HAL
open science

Maîtrise par l'alimentation des teneurs en acides gras et en composés vitaminiques du lait de vache

Anne Ferlay, Benoit Graulet, Yves Y. Chilliard

To cite this version:

Anne Ferlay, Benoit Graulet, Yves Y. Chilliard. Maîtrise par l'alimentation des teneurs en acides gras et en composés vitaminiques du lait de vache. INRA Productions Animales, 2013, 26 (2), pp.177-192. hal-02642658

HAL Id: hal-02642658

https://hal.inrae.fr/hal-02642658

Submitted on 28 May 2020

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

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

INRA Prod. Anim.,
2013, 26 (2), 177-192

Maîtrise par l'alimentation des teneurs en acides gras et en composés vitaminiques du lait de vache

A. FERLAY[1,2], B. GRAULET[1,2], Y. CHILLIARD[1,2]
[1] INRA, UMR1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France
[2] Clermont Université VetAgro Sup, UMR1213 Herbivores, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France
Courriel : anne.ferlay@clermont.inra.fr

La composition en acides gras et en vitamines du lait de vache a un rôle prépondérant pour sa qualité nutritionnelle. Cet article présente les principaux facteurs alimentaires influençant leurs teneurs.

Des recommandations alimentaires ont été établies pour des populations en bonne santé menant une vie « normale » par des comités d'experts (FAO 2001). En France, en 2010, l'Afssa[1] a réactualisé les Apports Nutritionnels Conseillés (ANC) en lipides suite à l'obtention de nouvelles données scientifiques chez l'Homme (Legrand *et al* 2010). Les ANC sont exprimés en fonction de l'Apport Energétique (AE) qui est corrélé aux risques de pathologies telles que le syndrome métabolique, l'obésité, les maladies cardiovasculaires. De nouveaux ANC ont été définis pour certains Acides Gras (AG) tels que les AG saturés (AGS), les AG polyinsaturés (AGPI) oméga 3 et les AG *trans*. En effet, une consommation excessive d'AGS (notamment les C12:0, C14:0 et C16:0) augmente le taux plasmatique du cholestérol LDL (transporté par des lipoprotéines de faible densité) un marqueur prédictif du risque des maladies cardiovasculaires (Mensink *et al* 2003). Les AGPI ω 3 ont des effets antiathérogènes et antidépressifs, l'effet du C18:3n-3 serait médié notamment par sa conversion en AG longs ω 3 (Legrand *et al* 2010). Par ailleurs, d'autres AGPI tels que les acides linoléiques conjugués (« *Conjugated Linoleic Acid* », CLA) présentent des propriétés anticancérigènes ou antilipogéniques sur modèles animaux ou sur des lignées cellulaires humaines (Shingfield *et al* 2008). Alors que l'effet délétère de certains AG monoinsaturés (AGMI) *trans* a été démontré (Willett *et al* 1993), des études épidémiologiques récentes n'ont pas prouvé que l'isomère principal du C18:1 présent dans le lait (C18:1-*t*11) soit associé au risque d'apparition de maladies cardiovasculaires (Bassett *et al* 2010).

Dans la plupart des pays européens, le lait et les produits laitiers tiennent une place importante dans l'alimentation humaine puisqu'ils apportent 40% du total des AGS consommés (Givens 2010). Il est donc important de connaître les facteurs de variation de la composition en AG de la Matière Grasse Laitière (MGL). Ils sont d'ordre génétique (génotype, race), physiologique (stade de lactation, parité) ou environnemental (saison, alimentation) (Palmquist *et al* 1993, Chilliard *et al* 2007). L'effet des facteurs alimentaires est quantitativement le plus grand. La caractérisation précise de leurs effets est importante en vue de la mise en place probable d'un système de paiement à la qualité fondé sur les teneurs en AG. De plus, l'évolution en matière d'étiquetage des produits alimentaires (directive 2008/100/CEE modifiant la 90/496/CEE) demande que la valeur énergétique des aliments, ainsi que les teneurs en lipides et en AGS, protéines, glucides et sel soient indiquées à partir de 2014. Ainsi, les filières laitières se préparent à cette nouvelle démarche. La détermination de la composition en AG du lait et des produits laitiers intéresse donc l'ensemble de la filière laitière, en raison de leur diversité, de leur variabilité et de leurs effets potentiels respectifs sur la santé humaine.

Le lait contient naturellement l'ensemble des vitamines (tableau 1) et selon les pratiques alimentaires des consommateurs, le lait de vache et les produits laitiers sont parmi les premiers contributeurs aux apports journaliers recommandés des formes A, D, B_2, B_5, B_9 et B_{12} (Coudray 2011, Drewnowski 2011, Vissers *et al* 2011). Bien que les carences cliniques en vitamines soient mieux contrôlées aujourd'hui, les femmes enceintes, les bébés nourris au sein et les personnes âgées restent des sujets à risque. De plus, il est établi désormais qu'il existe une relation positive entre des apports sub-optimaux de vitamines et la prévalence de maladies chroniques dans la population humaine. Par exemple, la consommation de vitamine K est positivement corrélée à la réduction du risque de fracture de la hanche (Shea et Booth 2008). Accessoirement, la vitamine E, bien qu'en faible concentration dans le lait ou les produits laitiers, présente néanmoins un intérêt nutritionnel pour le consommateur puisque sa propriété anti-oxydante permettrait la protection des AGPI de la MGL, très sensibles à l'oxydation. Par conséquent, l'amélioration des concentrations en vitamines dans le lait de vache reste un objectif nutritionnel important. Un pré-requis pour y parvenir est de mieux connaitre les facteurs de variation de ces concentrations avant de les maîtriser. A l'heure actuelle, s'ils sont relativement bien connus pour la vitamine A (et pour ses précurseurs caroténoïdes), il n'en est pas de même pour les autres vitamines. En effet, les vitamines constituent un groupe hétérogène de composés, sur le plan de leur nature chimique, leurs origines (figure 1), leur métabolisme, leur concentration dans le lait (tableau 1) et leurs propriétés biologiques. Les concentrations des vitamines dans le

[1] Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments.

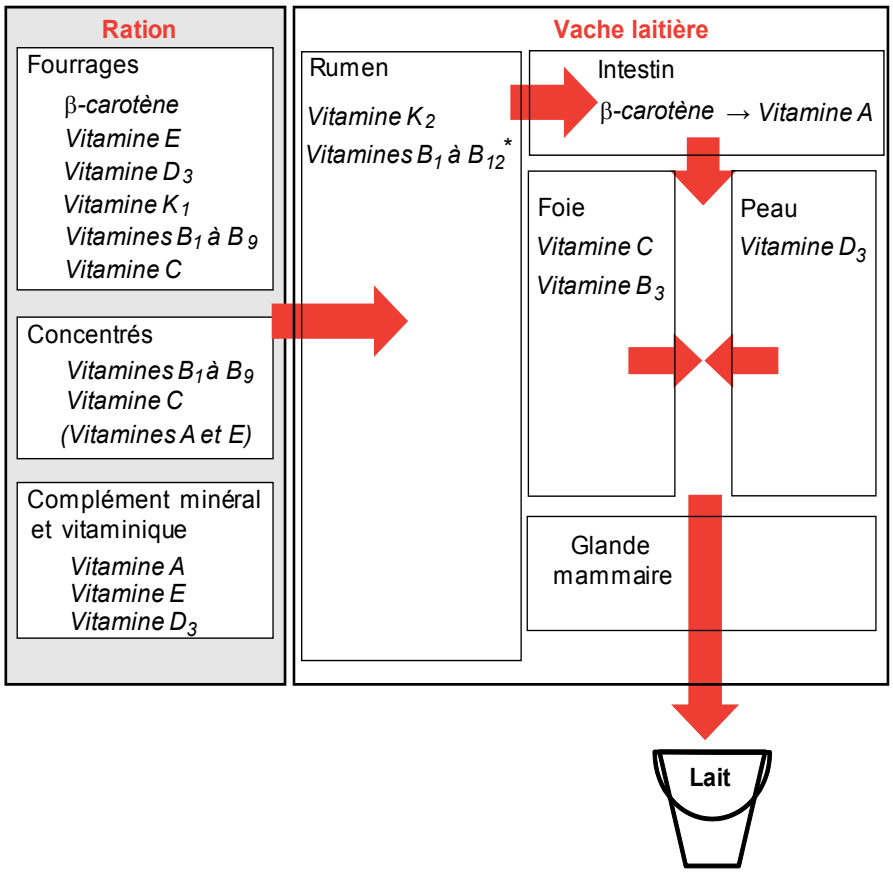
Tableau 1. *Concentrations en vitamines des laits humain et bovin[1] et contribution du lait bovin aux apports nutritionnels conseillés (ANC).*

Vitamines	Concentrations dans le lait (µg/L)				Contribution aux ANC[2] de la consommation de 250 mL de lait de bovin (%)	
	Humain		Bovin			
	min	max	min	max	min	max
A	390	600	295	520	8,2	21,7
D	0,02	0,40	0,30	10,00	0,5	50,0
E	800	3 960	700	1100	1,2	2,5
K	2,5	12,7	7,5	37,6	1,6	15,7
B_1	140	200	300	450	6,3	12,5
B_2	200	360	1 600	1 750	30,8	48,6
B_3	1 470	2 200	800	955	1,3	2,0
B_5	2 000	2 500	3 200	3 500	16,0	21,9
B_6	100	110	390	600	5,7	15,0
B_8	4	50	20	60	16,7	75,0
B_9	7	55	19	53	1,2	4,4
B_{12}	0,1	0,5	3,5	4,0	36,5	55,6
C	40 000	50 000	7 500	10 000	2,1	5,6

[1] d'après Hartman et Dryden (1965), Fournier *et al* (1987), USDA (1997, 1998, 2000 et 2001), Elder *et al* (2006), Park et Guo (2006), Kamao *et al* (2007), Pandya et Ghodke (2007), Park *et al* (2007), Raynal-Ljutovac *et al* (2008).

[2] valeurs exprimées par rapport aux ANC d'individus adultes à partir de 18 ans et + (homme ou femme ni gestante ni lactante).

Figure 1. *Origines possibles (sites de synthèse) des vitamines du lait chez la vache.* * Le rumen est à la fois le lieu de synthèse et d'utilisation/de dégradation des vitamines du groupe B par les microorganismes.



lait résultent de leur origine spécifique qui conditionne la bio-disponibilité pour l'animal et le transfert au lait, et aussi de facteurs régulateurs tels que les processus digestifs ou des besoins métaboliques de l'animal, eux-mêmes dépendants de l'état physiologique et/ou de la santé de la vache (Graulet 2010).

L'objectif de cet article est de préciser l'effet des différents facteurs alimentaires (composition de la ration, nature des fourrages, suppléments en oléagineux) sur la composition en acides gras et en vitamines du lait de vache, et de caractériser les réponses moyennes de ces composés.

1 / Origine des acides gras sécrétés dans le lait

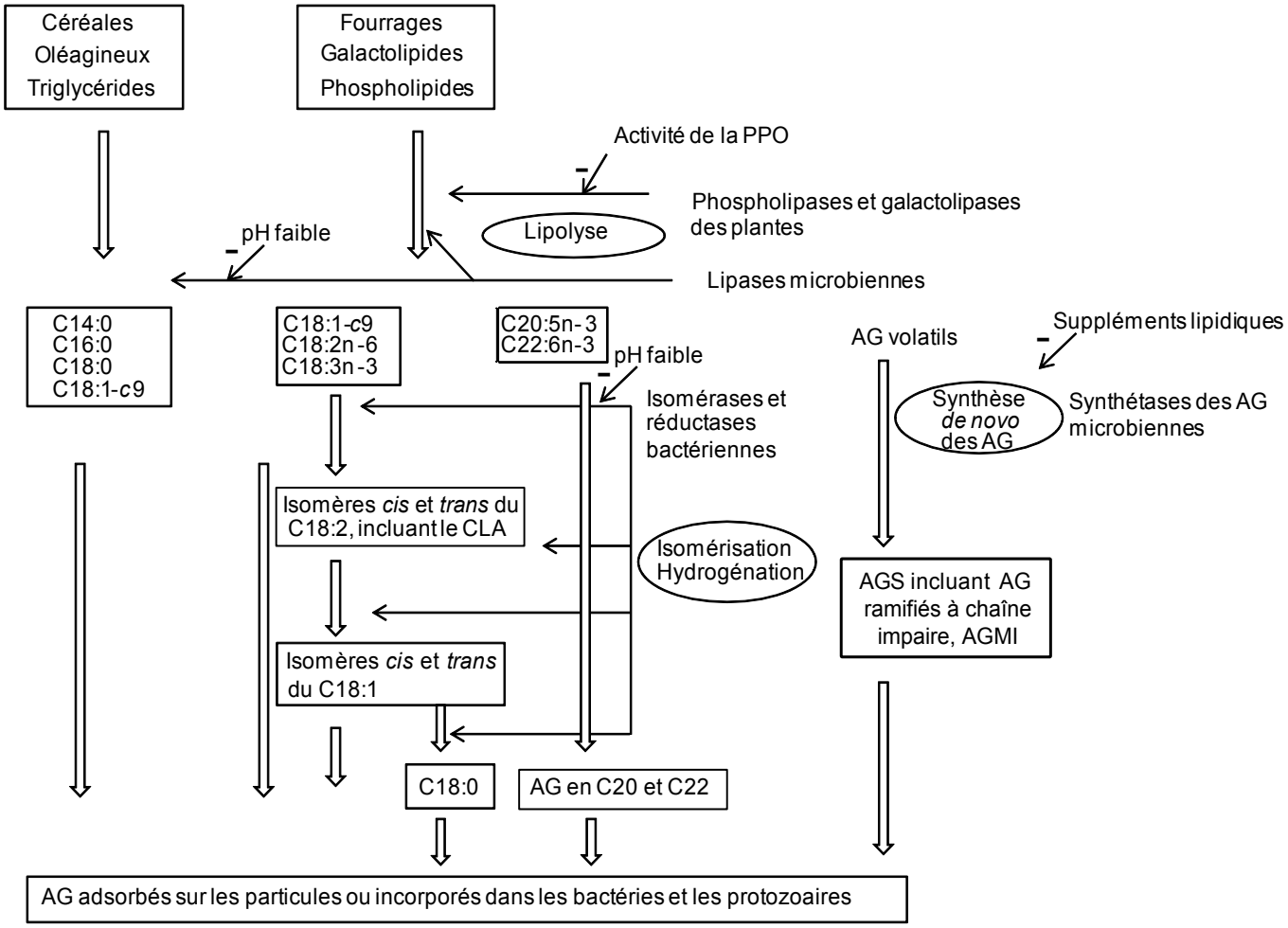
Le lait de vache contient en moyenne 40 g/kg de matière grasse, qui est constituée à 96% de triglycérides (TG), 1,1% de phospholipides, 0,5% de cholestérol et 0,02% d'esters de cholestérol (Jensen 2002). La MGL comporte environ 500 AG dont près de 150 ont été identifiés jusqu'à présent (Dreiucker et Vetter 2011). Pour des laits provenant de régimes témoins et supplémentés en lipides, elle est composée, en moyenne (minimum - maximum), à 70% d'AGS (34,9 - 78,2%), 25,6% d'AGMI (16,5 - 49,8%) et 3,3% d'AGPI (1,9 - 14,1%) et 4% d'AG *trans* (1,4 - 31,8%) (Ferlay *et al* 2008, Shingfield *et al* 2008, Coppa *et al* 2010). Cette variabilité est liée principalement aux facteurs alimentaires et à la double origine des AG sécrétés dans le lait : alimentaire ou endogène. Les régimes distribués aux vaches laitières ont une teneur faible en AG totaux (2 - 3%). Les AG les plus abondants dans la ration des ruminants sont les acides oléique (C18:1-*c*9), linoléique (C18:2n-6) et linolénique (C18:3n-3), apportés par les fourrages, les céréales ou les graines oléagineuses.

1.1 / Digestion

Le rumen est le lieu d'un métabolisme intense des lipides alimentaires, qui se déroule suivant différentes étapes (figure 2). La première correspond à la lipolyse (> 85%) des lipides alimentaires (galactolipides des fourrages, phospholipides et TG) sous l'action des lipases microbiennes et des lipases des plantes, qui aboutit à la libération d'AG libres avec une fonction carboxylique libre (Doreau *et al* 2011). Les AG libérés sont ensuite isomérisés et hydrogénés par l'activité microbienne anaérobie, qui conduit à la production du C18:0. Ce sont principalement des bactéries cellulolytiques qui sont responsables de la BioHydrogénation Ruminale (BHR), *B. fibrisolvens* étant la plus importante

Figure 2. *Principales étapes du métabolisme ruminal des lipides (d'après Doreau* et al *2011).*

AG : Acides Gras, AGMI : Acides Gras MonoInsaturés, AGS : Acides Gras Saturés, CLA : «*Conjugated Linoleic Acid*», PPO : PolyPhénol Oxydase, le signe moins (-) indique une régulation négative.



(jusqu'à présent 32 souches ont été identifiées, Buccioni *et al* 2012). La BHR des C18:2n-6 et C18:3n-3 est très intense, respectivement, de l'ordre de 80 et 90% (Doreau et Ferlay 1994). Ce mécanisme permettrait de limiter les effets toxiques des AGPI envers les bactéries ruminales et constituerait un apport souhaitable en AG pour la croissance bactérienne (Buccioni *et al* 2012). Les deux voies principales de BHR des AGPI sont les voies *t*10 et *t*11 du C18:1, cette dernière étant habituellement dominante. Mais différentes voies conduisent à d'autres isomères de position du C18:1 et du C18:2 (Chilliard *et al* 2007, Shingfield *et al* 2010, figure 3). Le pH ruminal et la composition de la ration (rapport fourrage/concentré, teneur en amidon) influencent la production d'isomères *trans* du C18:1 et du CLA. Un pH ruminal supérieur à 6 permettrait une production optimale de CLA-*c*9*t*11 car les bactéries cellulolytiques sont sensibles aux conditions acides (Martin et Jenkins 2002). Dans ce cas, la voie du *t*11 est privilégiée. A l'inverse, un pH ruminal inférieur à 6 et une teneur en amidon élevée dans la ration favoriseraient la voie du *t*10. Des données obtenues *in vitro* indiquent qu'une forte augmentation de la teneur en amidon du milieu ruminal produit une élévation des teneurs en CLA-*t*10*c*12 et en C18:1-*t*10 ainsi qu'une diminution du C18:1-*t*11 en présence de C18:2n-6 et non en présence de C18:3n-3 (Zened *et al* 2011).

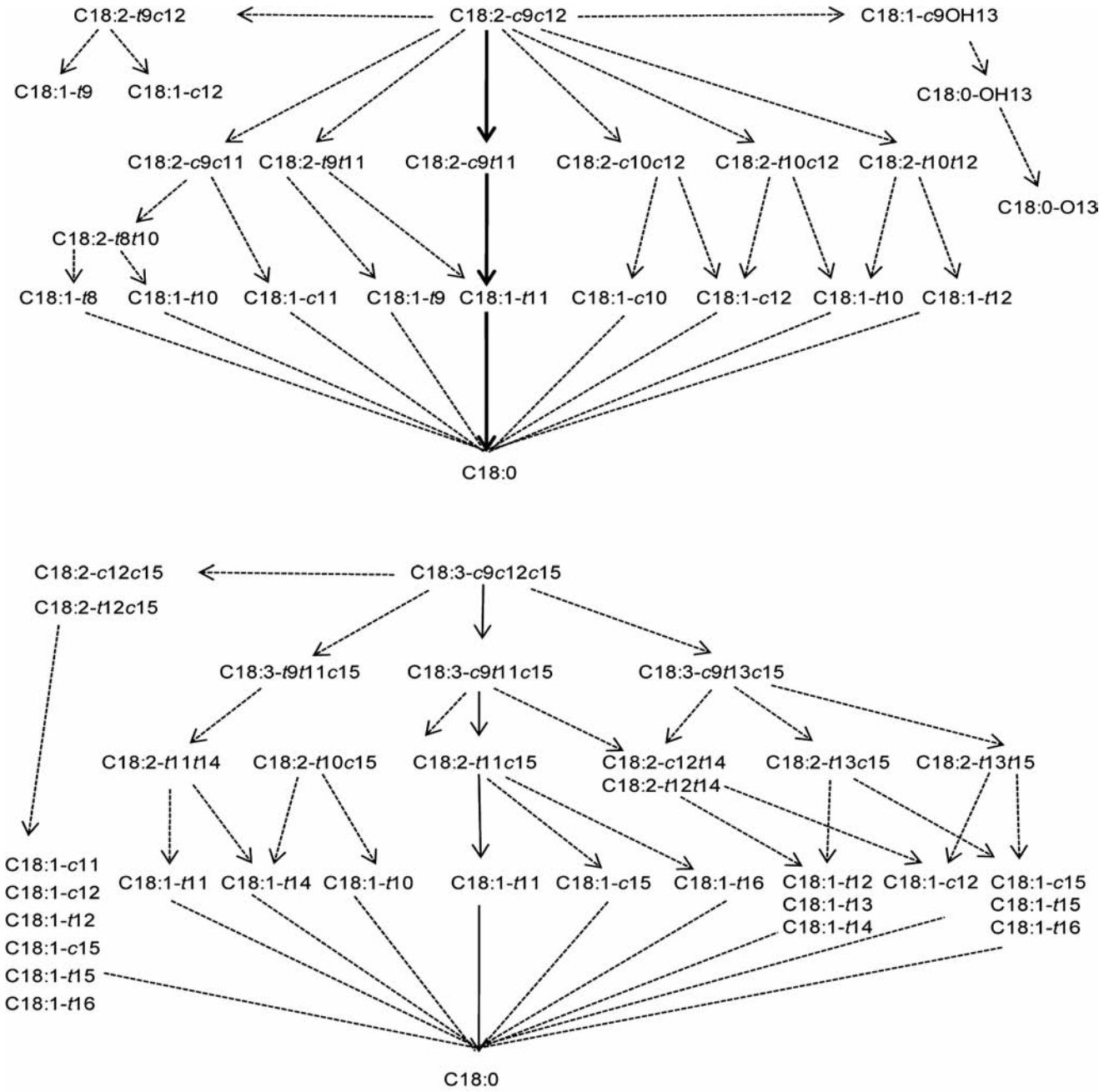
Les bactéries synthétisent *de novo* des AG ramifiés et/ou à chaîne impaire (Vlaeminck *et al* 2006). Les AG à chaîne impaire sont synthétisés à partir de l'élongation du propionate ou du valérate. Les AG ramifiés ont pour précurseurs les acides aminés ramifiés (valine, leucine et isoleucine), ou les acides carboxyliques ramifiés à courte chaîne (acides isovalérique et isobutyrique) (Fievez *et al* 2012).

Les AG issus du métabolisme ruminal sont principalement adsorbés sur des particules alimentaires et sur des bactéries. Ils sont ensuite désorbés par les sels biliaires et les lysolécithines avant d'être solubilisés dans une phase micellaire et absorbés au niveau du tube digestif. Ils sont ensuite ré-estérifiés au niveau des cellules intestinales en TG ou phospholipides pour être sécrétés, associés aux lipoprotéines intestinales, dans la lymphe (Doreau *et al* 2011). L'efficacité de l'absorption intestinale des AG est en moyenne de 83% chez les ruminants (Schmidely *et al* 2008).

1.2 / Métabolisme mammaire

La glande mammaire prélève des AG dans le sang artériel (en moyenne 60% des AG sécrétés), principalement parmi les AG à 16 et 18 carbones, des TG véhiculés par des lipoprotéines d'origine digestive (chylomicrons et VLDL), ou libérés par les Tissus Adipeux (TA) sous forme d'AG Non-Estérifiés (AGNE), ou en partie ré-estérifiés par le foie et remis en circulation sous forme de TG véhiculés par des lipoprotéines. La glande mammaire synthétise aussi *de novo* des AG ayant de 4 à 16 carbones (en moyenne 40% des AG sécrétés), principalement à partir de précurseurs qui sont l'acétate et le β-hydroxybutyrate provenant de la fermentation ruminale des glucides

Figure 3. *Voies de biohydrogénation ruminale supposées du C18:2n-6 et du C18:3n-3 (d'après Shingfield* et al *2010).* Les lignes continues représentent les voies principales, les lignes en pointillé produisent des métabolites secondaires. Les nombreuses interconversions entre les isomères du C18:1 ne sont pas représentées.



(Chilliard *et al* 2000). La synthèse *de novo* implique deux enzymes clefs : l'acétyl-CoA carboxylase qui catalyse la formation de malonyl-CoA à partir de l'acétate, et l'acide gras synthétase qui catalyse la condensation du malonyl-CoA avec l'acétyl-CoA ou le butyryl-CoA (Barber *et al* 1997). La glande mammaire contient également l'enzyme delta-9 désaturase, qui désature environ 50% du C18:0 prélevé dans le sang en C18:1-*c*9, et 10 à 40% du C18:1-*t*11 d'origine ruminale prélevé au niveau sanguin en CLA-*c*9*t*11. Cette désaturation mammaire représente la principale source de CLA-*c*9*t*11 du lait (80-95%, Chilliard *et al* 2007) et du CLA-*t*7*c*9 (Bernard *et al* 2008). Les AG sont ensuite estérifiés en TG et sécrétés dans les globules gras.

Les isomères du CLA actuellement identifiés dans le rumen et dans la MGL (au total 32) ont une double liaison conjuguée de la position 6-8 jusqu'à 13-15 de la chaîne carbonée (Schingfield *et al* 2008). L'isomère *c*9*t*11 est majoritaire dans la MGL, suivi du *t*7*c*9 (Schingfield *et al* 2008). Des isomères conjugués de l'acide linolénique (ou CLnA pour « *conjugated linolenic acid* ») ont déjà été identifiés dans la MGL : les C18:3-*c*9*t*11*c*15 et -*c*9*t*11*t*15 (Destaillats *et al* 2005, Plourde *et al* 2007). Récemment, Lerch *et al* (2012c) ont mis en évidence pour la première fois l'isomère triène conjugué, le C18:3-*c*9*t*11*t*13.

2 / Influence des principaux facteurs alimentaires sur la composition en acides gras du lait de vache

2.1 / Effets d'une alimentation au pâturage

Les lipides de l'herbe sont représentés essentiellement par des lipides polaires : des galactolipides et des phospholipides.

Les feuilles ont une teneur plus élevée en galactolipides et en TG que les tiges (Buccioni *et al* 2012). Les facteurs influençant la composition lipidique des fourrages verts sont multiples. Les principaux sont la variété pour une espèce donnée, l'âge et le stade phénologique de la plante, le rapport feuilles/tiges, les conduites de pâturage et de récolte, et des facteurs environnementaux (longueur du jour, pluie) (Vanhatalo *et al* 2007).

L'herbe à un stade feuillu est riche en AG totaux (1 à 3% de la Matière Sèche (MS)) et en C18:3n-3 (50 à 75% des AG totaux), ce qui est le cas au début de la mise à l'herbe et lors du pâturage des repousses à l'automne, expliquant qu'un lait issu de vaches au pâturage contient plus de C18:0, C18:1-*c*9, C18:1-*t*11, CLA-*c*9*t*11 et C18:3n-3 qu'un lait produit par des vaches recevant une ration hivernale. Ces laits sont aussi plus riches en C18:2-*t*11*c*15 et en C18:2-*c*9*t*13 (produits de la BHR du C18:3n-3) et plus pauvres en AGS (Chilliard *et al* 2007).

Expérimentalement, l'augmentation progressive de la part du pâturage dans la ration (de 30 à 100%) permet d'accroître linéairement les teneurs du lait en CLA-*c*9*t*11 et C18:3n-3 et de diminuer linéairement les teneurs en AGS (10 à 16 atomes de carbone) (Couvreur *et al* 2006). Il a été aussi observé que des laits de réservoir collectés au niveau d'un département et provenant de troupeaux pâturant des prairies permanentes de montagne sont plus pauvres en C16:0 et plus riches en AGMI *trans*, en CLA-*c*9*t*11 et en C18:3n-3 que des laits de plaine produits par des vaches ingérant des rations à base d'ensilage de maïs et de pâturage (Ferlay *et al* 2008).

Des laits provenant de différentes altitudes (plaine *vs* montagne *vs* alpage) ont des compositions en AG variées (Collomb *et al* 2002, Leiber *et al* 2005). Généralement, les laits de vaches pâturant des prairies permanentes de montagne ont des concentrations plus élevées en C18:3n-3 et C18:1-*c*9, et plus faibles en AGS. Ces prairies se caractérisent par une biodiversité floristique plus importante que les prairies de plaine du fait de l'abondance de diverses plantes dicotylédones (Falchero *et al* 2010). La présence de certains métabolites secondaires tels que les terpènes ou polyphénols associés à ces plantes pourraient inhiber la BHR des AGPI, et expliquer la teneur plus élevée en C18:3n-3 (Chilliard *et al* 2007). La teneur élevée des laits de montagne en C18:1-*c*9 pourrait s'expliquer quant à elle par une mobilisation des réserves corporelles due aux températures plus faibles ou à une marche plus prolongée des animaux dans les alpages (Leiber *et al* 2005).

Des travaux récents ont montré des effets mineurs du mode de pâturage (continu *vs* tournant), de l'intensité du chargement animal et de la diversité floristique des prairies sur les grandes familles d'AG (Coppa *et al* 2011). Néanmoins, la teneur en C18:3*n*-3 est plus élevée dans les laits produits à partir de prairies plus diversifiées et pâturées avec un chargement plus faible. En revanche, le CLA-*c*9*t*11 du lait augmente avec les prairies conduites de manière plus intensive car le stade végétatif de l'herbe maintenu au stade feuillu précoce permet la production d'herbe plus riche en lipides incluant des AGPI, précurseurs des CLA. Ces différences s'expliqueraient aussi par une sélection préférentielle des plantes feuillues par l'animal. Par ailleurs, la teneur du lait en C18:1 *trans* est plus élevée avec le pâturage continu qu'avec le pâturage tournant (Coppa *et al* 2011).

Peu d'études ont présenté la distribution des isomères du CLA dans le lait de vaches au pâturage. Renna *et al* (2010) indiquent qu'après le *c*9*t*11, l'isomère *t*11*c*13 est en quantité plus importante que l'isomère *t*7*c*9. Ce résultat est en accord avec les données de Lerch *et al* (2012c) seulement quand les vaches au pâturage reçoivent un concentré ayant une teneur en amidon limitée. Dans le cas contraire, c'est l'isomère *t*7*c*9 qui devient plus important que l'isomère *t*11*c*13. Les vaches de l'étude de Renna *et al* (2010) ont reçu un concentré riche en maïs/orge ou riche en pulpes de betterave. Le lait des vaches ingérant le premier type de concentré (caractérisé par une teneur plus élevée en acide linoléique) est plus riche en isomères *t*10*c*12 et *t*10*t*12 du CLA que celui des vaches nourries avec le second type de concentré.

2.2 / Effets de la nature des fourrages conservés et du pourcentage de concentré dans la ration

L'herbe fanée a des teneurs en AG totaux et en C18:3n-3 plus faibles que l'herbe pâturée à cause de la perte relative des feuilles qui sont plus riches en lipides que les tiges et aussi par une oxydation des AG intervenant lors de la récolte (Chilliard *et al* 2010). Ainsi, les C18:2n-6 et C18:3n-3 sont convertis en hydroperoxydes sous l'action de lipoxygénases puis en composés volatils (Dewhurst *et al* 2006). Des vaches nourries au foin produisent un lait contenant de l'ordre de 2,5 g/100 g de C18:2n-6 et de 1,0 à 1,65 g/100 g de C18:3n-3 (Dewhurst *et al* 2006, Ferlay *et al* 2006). En comparant des laits de vaches nourries de foin par rapport à ceux de vaches ingérant de l'ensilage d'herbe, il apparaît peu de différences au niveau des teneurs en AGS et AGMI, mais la teneur en C18:3n-3 est plus élevée dans le premier cas à cause d'un transfert plus élevé ou d'une BHR plus faible (Dewhurst *et al* 2006).

L'ensilage de trèfle violet ou blanc, comparé à de l'ensilage de graminées, permet d'augmenter les teneurs du lait en C18:2n-6 (+ 0,4 g/100 g) et en C18:3n-3 (+ 0,6 g/100 g), et de réduire celle des AGS du C10:0 au C16:0 (-3,8 g/100 g) (Vanhatalo *et al* 2007). Des teneurs du lait en C18:3n-3 de l'ordre de 1,3 g/100 g sont observées avec l'ensilage de trèfle violet à cause d'une richesse plus importante en C18:3n-3 de la légumineuse et d'un taux de transfert de l'ensilage vers le lait plus élevé (Vanhatalo *et al* 2007). Cet effet est observé au niveau des systèmes d'élevage puisque les laits provenant d'élevages en agriculture biologique utilisant plus de légumineuses sont également plus riches en C18:3n-3 et en CLA-*c*9*t*11 que ceux d'élevages conventionnels (Chilliard *et al* 2007).

L'ensilage de maïs, pauvre en C18:3n-3 et riche en C18:2n-6 et C18:1-*c*9, produit des laits ayant de faibles teneurs en C18:3n-3 (-0,4 g/100 g) et en CLA-*c*9*t*11 (- 0,1 g/100 g), mais des teneurs plus élevées en C18:0 et C18:1-*c*9 par rapport à l'ensilage d'herbe (Chilliard et Ferlay 2004, Dewhurst *et al* 2006, Chilliard *et al* 2007). L'ensilage de luzerne, comparé à l'ensilage de maïs, augmente légèrement les teneurs du lait en C18:3n-3 (+ 0,4 g/100 g) et en CLA-*c*9*t*11 (+ 0,3 g/100 g), mais diminue celle du C16:0 (- 3,4 g/100 g) (Benchaar *et al* 2007).

Les rations avec une forte proportion de concentré sont susceptibles d'induire des chutes de la sécrétion des matières grasses et du Taux Butyreux (TB). Chez la vache laitière, si le pourcentage de concentré dans la ration n'excède pas 50 à 60%, les effets sur le TB sont faibles (Chilliard *et al* 2007). En revanche, au-delà (> 60%), le TB diminue fortement. Si le pourcentage de concentré augmente de 3 à 35%, les teneurs du lait en C18:2n-6 et en AG synthétisés *de novo* s'élèvent (à l'exception de l'isomère *t*11 du C18:1), mais celles du C18:1*cis*9, du CLA-*c*9*t*11 et du C18:3n-3 diminuent. Si la proportion du concentré dans la ration augmente de 36 à 66%, le processus de BHR s'oriente vers la voie du C18:1-*t*10, les teneurs en C18:1-*t*10 et en AG *trans* du lait augmentent ainsi que celle du C18:2n-6 et du CLA-*c*9*t*11. En revanche, les teneurs en C14:0-C18:0 diminuent, ainsi que la sécrétion des matières grasses. L'augmentation du pourcentage de concentré de 20 à 70% diminue les AG impairs et ramifiés (Chilliard *et al* 2007). En effet, les proportions d'amidon et de fibres dans la ration sont des facteurs importants

modifiant la composition et le développement de la population microbienne et en particulier les souches des bactéries cellulolytiques (Buccioni *et al* 2012). Il existe des relations linéaires négatives entre la teneur en amidon de la ration et les concentrations en isoC14, isoC15 et isoC16 dans le lait (Vlaeminck *et al* 2006).

Un état d'acidose est diagnostiqué si le pH ruminal est inférieur à 5,6. Une élévation de la teneur dans le lait en C18:1-*t*10 n'est pas systématique, mais souvent les concentrations des AG ramifiés et/ou à chaîne impaire sont modifiées dans cette situation. En effet, l'isoC14 diminue et les C15:0, C17:0, et le C17:1-*c*9 augmentent (Fievez *et al* 2012). De même, des vaches laitières recevant des rations avec des teneurs croissantes en amidon (26, 39 et 44% de la MS) ont produit des laits riches en C13:0 et C15:0 et seul le régime avec 44% d'amidon a permis une élévation significative du C18:1-*t*10 dans le lait (Enjalbert *et al* 2008). Ainsi, les AG ramifiés et/ou à chaîne impaire du lait sont susceptibles d'être des indicateurs de l'acidose ruminale.

2.3 / Effets d'une supplémentation de la ration en oléagineux

La supplémentation lipidique des rations a été utilisée depuis plusieurs décennies, par la recherche et dans une certaine mesure en élevage, pour augmenter la densité énergétique des rations et ainsi modifier le métabolisme énergétique et les performances des vaches laitières ainsi que la composition en AG de leur lait. Ce paragraphe synthétise les études récentes portant sur les effets des supplémentations en lin et en colza sur la composition en AG du lait. L'apport de ces oléagineux dans la ration des vaches laitières peut améliorer la qualité nutritionnelle du lait car ils sont riches en AG d'intérêt. Ainsi, les graines de lin et de colza contiennent environ 40% de lipides avec, respectivement, 55% de C18:3n-3 et 60% de C18:1-*c*9 (Glasser *et al* 2008, Petit 2010). Le colza est la principale production de graines oléagineuses dans l'Union Européenne (UE) et en France (respectivement, 23 et 4,8 millions de tonnes en 2010). En revanche, la production de lin oléagineux demeure faible (respectivement 160 et 35 milliers de tonnes produites dans l'UE et en France, FAO 2012). La culture des principaux oléagineux s'est développée grâce au soutien financier associé à la politique de l'UE et à l'accroissement de la demande en agro-carburants (Brunschwig *et al* 2010). La demande en lin oléagineux s'accroît actuellement pour une destination vers l'alimentation animale.

Plusieurs revues récentes rapportent l'effet des supplémentations en oléagineux distribuées pendant 1 à 3 mois (Chilliard *et al* 2007, Glasser *et al* 2008, Brunschwig *et al* 2010). La méta-analyse de Glasser *et al* (2008) a été réalisée sur des études apportant en moyenne 0,65 et 0,59 kg/j de lin et de colza dans la ration. Ces supplémentations diminuent les pourcentages des AG à chaîne courte et moyenne et simultanément, augmentent le pourcentage des AG à 18 atomes de carbone. La méta-analyse met en évidence un effet de la forme d'apport des oléagineux. Les pourcentages du C6:0 au C14:0 diminuent linéairement avec l'apport croissant de lin mais de façon plus importante lorsqu'il est apporté sous forme d'huile que sous forme de graine (figure 4). Les pourcentages de ces AGS diminuent de manière similaire entre les 2 formes de colza. La diminution du C16:0 suit une loi quadratique avec des doses croissantes de lipides ajoutés dans la ration (de 484 à 868 g/jour), et elle est plus importante avec l'huile de lin par rapport au colza (huile ou graine), la diminution étant intermédiaire avec les graines de lin (Glasser *et al* 2008). Le pourcentage du total des AG en C18 augmente de façon quadratique (de 35,4% avec les régimes témoins jusqu'à + de 50% avec les régimes supplémentés). Les pourcentages des C18:1 *cis* et *trans* augmentent linéairement avec des effets plus marqués avec les huiles. Les C18:1 *trans* augmentent de façon plus importante avec l'huile de lin par rapport à la graine de lin, les valeurs sont intermédiaires avec l'huile de colza. La graine de colza ne les augmente pas de façon significative. Il semble donc que la BHR soit plus complète lorsque les lipides sont apportés sous forme de graines, probablement parce qu'une libération progressive des lipides perturbe moins l'écosystème microbien ruminal qu'un apport d'huile (Chilliard *et al* 2009). Le pourcentage de la somme des CLA augmente avec le colza et seulement très légèrement avec le lin. Le C18:3n-3 est augmenté davantage avec le lin (+ 0,4 g/100 g) qu'avec le colza (+ 0,04 g/100 g) (Glasser *et al* 2008).

Les suppléments lipidiques inhibent la croissance et l'activité des bactéries ruminales, les effets négatifs augmentant avec le degré d'insaturation, et la configuration géométrique (*cis vs trans)* des lipides (Vlaeminck *et al* 2006). Ainsi, une supplémentation en C18:2n-6 ou C18:3n-3 réduit la teneur totale en AG ramifiés et/ou à chaîne impaire (Vlaeminck *et al* 2006).

L'addition de savons de calcium d'huile de palme dans la ration est souvent réalisée dans la pratique. Des méta-analyses indiquent que des apports de 593 g/j ou 2,2% d'extrait éthéré (en % de la ration) augmentent légèrement la production laitière (+ 0,94 ou 0,25 kg/j), et augmentent le TB (+ 0,4 g/kg ou + 0,3%) par rapport au régime témoin (respectivement, Chilliard *et al* 1993 ou Rabiee *et al* 2012). Une supplémentation modérée en savons de calcium d'huile de palme (1,75 à 3% de lipides) ne modifie pas la teneur du lait en C16:0 par rapport à un régime témoin sans lipides, mais diminue les teneurs en AG préformés *de novo* (- 6,0 à - 8,0 g/100 g) et augmente les teneurs en AG à 18 carbones (+ 3,0 à 6,0 g/100 g) (Beaulieu et Palmquist 1995, Dhiman *et al* 1995, Harvatine et Allen 2006). En revanche, des supplémentations plus fortes (762 g/j) augmentent les teneurs en C16:0 (+ 2,1 g/100 g) et en C18:1 (+ 2,2 g/100 g) du lait (Chilliard *et al* 1993).

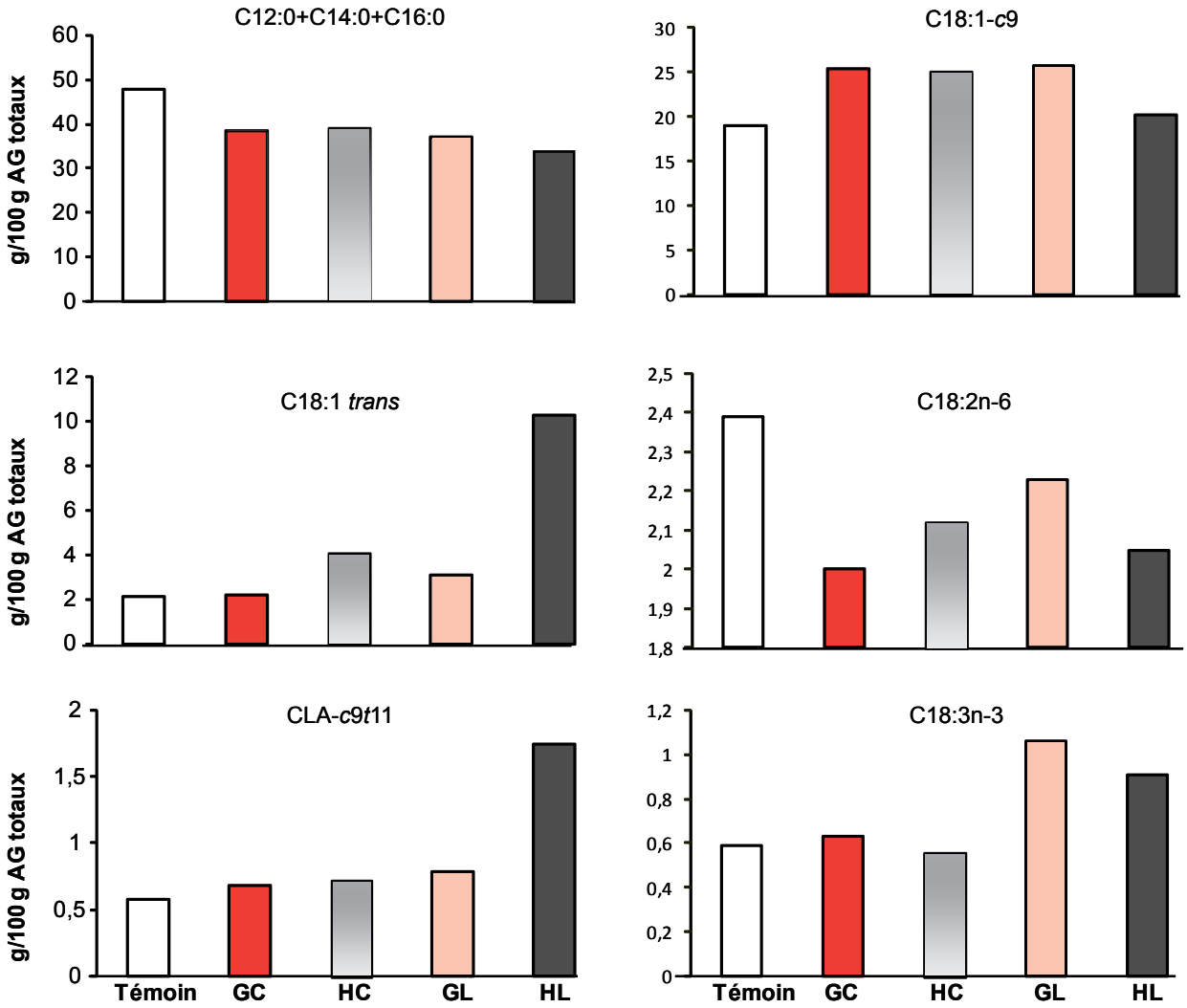
2.4 / Interaction entre nature du concentré, nature du fourrage et type de suppléments lipidiques

Le syndrome de chute de TB est appelé aussi «*Milk Fat Depression*» (MFD). Les rations MFD correspondent à des régimes comportant des glucides hautement fermentescibles et/ou des suppléments oléagineux ou des huiles marines. Ces rations MFD se caractérisent par une réduction jusqu'à 50% de la sécrétion lipidique mammaire sans modification de la production laitière. Ces modifications sont négativement corrélées avec la concentration de certains AG *trans* du lait. Bauman et Griinari (2003) ont suggéré que ce phénomène de MFD était dû à l'inhibition de la synthèse lipidique mammaire par des intermédiaires spécifiques porteurs d'une liaison *trans* et produits lors de la BHR des AGPI. Cette hypothèse appelée « la théorie de la biohydrogénation » a été l'objet de nombreuses expérimentations durant la dernière décennie. Cette situation de MFD est souvent rencontrée dans les systèmes laitiers intensifs.

Une meilleure compréhension de ce phénomène peut permettre : *i)* de déterminer quels sont les facteurs nutritionnels ou les conduites d'élevage qui le produisent, et *ii)* d'identifier les situations pour lesquelles une réduction de la MGL est bénéfique en vue d'épargner des nutriments pour d'autres voies métaboliques (indisponibilité en ressources fourragères).

La détermination d'éventuels effecteurs est étudiée *in vivo* par l'infusion post-ruminale d'AG spécifiques afin de court-circuiter l'action des bactéries. Des effets négatifs ont été démontrés pour les isomères *t*10*c*12 (réduction maximale de 50% de la sécrétion de la MGL), *t*9*c*11, *c*10*t*12 du CLA, et le C18:1-*t*10 à

Figure 4. *Effets de la supplémentation en colza (C) ou en lin (L) et de la forme d'apport en graine (G) ou en huile (H) (à hauteur de 3 à 4% de lipides ajoutés, en % de la matière sèche ingérée) sur la composition en acides gras du lait de vache (d'après Glasser* et al *2008).*



forte dose (Shingfield *et al* 2009, Shingfield *et al* 2010). Des résultats similaires ont été obtenus lors de la distribution de certaines rations riches en concentrés amylacés et/ou supplémentées en huiles végétales polyinsaturées (Loor *et al* 2005a, b). L'isomère *t*10*c*12 du CLA n'est pas le seul effecteur de la chute du TB. C'est l'isomère *t*10 du C18:1 qui est le mieux corrélé avec la diminution de la sécrétion lipidique observée pour des vaches recevant des régimes supplémentés en huile de tournesol et riches en ensilage de maïs ou en concentré (Roy *et al* 2006). L'isomère *t*9*c*11 du CLA serait également inhibiteur dans le cas de régimes supplémentés en huile de lin (Roy *et al* 2006) ou en graines de lin extrudées (Lerch *et al* 2012c), et il serait co-inhibiteur avec le CLA-*t*10*c*12, lorsque des régimes à teneur moyenne ou forte en amidon sont supplémentés en huile de tournesol (Roy *et al* 2006).

La composition en AG du lait est modifiée suivant la dose lorsque le CLA-*t*10*c*12 est infusé au niveau post-ruminal : à faible dose, il apparaît une diminution des AG préformés et des AG longs. Le CLA-*t*10*c*12 est incorporé linéairement dans la MGL et son taux de transfert peut atteindre en moyenne une valeur de 22%. Dans le cas d'une dose induisant une chute de la MGL de 20%, l'activité de la delta9-désaturase est inhibée. Les mécanismes mis en jeu correspondent à une diminution de l'expression des gènes des enzymes impliquées dans la synthèse lipidique, en particulier la «*Fatty Acid Synthase*» (FAS), l'acétyl-CoA carboxylase, la lipoprotéine lipase, et la delta9-désaturase (Bauman *et al* 2011). L'addition dans la ration de savons de calcium de CLA-*t*10*c*12 durant 3 à 20 semaines permet de réduire la sécrétion de matières grasses à différentes périodes de la lactation (de l'ordre de 15 à 30% pour des apports de 15 à 35 g de CLA-*t*10*c*12, Giesy *et al* 2002, Moore *et al* 2004, Selberg *et al* 2004). Les teneurs du lait en AG de 6 à 14 carbones diminuent légèrement avec des doses croissantes de savons de calcium de CLA-*t*10*c*12 (- 2,1 à - 3,1 g/100 g d'AGT), à l'inverse de celles des AG à 18 carbones qui augmentent (+ 4,2 à 6,1 g/100 g d'AGT, Giesy *et al* 2002, Moore *et al* 2004).

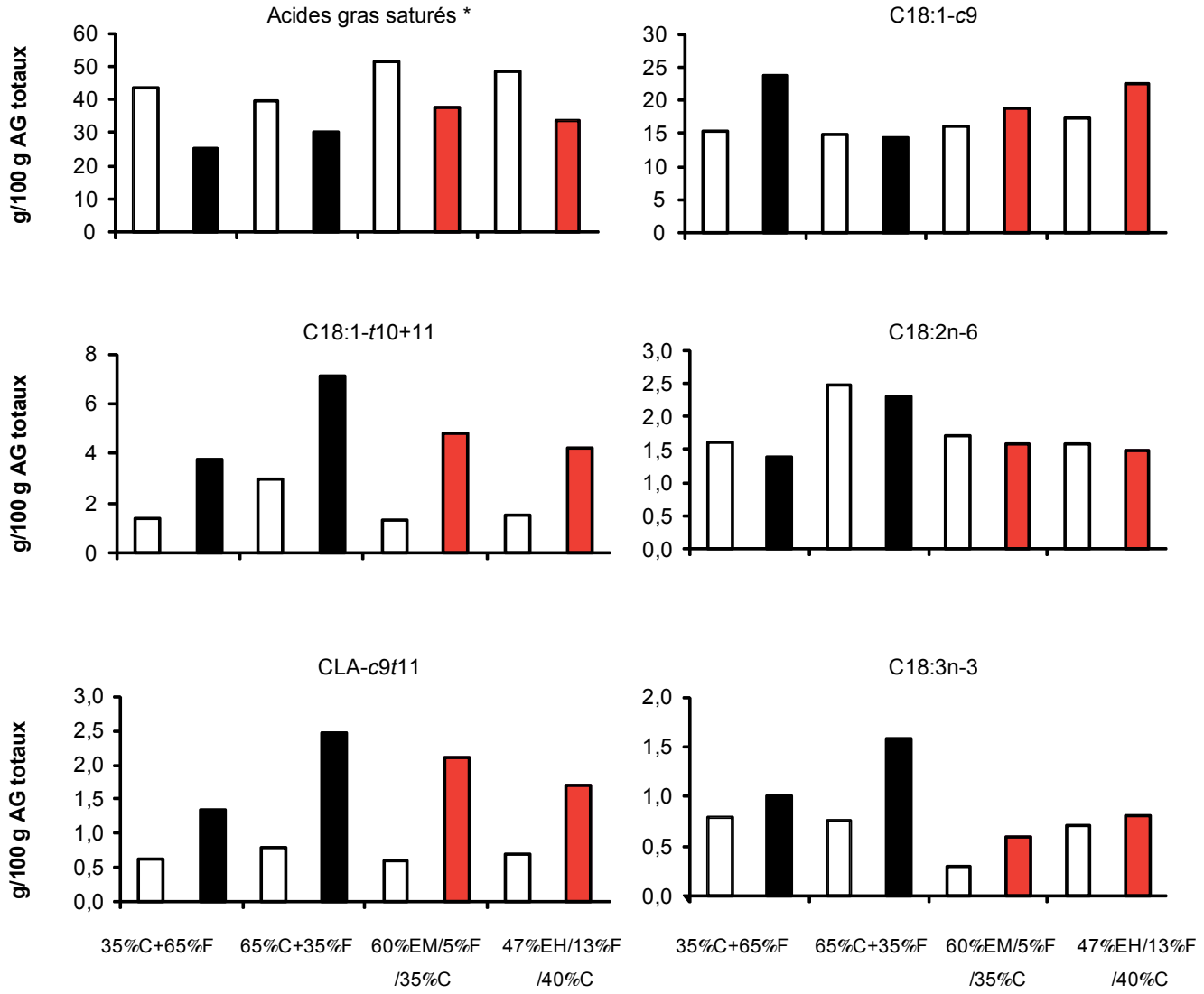
Il existe de fortes interactions entre la nature de l'huile et la proportion de concentré dans la ration. En effet, les pourcentages de C18:0 et C18:1-*c*9 répondent mieux à la supplémentation lipidique avec des régimes riches en foin que riches en concentré (Loor *et al* 2005a, Roy *et al* 2006) (figure 5). Inversement, l'augmentation du pourcentage du CLA-*c*9*t*11 en réponse à une supplémentation en huile de lin tend à être plus élevée avec des régimes riches en concentré que riches en fourrage, en raison notamment d'un effet concentration par la diminution de la quantité de matières grasses sécrétées (Loor *et al* 2005a).

L'effet des supplémentations en oléagineux sur la composition en AG du lait dépend aussi de la nature du fourrage. En effet, Glasser *et al* (2008) montrent

Figure 5. *Effets du rapport fourrages/concentré, de la nature du fourrage et de l'huile de lin sur la composition en acides gras du lait de vache (d'après Loor* et al *2005a et Chilliard* et al *2007).*
AG : Acides Gras, C : Concentré, EH : Ensilage d'Herbe, EM : Ensilage de Maïs, F : Foin.

Les barres blanches représentent les régimes témoins dans les deux expériences. Les barres noires et rouges correspondent aux régimes supplémentés à raison de 3% d'huile de lin (% de la matière sèche), respectivement dans les expériences de Loor *et al* (2005a) et de Chilliard *et al* (2007).

* La somme des AG saturés est égale à C12:0 + C14:0 + C16:0 pour Loor *et al* (2005a) et à C10:0 + C12:0 + C14:0 + C16:0 pour Chilliard *et al* (2007).

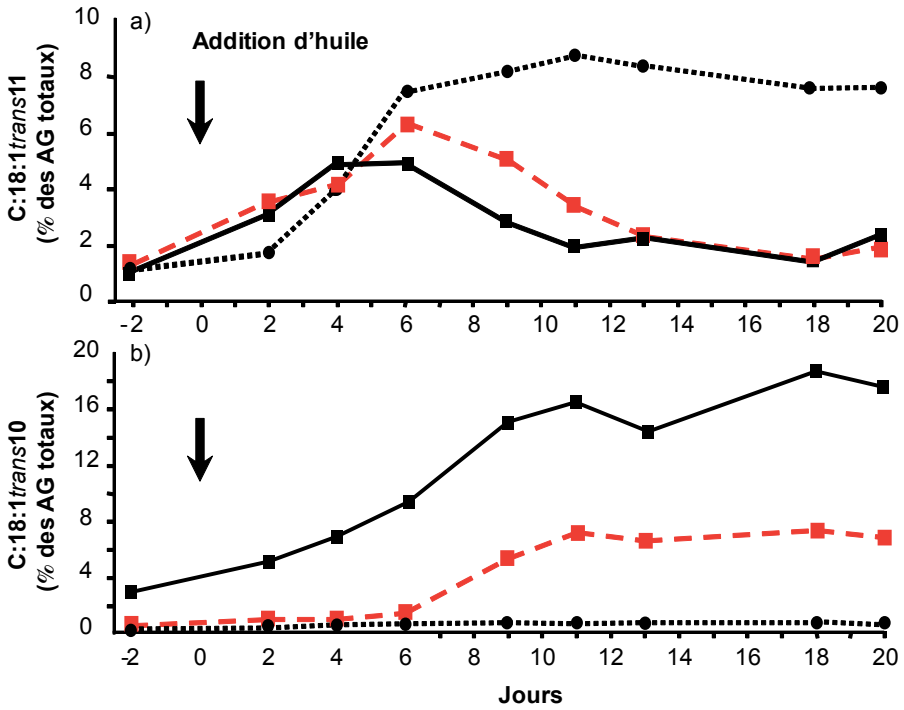


dans le cas d'une supplémentation en lin une élévation de la teneur du lait en C18:1 *cis* total plus importante avec l'ensilage de luzerne > ensilage de maïs > foin d'herbe > ensilage d'herbe. La supplémentation en lin d'une ration à base d'herbe pâturée ne modifie pas la teneur en C18:1-*c*9 tandis que celle-ci est augmentée avec des rations à base d'ensilage de maïs (Brunschwig *et al* 2010). La diminution des teneurs en AGS (C4:0 au C14:0) est plus importante avec l'ensilage de maïs qu'avec l'herbe pâturée ou l'ensilage d'herbe, quelle que soit la supplémentation lipidique (Glasser *et al* 2008).

2.5 / Persistance au cours du temps de la réponse des concentrations en acides gras du lait à des suppléments lipidiques

Cet aspect a été moins étudié. Les cinétiques de sécrétion des isomères *t*11 et *t*10 du C18:1 et du CLA-*c*9*t*11 ont été analysées durant 3 semaines après la distribution du supplément lipidique. Le C18:1-*t*11 et le CLA-*c*9*t*11 suivent des cinétiques parallèles mais variables selon le type des régimes : le pic de concentration est atteint rapidement (4 à 6 jours après le début de la supplémentation), mais de façon très transitoire avec des régimes riches en ensilage de maïs ou en concentré, supplémentés en huile de tournesol (type « amidon-oméga 6 »). En revanche, un régime riche en foin supplémenté en huile de lin (type « fibres-oméga 3 ») entraîne une augmentation plus lente mais continue des teneurs en ces deux AG pour atteindre des valeurs élevées et stables à 3 semaines. Le C18:1*t*10 présente une cinétique très différente et atteint une valeur très élevée à 2 semaines avec les régimes « amidon-oméga 6 », alors qu'il reste à sa valeur basale avec le régime « fibres-oméga 3 ». La diminution du pourcentage du C18:1-*t*11 coïncide au cours du temps avec l'augmentation de celui de l'isomère *t*10 (figure 6, Roy *et al* 2006), qui est fortement corrélée à la diminution de

Figure 6. *Effets de la nature du fourrage et de la supplémentation lipidique sur la teneur du lait en C18:1t11 (a) et C18:1t10 (b) chez la vache recevant un régime "concentré-tournesol" (ligne continue), "ensilage de maïs-tournesol" (ligne en tirets) ou "foin-lin" (ligne pointillée) (d'après Roy* et al *2006).*



la sécrétion de la MGL. Les concentrations des isomères *cis* et *trans* du C18:1 et du CLA varient donc fortement au cours du temps, ce qui suggère une adaptation de la flore bactérienne ruminale. De plus, ils sont spécifiques du régime alimentaire.

Peu de travaux ont été réalisés durant une lactation entière ou sur plusieurs lactations. Ainsi, au cours de deux lactations successives (comprenant une période hivernale et une période de pâturage par lactation), des vaches laitières ont reçu des régimes à base d'herbe (pâturée ou conservée) supplémentés en graines de colza (entières, extrudées ou sous forme de tourteau) ou en graines de lin extrudées. Les suppléments lipidiques, par rapport au régime témoin, n'ont pas modifié la production laitière, ni les taux butyreux et protéique durant la première période hivernale. En revanche, ils ont modifiés ces performances laitières de façon répétable entre les 2 périodes de pâturage, et avec des effets très comparables à ceux observés lors de supplémentations distribuées pendant quelques mois (Lerch *et al* 2012a). Les supplémentations en colza et en lin pendant deux lactations ont significativement diminué la proportion des AGS du lait (figure 7), et augmenté celles du C18:1-*c*9 et des isomères *trans* du C18:1, à l'exception de la graine de colza entière. Seul le lin a induit des proportions en C18:3*n*-3 du lait plus élevées durant toute la lactation. La qualité nutritionnelle des laits est globalement améliorée par les supplémentations oléagineuses, en particulier durant la saison hivernale, mais seulement lorsque la teneur de la ration en amidon est limitée.

Plus précisément, durant la période hivernale, une comparaison directe entre les deux graines extrudées (lin *vs* colza) a mis en évidence des distributions différentes des AG insaturés. Le lin extrudé a plus augmenté la teneur du lait en isomères *cis* et *trans* du C18:1 (en position 12 à 16), en C18:2 *trans*, CLA-*c*9*t*11, CLA-*t*9*t*11, CLA-$\Delta^2$11,13 à Δ13,15, C18:3n-3, CLnA-$\Delta^3$9,11,15 et en CLnA-*c*9,*t*11*t*13 que le colza extrudé, mais a diminué davantage les teneurs en C18:1-*c*11, *t*4 à *t*9, et en CLA-*t*7*c*9. Ces variations s'expliquent probablement par la production d'intermédiaires différents lors de la BHR du C18:1-*c*9 et du C18:3n-3 (Shingfield *et al* 2010). Durant la saison de pâturage, les supplémentations en lin et colza extrudés n'ont pas augmenté la teneur du lait en C18:1-*t*11 et, de façon surprenante, ont diminué celle en CLA-*c*9*t*11 à l'inverse de précédentes études utilisant ces supplémentations sous forme d'huile (Fearon *et al* 2004, Flowers *et al* 2008). L'apport de ces graines extrudées a aussi diminué les teneurs du lait en CLA-*t*10*c*12 et en CLA-*t*9*c*11. L'explication serait liée à la teneur plus élevée en amidon fermentescible pour le régime témoin par rapport aux deux régimes supplémentés, qui aurait permis une accumulation ruminale plus importante en C18:1-*t*11 par limitation de la dernière étape d'hydrogénation en C18:0 et donc ensuite une sécrétion plus importante de CLA-*c*9*t*11 dans le lait (Lerch *et al* 2012b,c). Durant la deuxième période hivernale, l'augmentation des teneurs en CLA-*c*9*t*11, -*c*12*t*14, et -*t*11*c*13, et en CLnA-*c*9*t*11*c*15 en réponse aux supplémentations de lin ou de colza est plus faible qu'en première période, en raison d'une interaction avec la composition de la ration (teneur en amidon).

2.6 / Effets d'un apport d'additifs dans la ration

La supplémentation lipidique des rations induit parfois une élévation des teneurs du lait en AGPI notamment ω3, et donc un risque plus élevé d'oxydation de ces AG (Jensen 2002). Ce risque pourrait être limité en augmentant la teneur du lait en antioxydants naturels (caroténoïdes, composés phénoliques ou vitamine E). Ainsi, des recherches ont été entreprises afin d'analyser l'influence des antioxydants d'origine naturelle tels que les métabolites secondaires des plantes (tannins ou huiles essentielles) sur le processus de BHR ou la composition en AG du lait.

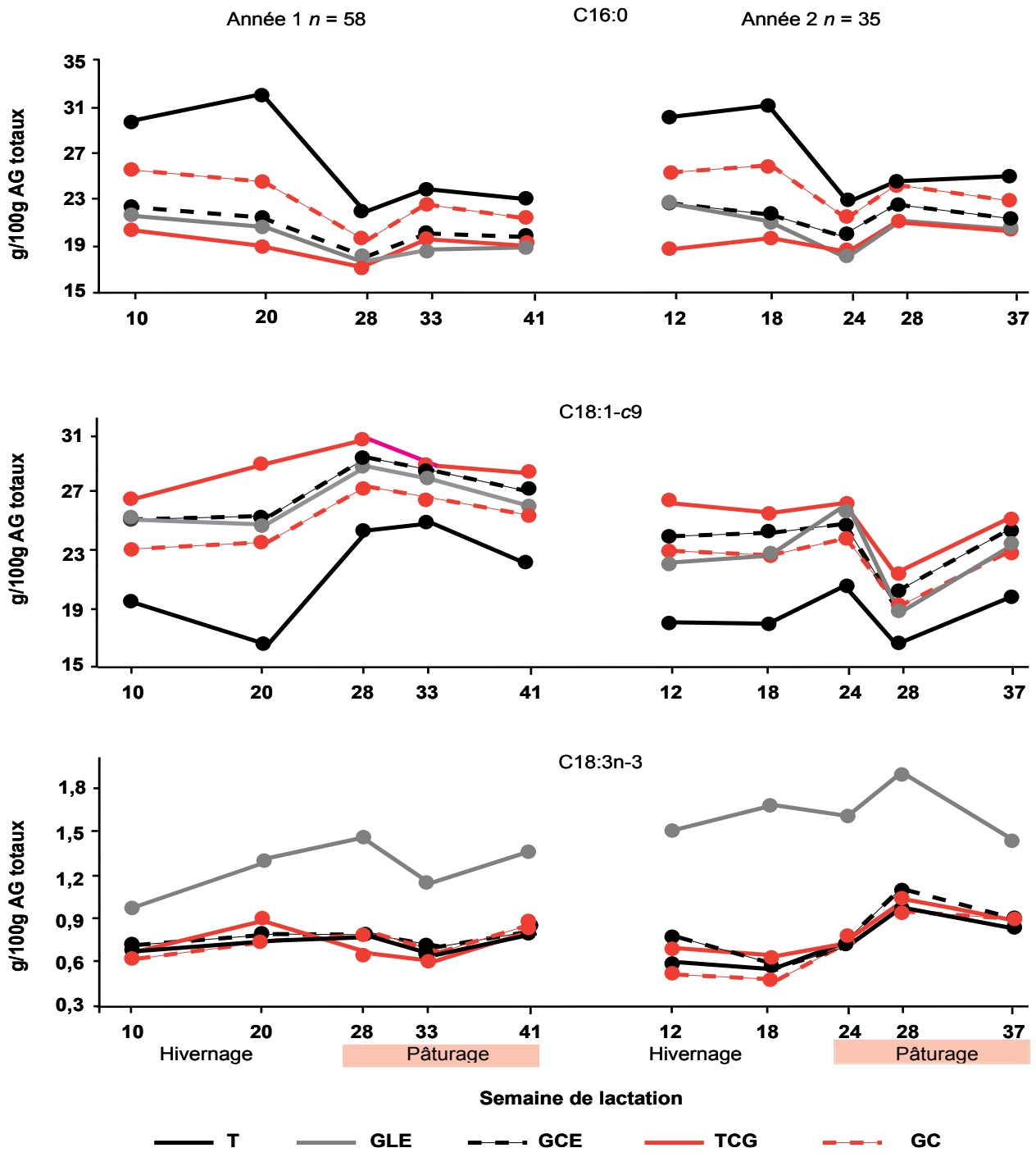
a) Tannins et vitamine E

Les tannins sont des composés hydrosolubles polyphénoliques. Il a été montré *in vitro* que lors de la BHR, l'étape de réduction du C18:1-*t*11 en C18:0 peut être limitée par des polyphénols tels que des tannins de l'arbre Quebracho (*Schinopsis balansae*) par inhibition de l'activité des microorganismes du rumen (Vasta *et al* 2009). La même équipe a analysé l'apport de ces tannins dans la ration de moutons. Il ressort que la présence de tannins permettait une accumulation du C18:1-*t*11 au niveau ruminal et une modification du faciès bactérien impliqué dans la BHR (Vasta *et al* 2010). Cependant, l'apport de 150 g/j de tels tannins dans la ration chez la vache laitière n'a pas modifié la composition en AG du lait (Benchaar et Chouinard 2009).

L'effet de la vitamine E a été aussi exploré en nutrition des ruminants. Focant *et al* (1998) ont montré qu'un apport de

[2] En position *c*, *c* ou *t*, *c*, ou *c*, *t* ou *t*, *t*.
[3] En position *c*, *c*, *c* ou *c*, *t*, *t* ou *t*, *c*, *t* ou *c*, *c*, *t ou t*, *t* , *c* ou *t*, *c* ,*c* ou *t*, *t*, *t*.

Figure 7. *Cinétiques de réponse des concentrations des acides gras du lait à des supplémentations en lin et en colza (3 à 4% de la matière sèche) durant deux lactations successives (d'après Lerch* et al *2012b).*
T : Témoin, GLE : Graine de Lin Extrudée, GCE : Graine de Colza Extrudée, TCG : Tourteau Colza Gras, GC : Graine de Colza crue.



vitamine E dans des régimes susceptibles d'induire une chute du TB limitait cette baisse, suggérant que la vitamine E pourrait réduire la production ruminale de l'isomère *t*10 du C18:1 et favoriserait celle du *t*11. Dans une ration à base d'ensilage de maïs supplémentée en lin extrudé, l'apport de vitamine E seule ou en association avec des extraits végétaux riches en polyphénols (à base de romarin (*Rosemarinus officinalis*), de vigne (*Vinis vitifera*), de citron (*Citrus paradise*) et de Souci officinal (*Calendula officinalis*) a été étudié (Ferlay *et al* 2010). La vitamine E n'a pas modifié les performances laitières et a eu un effet faible sur la composition en AG du lait (augmentation du C16:0, diminution du C18:0 et du C18:1-*t*6,7,8). De même, les extraits végétaux riches en polyphénols n'ont pas eu d'effet sur la composition en AG du lait, probablement à cause de l'absence de chute du TB dans ces conditions d'études (Ferlay *et al* 2010).

b) Huiles essentielles

Depuis une dizaine d'années, des études ont analysé l'utilisation potentielle de plantes ou d'extraits de plantes en substitution de l'utilisation d'antibiotiques en nutrition des ruminants. Depuis, en janvier 2006, l'UE a interdit l'utilisation des antibiotiques en tant qu'additifs (Directive 1831/2003/CEE, 2003). Récemment, un nouvel intérêt s'est porté sur les huiles essentielles obtenues par distilla-

tion ou extraction dans des solvants de plantes. Elles comprennent des composés volatils notamment des terpènes, des sesquiterpènes et des monoterpènes. Ces composés présentent des propriétés antimicrobiennes (Calsamiglia *et al* 2007). Les huiles essentielles de différentes sources végétales modifient la croissance bactérienne et le métabolisme de différents types bactériens, et en particulier les bactéries du rumen (Calsamiglia *et al* 2007). Ces effets ont été démontrés *in vitro* et très peu d'études ont été réalisées *in vivo*. Il est supposé que ces huiles essentielles pourraient limiter la BHR par inhibition des bactéries impliquées dans ce processus et donc modifier la composition en AG du lait en augmentant la teneur du lait en AGPI. Benchaar *et al* (2006, 2007) montrent l'absence d'effet d'un apport d'huiles essentielles (riches en thymol, eugénol, vanille et de limonène) à différentes doses sur la production laitière et sa composition, à l'exception d'une augmentation du taux de lactose, + 0,2%, pour l'étude de 2007, ainsi que sur le profil en AG du lait. Compte-tenu de la diversité des molécules potentiellement actives, l'efficacité de cette stratégie reste à démontrer.

3 / Origines des composés vitaminiques du lait de vache

De manière générale, les vitamines du lait ont une origine multiple. En effet, hormis la vitamine B_{12}, l'ensemble des vitamines présentes dans le lait peut provenir de l'alimentation de la vache, c'est-à-dire des fourrages, des aliments concentrés (céréales, graines oléagineuses dont le soja…) et/ou du Complément Minéral et Vitaminique (CMV) contenant généralement les vitamines A, E, et D_3. L'animal peut également synthétiser certaines vitamines à partir de précurseurs provenant de l'alimentation. Ainsi, la vitamine A est produite dans les cellules intestinales par l'hydrolyse enzymatique des différents isomères du β-carotène, l'isomère tout-*trans* étant la forme majeure, car la plus concentrée dans les aliments et le meilleur substrat de l'enzyme. La vitamine C est synthétisée à partir de glucuronate par le foie chez les mammifères, dont les bovins mais pas les primates, ce qui rend les humains fortement dépendants des apports alimentaires. La vitamine B_3 (niacine ou vitamine PP) peut également être produite au niveau hépatique à partir du tryptophane. Enfin, la vitamine D_3 est synthétisée par la peau à partir du 7-hydroxycholestérol sous l'action des rayonnements solaires. Pour terminer, les vitamines B et K sont produites par les microorganismes du rumen qui contribuent ainsi aux apports à l'animal. Par conséquent, parmi les vitamines présentes dans le lait, certaines ont une seule origine comme la vitamine E qui ne provient que de l'alimentation ou la vitamine B_{12} synthétisée uniquement par les bactéries du rumen. A l'opposé, la niacine du lait a des origines multiples puisqu'elle peut provenir de l'alimentation, des synthèses bactériennes ruminales et du métabolisme animal (Graulet 2010). Cependant, à l'heure actuelle, les parts respectives de ces différentes sources dans les apports à l'animal et dans le lait ne sont pas connues.

Il est accepté de manière courante que les besoins en vitamines A, E et D des ruminants ne sont pas totalement couverts par les apports de la ration, hormis pour des animaux au pâturage, et il en est donc généralement distribué dans le CMV en accord avec les recommandations établies par le «*National Research Council*» des USA (Wolter 1988, NRC 2001, Meschy 2007). Pour les autres vitamines, il a été longtemps considéré que les synthèses ruminales combinées aux apports par les fourrages et les concentrés permettaient une autosuffisance de l'animal. Néanmoins, des résultats récents montrent que les concentrations des vitamines B_9 et B_{12} du lait, comme celles de vitamine A (Nozière *et al* 2006), sont variables en fonction des rations distribuées aux vaches (Chassaing *et al* 2011). De plus, des suppléments alimentaires en ces deux vitamines du groupe B permettent des augmentations significatives de leurs quantités sécrétées dans le lait, ainsi que des performances des vaches (Graulet *et al* 2007), ce qui indiquerait que, d'une part, selon le type de ration, les besoins des vaches en vitamines B pourraient ne pas être toujours couverts de manière optimale et que, d'autre part, leurs concentrations dans le lait peuvent être optimisées, nécessitant pour cela une meilleure maîtrise des facteurs contrôlant leur sécrétion par la glande mammaire. La nature de l'alimentation jouerait alors très certainement un rôle majeur, soit comme source directe de ces composés (pour les vitamines A, E et D principalement), soit parce qu'elle oriente les activités microbiennes dans le rumen, modulant probablement ainsi leurs taux de synthèse et de transfert dans le duodénum (en particulier pour les vitamines B).

4 / Influence des principaux facteurs alimentaires sur les teneurs en composés vitaminiques du lait de vache

4.1 / Vitamines liposolubles : A, E et β-carotène

Les facteurs de variation des concentrations en vitamine A et de ses précurseurs caroténoïdes dans le lait sont de loin les mieux connus. Ainsi, celles-ci diffèrent suivant les espèces, les races, selon la variabilité individuelle liée au patrimoine génétique, le stade de lactation, la parité de l'animal, en interaction avec son niveau de production et son état sanitaire. La nature de l'alimentation joue également un rôle important, en particulier pour ce qui concerne les apports respectifs de rétinol et de β-carotène (Nozière *et al* 2006). Une part de la variation observée des concentrations est liée à la modulation du taux de Matière Grasse (MG) dans le lait. Ainsi, pour s'affranchir de ce facteur, les résultats de concentrations de caroténoïdes, vitamines A ou E du lait sont le plus souvent exprimés par rapport à la MGL dans la littérature.

Les concentrations en vitamines liposolubles A, E et en β-carotène dans le lait sont principalement liées aux quantités consommées par les vaches. En effet, dans des conditions expérimentales, une relation a été observée entre les apports de β-carotène et de vitamine E alimentaires, leurs concentrations dans le plasma et leur sécrétion dans la MGL (Calderón *et al* 2007). Ces auteurs ont observé une relation linéaire entre l'apport alimentaire et les concentrations plasmatiques de β-carotène et de vitamine E. Cependant, au niveau du lait, la linéarité de la relation n'a été observée que pour la vitamine E, les concentrations du lait en β-carotène atteignant un plateau autour de 5 µg/g MG suggérant une saturation dans le transfert du plasma au lait. Ces résultats expérimentaux sont en accord avec la littérature résumée par Nozière *et al* (2006) montrant une relation linéaire entre le β-carotène alimentaire lorsque le régime apporte entre 0 et 60 mg/kg MS et sa concentration dans le lait (entre 1,5 et 5,5 µg/g MG). Cette analyse de la littérature suggère également une relation entre le β-carotène alimentaire et la concentration de rétinol dans le lait qui, cependant, n'a pas été observée dans les conditions expérimentales utilisées par Calderón *et al* (2007).

Les différences dans les quantités ingérées de caroténoïdes expliquent principalement les écarts de concentration observés entre les laits de vaches nourries avec différents types de fourrages ou des rations présentant différents rapports entre fourrage et concentré (Nozière *et al* 2006). L'herbe fraîche est de loin, parmi les fourrages, la source la plus riche en caroténoïdes (1200 mg/kg MS dont environ 30% de β-carotène) et en vitamine E (250 mg/kg MS). Toutefois, la teneur en caroténoïdes varie en fonction de la composition botanique des pâturages puisque les prairies riches en dicotylédones sont plus pauvres en caroténoïdes que celles composées principalement de plantes herbacées monocotylédones (600 *vs* 1200 mg/kg MS, respectivement) (Nozière *et al* 2006,

Graulet *et al* 2012). Ainsi, les laits présentant les plus fortes concentrations de β-carotène sont généralement produits au cours du printemps et de l'été par les vaches au pâturage, mangeant de l'herbe fraîche, lorsque celle-ci est riche en graminées (Graulet *et al* 2012). En effet, dans le lait de vaches Holstein au pâturage sur une prairie de moyenne montagne composée d'herbe peu diversifiée et à un stade feuillu, les concentrations ont atteint 7 à 8 µg/g MG pour le β-carotène et le rétinol (Graulet *et al* 2012), soit des valeurs légèrement supérieures aux données moyennes recensées dans la littérature (Nozière *et al* 2006). Pour la vitamine E, les données disponibles sont de l'ordre de 0,63 µg/mL chez des vaches au pâturage (Martin *et al* 2004), soit 35 µg/g MG, sans qu'il semble y avoir de différence selon le niveau de diversité floristique de la parcelle (Graulet *et al* 2012). Ces valeurs sont de l'ordre de 2,5 à 2,8 µg/g MG pour le β-carotène et le rétinol et de 0,48 µg/mL pour la vitamine E lorsque l'alimentation est basée sur l'ensilage d'herbe, le foin ou l'ensilage de maïs qui sont plus pauvres en β-carotène et vitamine E (Martin *et al* 2004, Nozière *et al* 2006). En effet, la concentration en caroténoïdes varie entre 20 et 70 mg/kg MS dans l'ensilage de maïs (dont 20 à 30% de β-carotène, Graulet, données non publiées). Les apports en caroténoïdes (et en vitamine E sauf dans le cas des oléagineux) dus aux aliments concentrés sont très faibles car leurs ingrédients sont généralement des sources pauvres, ceci étant accentué par les traitements qu'ils subissent, comme le chauffage pour la granulation par exemple, qui détruisent ces composés (Nozière *et al* 2006). Par conséquent, lorsque la proportion d'aliments concentrés dans la ration est plus élevée, en hiver ou dans les systèmes intensifs, l'apport de caroténoïdes et leur concentration dans le lait sont généralement inférieurs par rapport au printemps ou à l'été ou dans des conditions plus extensives (Martin *et al* 2004, Hulshof *et al* 2006, Agabriel *et al* 2007).

Ainsi, les concentrations en β-carotène du lait sont liées aux quantités ingérées du fourrage. En ce qui concerne les concentrations de vitamines A et E dans le lait, on pourrait supposer qu'elles varient proportionnellement à celles des caroténoïdes, puisque d'une part, la vitamine A est synthétisée à partir du β-carotène et d'autre part, les fourrages qui sont riches en caroténoïdes, sont également généralement les plus riches en vitamine E (Wolter 1988). Pour cette dernière, il a été effectivement vérifié expérimentalement dans des conditions contrôlées que la concentration de vitamine E du lait variait, comme pour le β-carotène, selon la proportion et la nature des fourrages dans la ration (Martin *et al* 2004). De plus, une relation dose-dépendante positive entre la quantité de vitamine E ingérée et sa concentration dans le lait des vaches a été bien établie (Calderón *et al* 2007). Toutefois, contrairement au β-carotène, dans la pratique, les effets de la nature du fourrage sur les concentrations de vitamines A et E du lait peuvent être masqués par l'utilisation de suppléments alimentaires vitaminiques (Hulshof *et al* 2006, Agabriel *et al* 2007). Les suppléments oléagineux peuvent également constituer des sources importantes de vitamine E, mais la nature chimique de cette vitamine est variable selon les espèces végétales. Ainsi, les analyses disponibles sur l'huile de tournesol montrent qu'elle contient surtout de l'α-tocophérol (41,7 mg/100 g) tandis que l'huile de lin est source de γ-tocophérol (18,8 mg/100 g) et l'huile de colza apporte un mélange des deux composés (respectivement 18,4 et 21,6 mg/100 g pour l'α- et le γ-tocophérol). Néanmoins, distribuées à des vaches en lactation sous forme de suppléments expérimentaux, ces huiles permettraient une augmentation très modérée de la vitamine E du lait, en agissant exclusivement sur l'α-tocophérol, les huiles de tournesol ou de colza entraînant de meilleures réponses que l'huile de lin sur ce paramètre (Graulet, données non publiées). A l'heure actuelle, des données équivalentes basées sur la distribution des oléagineux sous forme de graines (en particulier extrudées comme il devient plus courant dans la pratique) ne sont pas disponibles. L'information sur les facteurs influençant le transfert des autres vitamines liposolubles (D et K) du lait est très limitée. McDermott *et al* (1985) n'ont pas observé d'augmentation d'activité biologique de la vitamine D dans le lait suite à la supplémentation alimentaire des vaches.

4.2 / Vitamines B

Jusqu'à il y a quelques années, seul un nombre très limité de recherches sur le statut en vitamines B des vaches laitières avait été mené puisqu'on considérait que la somme des apports alimentaires et de la synthèse bactérienne au niveau du rumen était suffisante pour couvrir les besoins de la vache. Toutefois, entre 1990 et 2005, les rendements de production du lait de vache et de ses composants, et par conséquent la demande en éléments nutritifs, ont augmenté d'environ 33% tandis que la consommation de MS n'a augmenté que de 15% (Weiss et Ferreira 2006). Les vitamines B agissant comme cofacteurs dans la plupart des grandes voies métaboliques (synthèse protéique, synthèse des acides nucléiques, néoglucogenèse, métabolisme oxydatif, chaîne respiratoire…), il est très probable que les besoins pour celles-ci aient augmenté avec les performances de production.

Néanmoins, en dépit d'un regain d'intérêt, l'information sur la disponibilité en vitamines B chez les vaches laitières et leur transfert au lait reste très insuffisante. Les concentrations en vitamines B dans le lait semblent faiblement reliées à leurs apports alimentaires probablement en raison de remaniements importants intervenant dans le rumen (synthèses et dégradations). Santschi *et al* (2005) ont montré qu'une fraction élevée des compléments alimentaires de vitamines B synthétiques est détruite (et/ou utilisée par les micro-organismes) dans le rumen chez la vache laitière en production : vitamine B_2 (99,3%), B_3 (98,5%), B_9 (97,0%), B_1 (67,8%), B_{12} (62,9%), B_8 (45,2%) et B_6 (41,0%). Par ailleurs, le flux duodénal et la synthèse ruminale des vitamines B sont modifiés par la composition du régime alimentaire, et sont faiblement liés à l'apport en vitamines (Schwab *et al* 2006, Seck *et al* 2010a et b, 2011). Ainsi, la synthèse ruminale apparente des vitamines B_3, B_6, B_9 et B_{12} est plus faible lorsque la part de fourrage dans la ration augmente (Schwab *et al* 2006, Seck *et al* 2010b). Cependant, l'augmentation de la part des glucides non-pariétaux dans la ration (de 30 à 40%) favorise la synthèse apparente des vitamines B_3, B_6, et B_9, mais diminue celle de la B_{12} (Schwab *et al* 2006). De plus, la synthèse ruminale apparente des vitamines B_3 et B_6 chez des vaches recevant de l'ensilage d'herbe comme seul fourrage est plus élevée lorsque celui-ci est composé de dactyle que de luzerne, permettant une disponibilité supérieure pour l'animal et ceci bien que les quantités ingérées de ces vitamines aient été supérieures avec la ration à base de luzerne (Seck *et al* 2010a). Enfin, les flux duodénaux de vitamines B_1, B_2, B_3 (mais pas B_6) sont augmentés lors de la réduction de la taille des particules de maïs séché broyé (Seck *et al* 2011). Malheureusement, les effets de ces facteurs alimentaires sur les concentrations en vitamines du lait n'étaient pas disponibles dans ces études.

Par ailleurs, des études menées en fermes commerciales ont montré que les concentrations des vitamines B_9 et B_{12} du lait étaient variables en fonction des rations distribuées aux vaches. Ainsi, les teneurs en vitamines B_{12} apparaissent plus élevées avec une alimentation à base d'ensilage de maïs alors que les teneurs en vitamine B_9 sont supérieures au pâturage ou avec une alimentation riche en foin (Chassaing *et al* 2011). De plus, lorsque des suppléments alimentaires de vitamines B_9 et B_{12} ont été distribués à des vaches en lactation, à des niveaux similaires à ceux étudiés par Santschi *et al* (2005), une augmentation de la sécrétion de ces deux vitamines dans le lait a pu être observée (Graulet *et al* 2007), ce qui suggère qu'une frac-

tion de la dose administrée a échappé aux dégradations ruminales. De plus, ces suppléments alimentaires riches en ces 2 vitamines avaient également permis des améliorations significatives des performances (lait produit, TB, valorisation de l'azote alimentaire) de ces vaches nourries avec une ration riche en maïs indiquant que, selon le type de ration, les besoins en vitamines B pourraient ne pas être toujours couverts de manière optimale. Toutefois, dans ces deux dernières expériences, de fortes doses de suppléments ont été données. De même, les suppléments d'acide pantothénique (vitamine B_5) protégé des dégradations bactériennes dans le rumen permettent d'augmenter sa concentration plasmatique chez les vaches laitières (Ragaller *et al* 2010, 2011). Néanmoins, apportée sous forme non protégée, la vitamine B_5 n'a eu que des effets marginaux, en particulier aux doses les plus faibles, et son transfert au lait n'a pas été affecté, suggérant que la vitamine a été en grande partie détruite par la microflore du rumen.

Conclusion

Cet article recense les principaux facteurs alimentaires influençant la composition en AG et en vitamines du lait. Ils diffèrent suivant le type de composés et les connaissances sur la composition vitaminique sont plus limitées. Concernant la composition lipidique, l'ingestion d'herbe pâturée par rapport à des régimes hivernaux permet de diminuer les teneurs du lait en AGS et d'augmenter les teneurs en C18:1-*c*9, C18:3n-3, CLA-*c*9*t*11 et aussi celle en C18:1 *trans*. Pendant la saison de pâturage, les effets du stade phénologique, de la composition botanique et de la conduite du pâturage sont d'ampleur plus restreinte. Les effets les plus marqués sont observés avec les supplémentations en oléagineux, à court terme ou à long terme. Ces suppléments diminuent les concentrations des AGS dans le lait, et augmentent celles du C18: 1*c*9 et des AG *trans*. L'apport de lin dans la ration, par rapport au colza, induit une distribution différente en isomères *cis* et *trans* du C18:1, du CLA et du CLnA. Il existe de fortes interactions entre la nature des fourrages, les concentrés amylacés et le type de suppléments oléagineux. L'effet des tannins ou des huiles essentielles sur la BHR observé *in vitro* n'est pas reproduit *in vivo* puisque la composition en AG du lait n'est pas modifiée par de tels composés. La caractérisation de la composition en AG du lait et des produits laitiers en fonction des conduites d'élevage est nécessaire en vue de la mise en place d'un système de paiement à la qualité incluant les différentes classes d'AG (AGS, C16:0, AG insaturés, C18:3n-3). L'application de certaines stratégies alimentaires au sein des élevages dépendra du point de vue économique, de l'évolution des prix des matières premières (notamment oléagineux) et de la plus-value concédée par les industriels à un lait dit de qualité. Néanmoins, avec l'avancée des méthodes analytiques, la détermination de la composition en AG du lait met en évidence l'existence de certains isomères du CLA et du CLnA dont il reste à déterminer l'effet sur la santé humaine.

L'augmentation des teneurs en vitamines du lait et des produits laitiers ferait d'eux une source très intéressante (Drewnowski 2011), en particulier pour les sujets les plus jeunes et les plus âgés, qui ont un apport alimentaire limité et dont l'efficacité d'absorption est souvent réduite. Cependant, les vitamines doivent être bien distinguées les unes des autres. En effet, dans l'alimentation humaine, certaines d'entre elles sont plutôt fournies par les produits d'origine animale (vitamines A, D, B_2, B_5 et B_{12} - cf. tableau 1), tandis que les fruits et les légumes sont les principales sources des autres. De plus, si les facteurs influant les concentrations de vitamine A (rétinol et β-carotène) du lait sont assez bien connus, en particulier chez les bovins, pour les vitamines D et K, l'information est trop rare (y compris chez l'Homme) pour comprendre comment leur sécrétion dans le lait est régulée. La situation est relativement similaire pour les vitamines B pour lesquelles quelques données sont désormais disponibles, mais qui nécessitent néanmoins des études supplémentaires pour identifier les facteurs de régulation de leur synthèse et de leur dégradation dans le rumen ainsi que de leur transfert au lait.

Références

Agabriel C., Cornu A., Journal C., Sibra C., Grolier P., Martin B., 2007. Tanker milk variability according to farm feeding practices: vitamins A and E, carotenoids, colour and terpenoids. J. Dairy Sci., 90, 4884-4896.

Barber M.C., Clegg R.A., Travers M.T., Vernon R.G., 1997. Lipid metabolism in the lactating mammary gland. Biochim. Biophys. Acta, 1347, 101-126.

Bassett C.M.C., Edel A.L., Patenaude A.F., McCullough R.S., Blackwood D.P., Chouinard P.Y., Pacquin P., Lamarche B., Pierce G.N., 2010. Dietary vaccenic acid has antiatherogenic effects in LDR-/- mice. J. Nutr., 140, 18-24.

Bauman D.E., Griinari J.M., 2003. Nutritional regulation of milk fat synthesis. Annu. Rev. Nutr., 23, 203-227.

Bauman D.E., Harvatine K.J., Lock A.L., 2011 Nutrigenomics, rumen-derived bioactive fatty acids, and the regulation of milk fat synthesis. Annu. Rev. Nutr., 31, 299-319.

Beaulieu A.D., Palmquist D.L., 1995. Differential effects of high fat diets on fatty acid composition in milk of Jersey and Holstein cows. J. Dairy Sci., 78, 1336-1344.

Benchaar C., Petit H.V., Berthiaume R., Whyte T.D., Chouinard P.Y., 2006. Effects of addition of essential oils and monensin premix on digestion, ruminal fermentation, milk production, and milk composition in dairy cows. J. Dairy Sci., 89, 4352-4364.

Benchaar C., Petit H.V., Berthiaume R., Ouellet D.R., Chiquette J., Chouinard P.Y., 2007. Effects of essential oils on digestion, ruminal fermentation, rumen microbial populations, milk production, and milk composition in dairy cows fed alfalfa silage or corn silage. J. Dairy Sci., 90, 886-897.

Benchaar C., Chouinard P.Y., 2009. Short communication: assessment of the potential of cinnamaldehyde, condensed tannins, and saponins to modify milk fatty acid composition of dairy cows. J. Dairy Sci., 92, 3392-3396.

Bernard L., Leroux C., Chilliard Y., 2008. Expression and nutritional regulation of lipogenic genes in the ruminant lactating mammary gland. Adv. Exp. Med. Biol., 606, 67-108.

Brunschwig P., Hurtaud C., Chilliard Y., Glasser F., 2010. L'apport de lin dans la ration des vaches laitières : Effets sur la production, la composition du lait et des produits laitiers, les émissions de méthane et les performances de reproduction. INRA Prod. Anim., 23, 307-318.

Buccioni A., Decandia M., Minieri S., Molle G., Cabiddu A., 2012. Lipid metabolism in the rumen: New insights on lipolysis and biohydrogenation with an emphasis on the role of endogenous plant factors. Anim. Feed Sci. Technol., 174, 1-25.

Calderón S.F., Chauveau-Duriot B., Pradel P., Martin B., Graulet B., Doreau M., Nozière P., 2007. Variations in carotenoids, vitamins A and E, and color in cow's plasma and milk following a shift from hay diet to diets containing increasing levels of carotenoids and vitamin E. J. Dairy Sci., 90, 5651-5664.

Calsamiglia S., Busquet M., Cardozo P.W., Castillejos L., Ferret A., 2007. Invited review: Essential oils as modifiers of rumen microbial fermentation. J. Dairy Sci., 90, 2580-2595.

Chassaing C., Graulet B., Agabriel C., Martin B., Girard C.L., 2011. Vitamin B_9, and B_{12} contents in cow milk according to production system. In: Dairy Production in Mountain: farming systems, milk and cheese quality and implications for the future. Coppa M., Borreani G. (Eds). 35-36.

Chilliard Y., Ferlay A., 2004. Dietary lipids and forages interactions on cow and goat milk fatty acid composition and sensory properties. Reprod. Nutr. Dev., 45, 467-492.

Chilliard Y., Doreau M., Gagliostro G., Elmeddah Y., 1993. Addition de lipides protégés (encapsulés ou savon de calcium) à la ration des vaches laitières. Effets sur les performances et la composition du lait. INRA Prod. Anim., 6, 139-150.

Chilliard Y., Ferlay A., Mansbridge R.M., Doreau M., 2000. Ruminant milk fat plasticity: nutritional control of saturated, polyunsaturated, trans and conjugated fatty acids. Ann. Zootech., 49, 181-205.

Chilliard Y., Glasser F., Ferlay A., Bernard L., Rouel J., Doreau M., 2007. Diet, rumen biohydrogenation, cow and goat milk fat nutritional quality: a review. Eur. J. Lipid Sci. Technol., 109, 828-855.

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.

Chilliard Y., Glasser F., Ferlay A., Bernard L., Rouel J., Martin B., Martin C., Enjalbert F., Schmidely P., 2010. Que peut-on attendre des pratiques d'élevage pour améliorer la qualité nutritionnelle des matières grasses du lait bovin et caprin. Cah. Nutr. Diet., 45, 310-319.

Collomb M., Butikofer U., Sieber R., Jeangros B., Bosset J.O., 2002. Correlation between fatty acids in cows' milk fat produced in the Lowlands, Mountains and Highlands of Switzerland and botanical composition of the fodder. Int. Dairy J., 12, 661-666.

Coppa M., Ferlay A., Leroux C., Jestin M., Chilliard Y., Martin B., Andueza D., 2010. Prediction of milk fatty acid composition by Near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS). Int. Dairy J., 20, 182-189.

Coppa M., Ferlay A., Monsallier F., Verdier-Metz I., Pradel P., Didienne R., Farruggia A., Montel M.C., Martin B., 2011. Milk fatty acid composition and cheese texture and appearance from cows fed hay or different grazing systems on upland pastures. J. Dairy Sci., 94, 1132-1145.

Coudray B., 2011. The contribution of dairy products to micronutrient intakes in France. J. Amer. Coll. Nutr., 30, 410S-414S.

Couvreur S., Hurtaud C., Lopez C., 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.

Destaillats, F., Trottier J.P., Galvez J.M.G, Angers P., 2005. Analysis of alpha-linolenic acid biohydrogenation intermediates in milk fat with emphasis on conjugated linolenic acids. J. Dairy Sci., 88, 3231-3239.

Dewhurst R.J., Shingfield K.J., Lee M.R.F., Scollan N.D., 2006. Increasing the concentrations of beneficial polyunsaturated fatty acids in milk produced by dairy cows in high-forage systems. Anim. Feed Sci. Technol., 131, 168-206.

Dhiman T.R., Zanten K.V., Satter L.D., 1995. Effect of dietary fat source on fatty acid composition of cow's milk. J. Sci. Food Agric., 69, 101-107.

Doreau M., Ferlay A., 1994. Digestion and utilisation of fatty acids by ruminants. Anim. Feed Sci. Technol., 45, 379-396.

Doreau M., Bauchart D., Chilliard Y., 2011. Enhancing fatty acid composition of milk and meat through animal feeding. Anim. Prod. Sci., 51, 19-29.

Dreiucker J., Vetter W., 2011. Fatty acids patterns in camel, moose, cow and human milk as determined with GC/MS after silver ion solid phase extraction. Food Chem., 126, 45-750.

Drewnowski A., 2011. The contribution of milk and dairy products to micronutrient density and affordability of the U.S. diet. J. Amer. Coll. Nutr., 30, 422S-428S.

Elder S., Haytowitz D.B., Howe J., Peterson J.W. and Booth S.L., 2006. Vitamin K contents of meat, dairy, and fast food in the US diet. J. Agric. Food Chem., 54, 463-467.

Enjalbert F., Videau Y., Nicot M.C., Troegeler-Meynadier A., 2008. Effects of induced subacute ruminal acidosis on milk fat content and milk fatty acid profile. J. Anim. Physiol. Anim. Nutr., 92, 284-291.

Falchero L., Lombardi G., Gorlier A., Lonati M., Odoardi M., Cavallero A., 2010. Variation in fatty acid composition of milk and cheese from cows grazed on two alpine pastures. Dairy Sci. Technol., 90, 657-672.

FAO, 2001. Human energy requirements. Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation: FAO, Food and Nutrition Technical Report Series. FAO. 2012. FAO Stat. http://faostat.fao.org/

Fearon A. M., Mayne C. S., Beattie J.A.M., Bruce D.W. 2004. Effect of level of oil inclusion in the diet of dairy cows at pasture on animal performance and milk composition and properties. J. Sci. Food Agric., 84, 497-504.

Ferlay A., Martin B., Pradel Ph., Coulon J.B., Chilliard Y. 2006. Influence of grass-based diets on milk fatty acid composition and milk lipolytic system in Tarentaise and Montbéliarde cow breeds. J. Dairy Sci., 89, 4026-4041.

Ferlay A., Agabriel C., Sibra C., Journal C., Martin B., Chilliard Y., 2008. Tanker milk variability of fatty acids according to farm feeding and husbandry practices in a French semi-mountain area. Dairy Sci. Technol., 88, 193-215.

Ferlay A., Martin B., Lerch S., Gobert M., Pradel P., Chilliard Y., 2010. Effects of supplementation of maize silage diets with extruded linseed, vitamin E and plant extracts rich in polyphenols, and morning vs. evening milking on milk fatty acid profiles in Holstein and Montbéliarde cows. Animal, 4, 627-640.

Fievez V., Colman E., Castro-Montoya J.M., Stefanov I., Vlaemink B., 2012. Milk odd- and branched-chain fatty acids as biomarlers of rumen function - An update. Anim. Feed Sci. Technol., 172, 51-65.

Flowers G., Ibrahim S. A., AbuGhazaleh A.A., 2008. Milk fatty acid composition of grazing dairy cows when supplemented with linseed oil. J. Dairy Sci., 91, 722-730.

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.

Fournier B., Sann L., Guillaumont M., Leclercq M., 1987. Variations of phylloquinone concentration in human milk at various stages of lactation and in cow's milk at various seasons. Am. J. Clin. Nutr., 45, 551-558.

Giesy J.G., McGuire M.A., Shafii B., Hanson T.W., 2002. Effect of dose of calcium salts of conjugated linoleic acid (CLA) on percentage and fatty acid content of milk fat in midlactation holstein cows. J. Dairy Sci., 85, 2023-2029.

Givens D.I., 2010. Milk and meat in our diet: good or bad for health? Animal, 4, 1941-1952.

Glasser F., Ferlay A., Chilliard Y., 2008. Oilseed lipid supplements and fatty acid composition of cow milk: a meta-analysis. J. Dairy Sci., 91, 4687-4703.

Graulet B., 2010. Vitamins naturally occuring in bovine milk. In: Improving the safety and quality of milk. Griffiths M. (Ed). Wood-head Publishing Ltd, Cambridge, UK, 2, 231-251.

Graulet B., Matte J.J., Desrochers A., Doeppel L., Palin M.F., Girard C.L., 2007. Effects of dietary supplements of folic acid and vitamin B_{12} on metabolism of dairy cows in early lactation. J. Dairy Sci., 90, 3442-3455.

Graulet B., Piquet M., Duriot B., Pradel P., Hulin S., Cornu A., Portelli J., Martin B., Farruggia A., 2012. Variations des teneurs en micronutriments de l'herbe de prairies de moyenne montagne et transfert au lait. Fourrages, 209, 59-68.

Hartman A.M., Dryden L.P., 1965. Vitamins in milk and milk products. American Dairy Science Association, Champaign, IL, USA, 123p.

Harvatine K.J., Allen M.S., 2006. Effects of fatty acid supplements on milk yield and energy balance of lactating dairy cows. J. Dairy Sci., 89, 1081-1091.

Hulshof P.J.M., van Roekel-Jansen T., van de Bovenkamp P., West C.E., 2006. Variation in retinol and carotenoids content of milk and milk products in The Netherlands. J. Food Comp. Anal., 19, 67-75.

Jensen R.G., 2002. The composition of bovine milk lipids: January 1995 to December 2000. J. Dairy Sci., 85, 295-350.

Kamao M., Tsugawa N., Suhara Y., Okano T., 2007. Determination of fat-soluble vitamins in human plasma, breast milk and food samples: application in nutrition survey for establishment of dietary reference intakes for Japanese. J. Health Sci., 53, 257-262.

Legrand P., Astorg P.O., Bougnoux P., Calvarin J., Chalon S., Dallongeville J., Dumas C., Friocourt P., Gerber M., Guesnet P., Kalonji E., Lapillonne A., Morise A., Lecerf J.M., Margaritis I., Moulin P., Pieroni G., 2010. Avis de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments relatif à l'actualisation des apports nutritionnels conseillés pour les acides gras. Afssa, saisine n° 2006-SA-0359. http://www.afssa.fr/Documents/NUT2006sa0359.pdf

Leiber F., Kreuze M., Nigg D., Wettstein H.R., Scheeder M.R.L., 2005. A study on the causes for the elevated n-3 fatty acids in cows' milk of alpine origin. Lipids, 40, 191-202.

Lerch S., Ferlay A., Pomiès D., Martin B., Pires J.A.A., Chilliard Y., 2012a. Rapeseed or linseed supplementation of grass-based diets: effects on dairy performance of Holstein cows over two consecutive lactations. J. Dairy Sci., 95, 1956-1970.

Lerch S., Ferlay A., Shingfield K.J., Martin B., Pomiès D., Chilliard Y., 2012b. Rapeseed or linseed supplements in grass-based diets: effects on milk fatty acid composition of Holstein cows over two consecutive lactations. J. Dairy Sci., 95, 5221-5241.

Lerch S., Shingfield K.J., Ferlay A., Vanhatalo A., Chilliard Y., 2012c. Rapeseed or linseed supplementation of grass-based diets: effects on conjugated linoleic and conjugated linolenic acid isomers in milk fat from Holstein cows over two consecutive lactations. J. Dairy Sci., 95, 7269-7287.

Loor J.J., Ferlay A., Ollier A., Doreau M., Chilliard Y., 2005a. 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.

Loor J.J., Ueda K., Ferlay A., Chilliard Y., Doreau M., 2005b. Intestinal flow and digestibility of *trans* fatty acids and conjugated linoleic acids (CLA) in dairy cows fed a high-concentrate diet supplemented with fish oil, linseed oil, and sunflower oil. Anim. Feed Sci. Technol., 119, 203-225.

Martin B., Fedele V., Ferlay A., Grolier P., Rock E., Gruffat D., Chilliard Y., 2004. Effects of grass-based diets on the content of micronutrients and fatty acids in bovine and caprine dairy products. In : Land use systems in grassland dominated regions. Lüscher A., Jeangros B., Kessler W., Huguenin O., Lobsiger M., Millar N., Suter D. (Eds). Vdf, Zürich, Swiss, 9, 876-886.

Martin S.A., Jenkins T.C., 2002. Factors affecting conjugated linoleic acid and trans-C18:1 fatty acid production by mixed ruminal bacteria. J. Anim. Sci., 80, 3347-3352.

McDermott C.M., Beitz D.C., Littledike E.T., Horst R.L., 1985. Effects of dietary vitamin D_3 on concentrations of vitamin D and its metabolites in blood plasma and milk of dairy cows. J. Dairy Sci., 68, 1959-1967.

Mensink R.P., Zock P.L., Kester A.D., 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.

Meschy F., 2007. Alimentation minérale et vitaminique des ruminants : actualisation des connaissances. INRA Prod. Anim., 20, 119-128.

Moore C.E., Hafliger H.C., Mendivil O.B., Sanders S.R., Bauman D.E., Baumgard L.H., 2004. Increasing amounts of conjugated linoleic acid progressively reduces milk fat synthesis immediately postpartum. J. Dairy Sci., 87, 1886-95.

National Research Council, 2001. Nutrient requirements of dairy cattle. 7th revised edition. National Academy Press, Washington, DC.

Nozière P., Graulet B., Lucas A., Martin B., Grolier P., Doreau M., 2006. Carotenoids for ruminants: from forages to dairy products. Anim. Feed Sci. Technol., 131, 418-450.

Palmquist, D.L., Beaulieu, A.D., Barbano, D.M., Feed and animal factors influencing milk fat composition. J. Dairy Sci., 1993, 76, 1753-1771.

Pandya A.J., Ghodke K.M., 2007. Goat and sheep milk products other than cheeses and yoghurt. Small Rum. Res., 68, 193-206.

Park Y.W., Guo M.R., 2006. Goat milk products: Types of products, manufacturing technology, chemical composition and marketing. In: Handbook of Milk of Non-Bovine Mammals. Park Y.W., Haenlein G.F.W. (Eds). Blackwell Publishers. Ames, Iowa and Oxford, England. 59-106.

Park Y.W., Juarez M., Ramos M., and Haenlein G.F.W., 2007. Physico-chemical characteristics of goat and sheep milk. Small Rum. Res., 68, 88-113.

Petit H.V., 2010. Review: Feed intake, milk production and milk composition of dairy cows fed flaxseed. Can. J. Anim. Sci., 90, 115-127.

Plourde M., Destaillats F., Chouinard P.Y., Angers P., 2007. Conjugated alpha-linolenic acid isomers in bovine milk and muscle. J. Dairy Sci., 90, 5269-5275.

Rabiee A.R., Breinhild K., Scott W., Golder H.M., Block E., Lean I.J., 2012. Effect of fat additions to diets of dairy cattle on milk production and components: a meta-analysis and meta-regression. J. Dairy Sci., 95, 3225-3247.

Ragaller V., Lebzien P., Bigalke W., Südekum K.H., Hüther L., Flachowsky G., 2010. Effects of a pantothenic acid supplementation to different rations on ruminal fermentation, nutrient flow at the duodenum, and on blood and milk variables of dairy cows. J. Anim. Physiol. Anim. Nutr., 95, 730-743.

Ragaller V., Lebzien P., Südekum K.H., Lüther L., Flachowsky G., 2011. Pantothenic acid in ruminant nutrition: a review. J. Anim. Physiol. Anim. Nutr., 95, 6-16.

Raynal-Ljutovac K., Lagriffoul G., Paccard P., Guillet I., Chilliard Y., 2008. Composition of goat and sheep milk products: an update. Small Rum. Res., 79, 57-72.

Renna M., Collomb M., Münger A., Wyss U., 2010. Influence of low-level supplementation of grazing dairy cows with cereals or sugar beet pulp on the concentrations of CLA isomers in milk. J. Sci. Food Agric., 90, 1256-1267.

Roy A., Ferlay A., Shingfield K. J., Chilliard Y., 2006. Examination of the persistency of milk fatty acid composition responses to plant oils in cows given different basal diets, with particular emphasis on trans-C-18:1 fatty acids and isomers of conjugated linoleic acid. Anim. Sci., 82, 479-492.

Santschi D.E., Berthiaume R., Matte J.J., Mustafa A.F., Girard C.L., 2005. Fate of supplementary B-vitamins in the gastrointestinal tract of dairy cows. J. Dairy Sci., 88, 2043-2054.

Schmidely P., Glasser F., Doreau M., Sauvant D., 2008. Digestion of fatty acids in ruminants: a meta-analysis of flows and variation factors. 1. Total fatty acids. Animal, 2, 677-690.

Schwab E.C., Schwab C.G., Shaver R.D., Girard C.L., Putnam D.E., Whitehouse N.L., 2006. Dietary forage and nonfiber carbohydrate contents influence B-vitamin intake, duodenal flow, and apparent ruminal synthesis in lactating dairy cows. J. Dairy Sci., 89, 174-187.

Seck M., Voelker Linton J.A., Allen M.S., Chouinard P.Y., Girard C.L., 2010a. Effects of forage family (alfalfa *vs* orchardgrass) on apparent ruminal synthesis of niacin and vitamin B_6 in lactating dairy cows. J. Dairy Sci., 93, 152.

Seck M., Voelker Linton J.A., Allen M.S., Chouinard P.Y., Girard C.L., 2010b. Effects of forage-to-concentrate ratio and rumen fermentation characteristics on apparent ruminal synthesis of niacin and vitamin B_6 in lactating dairy cows. J. Dairy Sci., 93, 435.

Seck M., Allen M.S., Chouinard P.Y., Girard C.L., 2011. Particle size and endosperm type of dry ground corn alter apparent ruminal synthesis of B-vitamins in lactating dairy cows. J. Dairy Sci., 94, 378.

Selberg KT, Lowe AC, Staples CR, Luchini ND, Badinga L., 2004. Production and metabolic responses of periparturient Holstein cows to dietary conjugated linoleic acid and trans-octadecenoic acids. J. Dairy Sci., 87, 158-68.

Shea M.K., Booth S.L., 2008. Update on the role of vitamin K in skeletal health. Nutr. Rev., 66, 549-557.

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., Sæbø A., Sæbø P.C., Toivonen V., Griinari J.M., 2009. Effect of abomasal infusions of a mixture of octadecenoic acids on milk fat synthesis in lactating cows. J. Dairy Sci., 92, 4317-4329.

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.

United States Department of Agriculture (USDA), 1997. Dietary Reference Intakes for calcium, phosphorus, magnesium, vitamin D and fluoride. www.nap.edu

United States Department of Agriculture (USDA), 1998. Dietary Reference Intakes for thiamin, riboflavin, niacin, vitamin B_6, folate, vitamin B_{12}, pantothenic acid, biotin and choline. www.nap.edu

United States Department of Agriculture (USDA), 2000. Dietary Reference Intakes for vitamin C, vitamin E, selenium and carotenoids. www.nap.edu

United States Department of Agriculture (USDA), 2001. Dietary Reference Intakes for vitamin A, vitamin K, arsenic, boron, chromium, copper, iodine, iron, manganese, molybdenium, nickel, silicon, vanadium and zinc. www.nap.edu

Vanhatalo A., Kuoppala K., Toivonen V., Shingfield K.J., 2007. Effects of forage species and stage of maturity on bovine milk fatty acid composition. Eur. J. Lipid Sci. Technol., 109, 856-867.

Vasta V., Makkar H.P.S., Mele M., Priolo A., 2009. Ruminal biohydrogenation as affected by tannins *in vitro*. Br. J. Nutr., 102, 82-92.

Vasta V., Yanez-Ruiz D.R., Mele M., Serra A., Lucinao G., Lanza M., Biondi L., Priolo A., 2010. Bacterial and protozoal communities and fatty acid profile in the rumen of sheep fed a diet containing added tannins. Appl. Environ. Microbiol., 76, 2549-2555.

Vissers P., Streppel M., Feskens E., de Groot L., 2011. The contribution of dairy products to micronutrient intake in The Netherlands. J. Am. Coll. Nutr., 30, 415S-421S.

Vlaeminck B., Fievez V., Cabrita A.R.J., Fonseca A.J.M., Dewhurst R.J., 2006. Factors affecting odd- and branched-chain fatty acids in milk: a review. Anim. Feed Sci. Technol., 131, 389–417.

Weiss W.P., Ferreira G., 2006. Water soluble vitamins for dairy cattle. In: 15th Tri-State Dairy Nutr. Conf. Proc. held at Fort-Wayne, USA, 51-63.

Willett W.C., Stampfer M.J., Manson J.E., Colditz G.A., Speizer F.E., Rosner B.A.,

Sampson L.A., Hennekens C.H. 1993. Intake of trans fatty acids and risk of coronary heart disease among women. Lancet, 341, 581-585.

Wolter R., 1988. Besoins vitaminiques des ruminants. INRA Prod. Anim., 1, 311-318.

Zened A., Troegeler-Meynadier A., Nicot M. C., Combos S., Cauquil L., Farizon Y., Enjalbert F. 2011. Starch and oil in the donor cow diet and starch in substrate differently affect the in vitro ruminal biohydrogenation of linoleic and linolenic acids. J. Dairy Sci., 94, 5634-5645.

Résumé

Après un rappel de l'origine digestive et métabolique des acides gras et des composés vitaminiques du lait, cet article relate l'effet des principaux facteurs alimentaires sur leur concentration. L'herbe pâturée, par rapport à des rations hivernales, diminue les teneurs du lait en acides gras saturés au profit des acides gras *trans* et polyinsaturés dont le C18:3n-3 et le CLA-*c*9*t*11. Les supplémentations des rations des vaches laitières en lin ou en colza augmentent les teneurs du lait en acides gras *trans* et légèrement en CLA-*c*9*t*11, à court terme et aussi à long terme. Le lin produit des laits plus riches en C18:3n-3 et plus pauvres en C18:1-*c*9 que le colza. Des réponses différentes existent en fonction de l'interaction entre la nature des fourrages, la teneur de la ration en amidon et le type d'oléagineux. Les tannins ou les huiles essentielles ont peu d'influence sur la composition en acides gras du lait. Hormis la vitamine B_{12}, l'ensemble des vitamines dans le lait peut provenir des fourrages ou du concentré et/ou du complément minéral contenant les vitamines A, E et D_3. Le ruminant peut également synthétiser les vitamines A, C, B_3, et D à partir de précurseurs apportés dans la ration. Les vitamines B et K sont synthétisées par les bactéries ruminales. Les facteurs nutritionnels influençant les concentrations en vitamines dans le lait sont peu documentés, à l'exception de la vitamine A. L'alimentation est néanmoins un levier important permettant d'augmenter la qualité nutritionnelle du lait.

Abstract

Feeding control of fatty acid composition and vitamin content in the cow milk

This paper, after summarising the digestive and metabolic origins of milk fatty acids and vitamins, presents the effects of the main nutritional factors on their concentration. Grazed grass, when compared to winter diets, decreased the milk content of saturated fatty acids, in favor of trans and polyunsaturated fatty acids, including C18:3n-3 and *c*9*t*11-CLA. Short- and long-term supplementation of dairy cow diets with linseed or rapeseed increased the milk content of trans fatty acids and slightly *c*9*t*11-CLA. Cows fed linseed produced milks richer in C18:3n-3 and poorer in *c*9-C18:1 than those fed rapeseed. The responses depend on interactions among the nature of the forage, starch content and oilseed nature. The addition of tannins or essential oils has little influence on milk fatty acid composition. Except for the B12 vitamin, all vitamins present in milk can originate from forages or concentrate, and/or mineral premix containing A, E and D3 vitamins. The ruminant can also synthesize A, C, B3, and D vitamins from dietary precursors. The B and K vitamins are synthesized by rumen bacteria. The nutritional factors altering milk vitamin concentrations are not well documented, except for vitamin A. Nevertheless, feeding is an important tool to improve milk nutritional quality.

FERLAY A., GRAULET B., CHILLIARD Y., 2013. Maîtrise par l'alimentation des teneurs en acides gras et en composés vitaminiques du lait de vache. In : Numéro spécial, La vache et le lait. Faverdin P., Leroux C., Baumont R. (Eds). INRA Prod. Anim., 26, 2, 177-192.