feed intake by cows and diet composition of the 2 diets compared.**

MS pour les 2 rations. La composition de la ration DUR est conforme aux objectifs annoncés (tableau 2). Sa teneur en MAT est de 13,5% pour 16,4% dans la ration CTL, et l'équilibre [énergie vs azote] des apports alimentaires pour les microbes (Rmic = (PDIN - PDIE)/UFL) est de -0,1 au lieu de 17,9 g/UFL, afin de minimiser les rejets de N. Dans le but de réduire la production entérique de méthane, la ration DUR a une teneur plus élevée en amidon (21,4 vs 15,1% de la MS) et la teneur en lipides est doublée (4,4 vs 2,2% de la MS). Enfin, pour améliorer la valeur nutritionnelle du lait, la MG de la ration DUR a une teneur plus faible en C16:0 (9,9 vs 14,8% des AG) et plus élevée en C18:3 n-3 (36,3 vs 11,9% des AG).

	CTL	DUR	ESM <sup>(1)</sup>	P-valeur
Lait (kg/j)	30,7	30,0	1,54	0,39
Lait standard <sup>(2)</sup> (kg/j)	30,6	28,4	1,40	<0,01
MG (%)	4,02	3,70	0,13	<0,01
MG (kg/j)	1,21	1,07	0,06	<0,01
Protéines (%)	3,42	3,31	0,08	0,03
Protéines (kg/j)	1,03	0,97	0,05	0,03
Urée (mg/l)	264	125	4,90	<0,01

1 : Erreur standard sur la moyenne

2 : Lait corrigé pour une teneur énergétique de 730 kcal/kg par la formule (DE BRABANDER *et al.*, 2011) :  $[0,337 + (0,116 \times \% \text{ MG}) + (0,06 \times \% \text{ MAT})] \times \text{kg lait}$

**TABEAU 3 : Production laitière et composition du lait des 2 rations de base comparées.**

**TABLE 3 : Milk yield and composition of the 2 diets compared.**

## ■ Production et composition du lait

La production de lait a été similaire pour les 2 rations (tableau 3). Cependant, le TB (3,70% vs 4,02%) et le TP (3,31% vs 3,42%) ont été plus faibles pour la ration DUR (P < 0,05), ce qui explique la moindre production de lait standard (28,35 kg/j vs 30,63), de MG (1,07 kg/j vs 1,21) et de protéines (0,97 kg/j vs 1,03). Le taux d'urée du lait a été réduit de 53% lorsque les vaches ingéraient la ration DUR.

## ■ Composition du lait en acides gras

L'apport de graines de lin dans la ration DUR a largement modifié la composition de la MG du lait (tableau 4). La teneur en AG insaturés (AGI) a été augmentée de 33%, celle des AG n-3 de 92% et celle du cis9-trans11 CLA de 121%. Dans le même temps, les concentrations des AG susceptibles de favoriser les maladies cardio-vasculaires, 12:0, 14:0 et 16:0, étaient respectivement réduites de 18, 12 et 23%.

Acides gras	CTL	DUR	ESM <sup>(1)</sup>	P-valeur
4:0 ; 6:0 ; 8:0 ; 10:0	9,75	8,67	0,96	<0,001
12:0	4,32	3,32	0,81	<0,001
14:0	14,26	11,83	1,23	<0,001
16:0	37,33	30,44	2,09	<0,001
18:0	8,60	10,99	1,28	<0,001
Cis-9 18:1	16,43	22,95	1,99	<0,001
Cis-9, trans-11 CLA	0,48	1,06	0,49	<0,001
18:2n-6	1,90	1,97	0,46	<0,001
18:3n-3	0,42	0,92	0,29	<0,001
Σ AGI	26,79	35,87	2,32	<0,001
18:2n-6 : 18:3n-3 ratio	4,52	2,14	0,86	<0,001
Trans-10 18:1 <sup>(2)</sup>	0,41	1,12	-	-
Trans-11 18:1 <sup>(2)</sup>	0,81	2,12	-	-

1 : Erreur standard sur la moyenne

2 : Résultats des dosages réalisés par chromatographie gazeuse sur les échantillons moyens

**TABEAU 4 : Composition en acides gras de la matière grasse du lait (g/100 g AG totaux).**

**TABLE 4 : Fatty acid composition of the milk fat (g/100 g total FAs).**

## ■ Emissions de méthane

Comme le montre le tableau 5, la ration DUR, plus riche en amidon et en MG, a permis de réduire les émissions de méthane des vaches. Les prédictions établies à partir du spectre MIR du lait (VANLIERDE *et al.*, 2016) estiment la diminution à 12% du méthane émis par jour et à 4% du méthane produit par kg de lait standard. Cependant, parmi les équations proposées par CHILLIARD *et al.* (2009) pour des rations complémentées avec des graines de lin, celle qui se base sur la somme des AG à 18 C prédit une baisse de 22% pour le méthane journalier et de 15% pour le méthane émis par kg de lait standard.

## ■ Efficience azotée des rations et rejet d'azote urinaire

Bien que la diminution de l'ingestion de N de 18,5% avec la ration DUR ait entraîné une réduction de

	CTL	DUR	ESM <sup>(1)</sup>	P valeur
Méthode du spectre MIR du lait (VANLIERDE <i>et al.</i> , 2016)				
CH <sub>4</sub> (g/j)	484,1	426,2	16,70	<0,01
CH <sub>4</sub> (g/kg lait standard)	16,5	15,8	1,05	0,05
Méthode de la somme des AG à 18 C du lait <sup>(2)</sup> (CHILLIARD <i>et al.</i> , 2009)				
CH <sub>4</sub> (g/j)	461,6	361,2	7,74	<0,001
CH <sub>4</sub> (g/kg lait standard)	16,2	13,7	2,19	<0,001

1 : Erreur standard sur la moyenne  
2 : CH<sub>4</sub> (g/j) = - 8,72 x %C18 + 729

**TABLEAU 5 : Prédictions des émissions de méthane selon 2 méthodes.**

TABLE 5 : *Estimated methane emissions (according to 2 methodologies).*

**5,8% de la sécrétion de N dans le lait, il en a résulté une amélioration de 15,5% de l'efficacité azotée de la ration mesurée par le rapport N lait/N ingéré** (respectivement 27,42% et 31,68% pour les rations CTL et DUR ; tableau 6). En estimant l'excrétion de N fécal par l'équation proposée par HUHTANEN *et al.* (2008), nous avons pu en déduire que l'excrétion de N urinaire était diminuée de l'ordre de 38%, en passant de 240 à 148 g/j.

	CTL (moyenne ± écart-type)	DUR
Ingestion N (g/j)	589,8 ± 28,4	480,8 ± 32,0
Sécrétion d'azote dans le lait		
(g/j)	161,4 ± 6,7	151,8 ± 8,0
(% de N ingéré)	27,4 ± 1,6	31,7 ± 1,8
N fécal <sup>(1)</sup> (g/j)	187,3 ± 7,0	179,7 ± 7,2
N urinaire <sup>(2)</sup> (g/j)	240,0 ± 15,9	148,3 ± 5,9

1 : N fécal = - 28 + 9,9 x MSing (HUHTANEN *et al.*, 2008)  
2 : estimé par : N urinaire = N ingéré - N sécrété dans le lait - N fécal

**TABLEAU 6 : Efficacité azotée des 2 rations comparées et prédiction de l'excrétion d'azote fécal et urinaire par les vaches.**

TABLE 6 : *Effect of diet on cow nitrogen efficiency (actual) and fecal and urinary nitrogen excretion (predicted).*

### 3. Discussion

#### ■ Performances zootechniques

**La réduction de la teneur en protéines de la ration DUR a permis de supprimer l'apport de tourteau de soja et d'augmenter l'autonomie alimentaire potentielle de cette ration.** Ceci constitue non seulement un levier de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) mais aussi une source d'économie étant donné le coût généralement élevé des suppléments protéiques (BRODERICK, 2003).

**La petite diminution d'ingestion de MS, observée pour la ration DUR, peut être expliquée par le rapport PDIE/UFL plus faible.** Selon la loi de réponse établie par VÉRITÉ et DELABY (2000), la réduction de ce rapport de 114,2 g pour la ration CTL à 96,9 g pour la ration DUR devrait diminuer l'ingestion de MS de l'ordre de 600 g/j, ce qui est proche de notre observation. MONTEILS *et al.* (2002)

et BRODERICK (2003) observèrent aussi une plus petite ingestion de MS pour les rations les moins riches en protéines, contrairement à OLMOS COLMENERO et BRODERICK (2006) et CUNNINGHAM *et al.* (1996).

Comme FOCANT *et al.* (1998) l'avaient déjà observé pour une ration enrichie en graines de lin et de colza, **les TB et TP du lait ont été significativement plus faibles pour la ration DUR.** En ce qui concerne le TB, **deux facteurs peuvent être incriminés.** D'une part, la substitution des pulpes de betteraves par l'orge a accru l'apport d'amidon rapidement dégradable dans la ration DUR. Ce dernier favorise la diminution du rapport acétate/propionate dans le rumen et du TB du lait (LINN, 1988). D'autre part, les régimes comportant des glucides hautement fermentescibles et/ou des suppléments oléagineux peuvent être responsables du syndrome de chute du TB, appelé aussi *milk fat depression* (MFD) (BAUMAN et GRINARI, 2003 ; FERLAY *et al.*, 2013). Comme l'ont démontré MAXIN *et al.* (2011) en l'infusant directement dans le rumen, le t10 c12 CLA est la principale cause de la MFD. SHINGFIELD *et al.* (2010) ont aussi induit une baisse du TB en infusant du t10 C18:1 à forte dose. Suite à l'apport supplémentaire d'orge riche en amidon rapidement fermentescible et de graines de lin dans la ration DUR, le taux de t10 C18:1 a été augmenté de 173%. Ceci est sans doute en relation avec la baisse de TB observée. Enfin, plusieurs études ont montré qu'une diminution du pourcentage de protéines dans la ration pouvait être associée à une baisse du TB, sans pouvoir l'expliquer (CUNNINGHAM *et al.*, 1996 ; OLMOS COLMENERO et BRODERICK, 2006).

Comme pour le TB, la baisse de TP provoquée par la ration DUR a plusieurs causes possibles. DEPETERS et CANT écrivaient déjà en 1992 que **l'apport de graines oléagineuses dans la ration peut provoquer une diminution du TP.** Cet effet fut notamment observé par FOCANT *et al.* (1998) et par HURTAUD *et al.* (2010) avec une supplémentation en graines de lin, et par BENCHAAAR *et al.* (2015) avec de l'huile de lin. En revanche, pour des apports lipidiques similaires, ni MARTIN *et al.* (2008), ni LIVINGSTONE *et al.* (2015) n'enregistrèrent d'effet des graines de lin extrudées sur le TP. **Il est possible que l'effet de l'apport de MG dépende de la ration de base.** En effet, LOOR *et al.* (2005) observèrent qu'un apport d'huile de lin à une ration riche en fourrages diminuait le TP tandis que le même complément apporté à une ration riche en concentrés l'augmentait. Par ailleurs, une loi de réponse entre le rapport PDIE/UFL de la ration et le TP du lait a été établie par VÉRITÉ et DELABY (2000). Selon ces auteurs, la diminution de PDIE/UFL dans la ration DUR par rapport à la ration CTRL aurait dû abaisser le TP de 0,55 g/kg de lait alors qu'elle est de 1,10 g/kg dans notre expérimentation. EMERY (1978) estimait aussi que le TP augmentait de 0,02% pour chaque % d'augmentation de MAT dans la ration. Il est possible que l'écart entre notre observation et les prévisions basées sur les équations d'EMERY (1978) et de VÉRITÉ et DELABY (2000) résulte d'un apport limitant en LysDI (respectivement 6,90 et 6,67%PDIE pour les rations CTL et DUR ; Inration 4.07) provoqué par la suppression du tourteau de soja. OLMOS COLMENERO et BRODERICK (2006) ont enregistré une différence de TP de 0,9 g/kg pour des rations à 13,5 et 17,9% de MAT, ce qui est proche de notre résultat.

## ■ Composition du lait en acides gras

L'effet des graines de lin sur la composition du lait en AG est bien documenté dans la littérature. Pour des apports équivalents de graines de lin extrudées dans des rations à base d'ensilage de maïs, FOCANT *et al.* (1998) et FERLAY *et al.* (2013) observèrent des effets sur les teneurs en AG du lait similaires à ceux rapportés dans cette expérience : augmentation des AG insaturés totaux, des CLA et des oméga-3. **La composition en AG du lait DUR correspond à celle du lait produit par des vaches consommant une ration composée de 100% d'herbe jeune et fraîche**, riche en acide alpha linoléique comme l'huile de lin (COUVREUR *et al.*, 2006).

## ■ Emissions de méthane

MOHAMED *et al.* (2011) ont recherché un modèle de prédiction des émissions de méthane pour des rations contenant des graines oléagineuses. Ils ont aussi comparé leurs résultats à ceux estimés à partir des équations de CHILLIARD *et al.* (2009) et de DIJKSTRA *et al.* (2011). Ils purent confirmer la corrélation positive de l'ingestion des fourrages et négative du taux de propionate ruminal sur la production de CH<sub>4</sub> (g/j). Pour les vaches ingérant une ration à base d'ensilage d'orge immature et d'orge floconnée, ces auteurs ont conclu que les équations proposées par CHILLIARD *et al.* (2009) surestimaient la production de méthane de l'ordre de 40% par rapport à leurs mesures en chambre respiratoire. Pour la même ration complétée avec 9,3% de graines de lin, la surestimation était de l'ordre de 12%. Ces différences s'expliquent peut-être par la teneur en amidon plus élevée dans les rations de MOHAMED *et al.* Bien qu'aucun modèle de prédiction ne soit aussi précis qu'une mesure directe de la production de méthane, nous avons pu évaluer que **la ration DUR a diminué la production journalière de méthane d'un pourcentage compris entre 12 et 22 en fonction de l'équation utilisée**. Pour un niveau de production de lait équivalent au nôtre, MOHAMED *et al.* (2011) avaient enregistré une diminution des émissions de méthane de 17%, ce qui corrobore nos estimations. Par rapport aux fibres, la fermentation de l'amidon dans le rumen limite les émissions de méthane grâce à la plus grande production de propionate (BANNINK *et al.*, 2006). Cependant, pour des apports d'amidon comparables à la ration DUR, ni PIRONDINI *et al.* (2015), ni HATEW *et al.* (2014) n'ont pu mettre en évidence un effet significatif d'une augmentation du pourcentage d'amidon au détriment des pulpes de betteraves, sur la production de méthane par kg de MS ingéré. **Les graines de lin extrudées constituent donc probablement le facteur principal expliquant la réduction de l'émission de méthane prédite pour la ration DUR**.

## ■ Efficacité azotée et rejets d'azote

Il est bien établi que, lorsque la teneur en MAT de la ration augmente, la quantité de protéines dégradées dans le rumen s'accroît aussi. Lorsque celle-ci dépasse les besoins des micro-organismes, l'excès de NH<sub>3</sub> produit est

absorbé dans le sang, transformé en urée dans le foie pour être excrété dans l'urine. Dans le lisier, l'urée urinaire peut être rapidement hydrolysée en NH<sub>3</sub> qui est perdu par volatilisation dans l'environnement (MUCK, 1982 ; DIJKSTRA *et al.*, 2013). De plus, la transformation de l'ammonium en nitrate, par nitrification, est une source de N<sub>2</sub>O (CHADWICK *et al.*, 2011). Dans notre expérience, l'excrétion de N urinaire a été estimée par différence entre le N ingéré et la somme du N produit dans le lait et du N fécal. Ce dernier, estimé à partir d'une équation proposée par HUHTANEN *et al.* (2008), est proche des valeurs fécales mesurées par OLMOS COLMENERO et BRODERICK (2006) ou KAUFFMAN et SAINT-PIERRE (2001). Selon JOHNSON *et al.* (2016), la plupart des équations prédictives des rejets de N fécal chez les vaches laitières publiées dans la littérature présentent de faibles niveaux d'erreur et une précision acceptable. Pour l'estimation de l'excrétion de N urinaire, nous avons négligé l'azote retenu. En effet, la prise moyenne de poids (de l'ordre de 350 g/j) était faible et équivalente pour les deux régimes. La précision des pesées n'étant pas satisfaisante et la plus grande partie de la composition du gain de poids vif étant constituée d'eau et de graisse, nous avons préféré ne pas tenir compte d'une éventuelle fixation d'azote dans le bilan azoté. La diminution de l'excrétion de N urinaire de 92 g/j estimée suite à la réduction de l'ingestion d'azote avec la ration DUR n'est pas étonnante. Selon VÉRITÉ et DELABY (2000), l'excrétion journalière de N urinaire augmente de façon linéaire avec le rapport PDI/UFL, à la vitesse de 30 g N par vache par accroissement de 10 g du rapport PDI/UFL. Entre les rations CTL et DUR, nous avons une différence de 17,3 g PDIE/UFL qui aurait dû entraîner une diminution de 51,9 g N urinaire. Toutefois, avec des ingestions de N et des productions de lait très proches des nôtres, KAUFFMAN et SAINT-PIERRE (2001) ont mesuré une diminution de N urinaire de 90 g par vache et par jour entre des rations à 16,7% et 13,5% de MAT. Ces résultats sont, en tous points, semblables aux nôtres. Enfin, on reproche souvent aux vaches laitières d'être de piètres transformatrices des protéines alimentaires. En général, moins de 30% du N ingéré est retenu dans le lait mais la réduction des quantités de N ingéré augmente la proportion de N excrété dans le lait (CASTILLO *et al.*, 2000 ; CALSAMIGLIA *et al.*, 2010). **La diminution des apports de N dans la ration DUR a permis d'accroître l'efficacité azotée (N lait/N ingéré) de 27,4% à 31,7%**. Cette amélioration a la même ampleur que celles observées par OLMOS COLMENERO et BRODERICK (2006) et KAUFFMAN et SAINT-PIERRE (2001) pour des productions laitières et des différences d'ingestion de N équivalentes.

## Conclusion

L'originalité de cette étude réside dans la démonstration que plusieurs facteurs de durabilité pouvaient être améliorés dans une même ration. Le concept développé repose sur la valorisation de fourrages (ensilages de maïs et d'herbe préfanée) et de concentrés (tourteau de colza, céréales) produits localement, sur une alimentation de précision au regard des besoins protéiques des animaux (< 100 g PDI/UFL) et sur la fourniture d'un supplément de

graines de lin extrudées aux animaux. Sur base des estimations effectuées dans ce travail, l'optimisation de la ration sur ces principes a non seulement permis d'améliorer la qualité nutritionnelle du lait mais a aussi réduit, de manière très significative, les rejets d'azote et les émissions de méthane entérique, en comparaison avec une ration classique, et cela sans altérer le niveau de production.

Accepté pour publication,  
le 17 août 2017

**Remerciements :** Nous tenons à remercier le personnel de l'unité de nutrition animale et durabilité du CRAW, et en particulier François Rouelle, et celui de l'Institut des Sciences de la Vie de l'UCL, et en particulier Cécile Gardin, pour leur participation au bon déroulement de l'expérience. Ce travail a été financé par le Gouvernement de la Région Wallonne, en collaboration avec la S.A. Dumoulin.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AOAC - ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (1995) : *Official methods of analysis*, vol. 2, 16<sup>th</sup> edition, AOAC International, Arlington, VA, USA.
- BANNINK A., KOGUT J., DIJKSTRA J., FRANCE J., KEBREAB E., VAN VUUREN A.M., TAMMINGA S. (2006) : «Estimation of the stoichiometry of volatile fatty acid production in the rumen of lactating cows», *J. Theor. Biol.*, 238, 36-51.
- BAUMAN D.E., GRIINARI J.M. (2003) : «Nutritional regulation of milk fat synthesis», *Annual Review of Nutrition*, 23, 203-227.
- BENCHAAR C., HASSANAT F., MARTINEAU R., GERVAIS R. (2015) : «Linseed oil supplementation to dairy cows fed diets based on red clover silage or corn silage: Effects on methane production, rumen fermentation, nutrient digestibility, N balance, and milk production», *J. Dairy Sci.*, 98, 7993-8008.
- BRODERICK G. A. (2003) : «Effects of varying dietary protein and energy levels on the production of lactating dairy cows», *J. Dairy Sci.*, 86, 1370-1381.
- CALSAMIGLIA S., FERRET A., REYNOLDS C.K., KRISTENSEN N.B., VAN VUUREN A.M. (2010) : «Strategies for optimizing nitrogen use by ruminants», *Animal*, 4, 1184-1196.
- CASTILLO A.R., KEBREAB E., BEEVER D.E., FRANCE J. (2000) : «A review of efficiency of nitrogen utilisation in lactating dairy cows and its relationship with environmental pollution», *J. Animal and Feed Sci.*, 9, 1-32.
- CHADWICK D., SOMMER S., THORMAN R., FANGUEIRO D., CARDENAS L., AMON B., MISSELBROOK T. (2011) : «Manure management: implications for greenhouse gas emissions», *Animal Feed Science and Technology*, 166-167, 514-531.
- CHILLIARD Y., FERLAY A., DOREAU M. (2001) : «Contrôle de la qualité nutritionnelle des matières grasses du lait par l'alimentation des vaches laitières: acides gras *trans*, polyinsaturés, acide linoléique conjugué», *INRA Prod. Anim.*, 14, 323-335.
- CHILLIARD, Y., MARTIN C., ROUEL J., DOREAU M. (2009) : «Milk fatty acids in dairy cows fed whole crude linseed, extruded linseed, or linseed oil, and their relationship with methane output», *J. Dairy Sci.*, 92, 5199-5211.
- COUVREUR S., HURTAUD C., LOPEZ C., DELABY L., PEYRAUD J.L. (2006) : «The linear relationship between the proportion of fresh grass in the cow diet, milk fatty acid composition, and butter properties», *J. Dairy Sci.*, 89, 1956-1969.
- CUNNINGHAM K.D., CECAVA M.J., JOHNSON T.R., LUDDEN P.A. (1996) : «Influence of source and amount of dietary protein on milk yield by cows in early lactation», *J. Dairy Sci.*, 79, 620-630.
- DANG VAN Q.C., FOCANT M., DESWYSEN D., MIGNOLET E., TURU C., POTTIER J., FROIDMONT E., LARONDELLE Y. (2008a) : «Influence of an increase in diet structure on milk conjugated linoleic acid content of cows fed extruded linseed», *Animal*, 2, 1538-1547.
- DANG VAN Q.C., FOCANT M., FROIDMONT E., LARONDELLE Y. (2008b) : «Amélioration du profil en acides gras et de la teneur en CLA du lait de vache par l'apport de graines extrudées de lin et/ou de colza», *Renc. Rech. Ruminants*, 15, 294.
- DANG VAN Q.C., FOCANT M., MIGNOLET E., TURU C., FROIDMONT E., LARONDELLE Y. (2011a) : «Influence of the diet structure on ruminal biohydrogenation and milk fatty acid composition of cows fed extruded linseed», *Animal Feed Science and Technology*, 169, 1-10.
- DANG VAN Q. C., BEJARANO L., MIGNOLET E., COULMIER D., FROIDMONT E., LARONDELLE Y., FOCANT M. (2011b) : «Effectiveness of extruded rapeseed associated with an alfalfa protein concentrate in enhancing the bovine milk fatty acid composition», *J. Dairy Sci.*, 94, 4005-4015.
- DE BRABANDER D., DE CAMPENEERE S., RYCKAERT I., ANTHONISSEN A. (2011) : *Melkveevoeding, ILVO Mededeling*, 101, Ed. Vlaamse overheid, Brussel.
- DEPETERS E.J., CANT J.P. (1992) : «Nutritional factors influencing the nitrogen composition of bovine milk: a review», *J. Dairy Sci.*, 75, 2043-2070.
- DIJKSTRA J., VAN ZIJDERVELD S.M., APAJALAHTIC J.A., BANNINK A., GERRITSA W.J.J., NEWBOLD J.R., PERDOKB H.B., BERENDSA H. (2011) : «Relationships between methane production and milk fatty acid profiles in dairy cattle», *Animal Feed Science and Technology*, 166-167, 590-595.
- DIJKSTRA J., OENEMA O., VAN GROENIGEN J.W., SPEK J.W., VAN VUUREN A.M., BANNINK A. (2013) : «Diet effects on urine composition of cattle and N<sub>2</sub>O emissions», *Animal*, 7, 292-302.
- DOLLÉ J.B., AGABRIEL J., PEYRAUD J.L., FAVERDIN P., MANNEVILLE V., RAISON C., GAC A., LE GALL A. (2011) : «Les gaz à effet de serre en élevage bovin : évaluation et leviers d'action», *INRA Prod. Anim.*, 24, 415-432.
- 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.
- EDOUARD N., HASSOUNA M., ROBIN P., FAVERDIN P. (2016) : «Low degradable protein supply to increase nitrogen efficiency in lactating dairy cows and reduce environmental impacts at barn level», *Animal*, 1, 1-9.
- EMERY R.S. (1978) : «Feeding for milk protein», *J. Dairy Sci.*, 61, 825-828.
- FERLAY A., DOREAU M., MARTIN C., CHILLIARD Y. (2013) : «Effects of incremental amounts of extruded linseed on the milk fatty acid composition of dairy cows receiving hay or corn silage», *J. Dairy Sci.*, 96, 6577-6595.
- FOCANT M., MIGNOLET E., MARIQUE M., CLABOTS F., BREYNE T., DALEMANS D., LARONDELLE Y. (1998) : «The effect of vitamin E supplementation of cow diets containing rapeseed and linseed on the prevention of milk fat oxidation», *J. Dairy Sci.*, 81, 1095-1101.
- HATEW B., PODESTA S.C., VAN LAAR H., PELLIKAAAN W.F., ELLIS J.L., DIJKSTRA J., BANNINK A. (2014) : «Effects of dietary starch content and rate of fermentation on methane production in lactating dairy cows», *J. Dairy Sci.*, 98, 486-499.
- HUHTANEN P., NOUSIAINEN J.I., RINNE M., KYTÖLÄ K., KHALILI H. (2008) : «Utilization and Partition of Dietary Nitrogen in Dairy Cows Fed Grass Silage-Based Diets», *J. Dairy Sci.*, 91, 3589-3599.
- HURTAUD C., FAUCON F., COUVREUR S., PEYRAUD J.L. (2010) : «Linear relationship between increasing amounts of extruded linseed in dairy cow diet and milk fatty acid composition and butter properties», *J. Dairy Sci.*, 93, 1429-1443.

- JOHNSON A.C.B., REED K.F., KEBREAB E. (2016) : «Evaluation of nitrogen excretion equations from cattle», *J. Dairy Sci.*, 99, 7669-7678.
- KALSCHER K.F., VANDERSALL J.H., ERDMAN R.A., KOHN R.A., RUSSEK-COHEN E. (1999) : «Effects of Dietary Crude Protein Concentration and Degradability on Milk Production Responses of Early, Mid, and Late Lactation Dairy Cows», *J. Dairy Sci.*, 82, 545-554.
- KAUFFMAN A.J., ST-PIERRE N.R. (2001) : «The relationship of milk urea nitrogen to urine nitrogen excretion in Holstein and Jersey cows», *J. Dairy Sci.*, 84, 2284-2294.
- KEBREAB E., FRANCE J., BEEVER D.E., CASTILLO A.R. (2001) : «Nitrogen pollution by dairy cows and its mitigation by dietary manipulation», *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 60, 275-285.
- LIVINGSTONE K. M., HUMPHRIES D.J., KIRTON P., KLIEM K.E., GIVENS D.I., REYNOLDS C.K. (2015) : «Effects of forage type and extruded linseed supplementation on methane production and milk fatty acid composition of lactating dairy cows», *J. Dairy Sci.*, 98, 4000-4011.
- LINN J.G. (1988) : «Factors Affecting the Composition of Milk from Dairy Cows», *Designing Foods: Animal Product Options in the Marketplace*, Washington D.C.: National Academy Press, 224-241.
- LOOR J.J., FERLAY A., OLLIER A., DOREAU M., CHILLIARD Y. (2005) : «Relationship among trans and conjugated fatty acids and bovine milk fat yield due to dietary concentrate and linseed oil», *J. Dairy Sci.*, 88, 726-740.
- MARTIN C., ROUEL J., JOUANY J.P., DOREAU M., CHILLIARD Y. (2008) : «Methane output and diet digestibility in response to feeding dairy cows crude linseed, extruded linseed, or linseed oil», *J. Anim. Sci.*, 86, 2642-2650.
- MAXIN G., GLASSER F., HURTAUD C., PEYRAUD J.L., RULQUIN H. (2011) : «Combined effects of *trans*-10,*cis*-12 conjugated linoleic acid, propionate and acetate on milk fat yield and composition in dairy cows», *J. Dairy Sci.*, 94, 2051-2059.
- MENSINK R.P., ZOCK P.L., KESTER A.D.M., KATAN M.B. (2003) : «Effects of dietary fatty acids and carbohydrates on the ratio of serum total to HDL cholesterol and on serum lipids and apolipoproteins: a meta-analysis of 60 controlled trials», *Am. J. Clin. Nutr.*, 77, 1146-1155.
- MOHAMED R., MCGINN S.M., BEAUCHEMIN K.A. (2011) : «Prediction of enteric methane output from milk fatty acid concentrations and rumen fermentation parameters in dairy cows fed sunflower, flax, or canola seeds», *J. Dairy Sci.*, 94, 6057-6068.
- MONTEILS V., JURJANZ S., BLANCHART G., LAURENT F. (2002) : «Nitrogen utilisation by dairy cows fed diets differing in crude protein level with a deficit in ruminal fermentable nitrogen», *Reprod. Nutr. Dev.*, 42, 545-557.
- MUCK R.E. (1982) : «Urease activity in bovine feces», *J. Dairy Sci.* 65, 2157-2163.
- OLMOS COLMENERO J.J., BRODERICK G.A. (2006) : «Effect of Dietary Crude Protein Concentration on Milk Production and Nitrogen Utilization in Lactating Dairy Cows», *J. Dairy Sci.*, 89, 1704-1712.
- PARODI P.W. (2005) : «Dairy product consumption and the risk of breast cancer», *J. Am. Coll. Nutr.*, 24, 556S-568S.
- PEYRAUD J.L., AGABRIEL J., BENOIT M., DUHEM K., LAGRIFOUL G., LEGARTO J., MORIN E. (2013) : «Vers des systèmes d'élevage de ruminants à hautes performances», *Renc. Rech. Ruminants*, 20, 21-30.
- PIRONDINI M., COLOMBINI S., MELE M., MALAGUTTI L., RAPETTI L., GALASSI G., CROVETTO G.M. (2015) : «Effect of dietary starch concentration and fish oil supplementation on milk yield and composition, diet digestibility, and methane emissions in lactating dairy cows», *J. Dairy Sci.*, 98, 357-372.
- SHINGFIELD K.J., CHILLIARD Y., TOIVONEN V., KAIRENIUS P., GIVENS D.I. (2008) : «*Trans* fatty acids and bioactive lipids in ruminant milk», *Adv. Exp. Med. Biol.*, 606, 3-65.
- SHINGFIELD K.J., BERNARD L., LEROUX C., CHILLIARD Y. (2010) : «Role of trans fatty acids in the nutritional regulation of mammary lipogenesis in ruminants», *Animal*, 4, 1140-1166.
- SOYEURT H., DEHARENG F., GENGLER N., MCPARLAND S., WALL E., BERRY D.P., COFFEY M., DARDENNE P. (2011) : «Mid-infrared prediction of bovine milk fatty acids across multiple breeds, production systems, and countries», *J Dairy Sci.*, 94, 1657-1667.
- VANLIERDE A., VANROBAYS M.L., GENGLER N., DARDENNE P., FROIDMONT E., SOYEURT H., MCPARLAND S., LEWIS E., DEIGHTON M., MATHOT M., DEHARENG F. (2016) : «Milk mid-infrared spectra enable prediction of lactation-stage dependent methane emissions of dairy cattle within routine population-scale milk recording schemes», *Animal Prod. Sci.*, 56, 258-264.
- VÉRITÉ R., DELABY L. (2000) : «Relation between nutrition, performances and nitrogen excretion in dairy cows», *Ann. Zoot.*, 49, 217-230.