



Composés d'intérêt nutritionnel du lait et des fromages de terroir

Ouvrage collectif coordonné par Cécile Sibra (VetAgro Sup)

Novembre 2014



Composés d'intérêt nutritionnel du lait et des fromages de terroir

Ouvrage collectif coordonné par Cécile Sibra (VetAgro Sup) dans le cadre du RMT « Filières fromagères valorisant leur terroir » animé par le CNAOL.

■ Remerciements

Nous remercions tout particulièrement les personnes qui ont accepté de relire cet ouvrage et d'y apporter ainsi leur expertise :

- Laurent Forray (CNAOL) et Agnès Hauwuy (GIS Alpes Jura), animateurs du RMT,
- Jean-Baptiste Coulon (Inra, centre de Clermont-Theix-Lyon),
- Stéphane Gavoye (Actalia, Pôle technologie fromagère et laitière),
- Sophie Hulin (Pôle fromager AOP Massif central),
- Jean Legarto (Institut de l'Élevage, site de Toulouse/Castanet-Tolosan).

Nous remercions également Geneviève Freund (Centre de Ressources et de Documentation Caprine, Actalia), Dominique Pomiès (Inra, centre de Clermont-Theix-Lyon) et Denise Renard (Union Régionale des Fromages d'Appellation d'origine Comtois) pour leur aide ponctuelle à la réalisation de cet ouvrage.

■ Liste des auteurs

Agabriel Claire

VetAgro Sup Campus agronomique de Clermont 89 avenue de l'Europe BP35 63370 Lempdes claire.agabriel@vetagro-sup.fr

Cornu Agnès

Inra Clermont-Theix-Lyon UMR Herbivores 63122 Saint-Genès-Champanelle agnes.cornu@clermont.inra.fr

Gagnaire Valérie

Inra Rennes
UMR Science et Technologie du Lait et de l'Œuf
65 rue de Saint Brieuc
35042 Rennes cedex
valerie.gagnaire@rennes.inra.fr

Graulet Benoît

Inra Clermont-Theix-Lyon UMR Herbivores 63122 Saint-Genès-Champanelle benoit.graulet@clermont.inra.fr

Jouvet Thierry

ACTALIA
419 route des Champs Laitiers
BP30
74801 La Roche-sur-Foron cedex
t.jouvet@actalia.eu

Lefrileux Yves

Institut de l'Élevage Ferme expérimentale du Pradel 07170 Mirabel yves.lefrileux@idele.fr

Sibra Cécile

VetAgro Sup Campus agronomique de Clermont 89 avenue de l'Europe BP35 63370 Lempdes cecile.sibra@vetagro-sup.fr

Beuvier Eric

Inra Poligny
UR Technologie et Analyses Laitières
Rue de Versailles BP 20089
39801 Poligny cedex 1
eric.beuvier@poligny.inra.fr

Ferlay Anne

Inra Clermont-Theix-Lyon UMR Herbivores 63122 Saint-Genès-Champanelle anne.ferlay@clermont.inra.fr

Gaucheron Frédéric

Inra Rennes
UMR Science et Technologie du Lait et de l'Œuf
65 rue de Saint-Brieuc
35042 Rennes cedex
frederic.gaucheron@rennes.inra.fr

Hurtaud Catherine

Inra Rennes UMR Physiologie, Environnement, Génétique pour l'Animal et les Systèmes d'Élevage 35590 Saint-Gilles catherine.hurtaud@rennes.inra.fr

Lagriffoul Gilles

Institut de l'Élevage Campus Inra Chemin de Borde Rouge BP 42118 31321 Castanet-Tolosan cedex gilles.lagriffoul@toulouse.inra.fr

Martin Bruno

Inra Clermont-Theix-Lyon UMR Herbivores 63122 Saint-Genès-Champanelle bruno.martin@clermont.inra.fr

Thorel Lucile

ACTALIA
Route de Saint-Brieuc BP50915
35009 Rennes cedex
I.thorel@actalia.eu

■ Table des matières

Listes des tableaux, figures et abréviations	6
Introduction	11
Chapitre 1 : Les composés du lait et leur intérêt nutritionnel	15
Partie 1 : Composés majeurs (macronutriments)	17
1. Lactose	17
2. Matières protéiques	17
3. Matières grasses	18
Partie 2 : Composés mineurs (micronutriments)	23
1. Minéraux	23
2. Vitamines	25
2.1. Vitamines liposolubles (A, E, D, K)	26
2.2. Vitamines hydrosolubles (C et groupe B)	26
3. Composés phénoliques	27
4. Terpènes	28
L'essentiel à retenir	29
Chapitre 2 : Les liens entre les conditions de production et les composés d'intérêt nutritionnel	
du lait	31
Partie 1 : Caractéristiques de l'animal	32
1. Espèce animale	32
2. Race	33
3. Rang de lactation	37
4. Stade de lactation	38
Partie 2 : Environnement	40
1. Saison	40
2. Température	40
Partie 3. Conduite du troupeau	41
1. Fourrages	41
1.1. Laits produits au pâturage <i>versus</i> avec des fourrages conservés	41
1.2. Laits produits au pâturage : stade et nature botanique de l'herbe, gestion du pâturage	43
1.3. Laits produits avec des fourrages conservés	46
2. Concentrés	48
2.1. Proportion de concentrés dans la ration	48
2.2. Nature des concentrés	49
3. Graines oléagineuses et huiles	50
4. Additifs	54
4.1 Aliment minéral vitaminé (AMV)	54

	TABLE DES MATIÈRES
4.2. Huiles essentielles et extraits végétaux	55
5. Conduite de traite	55
5.1. Traite biquotidienne	55
5.2. Monotraite, suppression d'une traite, robot de traite	56
L'essentiel à retenir	57
Chapitre 3 : Les liens entre les procédés technologiques de transformation du lait et les composés d'intérêt nutritionnel du fromage	59
Partie 1 : Traitements du lait avant mise en fabrication	62
1. Stockage et conservation du lait à basse température	62
2. Travail en cuve - Acidification/égouttage - Délactosage	63
3. Traitement thermique du lait	63
Partie 2 : Fabrication fromagère et affinage	65
Ferments lactiques et autres ferments (moisissures, levures)	65
2. Écrémage du lait	65
3. Matériau de la cuve de fabrication	67
4. Salage et conditions de salage	68
5. Affinage	68
L'essentiel à retenir	72
Chapitre 4 : La composition nutritionnelle des fromages observée sur le terrain	73
Partie 1 : Des teneurs en composés liposolubles des laits et des fromages variables selon les	
conditions de production	76
1. Fromages au lait de vache	76
2. Fromages au lait de chèvre	80
Partie 2 : Des teneurs en composés hydrosolubles des fromages variables selon les conditions	0.4
de transformation	81
L'essentiel à retenir	82
Conclusion	83
Fiches synthétiques	85
Fiche n°1 : Le lait	86
Fiche n°2 : Le lactose	88
Fiche n°3 : Les matières protéiques	90
Fiche n°4 : Les matières grasses	93
Fiche n°5 : Les minéraux	96
Fiche n°6 : Les vitamines	98
Fiche n°7 : Les composés phénoliques et terpènes	101
Références bibliographiques	103

■ Liste des tableaux

- **Tableau 1.** Consommation des principaux produits laitiers dans quelques pays d'Europe en 2012 (kg/habitant).
- **Tableau 2.** Évolution de la consommation des principaux produits laitiers en France de 1988 à 2012 (kg/habitant).
- **Tableau 3.** Production et collecte de lait en 2012.
- **Tableau 4.** Fabrications, importations et exportations des principaux produits laitiers en France en 2013 (1000 tonnes).
- Tableau 5. Caractéristiques physiques des laits de vache, chèvre et brebis (moyenne et/ou valeurs extrêmes).
- **Tableau 6.** Contribution du lait aux apports nutritionnels conseillés (ANC) pour les acides gras faisant l'objet d'une recommandation.
- **Tableau 7.** Contribution du lait aux apports nutritionnels conseillés (ANC) pour des minéraux faisant l'objet d'une recommandation.
- **Tableau 8.** Contribution du lait aux apports journaliers recommandés (AJR) en quelques vitamines.
- Tableau 9. Composition moyenne des laits de vache, de chèvre et de brebis.
- **Tableau 10.** Production laitière, taux butyreux et taux protéique selon la race des animaux pour les espèces bovine (lactations brutes, toutes lactations), caprine et ovine (toutes lactations).
- **Tableau 11.** Effet de la race des vaches laitières sur la composition en acides gras du lait (écarts en %).
- **Tableau 12.** Concentration du lait en minéraux chez la vache Ayrshire au cours de la lactation (mg/kg).
- **Tableau 13.** Composition movenne des fourrages.
- **Tableau 14.** Effets de l'herbe fraîche et conservée, en comparaison à une ration équilibrée à base d'ensilage de maïs, sur le profil en acides gras du lait de vache et sur ses teneurs en terpènes et composés phénoliques.
- **Tableau 15.** Effet de la nature de la ration de base sur la teneur du lait de vache en caroténoïdes et vitamines A et E (μg/ml).
- **Tableau 16.** Proportion de feuille et de tige (%) des légumineuses et des graminées et teneurs en β-carotène (mg/kg MS).
- **Tableau 17.** Composition moyenne en acides gras de quelques concentrés, graines oléagineuses et huiles (% des AGT).
- **Tableau 18.** Effets de différentes supplémentations en huiles et graines oléagineuses chez la vache laitière sur la production et la composition du lait.
- **Tableau 19.** Effets de la forme d'apport d'acides gras polyinsaturés (AGPI) sur le profil en acides gras du lait de vache.

- **Tableau 20.** Effet du système d'alimentation sur les acides gras du lait (g/100 g d'AGT).
- **Tableau 21.** Composition nutritionnelle moyenne des fromages selon la technologie de transformation fromagère.
- Tableau 22. Variabilité de la durée de saumurage selon le volume et le type de caillé.
- **Tableau 23.** Identification de quelques peptides bioactifs dans différentes variétés de fromages.
- **Tableau 24.** Teneurs en protéines, en petits peptides (TCA-SN, azote soluble dans l'acide trichloroacétique), en peptides anti-hypertensifs Valine-Proline (VPP) et Isoleucine-Proline-Proline (IPP) et activité anti-hypertensive (valeurs d'IC₅₀) des fromages.
- Tableau 25. Composition moyenne de guinze fromages en acides gras, vitamines et minéraux.
- **Tableau 26.** Teneurs des fromages en acides gras, β-carotène et vitamines A et E selon l'alimentation des vaches.
- **Tableau 27.** Écarts de teneurs en acides gras entre fromages et laits issus de vaches pâturant en altitude (en g/100 g d'AGT).

■ Liste des figures

- **Figure 1.** Composition movenne du lait de vache (g/L de lait).
- Figure 2. Comparaison des besoins en acides aminés essentiels d'un adulte et des apports du lait de vache.
- Figure 3. Structure schématique des acides gras.
- Figure 4. Nomenclature des acides gras.
- Figure 5. Point de fusion des principaux acides gras du lait.
- Figure 6. Origine des acides gras dans le lait de vache.
- Figure 7. Origine des minéraux et des vitamines dans le lait de vache.
- **Figure 8.** Teneur en acides gras saturés du lait au cours de la lactation (g/100 g d'AGT).
- **Figure 9.** Évolution de la production et de la composition du lait au cours des 52 semaines de l'année après annulation de l'effet du stade de lactation (écart à la moyenne).
- **Figure 10.** Teneurs de l'herbe en acide α-linolénique (g/100 g de matières grasses) selon le stade et la diversité floristique des prairies.

- Figure 11. Effet du stade végétatif des légumineuses et des graminées sur leurs teneurs en β-carotène (mg/kg MS).
- Figure 12. Teneur du lait en monoterpènes selon la date et le mode de pâturage (unités arbitraires de surface x 10⁵).
- **Figure 13.** Effet du mode de conservation sur la teneur en β-carotène des fourrages (mg/kg MS).
- **Figure 14.** Effets de différentes supplémentations en huiles et graines oléagineuses (toutes transformations) sur la composition en acides gras du lait de vache (en % des AGT).
- **Figure 15.** Taux de couverture des besoins minéraux d'une vache laitière de 650 kg de poids vif ingérant 22 kg de matière sèche par jour et produisant 35 kg de lait par jour (%).
- Figure 16. Principales phases de la fabrication du fromage.
- Figure 17. Diversité des fabrications fromagères en France.
- **Figure 18.** Concentration en lactoferrine (μg/g de fromage) dans des fromages expérimentaux à pâte pressée cuite, pressée non cuite ou molle, fabriqués à partir de lait cru ou pasteurisé (technique immunochimique ELISA).
- **Figure 19.** Relations entre la composition du fromage et celle du lait en acides palmitique (C:16) et ruménique (CLA) (g/100 g d'AGT), en β-carotène et vitamine E (mg/kg de matières grasses), en vitamine B₉ (mg/kg d'eau) et en calcium (g/kg de protéines).
- **Figure 20.** *Quatre fromages de terroir.* Teneurs moyennes des trois fromages au lait de vache (Abondance, tomme de Savoie, Cantal/Salers) en acides gras (g/100 g d'AGT), en β -carotène et en vitamines A et E (mg/kg de matières grasses) selon le type de ration fourragère.
- **Figure 21.** *Laits de Haute-Loire.* Teneurs moyennes des laits en acides gras selon le type de ration fourragère (g/100 g d'AGT).
- **Figure 22.** *Quatre fromages de terroir.* Teneurs des fromages de Rocamadour en acides gras (g/100 g d'AGT) selon la proportion de matières grasses apportées par les concentrés dans la ration.
- **Figure 23.** *Quatre fromages de terroir.* Teneurs des fromages de Rocamadour en acides gras (g/100 g d'AGT) selon le stade de lactation des chèvres (en mois).
- **Figure 24.** *Quatre fromages de terroir.* Teneurs des fromages de Rocamadour en acides gras (g/100 g d'AGT), en xanthophylles et vitamines A et E (mg/kg de matières grasses) selon le type de la ration.
- **Figure 25.** *Quatre fromages de terroir.* Teneurs et variabilités des fromages en calcium, phosphore, potassium et magnésium (g/kg), en zinc (mg/kg) et en vitamine B_o (μ g/kg).

■ Liste des abréviations

ANC Apports nutritionnels conseillés

AJR Apports journaliers recommandés

AGS Acides gras saturés

AGMI Acides gras monoinsaturés

AGPI Acides gras polyinsaturés

AGT Acides gras totaux

ANSES Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

AOP Appellation d'origine protégée

CNAOL Conseil national des appellations d'origine laitières

EFSA European food safety authority

ESD Extrait sec dégraissé

GIS Groupement d'intérêt scientifique

G/S Gras / sec

MG Matières grasses

MS Matière sèche

n-3 Acide gras de la série oméga 3 (ω3)

n-6 Acide gras de la série oméga 6 (ω6)

OMS Organisation mondiale de la santé

RDA Recommanded dietary allowances

RMT Réseau mixte technologique

UGB Unité gros bétail

VNR Valeur nutritionnelle de référence

Introduction

Cécile SIBRA, Bruno MARTIN

Cet ouvrage traite du lait et des fromages de vache, de chèvre et de brebis, avec l'intention de rassembler les connaissances actuelles sur leurs composés importants vis-à-vis de la nutrition et de la santé humaines. Le but n'est pas d'apporter des références exhaustives sur les teneurs des fromages en composés d'intérêt nutritionnel; cet ouvrage ne constitue donc pas un outil adapté pour répondre aux exigences règlementaires relatives à l'affichage nutritionnel. L'objectif majeur est de montrer en quoi les pratiques de production et de transformation du lait peuvent modifier les teneurs du lait et du fromage en composés d'intérêt nutritionnel. En complément, quelques éléments sont apportés sur les composés du lait et sur les recommandations alimentaires actuelles. Cet ensemble permet de comprendre les pratiques de production ou de transformation qui influent sur la qualité nutritionnelle du lait et du fromage. Il fournit ainsi des pistes de réflexion vis-à-vis de l'évolution des pratiques, notamment celles inscrites dans les cahiers des charges.

Comment est conçu cet ouvrage?

Cet ouvrage s'adresse plus particulièrement à un public non scientifique, notamment les techniciens du secteur agricole ou agro-alimentaire. Dans ce sens, il a été rédigé de façon à être compris par des lecteurs possédant des connaissances minimales sur le lait, sa production et sa transformation. Le premier chapitre s'attache à présenter et définir les composés du lait, tout en précisant les intérêts nutritionnels de chacun; les deuxième et troisième chapitres abordent ensuite les effets des modes de production, puis des procédés technologiques de transformation, sur la composition nutritionnelle du lait et du fromage. Enfin, le quatrième chapitre va au-delà des connaissances expérimentales, en présentant des observations issues d'études menées dans des fermes, en collaboration avec des éleveurs et des acteurs de la filière laitière, en conditions réelles de terrain. Pour les lecteurs pressés, les fiches placées en fin d'ouvrage offrent, pour chaque composé du lait, une vue synthétique de l'essentiel à retenir.

Le lait au fil du temps

L'homme utilise le lait des ruminants depuis la préhistoire, plus précisément depuis la période où il a su domestiquer et élever les animaux ; les premiers indices témoignant de cette consommation laitière datent d'environ 8 700 ans avant Jésus-Christ. La fabrication fromagère semble aussi remonter à la préhistoire ; elle était le moyen de transformer le lait, denrée périssable, en un produit de longue conservation, stockable et négociable. Le fromage assurait ainsi la subsistance alimentaire de la famille, en particulier pendant l'hiver, et devenait une valeur d'échanges en cas de besoin. Le lait et les fromages sont donc profondément inscrits dans notre histoire collective et notre culture alimentaire.

L'image du lait a évolué au cours du temps. Jusqu'au milieu du XX^e siècle, la matière grasse était considérée comme la partie noble du lait; le beurre et la crème bénéficiaient d'une large utilisation dans les préparations culinaires. La partie protéique, bien qu'essentielle dans la transformation fromagère, était considérée comme un sous-produit et n'a été valorisée qu'à partir des années 1970, notamment dans le cadre de la mise en place du paiement du lait à la qualité. À la même époque, la matière grasse laitière a été mise sur la sellette par une partie du corps médical, qui l'accusait de favoriser les maladies cardio-vasculaires et certains cancers. Ce courant de pensée tend à se modérer depuis le début des années 2000, période où les chercheurs ont commencé à démontrer le caractère excessif de ce discours. Actuellement, même si le lait de vache est parfois remis en cause par le corps médical, dans la plupart des publications scientifiques, le régime alimentaire est considéré dans son

ensemble et la place importante du lait dans l'alimentation humaine est réaffirmée, en mettant en évidence ses qualités nutritionnelles multiples et complémentaires des autres constituants du régime.

Aujourd'hui, le lait et les produits laitiers occupent une part importante dans l'alimentation des populations de nombreux pays. Ils bénéficient d'un capital de confiance élevé auprès des consommateurs, qui semblent les associer à la santé, au plaisir, à la fraîcheur et à la praticité, image soutenue par les producteurs et les industriels du secteur. Le lait est plus largement consommé par les jeunes enfants, alors que les adultes préfèrent le fromage. Les messages négatifs relatifs au lait ont *a priori* peu imprégné le grand public.

Lait et produits laitiers : une place importante dans notre alimentation...

En France, le niveau de consommation de produits laitiers demeure élevé, indépendamment de l'évolution des styles de vie. Notre pays se caractérise par une forte consommation de beurre et de fromage (1^{er} rang européen en 2012) et une faible consommation de lait (12^e rang européen) (tableau 1). Entre 1988 et 2012, les consommations de beurre et de lait ont diminué d'environ 15 et 30 %, alors que celle de fromage a augmenté de presque 20 % (tableau 2). Les repas pris en restauration hors foyer contribuent largement à la consommation de produits laitiers, puisqu'en 2012 environ 26 % du beurre, 23 % de la crème et 16 % du fromage y ont été servis.

	1988	1998	2008	2012
Beurre	8,8	8,3	7,5	7,4
Fromages	22,0	23,6	26,9	26,2
Laits liquides	79,0	75,5	58,9	54,3

Sources CNIEL 2014, Debry 2001

Tableau 2. Évolution de la consommation des principaux produits laitiers en France de 1988 à 2012 (kg/habitant).

... et dans notre économie

La France est le deuxième producteur européen de lait de vache, derrière l'Allemagne. Elle totalisait en 2012 environ 3,6 millions de vaches laitières, 1,3 millions de brebis laitières et 0,9 million de chèvres. Les volumes de lait produits par les brebis

	Beurre ¹	Fromages ²	Laits liquides
Allemagne	6,2	24,3	55,0
Autriche	5,0	19,2	77,6
Danemark	1,8	16,4	90,0
Espagne	0,6	9,3	83,2
Estonie	4,1	20,8	124,8
Finlande	4,5	23,7	132,4
France	7,4	26,2	54,3
Grèce	0,6	22,6	47,6
Irlande	2,4	6,7	39,9
Italie	2,3	20,9	54,4
Luxembourg	6,1	24,4	38,0
Pays-Bas	3,3	19,4	49,0
Pologne	4,1	11,4	42,2
Roumanie	0,6	4,4	12,1
Royaume-Uni	3,4	11,2	106,2
Suède	1,8	19,7	92,1
Union Européenne ³	3,7	17,2	64,0

Consommation apparente, soit production + imports - exports

Source CNIEL 2014

Tableau 1. Consommation des principaux produits laitiers dans quelques pays d'Europe en 2012 (kg/habitant).

et les chèvres représentaient environ 1,1 et 2,6 % par rapport à celui produit par les vaches. La grande majorité de ces laits est transformée par l'industrie, le lait de chèvre étant plus souvent transformé à la ferme que celui de vache et de brebis (tableau 3). Au cours de la campagne 2012-2013, un peu moins de 72 000 éleveurs de vaches ont livré du lait et de l'ordre de 5 200 éleveurs ont vendu en direct tout ou partie de leur production, en général après transformation (fromages, yaourts). Les régions Bretagne, Pays de Loire et Basse-Normandie rassemblaient en 2013 plus de 40 % des producteurs français de lait de vache et assuraient presque 50 % des livraisons de ce même lait.

	Vache	Chèvre	Brebis
Volume produit (millions de L)	23 578	614	271
Part du lait livré à l'industrie			
(%)	98	80	94

Source CNIEL 2014

Tableau 3. Production et collecte de lait en 2012.

¹ Beurre et butter oil, en équivalent beurre

² Fromages tous laits, y compris fromages frais

³ UE à 27 pays

Près de 2000 établissements assurent la transformation industrielle du lait. En valeur, la fabrication de produits laitiers a représenté en 2011 environ 16 % de la production de l'industrie agroalimentaire. En 2012, la France s'est située au 2° rang européen pour la fabrication de fromage, de beurre, de crème, de lait fermenté (yaourt) et de lait en poudre, et au 3° pour celle de lait liquide. Notre pays importe du beurre et du fromage : en 2012, il en a été respectivement le 1° et le 4° importateur à l'échelle de l'Europe; dans le même temps, il a été le 2° exportateur de lait en poudre et le 3° de fromage (tableau 4).

Actuellement, 45 fromages français bénéficient d'une appellation d'origine protégée (AOP), dont 28 au lait de vache, 14 au lait de chèvre et 3 au lait de brebis. En 2012, ces fromages ont représenté 16 % des fabrications de fromages affinés.

	Fabrications	Importations	Exportations
Beurre	341¹	1874	79 ⁴
Crème	438	149	277
Yaourts et desserts lactés	2 2 3 7	84	461
Fromages	1862 ²	286	697
Laits liquides	3 638 ³	382	870
Laits en poudre	435	1075	398⁵

¹ Beurre, beurre anhydre de crème (M.G.L.A.) et de beurre (butter oil)

Source CNIEL 2014

Tableau 4. Fabrications, importations et exportations des principaux produits laitiers en France en 2013 (1000 tonnes).

² Fromages et spécialités de vache, chèvre et brebis

³ Laits pasteurisés, stérilisés, UHT, aromatisés, infantiles

⁴ Spécialités laitières à tartiner et butter oil inclus, en équivalent beurre

⁵ Poudres de lait, de babeurre et de lait infantile

Chapitre 1

Les composés du lait et leur intérêt nutritionnel

Cécile SIBRA, Benoît GRAULET, Agnès CORNU, Anne FERLAY, Catherine HURTAUD, Bruno MARTIN

Le lait est majoritairement constitué d'eau (figure 1). Ses composés d'intérêt nutritionnel peuvent être classés en deux catégories, sur la base de leur concentration : les composés majeurs (lactose, matières grasses, matières protéiques) et les composés mineurs (minéraux, vitamines, composés phénoliques, terpènes...). Le lait comporte également d'autres constituants (cellules somatiques, micro-organismes, enzymes, micropolluants...), particulièrement importants au regard d'autres qualités du lait (technologique, sanitaire, microbiologique...), qui ne sont pas abordées dans ce chapitre. L'objet est de faire le point sur les composés d'intérêt nutritionnel du lait, en les définissant, en précisant leur nature, leurs voies de synthèse et de transfert au lait, leurs teneurs moyennes, puis d'énoncer leurs intérêts nutritionnels.

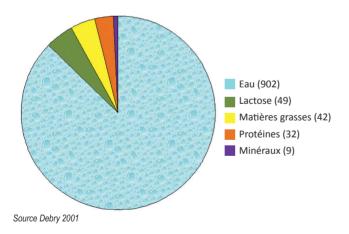


Figure 1. Composition moyenne du lait de vache (g/L de lait).

Le lait est le produit de sécrétion des glandes mammaires des femelles mammifères; sa fonction naturelle est de nourrir les jeunes après leur naissance, alors que la croissance est rapide et qu'aucun autre aliment ne peut le remplacer. La définition légale du lait a été établie à Genève en 1908, lors du 1^{cr} Congrès International de la Répression des Fraudes Alimentaires : «Le lait est le produit

intégral de la traite complète et ininterrompue d'une femelle laitière bien portante, bien nourrie et non surmenée ». La dénomination « lait » a été précisée en 1987 au niveau européen : elle est réservée « exclusivement au produit de la sécrétion mammaire normale obtenue par une ou plusieurs traites sans aucune addition ou soustraction ». La dénomination « lait » sans indication d'espèce est réservée au lait de vache. Le lait sécrété pendant les sept premiers jours de lactation (ou colostrum) et les laits issus d'animaux qui reçoivent ou ont reçu récemment des traitements médicamenteux ne sont pas commercialisables.

Le lait est un mélange hétérogène composé de la phase aqueuse (ou sérum) qui contient l'eau et les produits hydrosolubles (lactose, minéraux et protéines solubles), de la phase colloïdale constituée principalement des caséines et d'une partie des minéraux, et de l'émulsion contenant les globules gras.

Le pH du lait frais est proche de la neutralité, sa masse volumique est légèrement supérieure à 1 kg/L, son point d'ébullition légèrement supérieur à 100°C et son point de congélation légèrement inférieur à 0°C (tableau 5).

D'un point de vue nutritionnel, le lait contient des quantités significatives de nombreux nutriments essentiels à la vie. Il représente en particulier une source importante de protéines et de minéraux dans notre alimentation. La consommation de lait et de produits laitiers est conseillée à tous les âges, tant pendant la croissance des enfants que pour le maintien en santé tout au long de la vie.

Aborder les composés d'intérêt nutritionnel du lait amène à s'appuyer sur des éléments de référence. Les notions d'apports nutritionnels conseillés (ANC) et d'apports journaliers recommandés (AJR) sont utilisées dans cet ouvrage. Les ANC

	Vache	Chèvre	Brebis
pH (à 20°C)	6,6 (6,6 à 6,8)	6,5 à 6,6	6,6 (6,5 à 6,9)
Masse volumique (g/ml à 20°C)	1,032 (1,028 à 1,033)	1,027 à 1,035	1,034 à 1,039
Point d'ébullition (°C)	100,5 (100,17 à 100,15)		
Point de congélation (°C)	-0,520 à -0,550	-0,550 à -0,583	-0,570
Énergie (kcal/L)	701 (587 à 876)	600 à 750	1100

Sources Boubezari 2010, FAO 1998, Fondation de technologie laitière du Québec 2002

Tableau 5. Caractéristiques physiques des laits de vache, chèvre et brebis (moyenne et/ou valeurs extrêmes).

sont élaborés et publiés en France depuis 1981 par l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail). Ce ne sont pas des normes, mais des repères alimentaires favorisant un bon état de nutrition, évitant des états de carences, de déséquilibre ou de surcharge. Les ANC sont estimés pour une population considérée en bonne santé. Ils sont calculés sur la base du besoin nutritionnel moyen d'un groupe d'individus, auquel est ajoutée une marge de sécurité prenant en compte les différences entre individus. Les ANC prévoient de couvrir 130% du besoin nutritionnel moyen, englobant ainsi les besoins de la quasi-totalité de la population (>97%). Ils sont déclinés pour différentes catégories de population, selon l'âge (14 catégories du nourrisson à la personne de plus de 75 ans), le sexe, l'intensité de l'activité physique ou l'état physiologique; les ANC les plus couramment présentés concernent les hommes adultes de 20 à 50 ans, à corpulence et activité physique moyennes. Les experts français à l'origine des ANC ont choisi de compléter les données scientifiques utilisées par la notion de « culture alimentaire », c'està-dire les motivations et habitudes alimentaires de la population nationale, dans la mesure où ces dernières ne sont pas nuisibles à la santé. Cette démarche, ainsi que les mises à jour propres à chaque pays, expliquent les différences qui existent entre les ANC utilisés en France et les RDA (recommended dietary allowances) proposés par les spécialistes des États-Unis, ou les ANC d'autres pays.

Les AJR sont des valeurs de référence utilisées dans l'étiquetage des produits alimentaires pour l'information du consommateur. Ils doivent donc être interprétés comme des valeurs indicatives, facilement lisibles et compréhensibles par le consommateur : elles correspondent au besoin

moyen estimé pour un adulte et ne prennent pas en compte les différences entre individus (âge, sexe, niveau d'activité, etc.). Les AJR ont été établis en 1993 au niveau de l'Union Européenne, sur la base des travaux encadrés par l'EFSA (European food safety authority ou Autorité européenne de sécurité des aliments). Les conseils nutritionnels fournis par l'EFSA émanent de travaux d'expertise des états membres européens, ainsi que de travaux d'organisations internationales, telles que l'organisation mondiale de la santé (OMS). Depuis fin 2008, l'EFSA est chargée de la mise à jour des valeurs de référence élaborées en 1993 pour l'établissement des AJR. La notion de valeurs nutritionnelles de référence (VNR) est désormais introduite et remplace progressivement celle d'AJR (règlement n°1169/2011 du 25 octobre 2011). À ce jour, les VNR sont établies pour la plupart des nutriments, sauf pour les vitamines et les minéraux, dont la teneur dans 100 g ou 100 mL de produit doit encore être indiquée en pourcentage des AJR.

18

Partie 1 : Composés majeurs (macronutriments)

1. Lactose

Le lactose est le sucre spécifique du lait. Il est aussi le composant majeur le plus simple et sa teneur est relativement constante. Il est présent dans le lait de vache à hauteur de 47 à 52 g/L; sa concentration est légèrement inférieure dans le lait de brebis (41 à 55 g/L) et plus faible d'environ 10 % dans le lait de chèvre (41 à 47 g/L).

Le lactose est un solide blanchâtre en solution dans la phase aqueuse du lait, formé par l'union de deux sucres simples, le glucose et le galactose. C'est un sucre extrêmement rare dans la nature en dehors du lait. Il est synthétisé dans la glande mammaire à partir du glucose sanguin produit essentiellement par le foie. Il contrôle, conjointement avec les minéraux, la pression osmotique du lait. La sécrétion du lactose entraîne un mouvement d'eau vers la lumière des alvéoles sécrétrices : la quantité de lait sécrétée dépend ainsi des possibilités de synthèse du lactose par la mamelle.

Le lactose est un élément nutritionnel important du lait. Il a surtout un rôle énergétique et représente environ 30 % de sa valeur calorique. C'est un glucide lent, car il doit subir une hydrolyse intestinale par la lactase pour libérer les deux sucres simples qui le composent, qui deviennent ainsi absorbables. Son ingestion renforce considérablement l'absorption intestinale du calcium et de nombreux autres minéraux. Pour les êtres humains, il est en pratique la seule source de galactose, qui est un constituant des tissus nerveux. Le lactose favorise par ailleurs la croissance de bactéries lactiques bénéfiques et l'apparition d'acide lactique dans le côlon, inhibant ainsi le développement d'une flore indésirable. Il favorise aussi l'absorption du cholestérol et des acides biliaires; il ne participe pas à la formation de la plaque dentaire et à l'apparition de caries.

La consommation de lait peut s'accompagner d'une intolérance au lactose, surtout chez les sujets habituellement faibles consommateurs. Elle se traduit par des troubles diarrhéiques passagers liés à la production excessive d'acide lactique au niveau de l'intestin. Cette intolérance survient à cause d'un déficit de production de lactase, qui peut apparaître progressivement avant l'âge adulte.

2. Matières protéiques

Les protéines sont des molécules qui se caractérisent par la présence d'azote (N). Elles sont formées d'un enchaînement d'acides aminés reliés entre eux par des liaisons peptidiques. Parmi les vingt acides aminés qui composent les protéines de l'organisme humain, huit sont indispensables (ou essentiels) à l'homme, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent pas être synthétisés par l'organisme et sont fournis uniquement par l'alimentation, ou qu'ils ne sont pas synthétisés en quantité suffisante. Il s'agit de l'isoleucine, la leucine, la lysine, la valine, la thréonine, la méthionine, la phénylalanine et le tryptophane. Deux autres acides aminés, l'histidine et l'arginine, sont dits semi-essentiels, car seuls les nourrissons ont besoin d'un apport exogène (ces deux acides aminés se trouvent dans le lait maternel). Les teneurs moyennes en matières protéiques sont respectivement de l'ordre de 32, 35 et 55 g/kg dans le lait de vache, de chèvre et de brebis.

Les matières protéiques du lait sont classées en deux catégories d'après leur solubilité dans l'eau et leur stabilité : d'une part, les caséines, qui sont en suspension colloïdale et précipitent sous l'action de la présure ou lors de l'acidification à un pH d'environ 4,6; d'autre part, les protéines sériques, qui sont en solution dans le sérum et précipitent sous l'action de la chaleur. Le lait contient aussi de l'azote non protéique (respectivement de l'ordre de 1,7 g/kg, 2,6 g/kg et 2,2 g/kg pour le lait de vache, de brebis et de chèvre), dont le constituant majeur est l'urée. Les caséines représentent de l'ordre de 80 % de toutes les protéines du lait. Elles se regroupent sous forme de structures sphériques poreuses appelées micelles. Les quatre principales protéines contenues dans les micelles sont les caséines α_{s1} , α_{s2} , β et κ ; leurs proportions respectives dans les caséines totales du lait de vache sont 40, 10, 35 et 12 %. Dans le lait de chèvre, la proportion de caséine a, peut être très variable selon le génotype des animaux (0 à 25 % des caséines totales).

La caséine κ , quantitativement peu importante, joue un rôle majeur dans le phénomène de coagulation du lait sous l'action de la présure. Les protéines sériques représentent environ 20 % des matières protéiques du lait. Les deux principales sont l' α -lactoglobuline et la β -lactalbumine (respectivement 55 et 22% dans le lait de vache). Le sérum contient aussi des immunoglobulines (13%), de l'albumine sérique bovine (SAB, 7%), de la lactoferrine (4 %), ainsi que de nombreuses enzymes et autres protéines en quantité beaucoup plus faible.

La mamelle assure la synthèse de plus de 90 % des matières protéiques du lait (caséines, β-lactoglobuline et α-lactalbumine), majoritairement à partir des acides aminés libres prélevés dans le sang, ou d'acides aminés synthétisés dans la glande mammaire. Les autres matières protéiques solubles proviennent directement du sang.

Les matières protéiques laitières présentent un intérêt nutritionnel remarquable. Lors de leur ingestion, elles sont digérées à plus de 95 % et leur apport en acides aminés indispensables permet de couvrir au minimum 80 % des besoins d'un adulte (figure 2). Elles ont aussi un rôle fonctionnel important de protection contre les agressions, grâce à des composants tels que les immunoglobulines, la lactoferrine (reconnue antimicrobienne) et certaines enzymes. Une relation a été établie entre l'ingestion de matières protéiques laitières et la prévention de nombreuses pathologies, dont l'hypertension artérielle, les caries dentaires et

même le cancer. Les matières protéiques laitières augmentent aussi la biodisponibilité du calcium en facilitant son absorption. Elles sont susceptibles, via les peptides bioactifs issus de leur dégradation enzymatique (enzymes natives du lait, enzymes issues des fermentations microbiennes et/ou enzymes gastro-intestinales), d'intervenir dans des mécanismes physiologiques en régulant des fonctions essentielles de l'organisme (systèmes gastro-intestinal, nerveux, immunitaire, cardiovasculaire). Grâce à certains acides aminés (les aromatiques), elles possèdent une propriété antioxydante globale qui leur confère un rôle d'agent protecteur contre l'oxydation. Les protéines laitières sont quelquefois responsables d'allergies alimentaires, en particulier chez les jeunes enfants; les manifestations les plus classiques sont des troubles digestifs ou respiratoires, ou des problèmes cutanés.

3. Matières grasses

Les laits de vache et de chèvre contiennent en moyenne 40 et 37 g/kg de matières grasses, celui de brebis étant environ deux fois plus riche (en moyenne 73 g/kg). Les matières grasses laitières sont en émulsion dans la phase aqueuse du lait, sous forme de globules gras. Le globule gras est formé à la périphérie d'une membrane contenant principalement des phospholipides et des protéines. Cette membrane est relativement fragile et peut être endommagée lors de traitements mécaniques tels qu'une agitation excessive du lait qui facilite l'hydrolyse ou l'oxydation des matières grasses, à l'origine de défauts de flaveur

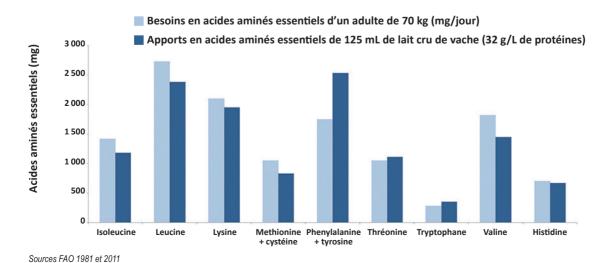


Figure 2. Comparaison des besoins en acides aminés essentiels d'un adulte et des apports du lait de vache.

20

(rancissement, goût de poisson...). La membrane, représentant de 2 à 5 % du globule gras, enveloppe la goutte lipidique qui est essentiellement constituée de triglycérides, formés de trois acides gras fixés sur une molécule de glycérol.

Les acides gras sont constitués d'une chaîne linéaire de 4 à 24 atomes de carbone et d'hydrogène, reliés entre eux par des liaisons simples ou doubles. Les acides gras à chaîne courte comportent moins de 12 atomes de carbone, ceux à chaîne moyenne entre 13 et 17 atomes et ceux à chaîne longue en comptent 18 et plus. Les acides gras saturés (AGS) ne présentent que des liaisons simples dans leur chaîne carbonée et ont une configuration linéaire dans l'espace (figure 3). Les acides gras insaturés (AGI) portent au sein de leur chaîne carbonée au moins une double liaison (acides gras monoinsaturés, AGMI), ou plusieurs doubles liaisons (acides gras polyinsaturés, AGPI). Chaque double liaison peut avoir deux configurations dans l'espace. La configuration cis est la plus courante : les 2 atomes d'hydrogène sont situés du même côté par rapport au plan de la double liaison, induisant une courbure dans la chaîne carbonée (figure 3). La configuration trans, où les 2 atomes d'hydrogène sont situés de part et d'autre du plan de la double liaison, induit une structure spatiale quasiment linéaire, proche de celle d'un AGS (figure 3). Pour la plupart des AGPI, les doubles liaisons sont séparées par

AGS : acides gras saturés AGI : acides gras insaturés

C : carbone H : hydrogène

Figure 3. Structure schématique des acides gras.

trois atomes de carbone; lorsqu'elles sont séparées seulement par deux atomes, ce sont des acides gras conjugués.

La teneur d'un acide gras dans le lait est le plus souvent exprimée en proportion (% ou g/100 g) des acides gras totaux (AGT). La nomenclature utilisée rend compte de la structure des différents acides gras (figure 4). La position des doubles liaisons dans la chaîne carbonée est mentionnée en comptant les atomes de carbone à partir de l'une ou de l'autre de ses extrémités, ce qui induit qu'un même acide gras peut être dénommé de deux façons. Dans un cas, seule la position de la première double liaison est indiquée (n-3 ou ω 3 par exemple). Dans l'autre cas, la position de toutes les doubles liaisons est indiquée, ainsi que leurs configurations (*cis*9 ou *trans12* par exemple).

Les différences entre acides gras (longueur de chaîne carbonée, nombre et configuration des doubles liaisons) leur confèrent des propriétés physiques, chimiques et physiologiques différentes. Par exemple, la température de fusion (ou point de fusion) s'accroît avec la longueur de la chaîne carbonée et, au contraire, diminue avec le nombre de doubles liaisons, de façon plus importante lorsqu'elles sont de configuration *cis* que lorsqu'elles sont de configuration *trans* (figure 5). Ainsi les matières grasses laitières riches en AGS (point de fusion élevé) sont solides à température ambiante, contrairement aux huiles végétales, riches en AGI (point de fusion faible).

À l'heure actuelle, plus de 400 acides gras ont été identifiés dans le lait, mais seulement une quinzaine d'entre eux représente une proportion supérieure à 1% des AGT. Quatre acides gras constituent à eux seuls plus de 75% des AGT : acides palmitique, oléique, stéarique et myristique. Les matières grasses du lait sont en moyenne composées de 70% d'AGS, 26% d'AGMI et 4% d'AGPI. Parmi les AGI, les AG trans représentent environ 5% des AGT.

Les acides gras du lait ont une double origine (figure 6). Les acides gras à chaîne courte et moyenne (jusqu'à 16 atomes de carbone) sont synthétisés par la mamelle, cette synthèse *de novo* étant à l'origine d'environ 40 % des AGT du lait. Les acides gras longs (18 atomes de carbone et plus) et une partie de l'acide palmitique (C16:0) sont prélevés dans le sang par la glande mammaire et représentent environ 60 % des AGT du lait. Ces acides gras proviennent de la mobilisation des réserves corporelles ou de

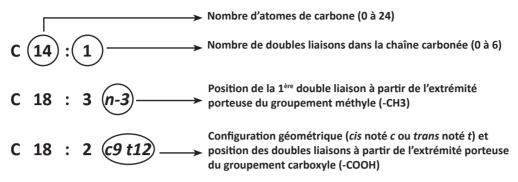


Figure 4. Nomenclature des acides gras.

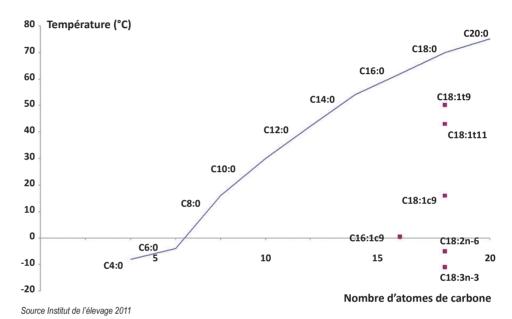


Figure 5. Point de fusion des principaux acides gras du lait.

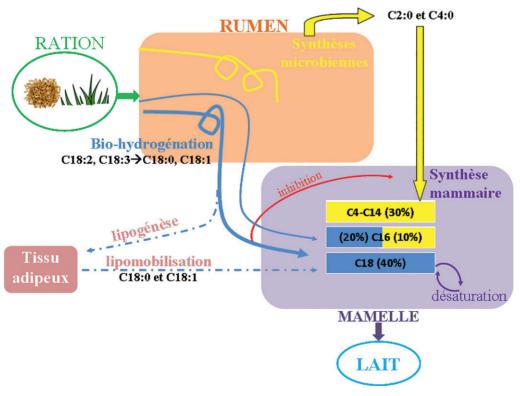


Figure 6. Origine des acides gras dans le lait de vache.

l'alimentation. Ceux apportés par l'alimentation sont essentiellement insaturés et sont largement modifiés dans le rumen où ils sont peu à peu transformés en acide stéarique (C18:0) par le processus de saturation, qui produit de nombreux acides gras intermédiaires, potentiellement transférés au lait. Ensuite, au niveau de la glande mammaire, ce processus de saturation est partiellement inversé par la production d'AGI à partir d'une partie des AGS.

La forte proportion d'AGS des matières grasses laitières est souvent pointée du doigt. Ces acides gras sont cependant nécessaires au bon fonctionnement de l'organisme humain (tableau 6) ; seuls les acides laurique, myristique et surtout palmitique sont, selon les recommandations alimentaires actuelles, à consommer en quantité limitée, du fait qu'ils sont considérés athérogènes (accentuant le dépôt de plaques d'athérome -ou petits nodules gras- dans les artères) et hypercholestérolémiants (augmentant le taux de cholestérol sanguin). Les autres AGS sont considérés comme neutres ou bénéfiques. L'acide myristique jouerait cependant un rôle essentiel dans l'activation de nombreuses protéines et la régulation de nombreuses fonctions cellulaires (fonction de myristoylation). Les AGS à chaîne moyenne (acides caproïque, caprylique et caprique) auraient des effets hypocholestérolémiants et antimicrobiens et généreraient moins de gain de poids et moins de dépôt adipeux que les AGS à chaîne longue.

Les AGI sont globalement supposés être plutôt bénéfiques à la santé humaine, en particulier ceux de configuration cis. Le principal AGMI du lait est l'acide oléique dont les effets positifs sur la santé sont souvent mentionnés dans le cadre de régimes de type « méditerranéen », mais qui est plutôt considéré comme neutre dans le cas du lait et des produits laitiers. Parmi les AGPI, les acides gras des séries oméga 3 (ou ω3 ou n-3) et oméga 6 (ou ω6 ou n-6) sont dits « essentiels » pour l'organisme, qui ne peut pas les synthétiser. Les principaux acides gras oméga 3 et oméga 6 du lait sont les acides linoléique et α-linolénique, parfois dénommés de façon abrégée AL et AAL (ou en anglais LA et ALA). Dans les régimes occidentaux, les apports d'acides gras n-6 sont trop élevés (plus de dix fois supérieurs à ceux d'acides gras n-3). Un meilleur équilibre entre ces deux types d'acides gras semble être associé à une réduction du risque d'apparition de maladies cardiovasculaires et de cancers, vraisemblablement induite par les effets antiathérogènes, anti-inflammatoires et hypotenseurs des acides gras n-3.

L'Anses préconise depuis 2011 un rapport n-6/n-3 inférieur ou égal à 5 dans notre alimentation. Le lait et les produits laitiers participent à cet objectif avec un rapport n-6/n-3 souvent inférieur à ce seuil. Les acides gras n-3 particulièrement intéressants sont principalement les acides eicosapentaénoïque (EPA)

Appellation commune	ANC ¹	ANC couverts par 250 mL de lait (%) ²		
(dénomination chimique)	(g/jour)	Vache	Chèvre	Brebis
Acides gras saturés (AGS)				
AGS totaux	25,6 maximum	24	27	47
Laurique (C12:0)	7	٦	7	٦
Myristique (C14:0)	- 17 maximum ³	- 25	- 22	- 41
Palmitique (C16:0)				
Acides gras insaturés (AGI)				
Oléique (C18:1cis9)	32 à 43	4 à 6	4 à 5	7 à 9
Linoléique (C18:2n-6, AL)	8,5	1,6	2,5	5
α-linolénique (C18:3n-3, AAL)	2	3,2	3,5	8,3
EPA (C20:5 n-3)	0.5 minimum4	1.4		
DHA (C22:6 n-3)	0,5 minimum ⁴	1,4		

¹ ANC pour un adulte consommant 2000 kcal par jour

Sources Anses 2011, Coppa et al. 2013, Lucas 2008, Varenne 2010

Tableau 6. Contribution du lait aux apports nutritionnels conseillés (ANC) pour les acides gras faisant l'objet d'une recommandation.

² Estimations sur la base de laits à 37, 38 et 70 g de matières grasses par litre, respectivement pour le lait de vache, de chèvre et de brebis

³ Recommandation pour C12+C14+C16

⁴ Recommandation pour EPA+DHA

et docosahexaénoïque (DHA), qui sont présents dans le lait seulement à l'état de traces (<0,1 %), alors qu'ils sont majoritaires dans les poissons gras. L'EPA et le DHA peuvent être synthétisés par l'organisme humain à partir de l'acide α -linolénique mais avec un rendement très faible.

Les acides gras de forme trans sont considérés de façon plutôt négative vis-à-vis de la santé humaine. Une distinction est cependant faite entre les AGI trans présents dans les huiles végétales partiellement hydrogénées par traitement industriel et ceux présents naturellement dans les produits des ruminants (lait et viande). Il est désormais admis qu'une consommation excessive d'acides gras trans de source industrielle est associée à une augmentation du risque d'apparition de maladies. Depuis 2002, il est recommandé de limiter la consommation de ces acides gras trans à moins de 2% de l'apport énergétique journalier total. Concernant les acides gras trans naturellement présents dans le lait, plusieurs publications rapportent l'absence d'association entre leur consommation et l'augmentation du risque cardiovasculaire. Parmi les acides gras trans du lait, certains acides linoléiques conjugués (en anglais conjugated linoleic acids ou CLA) auraient des propriétés anticancérigènes, antiathérogènes, antidiabétiques et immunostimulantes bien mises en évidence sur les modèles animaux. C'est le cas de l'acide ruménique qui est le CLA majoritaire des produits laitiers (environ 80% des CLA du lait). Le principal précurseur de l'acide ruménique au niveau de la mamelle ou de notre organisme est l'acide vaccénique (acide gras trans majoritaire dans le lait), qui est de ce fait souvent considéré comme favorable à la santé. Malgré leur faible teneur en CLA, le lait et la viande de ruminants sont les principales sources alimentaires d'acide ruménique, les produits laitiers étant les plus forts contributeurs.

Le lait contient également de très faibles quantités de cholestérol (de 0,1 à 0,2 g/L ou 3 à 6 g/kg de matières grasses). Il est actuellement reconnu que le cholestérol issu de l'alimentation a peu d'effet sur le cholestérol sanguin et sur la survenue des maladies cardiovasculaires, dans la mesure où notre organisme le produit naturellement et en régule la quantité dans le corps.

En pratique, dans l'alimentation, les acides gras consommés constituent un tout, les matières grasses laitières étant de plus associées aux vitamines liposolubles et à certains antioxydants. Actuellement, les études scientifiques mettant en œuvre l'ingestion de matières grasses laitières dans des quantités usuellement consommées évoquent même un effet protecteur du lait et des fromages vis à vis de certaines affections (risque cardiovasculaire par exemple).

Partie 2 : Composés mineurs (micronutriments)

1. Minéraux

Les minéraux sont des composés inorganiques, qui ne contiennent pas de carbone, d'azote ou d'oxygène dans leur structure chimique. Dans le lait et les produits laitiers, les minéraux sont classés en deux catégories suivant l'importance de leur concentration moyenne : les macroéléments (>10 mg/L) et les oligoéléments (<1 mg/L). Ils sont souvent désignés par leur symbole chimique. Les principaux macroéléments sont le calcium (Ca), le potassium (K), le phosphore (P), le chlore (Cl), le sodium (Na) et le magnésium (Mg); les oligoéléments sont le zinc (Zn), le fer (Fe), l'iode (I), le cuivre (Cu), le manganèse (Mn) et le sélénium (Se). D'autres éléments sont présents à l'état de trace (soufre, bore, fluor, silicium, brome, molybdène, cobalt, baryum, titane, lithium...).

Les minéraux du lait sont soit présents sous forme de sels en solution dans la phase aqueuse, soit associés aux micelles de caséines et donc sous forme insoluble. Au pH natif du lait, une partie du calcium (70%), du phosphore (55%), du magnésium (33%) et du zinc est liée aux caséines sous une forme colloïdale insoluble. Le sodium, le potassium et le chlore sont complètement solubles dans la phase aqueuse du lait. Ces équilibres, appelés équilibres salins, sont dynamiques et réversibles; un abaissement de la température ou du pH entraîne une solubilisation partielle du calcium et du phosphore micellaires et inversement.

Le lait de vache contient environ 1,2 g/kg de calcium et 1,0 g/kg de phosphore. Il contient également environ 1,6 g/kg de potassium, 1,1 de chlore, 0,5 de sodium et 0,12 de magnésium. Le zinc est le plus abondant des oligoéléments dans le lait de vache (4 mg/kg). Viennent ensuite le fer (0,5 mg/kg), le cuivre (0,2 mg/kg), l'iode (0,03 mg/kg) et le sélénium (de 0,01 à 0,03 mg/kg). Par rapport au lait de vache, le lait de brebis est nettement plus riche en calcium, phosphore, magnésium, zinc et cuivre; le lait de chèvre présente une composition en minéraux proche de celle du lait de vache, à l'exception de ses teneurs plus élevées en potassium et chlore.

Les minéraux présents dans l'organisme des animaux proviennent exclusivement de leur alimentation. Ils passent de la circulation sanguine au lait via les cellules de la glande mammaire. Dans le sang, ils proviennent soit directement de l'alimentation, soit des os, où le calcium, le phosphore et le magnésium sont stockés (figure 7).

Les minéraux naturellement présents dans le lait sont intéressants d'un point de vue nutritionnel (tableau 7). Le calcium, le phosphore et le magnésium sont les trois principaux constituants minéraux des os, où se concentrent, respectivement, 99, 80 et 79 % du total de ces éléments dans l'organisme. Ces trois minéraux, en plus d'être requis pour la croissance et le maintien d'une ossature en bonne santé, permettent de diminuer l'hypertension artérielle. Le calcium extra-osseux intervient au niveau des muscles (excitabilité et contraction), dans la coagulation sanguine et la perméabilité membranaire. Des subcarences sont fréquemment observées dans la population française, en particulier chez les adolescents (plus de 50%), les femmes de plus de 55 ans et les personnes âgées (près de 75 %), qui consommeraient moins des deux tiers des ANC en calcium. L'avantage du lait pour la santé osseuse est également qualitatif. Le calcium du lait est en effet très facilement disponible pour l'organisme, en raison de son association avec d'autres composés (vitamine D, lactose et certaines protéines du lactosérum) favorisant son absorption intestinale. En outre, grâce au calcium, les produits laitiers offrent une protection contre la carie dentaire, même en présence de sucre. Le phosphore est le constituant fondamental des cellules et intervient dans tous les processus vitaux ; il est absorbé par l'organisme majoritairement au niveau de l'intestin grêle, de façon plus efficace en présence de vitamine D. Son apport par le lait et les produits laitiers est cependant moins primordial que celui de calcium, car notre alimentation courante en fournit déjà des quantités supérieures aux ANC. Le magnésium est aussi impliqué dans un grand nombre de fonctions cellulaires. Son absorption par l'organisme s'effectue tout au long du tube digestif, mais surtout

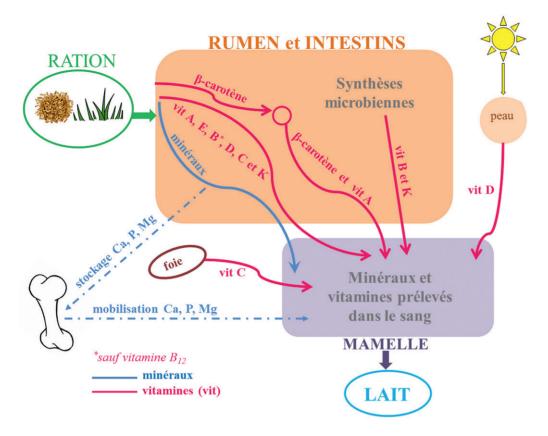


Figure 7. Origine des minéraux et des vitamines dans le lait de vache.

	ANC ¹	ANC couverts par 250 mL de lait (%)		
	(mg/jour)	Vache	Chèvre	Brebis
Macroéléments				
Calcium (Ca)	900 à 1200	26 à 35	26 à 35	41 à 54
Phosphore (P)	750 à 830	28 à31	29 à 32	37 à 41
Magnésium (Mg)	360 à 420	7 à 8	8 à 9	11 à 13
Oligo-éléments				
Zinc (Zn)	10 à 13	7 à 10	7 à 9	12 à 16
lode (I)	0,15	13	13	17
Sélénium (Se)	0,05 à 0,07	10 à 14	7 à 10	10 à 14

¹ ANC pour des adolescents et des adultes

Source CNERNA-CNRS et Afssa 2002, Raynal-Ljutovac et al. 2008

Tableau 7. Contribution du lait aux apports nutritionnels conseillés (ANC) pour des minéraux faisant l'objet d'une recommandation.

dans l'intestin grêle. Il semblerait qu'environ 20 % de la population adulte des pays industrialisés aient des apports alimentaires de magnésium inférieurs aux deux tiers des ANC.

Le lait et les produits laitiers constituent une source importante de zinc, d'iode et de sélénium dans notre alimentation; la consommation journalière de 250 mL de lait de vache permet de couvrir de 7 à 15% des ANC en ces trois oligoéléments (tableau 7). Le zinc intervient dans le métabolisme des protéines et des lipides et dans la structure de certaines hormones, comme l'insuline. L'iode est un élément essentiel de la composition des hormones thyroïdiennes, qui jouent un rôle capital sur la croissance de toutes les cellules de l'organisme et dans la prévention du goitre. Le sélénium, grâce à son pouvoir antioxydant, a un effet bénéfique contre les maladies cardio-vasculaires, le vieillissement des tissus et l'apparition de certains cancers. Dans les pays industrialisés, les enfants et les personnes âgées présentent souvent des carences en zinc et en sélénium. Le lait apporte également des quantités significatives de chrome et de molybdène, dont 10 et 24 % des ANC sont couverts par l'absorption de 250 mL. Le chrome a une influence positive sur l'insuline et sur la glycémie, le molybdène intervient au niveau du métabolisme des acides aminés soufrés.

2. Vitamines

Les vitamines sont des substances organiques nécessaires au métabolisme des organismes vivants. L'organisme humain ne peut pas synthétiser les vitamines en quantité suffisante pour assurer sa survie. Elles doivent donc être apportées régulièrement par l'alimentation de manière à couvrir les besoins spécifiques des individus.

L'ensemble des vitamines du lait est un groupe hétérogène de composés, sur les plans de leur nature chimique, de leur concentration, de leur origine et de leur intérêt pour le consommateur. Les vitamines sont le plus souvent subdivisées en vitamines liposolubles ou solubles dans la matière grasse (A, D, E et K), et hydrosolubles ou solubles dans l'eau (C et groupe B). La plupart d'entre elles représente en fait une petite famille de composés chimiquement apparentés.

Le lait de vache contient naturellement l'ensemble des vitamines à des niveaux de concentrations variables (de quelques µg à plusieurs milliers de µg/L). Dans le cas de régimes alimentaires classiques, le lait et les produits laitiers peuvent contribuer très significativement aux apports journaliers recommandés (AJR) en vitamines A, B₂, B₅, B₈, et B₁₂ (tableau 8).

	AJR¹ (mg/jour)	AJR couverts par 250 mL de lait (%)		
		Vache	Chèvre	Brebis
Vitamines liposolubles				
A (rétinol)	0,6 à 0,9	10 à 22	11 à 26	12 à 35
E (tocophérols)	11 à 15	1,2 à 2,5	0,5 à 1,5	1,8 à 2,5
Vitamines hydrosolubles				
B ₂ (riboflavine)	0,9 à 1,3	31 à 49	25 à 59	62 à 100
B ₅ (acide pantothénique)	4 à 5	16 à 23	16 à 26	18 à 28
B ₈ (biotine)	0,02 à 0,03	17 à 75	8 à 50	8 à 100
B ₁₂ (cobalamines)	0,0018 à 0,0024	37 à 62	6 à 14	63 à 99
C (acide ascorbique)	45 à 90	0 à 5,6	2,7 à 8,3	12 à 28

¹ Apports Journaliers Recommandés

Source Graulet et al. 2013

Tableau 8. Contribution du lait aux apports journaliers recommandés (AJR) en quelques vitamines.

2.1. Vitamines liposolubles (A, E, D, K)

La vitamine A est un ensemble de composés de la famille du rétinol. Ces composés sont naturellement synthétisés par l'animal à partir de précurseurs spécifiques, les caroténoïdes provitaminiques (principalement le β-carotène) contenus dans les végétaux. Les caroténoïdes et la vitamine A sont transportés par le sang et peuvent être sécrétés dans le lait. Chez la vache, une partie du β-carotène ingéré est absorbée par l'organisme, l'autre partie est convertie en vitamine A (figure 7). Les laits de chèvre et de brebis ne contiennent β-carotène, qui est complètement converti en vitamine A. Les matières grasses laitières contiennent 4 à 14 µg de vitamine A par gramme (soit environ 295 µg/L) dans lesquels les carotènes représentent une part variable selon les caractéristiques et la conduite des animaux. Chez l'homme, la vitamine A participe à la vision et joue un rôle régulateur dans de nombreuses grandes fonctions biologiques (croissance, reproduction, différenciation cellulaire...). La consommation de 250 mL de lait par jour permet de couvrir de 10 à 20 % des AJR en vitamine A et carotènes.

La vitamine E regroupe les tocophérols et tocotriénols dont les principaux représentants décrits dans le lait sont l'α et le γ-tocophérol. L'α-tocophérol est la forme la plus fréquente et la plus étudiée. La concentration en vitamine E du lait de vache, de chèvre ou de brebis se situe entre 0,3 et 1,1 mg/L. La vitamine E est synthétisée par les végétaux et sa présence dans le lait résulte de leur consommation par les animaux (figure 7). Sa principale action biologique est liée à son pouvoir antioxydant, qui lui permet notamment de préserver l'intégrité des matières grasses laitières, en particulier les AGPI, très sensibles à l'oxydation. Les autres bénéfices nutritionnels pour le consommateur sont négligeables, comptetenu de la part très mineure des AJR en vitamine E couverte par la consommation de lait et de produits laitiers, par rapport à celle de fruits et légumes, de céréales ou d'oléagineux.

Les vitamines D regroupent une trentaine de composés de la famille des calciférols. La teneur en vitamine D du lait de vache, chèvre ou brebis varie de 0,3 à 1,8 µg/L. Chez les ruminants, comme chez l'homme, la vitamine D corporelle a une double

origine: l'alimentation ou une synthèse endogène au niveau de la peau sous l'action des rayons ultraviolets solaires (figure 7). La vitamine D joue un rôle primordial dans la régulation du calcium corporel puisqu'elle en contrôle l'absorption intestinale, la résorption osseuse et la réabsorption rénale. Cette vitamine est ainsi impliquée dans la lutte contre le rachitisme, l'ostéoporose et plus généralement la fragilisation osseuse. Bien que la teneur en vitamine D du lait soit faible, le lait et les produits laitiers ont un intérêt nutritionnel particulier dans la mesure où ils apportent simultanément du calcium et de la vitamine D.

Les vitamines K sont les moins connues des vitamines liposolubles. Le lait de vache en contient en moyenne de 3 à 38 μ g/L. Certaines d'entre elles sont synthétisées par les plantes, alors que d'autres sont principalement produites par les bactéries du tube digestif de l'animal (figure 7). Elles ont pour principale fonction biologique la régulation de la coagulation du sang, mais ont également des actions sur la régulation du calcium dans l'organisme, le développement cellulaire ou la croissance. Un grand verre de lait permet de couvrir jusqu'à environ 16 % des AJR.

2.2. Vitamines hydrosolubles (C et groupe B)

La vitamine C, également appelée acide ascorbique, est essentielle pour l'homme qui ne peut pas la synthétiser. Sa concentration varie de 0 à 10 mg/L dans le lait de vache, de 10 à 15 dans le lait de chèvre et de 42 à 50 dans celui de brebis. La vitamine C est produite par les végétaux et par certains mammifères, en particulier les ruminants, qui la synthétisent au niveau du foie (figure 7). La vitamine C est un antioxydant; elle est également impliquée dans le métabolisme des acides aminés, l'activation d'hormones et la synthèse de neurotransmetteurs. Une carence en vitamine C est responsable du scorbut. Les produits laitiers sont une source complémentaire de vitamine C, mais ne peuvent assurer qu'une faible part des AJR (0 à 6%), facilement couverts par la consommation de fruits et légumes.

Les vitamines du groupe B, au nombre de 8 (B₁, B₂, B₃, B₅, B₆, B₈, B₉ et B₁₂), sont apparentées par leur caractère hydrosoluble, leurs domaines d'activité et leurs modes d'action.

Les vitamines B₂, B₃ et B₅ sont quantitativement les plus importantes dans le lait (1 à 4 mg/L); les vitamines B₁ et B₆ sont présentes à hauteur d'environ 0,4 à 0,8 mg/L et les vitamines B_o, B_s et B₁₂ respectivement à hauteur de 2 à 70, de 10 à 90 et de 0,6 à 7 μg/L. Les vitamines du groupe B sont synthétisées par les micro-organismes (bactéries, levures) et les plantes, sauf la vitamine B₁₂ qui est produite exclusivement par les micro-organismes, et la vitamine B3 dont la synthèse est également possible dans les tissus animaux. Chez le ruminant, la plupart d'entre elles a une double origine (figure 7) : l'alimentation et la synthèse ruminale. Une part très élevée des vitamines B, et B, ingérées, voire la totalité, serait dégradée ou utilisée dans le rumen par les micro-organismes. Les vitamines du groupe B ont des propriétés physico-chimiques et des rôles différents, mais la plupart d'entre elles sont impliquées dans le métabolisme cellulaire. La consommation de 250 mL de lait par jour permet de couvrir une part significative des AJR en vitamines B_2 , B_5 , B_8 et B_{12} (jusqu'à 49, 23, 75 et 62%, respectivement). Dans les pays développés, de légers déficits chroniques en vitamine B₆ sont observés sur l'ensemble de la population, avec pour conséquence une augmentation du risque d'apparition de maladies cardio-vasculaires, de cancers ou de la maladie d'Alzheimer. Des carences en vitamine B_o sont fréquemment relevées, en particulier chez les femmes enceintes, et peuvent être responsables de naissances prématurées ou de développements anormaux du fœtus. Les bébés, les personnes âgées et celles qui consomment peu ou pas de produits de ruminants souffrent souvent d'un manque de vitamine B₁₂, pouvant être à l'origine d'anémie ou d'augmentation du risque d'apparition de maladies cardiovasculaires et de cancers. Les carences en vitamine B, peuvent également être observées lors de faibles consommations de produits animaux.

3. Composés phénoliques

Les composés phénoliques sont des métabolites secondaires des plantes, c'est-à-dire des composés organiques qui ne participent pas directement aux processus vitaux, mais assurent des fonctions importantes, notamment dans la résistance des plantes aux maladies par exemple. Parmi les composés phénoliques, on distingue les phénols simples, les acides phénoliques, les flavonoïdes,

les lignanes et les stilbènes et enfin, les polymères (tanins, lignines).

Le lait contient une variété de composés phénoliques à des concentrations allant du microgramme au milligramme par litre. Ce sont des alcools aromatiques, majoritairement associés à la phase aqueuse du lait. L'origine principale des composés phénoliques du lait est l'alimentation des animaux. Les fourrages peuvent contenir une grande variété de métabolites secondaires phénoliques, qui sont en partie dégradés dans le rumen puis absorbés au niveau des cellules intestinales et transférés au lait via la circulation sanguine.

Les composés phénoliques du lait ont des propriétés antioxydantes, mais leur concentration est 1000 fois inférieure à celle observée dans les fruits et légumes. Les composés phénoliques des laits de ruminants ont néanmoins une spécificité par rapport aux composés d'origine végétale : ils proviennent de plantes qui ne sont généralement pas consommées par l'homme et ils subissent des biotransformations dans l'organisme du ruminant, qui peuvent modifier leur biodisponibilité ou leurs propriétés. En effet, certains composés phénoliques circulant dans notre organisme ne semblent pas provenir uniquement de notre consommation de produits d'origine végétale, et d'autres semblent provenir de biotransformations plus ou moins spécifiques aux ruminants.

L'intérêt des composés phénoliques sur le plan de la santé humaine provient principalement de l'activité pro- ou anti-œstrogène des lignanes et de certains flavonoïdes appartenant aux groupes des isoflavones et des coumestanes. Leur activité est 100 ou 1000 fois plus faible que celle des œstrogènes endogènes, mais dans le corps ils peuvent atteindre des concentrations cent fois plus élevées. Les isoflavones sont pour la plupart présentes dans la plante ingérée par la vache et sont à l'origine de la formation d'équol, qui est un phytoestrogène puissant. La flore intestinale humaine peut également produire l'équol à partir des isoflavones, mais de façon variable selon les individus (50% de la population au Japon et 25% aux USA). Les isoflavones ont un effet bénéfique sur des maladies cardiovasculaires, des cancers liés au fonctionnement hormonal (cancer du sein et de la prostate) et des symptômes de la ménopause. En revanche, pour certaines catégories de population, notamment les enfants, l'exposition aux phytoestrogènes augmenterait le risque de cancers. Ainsi, l'avantage lié aux propriétés oestrogènes des isoflavones s'accompagne d'un revers lié à ces mêmes propriétés ; elles sont alors qualifiées de « perturbateurs endocriniens ». Bien que la concentration en isoflavones du lait de vache ne dépasse pas 0,7 ppm, alors qu'elle est de 60 ppm dans le jus de soja, la consommation de lait de vache est intéressante pour les populations occidentales qui consomment peu ou pas de soja et pour les individus qui ne synthétisent pas d'équol à partir des isoflavones. Les principaux lignanes des végétaux sont convertis par les bactéries intestinales des ruminants en lignanes de mammifères, œstrogènes eux aussi. Tous ces composés ont été trouvés dans le lait de vache, avec un taux de transfert global du végétal au lait pouvant atteindre 12%. Les coumestanes proviennent directement des fourrages ingérés, mais sont présents dans le lait à des concentrations très faibles (3,2 µg/L pour le coumestrol par exemple).

La connaissance actuelle sur les composés phénoliques du lait est insuffisante pour évaluer le taux d'exposition des populations aux molécules présentant des risques.

4. Terpènes

Les terpènes sont, comme les composés phénoliques, des métabolites secondaires végétaux, connus avant tout en tant que constituants des huiles essentielles des plantes aromatiques. Ils sont constitués d'unités de base isoprène (cinq atomes de carbone). Le lait contient des monoterpènes (deux unités de base isoprène), des sesquiterpènes (trois unités), des diterpènes (quatre unités) comme les phytènes, des triterpènes (six unités) comme le squalène et des tétraterpènes (huit unités) comme les caroténoïdes. Par habitude, ce sont les mono et sesquiterpènes qui sont généralement désignés par le terme terpènes. Les mono et sesquiterpènes sont des composés volatils, contrairement aux terpènes de plus haut poids moléculaire. Ce sont de petites molécules associées aux matières grasses du lait, qui n'ont pas besoin de transporteurs pour traverser les membranes cellulaires.

La teneur du lait en terpènes est très faible et très variable. Elle a été estimée, par des mesures indirectes, à des valeurs de 0,1 à $1\,\mu g/L$. Les terpènes ont de nombreuses propriétés antiseptiques et médicinales, mais leurs teneurs dans le lait ne sont probablement pas suffisantes pour jouer un rôle significatif. Ils présentent un grand intérêt en tant que traceurs de l'alimentation des animaux, la composition en terpènes du lait étant le reflet direct de celle de l'alimentation des animaux.

L'essentiel à retenir

Le lait est un aliment qui participe de façon importante à l'alimentation humaine, grâce à ses apports en lactose, matières protéiques, matières grasses, vitamines et minéraux. Malgré sa richesse en certains acides gras saturés que les recommandations alimentaires actuelles préconisent de limiter (acide palmitique notamment), le lait présente des intérêts spécifiques sur le plan nutritionnel :

- sa composition en acides aminés essentiels, en adéquation avec les besoins de l'organisme humain, tant en qualité qu'en quantité.
- son équilibre entre acides gras n-6 et n-3 en accord avec les recommandations alimentaires et son apport en acides gras spécifiques, comme l'acide ruménique.
- sa richesse en minéraux, en particulier en calcium, mais aussi en phosphore, zinc, iode et sélénium, qui en fait un aliment incontournable pour la couverture des besoins humains.
- la présence de l'ensemble des vitamines, en particulier les vitamines A, B_2 , B_5 , B_8 et B_{12} dont les teneurs dans le lait permettent de couvrir une part significative des besoins de l'homme, et la vitamine D qui favorise l'absorption du calcium.

Chapitre 2

Les liens entre les conditions de production et les composés d'intérêt nutritionnel du lait

Bruno MARTIN, Anne FERLAY, Catherine HURTAUD, Benoît GRAULET, Agnès CORNU, Yves LEFRILEUX, Gilles LAGRIFFOUL, Cécile SIBRA

Dans les élevages, la composition du lait varie sous l'influence de deux grands types de facteurs : les facteurs intrinsèques, ou caractéristiques liées à l'animal lui-même, et les facteurs extrinsèques, extérieurs à l'animal, qui relèvent soit de l'environnement, soit de la conduite de l'animal. Ce chapitre rapporte plus particulièrement des connaissances issues d'études expérimentales. Ces dernières permettent, face à un phénomène à expliquer, d'isoler un facteur supposé intervenir, éventuellement de l'amplifier pour mieux l'interpréter, mais en s'éloignant des conditions habituellement rencontrées sur le terrain.

Le lait de vache est traité en priorité ; les différences éventuellement observées pour les laits de chèvre et de brebis sont signalées à la fin de chaque paragraphe. Les connaissances relatives aux taux protéique et butyreux, déjà largement publiées, font l'objet d'un rappel rapide.

■ Partie 1 : Caractéristiques de l'animal

Les caractéristiques de l'animal considérées sont tout d'abord l'espèce (vache, chèvre ou brebis), puis la race des femelles laitières, leur rang et leur stade de lactation. L'effet des mammites sur la composition du lait est important, mais il n'est pas abordé, dans la mesure où le lait d'animaux atteints de cette maladie n'est pas utilisé pour la consommation humaine.

1. Espèce animale

Il existe des différences sensibles entre le lait de vache, de chèvre et de brebis (tableau 9). Au niveau de la composition globale moyenne, le lait de brebis diffère nettement de ceux de vache et de chèvre, car il est presque deux fois plus riche en matières grasses et protéiques. Le lait de chèvre est légèrement plus pauvre en matières protéiques et en lactose que celui de vache. Les matières grasses du lait des petits ruminants se caractérisent par des globules gras de plus petite taille que ceux du lait de vache, ce qui pourrait expliquer que ces laits sont plus facilement digérés. Par rapport aux laits de vache et de brebis, celui de chèvre a une proportion plus faible de caséines, dont une part moins importante de caséine α et plus importante de caséines β et κ. Ceci est lié au polymorphisme génétique de la caséine α_{s1} , certaines chèvres ne produisant pas de caséine α_{s1} alors que d'autres en produisent des quantités importantes. Au cours des dernières années, la sélection basée sur la teneur totale du lait en matières protéiques a peu à peu favorisé le taux le plus élevé en caséines α_{s1} pour tendre vers un lait avec des caractéristiques proches de celles du lait de vache. La composition des protéines du sérum est spécifique à chaque espèce: l'α-lactalbumine est dominante dans le lait de vache, la β-lactoglobuline dans ceux de brebis et de chèvre, ce dernier contenant en revanche moins d'immunoglobulines. Compte-tenu des différences de composition des matières protéiques du lait selon l'espèce, la composition en acides aminés essentiels diffère également. Par exemple, le profil en acides aminés du lait de chèvre est proche de celui du lait humain, et les acides aminés essentiels s'y trouvent en quantité suffisante, y compris pour couvrir les besoins du nourrisson.

Acides gras

Les principales différences entre espèces concernant le profil en acides gras des laits portent sur les teneurs en acides gras à chaîne courte et moyenne (C6:0 au C12:0), le total des CLA et les AGPI. Le lait de chèvre est moins riche en acide butyrique, mais plus riche en acides caprylique et caprique que les laits de vache et de brebis. Le lait de brebis est plus riche en AGPI que ceux de vache et de chèvre. Le lait de vache contient en moyenne une proportion plus importante d'acide palmitique.

Vitamines

Une différence notable entre le lait de vache et celui des petits ruminants (chèvre ou brebis) réside dans l'absence de pro-vitamine A (β-carotène) chez ces derniers, d'où un lait plus blanc, le β-carotène étant un pigment jaune-orangé. Les laits de chèvre et de brebis contiennent néanmoins des caroténoïdes xanthophylles (lutéine et zéaxanthine) et des concentrations en vitamine A nettement supérieures à celle du lait de vache, car l'intégralité du β-carotène alimentaire est convertie en rétinol. Pour les autres vitamines, il ressort des rares études menées sur le sujet que le lait de chèvre est moins riche en vitamines E, B, et B, que le lait de brebis ou de vache, et que le lait de brebis présente des teneurs plus élevées que les laits de chèvre ou de vache en vitamines A, D, B et C. Enfin, le lait de vache est plus pauvre en vitamines B₁, B₃ et C que celui des petits ruminants.

Minéraux

Comparativement aux laits de vache et de chèvre, le lait de brebis est nettement plus riche en calcium, phosphore et magnésium, en liaison avec sa plus forte teneur en caséines ; il est aussi plus pourvu en oligoéléments, en particulier en zinc, fer et cuivre. Le lait de chèvre se distingue des laits de vache et

de brebis par une teneur plus élevée en potassium et une teneur moins élevée en sodium.

Composés phénoliques

Les différences de métabolisme entre espèces d'herbivores peuvent conduire à des différences de teneurs et profils en composés phénoliques du lait, mais cela n'a pas été étudié directement. Chez la brebis, les composés phénoliques sont majoritairement phosphorylés, alors que chez la chèvre et chez la vache, c'est la forme sulfatée qui est majoritaire. Par ailleurs, certains phénols simples, issus de la dégradation des polyphénols alimentaires, sont en concentration plus élevée dans les laits de chèvre et de brebis que dans celui de vache.

Terpènes

Les éventuelles différences de composition des laits en terpènes n'ont pas été étudiées directement. On peut néanmoins supposer que les laits de vaches et de chèvres conduites sur un même milieu présenteraient des compositions en terpènes spécifiques, en raison des différences notoires de choix alimentaires entre bovins et caprins.

2. Race

Il existe des différences de composition du lait en matières grasses et protéiques entre races bovines. Les différences importantes observées à partir des données du contrôle laitier ne sont pas uniquement liées aux facteurs génétiques, puisque les diverses races ne sont pas exploitées dans des conditions de milieu identiques (tableau 10). Parmi les trois principales races élevées en France, la Prim'Holstein (68 % des effectifs contrôlés) est la plus productive (environ 2300 L de plus que la Montbéliarde), mais son lait est moins riche en protéines (-0,7 g/kg). La Normande produit le lait le plus riche, à la fois en matières protéiques et grasses. La Jersiaise, race à petit effectif, se distingue par un lait particulièrement riche en matières grasses et protéiques. La race des vaches ne semble pas avoir d'effet important sur la teneur en lactose du lait.

Pour l'espèce caprine, les chèvres de race Alpine et Saanen sont les plus nombreuses. La race alpine donne un lait plus riche en matières grasses et protéiques (respectivement +2,0 et +1,2 g/kg). Les différences de composition du lait entre races et entre individus sont liées en partie à la fréquence des génotypes de la caséine $\alpha_{\rm s1}$. Depuis les années 1980, la sélection génétique sur ce critère a permis d'augmenter le taux protéique (en particulier les caséines) de +8 g/L, mais aussi le taux butyreux de +6 g/L.

En ce qui concerne l'espèce ovine, la comparaison raciale est difficile, en raison de l'association étroite entre une ou des races locales, un système de production et une zone géographique. Toutefois, le lait collecté dans le rayon de Roquefort (race Lacaune) présentait, en 2011, une composition moyenne supérieure à celle du lait collecté dans les Pyrénées-Atlantiques (notamment race Manech Tête Rousse), respectivement de +1,2 g/L et +2,1 g/L pour les taux butyreux et protéique. Pour cette race et pour ce bassin de production, l'augmentation du taux butyreux a été intégrée dans les critères de sélection au cours des années 1990, ce qui a permis d'observer une augmentation moyenne annuelle de +0,17 g/L entre 1995 et 2008.

Acides gras

Des différences de composition en acides gras du lait en fonction de la race des vaches ont été mises en évidence. Elles sont liées en partie à un effet spécifique de la race sur le métabolisme lipidique, mais peuvent aussi s'expliquer par des différences de conduite alimentaire, dans la mesure où les animaux, selon leur race, ont souvent des potentiels de production variables et ne sont donc pas alimentés de la même façon. Dans tous les cas, les différences de composition en acides gras du lait dues à la race sont de plus faible amplitude que celle liées à l'alimentation.

Selon plusieurs études, la teneur du lait en AGI a été significativement plus faible pour les races Jersiaise et Brune des Alpes comparativement à la race Prim'Holstein ; les écarts relevés pour la race Montbéliarde ont été contradictoires entre les études (tableau 11). Par rapport aux vaches Prim'Holstein, les vaches Montbéliardes et Normandes ont produit des laits avec des teneurs

	Vache	Chèvre	Brebis
Composition globale (%)			
Eau	87,5	87,0	82,2
Lactose	4,9	4,4	4,8
Matières grasses	3,7	3,8	7,0
Matières protéiques	3,2	2,9	5,4
Minéraux	0,8	0,9	1,0
Protéines			
Caséines dans protéines totales (%)	81,2	76,4	80,0
Caséines totales (g/L et (%)) dont	26,0	26,0	43,0
Caséine α_{s_1} et α_{s_2}	12,0 (46)	7,0 (27)	24,0 (45)
Caséine β	9,0 (36)	13,0 (50)	23,0 (43)
Caséine ĸ	3,5 (13)	5,7 (22)	5,0 (10)
Caséine γ	1,5 (6)		
Protéines sériques totales (g/L et (%)) dont	6,0	8,1	11,0
α-lactalbumine	1,5 (45)	2,0 (25)	1,1 (10)
β-lactoglobuline	2,7 (25)	4,4 (55)	7,4 (67)
Albumine sérique bovine	0,3 (5)	0,6 (7)	0,5 (5)
Immunoglobulines	0,7 (12)	0,5 (6)	2,0 (18)
Acides gras (g/100 g d'acides gras totaux) ¹			
Acides gras saturés	67,5	71,8	68,0
Butyrique (C4:0)	3,5	2,5	3,7
Caproïque (C6:0)	2,2	2,6	2,8
Caprylique (C8:0)	1,3	3,2	2,5
Caprique (C10:0)	3,0	10,5	7,4
Laurique (C12:0)	3,6	5,0	4,6
Myristique (C14:0)	11,8	11,0	11,0
Pentadécylique (C15:0)	1,3		1,1
Palmitique (C16:0)	29,2	23,4	24,1
Stéarique (C18:0)	9,4	9,6	8,8
Acides gras mono-insaturés	24,2	22,9	24,0
Myréolistique (C14:1 <i>cis</i> 9)	0,97	0,23	0,25
Palmitoléique (C16:1cis9)	1,5		1,2
Oléique (C18:1cis9)	19,3	18,2	16,9
Élaïdique (C18:1 <i>trans</i> 9)	0,19		
C18:1trans10	0,24		1,00
Vaccénique (C18:1trans11)	1,7	1,1	2,8
Acides gras poly-insaturés	3,0	4,2	6,0
Linoléique (C18:2cis9cis12, n-6)	1,4	2,3	2,4
Ruménique (C18:2cis9trans11, CLA)	0,88	0,50	1,21
α-linolénique (C18:3 <i>cis</i> 9 <i>cis</i> 12 <i>cis</i> 15, n-3)	0,66	0,82	0,95
Eicosapentaènoïque (C20:5 cis5cis8cis11cis14cis17, n-3, EPA)	0,06		
Docosahexaènoïque (C22:6 cis4cis7cis10cis13cis16cis19, n-3, DHA)	0,01		0,07

¹ Valeurs médianes pour les brebis (Varenne 2010)

Sources Coppa et al. 2013, Gaucheron 2003, Graulet et al. 2013, Lucas 2005, Varenne 2010

 Tableau 9. Composition moyenne des laits de vache, de chèvre et de brebis.

	Vache	Chèvre	Brebis
Minéraux			
Macro-éléments (mg/l)			
Calcium (Ca)	1250	1 260	1 950
Phosphore (P)	950	970	1240
Potassium (K)	1600	1 900	1 380
Sodium (Na)	425	380	500
Magnésium (Mg)	115	130	190
Oligo-éléments (µg/l)			
Zinc (Zn)	3800	3400	6 300
Fer (Fe)	460	550	1 000
Cuivre (Cu)	220	300	500
Manganèse (Mn)	60	80	70
Sélénium (Se)	30	20	31
/itamines (µg/l)			
Vitamines liposolubles			
A (rétinol)	378-520	400-622	438-830
D (calciférols)	0,3-0,8	0,6-1,1	1,8
E (tocophérols)	700-1100	300-700	1 100
K (phyllo et ménaquinones)	3-38	3	nd
Vitamines hydrosolubles			
B ₁ (thiamine)	300-460	400-680	650-800
B ₂ (riboflavine)	1600-1750	1 300-2 100	3 200-3 820
B ₃ (niacine)	800-955	1870-3100	4 100-4 270
B ₅ (acide pantothénique)	3 200-3 730	3 100-4 100	3 640-4 500
B ₆ (pyridoxal)	360-600	70-600	600-800
B ₈ (biotine)	20-60	10-39	9-93
B ₉ (acide folique)	19-53	2-30	2-70
B ₁₂ (cobalamines)	3,5-4,5	0,6-1,0	6,0-7,1
C (acide ascorbique)	0-10 000	10 000-15 000	41 600-50 000

Sources Coppa et al. 2013, Gaucheron 2003, Graulet et al. 2013, Lucas 2005, Varenne 2010

Tableau 9 (suite). Composition moyenne des laits de vache, de chèvre et de brebis.

plus faibles en acide palmitique, alors que les laits des vaches Montbéliardes et Salers ont été plus pourvus en acide ruménique, contrairement à celui des vaches Jersiaises.

Selon les résultats d'une étude de terrain récente, basée sur environ 300 000 laits, les vaches de race Normande ont produit un lait plus riche en AGS que les vaches Montbéliardes et Prim' Holstein; le lait des vaches de race Montbéliarde a été le plus riche en AGI, confirmant ainsi une partie des résultats obtenus en conditions expérimentales.

En ovin, cette même étude indique que le lait des brebis de race Lacaune élevées dans le rayon de Roquefort a présenté une part d'AGS plus importante que celui des brebis de race Manech Tête Rousse (+1,2 g/100 g d'AGT) élevées dans les Pyrénées Atlantiques avec des systèmes d'alimentation différents, rendant ainsi délicate la comparaison entre races. Par contre, la composition moyenne en acides gras du lait des chèvres de races Alpine et Saanen a été similaire.

Vitamines

La teneur en vitamines du lait des principales races françaises a été peu étudiée. Une étude comparant les races Prim'Holstein, Montbéliarde et Tarentaise n'a pas révélé de différences de

	Nombre de résultats	Durée de lactation (jour)	Production laitière (kg/animal/an)	Taux butyreux (g/kg)	Taux protéique (g/kg)
Vaches					
Prim'Holstein	1 687 730	352	9411	39,3	32,0
Montbéliarde	415 552	310	7 027	38,9	32,8
Normande	229 635	322	6 546	42,5	34,8
Abondance	22 763	293	5 302	37,3	33,4
Brune	17 235	339	7 401	41,8	34,3
Simmental française	16 045	305	6 151	40,3	33,7
Pie Rouge des Plaines	10 221	328	7 791	42,3	33,2
Tarentaise	7 660	278	4 2 4 0	36,4	32,4
Jersiaise	4 075	325	5 2 2 2	55,5	38,3
Salers	1 628	227	2 293	33,9	32,9
Vosgienne	1 223	289	4 157	38,0	31,8
Chèvres					
Alpine	166 282	296	915	37,6	33,0
Saanen	124 040	313	996	35,5	31,7
Brebis ¹					
Lacaune	151 040	166	298	73,5	55,2
Manech Tête Rousse	63 705	161	203	7	7
Manech Tête Noire	9 3 3 2	143	145	- 72,3 ²	- 53,1 ²
Basco-Béarnaise	20 151	145	172		
Corse	13 571	185	141		

Les données de production laitière (lait et durée) correspondent aux performances mesurées dans le cadre du contrôle laitier officiel, les données de composition du lait correspondent aux données de lait de mélange à l'échelle du bassin de production.

2 Taux moyens du bassin de production correspondant aux 3 races (Manech Tête Rousse, Manech Tête Noire et Basco-Béarnaise)

Source Institut de l'Élevage et France Conseil élevage 2012

Tableau 10. Production laitière, taux butyreux et taux protéique selon la race des animaux pour les espèces bovine (lactations brutes, toutes lactations), caprine et ovine (toutes lactations).

Publication	Race	Acides gras insaturés	Acide palmitique	Acide ruménique
Lawless et al. 1999	Montbéliarde ¹	+4,5*	-8,4*	+10,6*
	Normande ¹	+0,65	-4,8	-7,2
Ferlay et al. 2010	Montbéliarde ¹	-7,8*	+1,4	-6,5
Hurtaud et al. 2009 Delaby et al. 2002	Normande ¹	+1,2	-4,8*	+6,3
Kelsey et al. 2003	Brune des Alpes ¹	-4,2*	+1,1	-6,8
White et al. 2000	Jersiaise ¹	-11,3*	0	-19,3*
Cozma et al. 2012	Salers ¹	-2,6*	+0,4	+60,0*
Ferlay et al. 2006	Tarentaise ²	+7,7	-10,3	+2,8

Ecart par rapport à la race Prim'Holstein
 Ecart par rapport à la race Montbéliarde
 * Résultat statistiquement différent

Tableau 11. Effet de la race des vaches laitières sur la composition en acides gras du lait (écarts en %).

concentration en vitamine A dans les laits ou les fromages, ni en vitamines E et B_o dans les fromages. En revanche, les laits des races anglo-normandes Guernesey et Jersey ont présenté des concentrations de β-carotène plus fortes que celui de la race Prim'Holstein par exemple, les écarts semblant maximisés lorsque les animaux reçoivent des rations riches en carotènes (herbe pâturée). Cependant, bien que le β-carotène soit le principal précurseur de la vitamine A, les différences observées pour cette dernière entre races bovines ont été beaucoup moins marquées et les races se sont classées dans un ordre différent : les vaches Prim'Holstein et Frisonnes ont produit des laits avec des teneurs 1,6 fois plus élevées que celles observées dans le lait des vaches Guernesey, le lait des vaches Jersey ayant été intermédiaire. Les laits de vaches de races Guernesey et Jersey ont été plus riches en vitamines B, et B, que celui de vaches d'autres races, les teneurs du lait en autres vitamines B ayant peu varié entre races. D'autre part, la vitamine D est présente en quantité plus importante dans les matières grasses du lait des vaches Ayrshire et Jersey que dans celles des vaches Frisonnes.

Minéraux

La race semble avoir peu d'effet sur la composition des laits en minéraux, mais ce point est peu documenté dans la littérature. Il est cependant bien connu que les laits à forte teneur en matières protéiques ont aussi une teneur élevée en calcium, en magnésium et en phosphore, ces trois minéraux étant majoritairement liés aux caséines. Ceci a notamment été observé pour les races Normande et Jersiaise comparativement à la race Prim'Holstein, dont le lait est moins riche en matières protéiques. Le potassium, le sodium et le chlore sont principalement en solution dans la phase aqueuse du lait; les teneurs de ces trois minéraux semblent plus élevées dans le lait des vaches de race Prim'Holstein.

Chez la chèvre, les teneurs en minéraux et oligoéléments semblent légèrement plus élevées dans le lait de chèvre de race Alpine que dans celui de chèvre de race Saanen, mais à notre connaissance, il n'existe pas de comparaison directe entre ces deux races.

Pour l'ensemble de ces composés du lait, il est important de rappeler qu'au-delà de l'effet de la race, la composition du lait varie aussi très largement selon les individus ; ainsi, la teneur des matières grasses du lait de vache en acide ruménique peut varier d'un facteur 1 à 3 entre individus de race identique recevant une même alimentation. De grandes variations des teneurs du lait en vitamines A et E et en caroténoïdes entre vaches de même race ont également été observées à plusieurs reprises (facteur de 1 à 1,5).

La teneur du lait en la majorité des vitamines et acides gras semble partiellement héritable. Sur cette base, des perspectives de sélection génétique sont à l'étude actuellement.

3. Rang de lactation

Les différences de composition du lait entre la 1ère lactation et les suivantes semblent d'autant plus importantes que la 1ère mise-bas intervient précocement, lorsque les animaux sont encore en croissance. Il est admis que les taux butyreux et protéique sont d'un niveau à peu près identique au cours des quatre premières lactations. Le lait s'appauvrit ensuite, et ce d'autant plus que l'état de la mamelle aura été éventuellement dégradé sous l'effet cumulé de mammites. La teneur en lactose tend aussi à décroître avec le nombre de lactations. Peu d'études ont porté spécifiquement sur l'influence du stade de lactation des animaux sur les teneurs en composés d'intérêt nutritionnel du lait.

Acides gras

Une étude de terrain récente a mis en évidence une plus forte teneur en AGS dans le lait de vaches multipares par rapport au lait de vaches primipares (de l'ordre de +1,2 à +1,8 g/100 g d'AGT de la 1ère à la $4^{\rm c}$ lactation) ; dans le même temps, la teneur du lait en AGMI a diminué, alors que celle en AGPI est restée stable.

L'effet du rang de lactation a pu aussi être récemment étudié sur la composition en acides gras du lait de chèvre et de brebis ; il a été globalement le même que celui observé sur le lait de vache. Par rapport au lait de chèvres primipares, la teneur en AGS du lait de chèvres multipares a évolué

d'environ +0,4 à +0,6 g/100 g d'AGT entre la 1ère et la 4e lactation, alors que la teneur d'AGMI a diminué. Chez les brebis, cette même évolution positive de la teneur en AGS a été notée entre le lait de 1ère et de 2e lactation (+1,5 à +2,0 g/100 g d'AGT), accompagnée d'une diminution de la teneur en AGI. Cependant, cet effet du rang de lactation est surtout observé dans le cas de premières mise-bas précoces.

Vitamines

Des teneurs plus importantes en vitamine A et en β -carotène ont été mesurées dans le lait de primipares comparé à celui de multipares. Des teneurs minimales de β -carotène ont été observées au cours de la 2^e lactation et ont semblé augmenter progressivement au cours des lactations suivantes.

Minéraux

Il est aussi reconnu que la teneur minérale du lait est susceptible de varier selon le rang de lactation des animaux. La teneur en sodium semble augmenter et celle en phosphore diminuer avec l'augmentation du rang de lactation, alors que la teneur en calcium semble rester constante.

4. Stade de lactation

De manière générale, la composition du lait varie de façon très importante selon le stade de lactation. Dans nos systèmes d'élevage actuels, la durée de la lactation est d'environ 10 mois chez la vache, 9 mois chez la chèvre et 6 mois chez la brebis; les lactations sont quelquefois prolongées lorsque la mise-bas suivante est retardée. Les teneurs du lait en matières grasses et protéiques évoluent de façon inverse à la quantité sécrétée. C'est au cours de la période colostrale que l'évolution journalière de la composition du lait est la plus forte.

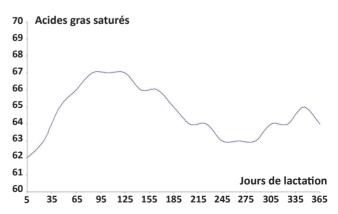
Chez les animaux gravides, la remontée des teneurs en matières grasses et protéiques en fin de lactation est plus importante. Les races dont le lait est riche en matières grasses et protéiques présentent une plus faible chute de leurs taux en début de lactation et une plus forte remontée en fin de lactation que celles dont le lait est plus pauvre.

De façon générale, la teneur en lactose du lait est inversement proportionnelle à celle des autres constituants dissous et osmotiquement actifs (sels minéraux, protéines sériques), en raison de la régulation de la pression osmotique. Ainsi, en tout début (phase colostrale) et en fin de lactation (8 à 9 mois), où le lait est plus riche en éléments dissous, la concentration en lactose est plus faible (en moyenne -10 g et -3 g/L respectivement, par rapport à la teneur pendant la pleine lactation). En dehors de ces deux situations, la teneur en lactose est moins variable et tend à diminuer de façon parallèle à la production laitière.

Acides gras

En début de lactation, les animaux sont généralement en déficit énergétique, ce qui entraîne une mobilisation des réserves corporelles adipeuses et ainsi une mobilisation des acides gras, en particulier à longue chaîne. Par ce phénomène, le lait de vache est, en début de lactation, plus riche en acides gras à longue chaîne (acides stéarique et oléique notamment) et plus pauvre en acides gras à chaînes courte et moyenne. Cette modification s'observe aussi chez les chèvres et les brebis. La teneur du lait en AGPI semble par contre peu affectée par le stade de lactation.

Il a été observé que la teneur en AGS du lait de vache augmente jusqu'au 85° jour de lactation, puis diminue progressivement pendant environ 200 jours (figure 8).



Source Arnould et al. 2010

Figure 8. Évolution de la teneur en acides gras saturés du lait au cours de la lactation (g/100 g d'AGT).

Cet effet du stade de lactation a été validé récemment sur la base d'observations de terrain de grande ampleur, qui ont montré que la teneur en AGS des laits a évolué aux dépens de celle en AGMI, alors que celle en AGPI est restée relativement stable au cours de la lactation. L'amplitude des variations observées a été plus importante chez les vaches de race Prim'Holstein, comparativement aux vaches Montbéliardes et Normandes, vraisemblablement en raison de leur niveau de production plus élevé.

Vitamines

Les concentrations en vitamines varient sensiblement au cours de la lactation. Chez la vache, les vitamines A et E (et le β-carotène) sont très concentrées dans le colostrum, mais leur sécrétion se réduit fortement lors de la mise en place de la lactation et diminue progressivement jusqu'à 180 jours, pour devenir relativement stable. Inversement, la concentration en vitamine B₅ est très faible dans le colostrum, mais elle augmente très rapidement entre 4 et 14 jours après le vêlage (concentration maximale 4 mg/L), pour diminuer ensuite progressivement. Les concentrations en vitamines B₉ et B₁₂ dans le lait diminuent progressivement au cours des premières semaines de la lactation, puis se stabilisent jusqu'au tarissement.

Minéraux

Au cours de la lactation, la teneur du lait en éléments minéraux varie de façon différenciée selon les composés. Les teneurs en sodium, calcium et magnésium baissent en milieu de lactation (de l'ordre de -11 à -17 %) et augmentent en fin de lactation (presque +100 % pour le sodium). À l'inverse, la teneur du lait en phosphore tend à augmenter en milieu de lactation, alors que celle en potassium s'abaisse régulièrement (tableau 12). Concernant les oligoéléments, il semble que les teneurs en zinc, cuivre et iode diminuent progressivement au cours de la lactation, tandis que la teneur en fer demeure constante ou augmente légèrement en fin de lactation.

		Stade de lactation				
	Début	Fin				
Calcium	1 330	1 178	1287			
Magnésium	138	121	131			
Sodium	683	570	1 122			
Potassium	1 634	1 576	1 052			

Source Gaucheron et al. 2005

Tableau 12. Concentration du lait en minéraux chez la vache Ayrshire au cours de la lactation (mg/kg).

Chez la brebis, les teneurs du lait en calcium et en phosphore augmentent jusqu'au 140° jour de lactation environ avant de décroître; la teneur en potassium diminue avec le stade de lactation, tandis que les teneurs en sodium et chlore augmentent en fin de lactation.

Pour le lait de chèvre, les effets observés du stade de lactation sont contradictoires. Certains auteurs ont relevé une diminution importante des teneurs en zinc et en potassium au cours de la lactation, mais n'ont dégagé aucune tendance régulière pour les autres minéraux. D'autres auteurs ont observé une augmentation des teneurs en calcium, phosphore, potassium, magnésium et sodium en cours de lactation.

Partie 2 : Environnement

Les facteurs environnementaux font référence au climat, à la saison, à la température, à la durée du jour.

1. Saison

Les effets propres de la saison (durée du jour et température) sont souvent confondus avec ceux de l'alimentation et du stade de lactation du troupeau. Cependant, une fois ces derniers pris en compte, le lait est globalement plus riche en matières grasses et protéiques en hiver (jours courts, respectivement +3 et +2 g/kg) qu'en été (jours longs); la production laitière suit une tendance inverse, avec une production maximale en juin (+2,5 kg) et minimale en décembre (figure 9). La variation de richesse du lait résulte d'un effet de dilution des matières, dans la mesure où les quantités de matières grasses et protéiques sécrétées sont constantes au cours de l'année.

Acides gras

Une étude de terrain récente de grande envergure a montré que pendant les jours courts d'automne et d'hiver, la teneur en AGS du lait de vache a été plus élevée (de l'ordre de 3 g/100 g d'AGT), comparativement à celle du lait prélevé en jours longs, au printemps et en été. Parallèlement, la teneur du lait en AGMI et en AGPI a été réduite en automne et en hiver (respectivement -2,5 et -0,5 g/100 g d'AGT).

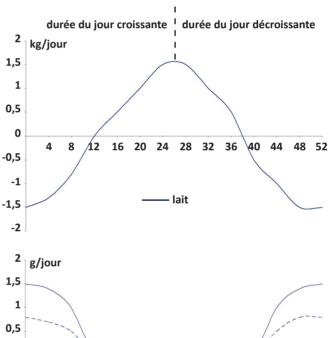
Minéraux

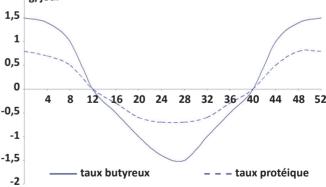
Des différences saisonnières de teneurs des laits en minéraux ont fréquemment été rapportées, les laits d'hiver étant globalement plus riches en minéraux que les laits d'été.

2. Température

Dans les gammes de température habituellement observées dans les pays tempérés (0 à 25°C), cette dernière n'a pas d'incidence majeure sur la production et la composition du lait. En revanche,

au-dessus de 25°C, on observe souvent une chute rapide de la production laitière, liée à une diminution nette de l'appétit des vaches et des quantités ingérées. Cette sous-alimentation s'accompagne d'une diminution de la teneur du lait en matières protéiques et d'une modification de son profil en acides gras. Les températures élevées (>28°C) ont également été associées à une diminution des teneurs du lait en calcium, phosphore et magnésium notamment. Les températures froides (<0°C) ont des effets plus modérés et plus progressifs.





Source Coulon et al. 1996

Figure 9. Évolution de la production et de la composition du lait de la 1^{ère} à la 52^e semaine de l'année après annulation de l'effet du stade de lactation (écart à la moyenne).

Partie 3 : Conduite du troupeau

Les facteurs de variation des composés d'intérêt nutritionnel du lait relatifs à la conduite du troupeau concernent l'alimentation des animaux et les conditions de traite. L'alimentation des femelles laitières (fourrages, concentrés, suppléments lipidiques et additifs) a un effet important sur la composition du lait, ceci de façon rapide et réversible; elle représente pour les éleveurs le moyen d'action le plus efficace pour moduler à court terme la composition du lait. Les conditions de traite ont comparativement un effet bien moindre.

1. Fourrages

La nature des fourrages distribués aux animaux a des effets sensibles sur la composition du lait en composés d'intérêt nutritionnel (acides gras et vitamines liposolubles notamment). Ainsi, le lait issu d'animaux au pâturage diffère de celui produit par des animaux consommant des fourrages conservés. De façon plus fine, la composition du lait de vaches au pâturage varie selon la nature, la composition floristique et le stade de l'herbe, alors que celle du lait de vaches à l'étable varie selon le type du fourrage distribué. Ces effets de la nature des fourrages sur la composition du lait sont liés principalement à leur composition (tableau 13).

1.1. Laits produits au pâturage *versus* avec des fourrages conservés

Le pâturage, ainsi que tous les régimes à base d'herbe, conduit à un lait moins riche en matières grasses, comparativement aux rations à base d'ensilage de maïs (-3 à -4 g/kg en moyenne). L'ensilage de maïs est plus favorable à la sécrétion des matières grasses, en raison des orientations fermentaires du rumen. Le taux protéique est souvent plus élevé en raison d'apports énergétiques généralement plus élevés. Cependant, à apports énergétiques identiques, le taux protéique varie peu entre un régime à base d'herbe fraîche ou conservée et un régime à base d'ensilage de maïs. Chez les chèvres, comparativement au lait produit au pâturage, le lait produit avec du foin est sensiblement moins riche en matières grasses.

Acides gras

Par rapport à une ration basée sur l'ensilage de maïs, la mise à l'herbe des bovins au printemps entraîne systématiquement et en moins d'une semaine une très forte réduction de la proportion d'AGS dans le lait, notamment de l'acide palmitique qui baisse de l'ordre de 10 g/100 g d'AGT, au profit des acides stéarique et oléique. Par ailleurs, les teneurs en acides vaccénique, ruménique et α-linolénique sont multipliées par un facteur de 4 à 5 et peuvent représenter dans le lait respectivement 4,5 g, 2 g et 1 g/100 g d'AGT. Parallèlement, la mise à l'herbe peut s'accompagner de l'augmentation d'autres AG trans, pour certains indésirables (de l'ordre de 4 g/100 g d'AGT). Le passage d'un régime basé sur l'ensilage de maïs au pâturage entraîne aussi une baisse significative du rapport n-6/n-3, qui passe de valeurs supérieures à 5 à des valeurs proches de 2 à 3. Des évolutions inverses sont observées lors du passage du pâturage vers une ration à base de fourrages conservés (notamment à base d'ensilage de maïs) (tableau 14).

Les effets du pâturage sur les proportions des acides gras du lait sont linéaires en fonction de la part d'herbe fraîche dans la ration. L'augmentation progressive de la part du pâturage dans la ration (de 30 à 100%) permet d'accroître linéairement les teneurs du lait en acides ruménique et α-linolénique et de diminuer linéairement les teneurs en AGS (10 à 16 atomes de carbone).

L'ampleur de l'effet de la proportion d'herbe pâturée dans la ration est du même ordre de grandeur entre les trois espèces de ruminants. Comme pour les vaches, le passage d'une ration hivernale au pâturage réduit de façon significative la part des AGS dans le lait de chèvre et de brebis, au profit des AGMI et des AGPI. En pratique, les rations distribuées aux chèvres contiennent moins d'herbe fraîche, y compris au cours de la période estivale, et les différences de teneurs en AGS selon les types de régimes sont par conséquent moins marquées (de l'ordre de 1,5 à 2 g/100 g d'AGT). Chez les brebis, le système d'alimentation peut être basé sur le pâturage, mais la proportion de lait

	Ensilage de maïs	Foin	Enrubannage	Ensilage d'herbe	Herbe pâturée
Matière grasse ¹	3,0	1,5		2,3	2,5
Acides gras (g/100g d'acides gras	totaux)				
Acide palmitique	14,2	16,0		15,0	15,0
Acide palmitoléique	0	1,5		2,2	2,2
Acide stéarique	2,1	6,8		3,5	1,5
Acide oléique	24,2	9,8		2,7	2,2
Acide linoléique	48,8	25,9	13,3	15,4	12,8
Acide α-linolénique	3,7	21,6	44,0	50,8	65,5
Vitamines et caroténoïdes² (µg/g	de matière sèche)				
β-carotène	$9,6 \pm 5,5$	$12,7 \pm 9,3$	$13,5 \pm 5,8$	$64,6 \pm 72,8$	$154,4 \pm 82,5$
Vitamine E	26 ± 14	72 ± 54		35 ± 11	105 ± 63
Minéraux (g/kg de matière sèche)					
Calcium total	2,0	4,6		5,7	6,0
Calcium absorbable	0,8	1,6		2,0	2,1
Phosphore total	1,8	3,2		3,1	4,0
Phosphore absorbable	1,3	2,1		1,9	2,8
Composés phénoliques totaux ^{3,4}	3,8	4,7			7,2

¹ En % de la matière sèche

Sources Graulet communication personnelle, Inra 2007, Institut de l'Élevage 2011

Tableau 13. Composition moyenne des fourrages.

	Herbe pâturée	Ensilage d'herbe	Foin	Foin ventilé	Balles rondes enrubannées	Luzerne déshydratée
Acides gras						
Diminution des AGS	+++	0	0	0	0	0
Diminution de l'acide palmitique	+++	0	0	0	0	0
Accroissement de l'acide oléique	+++	+/-	+/-	+	+/-	+
Accroissement de l'acide α-linolénique	+++	++	++	+++	0	+
Diminution du ratio n-6/n-3	+++	++	+++	+++	++	+
Accroissement des acides ruménique et vaccénique	+++	0	+	+	0	0
Accroissement des AG trans	+++	0	+	+	0	0
Risque d'apparition d'AG trans non souhaités	+/-	0	0	0	0	0
Composé phénoliques et terpènes						
Composés phénoliques	+++	+	+			
Terpènes	+++	++	+			

 $Effets: 0: nul\ ; \ +: faible\ ; \ ++: moyen\ ; \ +++: fort\ ; \ +/-: variable\ selon\ les\ sources$

AGS acides gras saturés

Sources Besle et al. 2010, Cornu et al. 2003, Institut de l'Élevage 2011

Tableau 14. Effets de l'herbe pâturée et conservée, en comparaison à une ration équilibrée à base d'ensilage de maïs, sur le profil en acides gras du lait de vache et sur ses teneurs en terpènes et composés phénoliques.

 $^{^{2}}$ Nombre de fourrages analysés : 4 à 20 pour les fourrages conservés, 138 pour l'herbe pâturée

³ Dosés selon la méthode de l'Inra, basée sur Reynaud et al. (2010), en mg équivalent acide gallique /g de MS

⁴ Nombre de fourrages analysés : 2 à 11 pour les fourrages conservés, 125 pour l'herbe pâturée

obtenu pendant la période de pâturage est faible, en raison de la saisonnalité de la production qui est arrêtée environ fin juillet.

Vitamines

En raison de la richesse de l'herbe en caroténoïdes, les laits issus de vaches laitières au pâturage sont associés aux produits laitiers les plus jaunes et aux laits les plus riches en β-carotène. Les teneurs du lait en vitamines varient elles aussi selon la consommation d'herbe fraîche ou de fourrages conservés ; d'une manière générale, les teneurs du lait en vitamines A et E sont plus importantes lorsque les animaux pâturent (tableau 15). Les concentrations de vitamine A dans le lait sont moins variables selon le type de fourrage que celles du β-carotène. Les teneurs du lait en caroténoïdes et en vitamine E sont 1,5 à 2 fois supérieures dans le lait des vaches au pâturage. Ces effets du pâturage sur les teneurs en vitamines et en caroténoïdes du lait sont observés notamment au moment de la mise à l'herbe, avec cependant un décalage dans le temps de 2 à 3 semaines. Néanmoins, dans les élevages où des suppléments contenant des vitamines A et E sont distribués, la relation entre la nature du fourrage ingéré et la concentration du lait en ces vitamines est moins nette. Les connaissances restent très lacunaires pour la plupart des autres vitamines. Les vitamines B et K, issues en partie des synthèses microbiennes du rumen, sont néanmoins susceptibles de varier selon le type de ration. Des résultats récents montrent que les teneurs du lait en vitamine B₁₂ sont plus élevées avec une alimentation à base d'ensilage de maïs, alors que les teneurs en vitamines B₂ et B₃ sont supérieures au pâturage.

Minéraux

La ration fourragère des animaux n'a *a priori* qu'un très faible effet à court terme sur la composition du lait en minéraux majeurs, dans la mesure où les réserves osseuses de l'animal permettent d'en réguler les teneurs dans le lait. Des études en cours permettent cependant de compléter les connaissances actuelles sur ce sujet.

Composés phénoliques et terpènes

Ces deux familles de composés se retrouvent généralement en quantité et en diversité nettement plus importantes dans le lait lorsque les animaux sont au pâturage. Ainsi, dans des laits de vaches au pâturage, il a été observé des teneurs en composés phénoliques et en terpènes estimées respectivement deux fois et six fois supérieures à celles de laits de vaches alimentées avec le foin de la même prairie.

1.2. Laits produits au pâturage : stade et nature botanique de l'herbe, gestion du pâturage

L'herbe verte est le fourrage permettant de produire le lait qui répond le mieux à l'ensemble des critères nutritionnels requis sur les matières grasses (à l'exception de certains AG trans), les vitamines liposolubles et les antioxydants. Cependant, cet effet est à nuancer selon le stade végétatif de l'herbe ingérée et la nature botanique des prairies.

Acides gras

L'effet de l'herbe verte sur le profil en acides gras du lait est d'autant plus important qu'elle est exploitée à un stade jeune et feuillu. En effet, lors de l'avancement du stade de maturité de

Régimes ¹	Сс	EM	ERG	FRG	FPN	P3	P6
Lutéine	0,026a	0,024a	0,027a	0,030ab	0,024a	0,032b	0,027a
β-carotène	0,12c	0,10cd	0,17ab	0,13c		0,19a	0,16b
Vitamine A	0,16ab	0,11b	0,18ab	0,17ab	0,12b	0,20a	0,14ab
Vitamine E	0,46a	0,48a	0,62b	0,47a	0,47a	0,63b	0,62b

¹ Cc : 65% concentrés et 35% fourrages - EM : 87% ensilage de maïs - ERG : 86% ensilage de ray-grass - FRG : 90% foin de ray-grass - FPN : 87% foin de prairie naturelle - P3 et P6 : 100% pâturage après 3 et 6 semaines de pâturage sur la même parcelle.

Des lettres différentes montrent une différence significative selon la nature de la ration

Source Martin et al. 2009

Tableau 15. Effet de la nature de la ration de base sur la teneur du lait de vache en caroténoïdes et vitamines A et E (µg/ml).

l'herbe, les proportions de lipides totaux et d'acide α -linolénique diminuent dans l'herbe (figure 10), entraînant dans le lait une diminution des acides ruménique et α -linolénique, et une augmentation importante de l'acide palmitique (+2 à +6 g/100 g d'AGT selon les références). En pratique, les laits obtenus avec des rations à base de fourrages conservés présentent quelquefois des profils en acides gras proches de ceux de laits provenant de pâturage d'herbe exploitée à un stade tardif (épiaison).

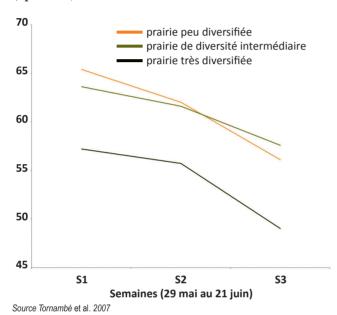


Figure 10. Teneurs de l'herbe en acide α-linolénique (g/100 g de matière grasse) selon le stade et la diversité floristique des prairies.

L'effet de la nature botanique de l'herbe sur le profil en acides gras du lait est nettement plus modéré que celui de sa maturité. Dans le cas de prairies temporaires à base de graminées, le profil en acides gras des laits ne semble pas être affecté par l'espèce pâturée (fétuque ou ray-grass par exemple),

ou de façon peu sensible. En revanche, la présence de légumineuses dans les prairies peut jouer un rôle plus important : la proportion d'acide α-linolénique dans le lait a été multipliée par deux lorsque la proportion de trèfle (violet et blanc) est passée de 0 à 40 % de la matière sèche des fourrages. En effet, les légumineuses, plus pourvues en feuilles que les graminées (tableau 16), sont aussi légèrement plus riches en matières grasses. La diminution de la concentration en matières grasses des légumineuses lors de l'avancement du

stade végétatif est plus lente que dans le cas des graminées. De même, le pâturage d'espèces riches en tanins, comme le sainfoin par exemple, comparé à celui de ray-grass, accroît en particulier la teneur du lait en acide α-linolénique et diminue celle en acide ruménique. Ces effets de la nature botanique des pâturages peuvent s'expliquer par la réduction supposée de la biohydrogénation ruminale provoquée par les métabolites secondaires des plantes (tanins, composés phénoliques...). Les effets cités précédemment expliquent en partie que le lait issu de fermes en agriculture biologique présente généralement davantage d'acides α-linolénique (+0,17 g/100 g d'AGT), oméga 3, ruménique (+0,7 g/100 g d'AGT), vaccénique et EPA et moins d'acides linoléique et oléique que celui issu de l'agriculture conventionnelle. Les vaches conduites en agriculture biologique reçoivent en effet des proportions plus importantes d'herbe, le fourrage distribué étant plus diversifié et plus pourvu en légumineuses.

L'altitude du pâturage a aussi un effet sur le profil en acides gras du lait, qui se confond avec celui de la nature botanique. Les dicotylédones non légumineuses, également appelées diverses, peuvent contribuer dans les prairies permanentes jusqu'à environ 50 % de la végétation en demi-montagne et jusqu'à presque 70 % en alpage. Plusieurs travaux récents sur les laits d'alpage ont montré qu'ils sont en moyenne moins riches en AGS de 12 à 16 atomes de carbone (-8,8 g/100 g d'AGT) et plus riches en acides ruménique et α-linolénique (respectivement +1,3 et +0,8 g/100 g d'AGT) que les laits produits en été en plaine. Ces effets importants n'ont pas pu être attribués seulement à la flore des pâturages plus diversifiée en alpage qu'en plaine, dans la mesure

	Feu	illes	Tiç	jes
	Proportion	β-carotène	Proportion	β-carotène
Graminées				
Fétuque	12	460	88	101
Fléole	17	387	83	95
Légumineuses				
Trèfle rouge	34	724	66	66
Luzerne	39	629	61	75

Source Williams et al. 1998

Tableau 16. Proportion de feuilles et de tiges (%) des légumineuses et des graminées et teneurs en β -carotène (mg/kg MS).

où les rations des animaux en plaine comprenaient éventuellement des fourrages conservés et des quantités plus importantes de concentrés. Lorsque l'on isole l'effet de la nature botanique des prairies (altitude et stade végétatif comparables), ce dernier est nettement plus faible que celui du stade végétatif de l'herbe. Cependant, les prairies très diversifiées sont à l'origine de laits légèrement plus riches en acide α -linolénique que les laits issus de prairies peu diversifiées, ces dernières étant pourtant plus riches en cet acide gras ; ceci s'explique vraisemblablement par la richesse de certaines plantes dicotylédones non légumineuses en métabolites secondaires susceptibles de limiter les biohydrogénations ruminales des AGPI.

Au cours de la saison de pâturage, des variations plus ou moins importantes de la composition du lait en acides gras sont observées selon le système de pâturage. Le profil en acides gras du lait obtenu avec un mode de pâturage permettant de maîtriser la quantité et la qualité de l'herbe offerte est généralement stable. À l'opposé, un système de pâturage plus extensif (chargement moindre, couvert végétal hétérogène et plus diversifié) conduit à la production d'un lait plus riche en acides gras d'intérêt nutritionnel au printemps (acides ruménique, vaccénique et α -linolénique), mais dont les teneurs chutent au cours de l'été avec l'avancement non maîtrisé du stade de l'herbe.

Vitamines

Le stade de l'herbe a un effet important sur la teneur du lait en vitamine A et en β-carotène : les valeurs les plus élevées sont observées lorsque l'herbe est feuillue au printemps et à l'automne, périodes où elle est particulièrement riche en caroténoïdes (figure 11). Au cours du 1^{er} cycle de végétation, la diminution de la teneur du lait en β-carotène est de l'ordre de 20 % entre le début et la fin du cycle. En revanche, les teneurs en vitamine E des laits sont peu variables au cours de la saison de pâturage, ou ont tendance à augmenter durant le 1^{er} cycle de végétation.

La composition botanique des prairies a un effet plus modéré : les laits de vaches pâturant les prairies les plus diversifiées ont tendance à être légèrement moins riches en β -carotène et en vitamine A que les laits de vaches pâturant des prairies composées

uniquement de graminées. Ceci peut s'expliquer en partie par la moindre richesse en caroténoïdes des plantes dicotylédones par rapport aux graminées.

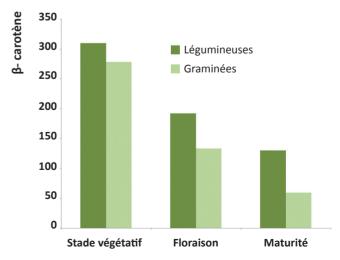
En pratique, il est quelquefois délicat de mettre en relation les teneurs de ces composés observées dans l'herbe avec celles relevées dans le lait, qui sont en partie régulées par l'animal dans le temps (latence et rémanence des composés).

Composés phénoliques

La teneur du lait en composés phénoliques est principalement liée à la composition botanique des fourrages. Ce lien a surtout été étudié dans le cas où ces composés ont des propriétés œstrogènes. Des premiers travaux ont montré qu'il est possible de maximiser la teneur en équol du lait en alimentant les vaches avec des fourrages riches en trèfle violet. Il a également été observé que le lait issu de l'agriculture biologique est généralement plus riche en phytœstrogènes que celui issu de l'agriculture conventionnelle, en raison d'une plus grande utilisation des légumineuses dans les fourrages distribués.

Terpènes

Le premier facteur de variation de la teneur des laits en terpènes est la composition botanique des prairies. Comparativement aux laits issus de prairies constituées principalement de graminées et de légumineuses (très pauvres en terpènes), les laits issus des prairies diversifiées, pourvues de



Source Williams et al. 1998

Figure 11. Effet du stade végétatif des légumineuses et des graminées sur leurs teneurs en β -carotène (mg/kg MS).

diverses plantes aromatiques, sont nettement plus riches en terpènes. Les prairies d'alpage, ou plus généralement de montagne, qui présentent une diversité botanique plus importante que celles de plaine, sont à l'origine d'un lait nettement plus riche en terpènes.

Pour la majorité des dicotylédones, la teneur en terpènes augmente lors de l'avancement du stade de végétation; elle est également plus élevée au cours du 1^{er} cycle de végétation que dans les repousses végétatives. Les teneurs observées dans le lait reflètent exactement ces évolutions.

Le mode de pâturage influence aussi la teneur en terpènes du lait : par exemple, un pâturage rationné à fort chargement instantané, qui force les animaux à consommer toute la végétation disponible, conduit à des laits environ deux fois plus riches en terpènes qu'un pâturage tournant à plus faible chargement (figure 12). Dans ce dernier cas, les animaux choisissent de consommer préférentiellement les graminées, qui sont plus appétantes mais moins riches en terpènes.

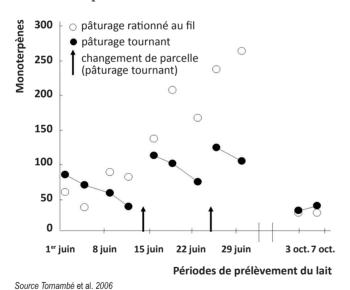


Figure 12. Teneur du lait en monoterpènes selon la date et le mode de pâturage (unités arbitraires des surface x10⁵).

1.3. Laits produits avec des fourrages conservés

Les effets de la nature des fourrages conservés sur la composition du lait sont globalement de plus faible amplitude que ceux de l'herbe pâturée. La conservation de l'herbe sous forme d'ensilage préserve mieux les qualités originelles de l'herbe que la conservation sous forme de foin, notamment

ED: ensilage direct avec conservateur ER: ensilage ressuyé 25% matière sèche 110 β- carotène EP: ensilage préfané 30% matière sèche BRE: balles rondes enrubannées 70% 100 matière sèche 90 FBT : foin récolté par beau temps 80 FM: foin récolté sec après 2 jours d'arrosage FG: foin récolté humide séché en grange 70 60 Ray-grass anglais 50 Dactyle 40 Trèfle violet 30 20 10 n BRE ED Mode de conservation

Source Chauveau-Duriot et al. 2005

Figure 13. Effet du mode de conservation sur la teneur en β -carotène des fourrages (mg/kg MS).

sa teneur en matières grasses, caroténoïdes et vitamine E (tableau 13 et figure 13). Ces composés sont en effet partiellement dégradés lors du fanage et du séchage, d'une part par la lumière, de façon d'autant plus importante que la durée de séjour au sol des fourrages est plus longue, d'autre part par une perte partielle des feuilles, parties les plus riches de la plante.

À même niveau d'apport énergétique, les rations à base d'ensilage d'herbe conduisent, dans le lait, à des taux protéique et butyreux légèrement inférieurs (respectivement -1,0 et -1,1 g/kg) à ceux obtenus avec des rations à base de foin, en raison d'une dilution des quantités de matières protéiques et grasses sécrétées dans une plus grande quantité de lait produite.

Acides gras

Comparativement à l'ensilage de maïs, le principal effet des régimes à base d'herbe conservée est l'accroissement systématique et parfois important de la teneur du lait en acide α-linolénique, qui conduit toujours à une forte réduction du ratio n-6/n-3 (tableau 14). En revanche, les laits issus de régimes à base d'herbe conservée ou d'ensilage de maïs sont relativement proches au niveau de leurs teneurs en AGS, AGMI et acide ruménique.

La teneur du foin en acide α-linolénique peut être inférieure de l'ordre de 50 à 75 % à celle de l'ensilage d'herbe ou de l'herbe correspondants. Toutefois, le lait de vaches nourries avec du foin peut être plus riche en acides linoléique et α-linolénique que celui de vaches recevant de l'ensilage, du fait d'une biohydrogénation ruminale plus faible avec le foin. Parmi les foins, il convient en effet de distinguer ceux réalisés dans d'excellentes conditions, par exemple coupés à un stade précoce et séchés en grange, qui peuvent présenter des teneurs en acides gras proches de celles de l'herbe fraîche. Des vaches nourries avec du foin produisent un lait avec des teneurs en acides linoléique et α-linolénique respectivement de l'ordre de 2,5 et de 1,0 à 1,7 g/100 g d'AGT. En comparaison, les vaches nourries avec de l'enrubannage ou de l'ensilage d'herbe produisent un lait avec un rapport n-6/n-3 légèrement moins favorable. Les teneurs du lait en acides vaccénique et ruménique sont légèrement plus élevées avec l'ensilage ressuyé qu'avec l'herbe enrubannée (respectivement, +0,27 et +0,14 g/100 g d'AGT) et celles en acides linoléique et α-linolénique sont identiques.

Peu de données sont disponibles en France sur l'effet de la composition botanique des ensilages et des foins sur la composition en acides gras des laits. L'ensilage de trèfle violet ou blanc, comparé à de l'ensilage de graminées, permet d'augmenter les teneurs du lait en acides linoléique (+0,2 g/100 g d'AGT), α-linolénique (+0,3 à +0,4 g/100 g d'AGT) et ruménique (+0,05 g/100 g d'AGT). Cet effet des légumineuses, qui reste modéré, pourrait s'expliquer par un transit digestif plus rapide limitant la biohydrogénation ruminale et, dans le cas du trèfle violet, par la présence de polyphénol oxydase, qui réduit la lipolyse durant l'ensilage.

L'introduction de fourrages déshydratés, comme la luzerne, à hauteur de 3 à 4 kg dans une ration à base d'ensilage de maïs permet d'accroître modérément la teneur du lait en acide α -linolénique (+0,1 à 0,2 g/100 g d'AGT).

Les différences observées en pratique sur les profils en acides gras des laits selon le mode de conservation de l'herbe ingérée par les animaux restent modérées. Une étude récente menée en conditions réelles sur de nombreux élevages a montré que les rations à base de foin sont à l'origine de laits dont la teneur en acide palmitique est plus élevée de 1,5 et 2,5 g/100 g d'AGT, comparativement à des laits issus respectivement de rations à base d'ensilage de maïs ou d'ensilage d'herbe.

Chez la chèvre, l'ingestion d'ensilage de maïs, par rapport à du foin de luzerne, diminue dans le lait les teneurs en acides palmitique, linoléique et α-linolénique et augmente la teneur en acide stéarique. Ces résultats expérimentaux ont été validés à plus grande échelle, mais, comme pour le lait de vache, les effets du type de ration hivernale restent limités. Par rapport à une ration composée majoritairement de foin de légumineuses, les autres types de rations (foin, ensilage d'herbe, ensilage de maïs) ont entraîné une légère baisse de la teneur du lait en AGS (de -0,2 à -0,4 g/100 g d'AGT). En contrepartie, la teneur du lait en AGI a augmenté, plus particulièrement celle d'AGMI et quelquefois d'AGPI de type oméga 3.

Pour le lait de brebis, dans le cadre de rations à base d'herbe conservée par rapport à une ration basée sur l'ensilage d'herbe, peu de différences ont été relevées, hormis une légère augmentation des teneurs du lait en acide palmitique (+0,4 g/100 g d'AGT) et en AGMI (+0,6 g/100 g d'AGT) avec le foin ventilé. En revanche, les rations à base d'ensilage de maïs ont entraîné une augmentation de la teneur du lait en AGS (de +1,5 à +2 g/100 g d'AGT).

Vitamines

La nature des fourrages conservés modifie à la fois les concentrations en β-carotène et en vitamines A, E, B₂, B₉ et B₁₂ des laits. Ainsi, les rations à base d'ensilage d'herbe conduisent à un lait plus riche en β-carotène et en vitamines A, B₂ et E, par rapport à celles basées sur le foin. La teneur en β-carotène et vitamine A des laits de vaches nourries avec de l'ensilage de ray-grass est similaire à celle obtenue au pâturage (tableau 15). En revanche, ces teneurs sont plus faibles dans des laits produits avec des régimes à base de foin et sont comparables à celles obtenues dans des laits produits avec de l'ensilage de maïs et des concentrés.

Pour la vitamine E, les teneurs les plus élevées dans le lait ont été obtenues avec des régimes

d'ensilage de ray-grass et les valeurs les plus faibles avec les régimes à base de foin, d'ensilage de maïs ou de concentrés (écart de $0,15~\mu g/mL$ - tableau 15). La teneur du lait en vitamine E augmente linéairement avec l'accroissement de la proportion d'ensilage d'herbe dans une ration basée sur le foin. Lors de la transition d'un régime pauvre à un régime riche en β -carotène et en vitamine E, la teneur de cette dernière dans le lait se stabilise après 8 jours environ, alors que la teneur en β -carotène augmente plus lentement et se stabilise seulement après 4 à 6 semaines. Lors de la transition inverse, les teneurs du lait en vitamine E et en β -carotène diminuent simultanément et rapidement (dès le premier jour) et se stabilisent au bout de 10 à 15 jours.

Des résultats récents ont montré que les concentrations du lait en vitamine B₉ sont les plus élevées lorsque les rations sont à base d'herbe conservée, en particulier lorsque qu'elles contiennent du foin. Inversement, les rations riches en ensilage de maïs sont à l'origine de laits plus riches en vitamine B₁₂.

Composés phénoliques et terpènes

Les fourrages conservés, y compris sous forme de foin, restent suffisamment pourvus en métabolites secondaires pour qu'il soit possible de différencier les laits selon la nature botanique des fourrages dont ils sont issus. Ainsi, les effets de la nature botanique de l'herbe détaillés dans le paragraphe relatif au pâturage restent valables pour l'herbe conservée.

2. Concentrés

Dans les élevages, les animaux reçoivent, en complément des fourrages, des aliments concentrés, dont la proportion dans la ration peut être très variable. La nature de ces concentrés est très diverse : céréales, co-produits de céréales, graines protéagineuses et oléagineuses, tourteaux d'oléagineux, tubercules, racines, fourrages déshydratés... Intégrer des aliments concentrés dans la ration permet d'en accroître la densité énergétique et/ou azotée. Suivant les types de produits distribués et leurs proportions dans la ration, les effets observés sur le profil en acides gras des laits et sur leurs teneurs en vitamines, caroténoïdes, minéraux et métabolites secondaires sont différents.

Le taux protéique du lait augmente si le niveau énergétique de la ration est accru, par une élévation de la proportion de concentrés ou par une amélioration de la qualité des fourrages. Cet accroissement s'observe quelle que soit la nature de l'aliment concentré, à l'exception des supplémentations en lipides. L'augmentation des apports azotés dans la ration conduit à une augmentation conjointe de la production de matières protéiques et de lait, de telle sorte que le taux protéique n'est que peu modifié.

Le taux butyreux du lait dépend assez peu des apports énergétiques, sauf dans le cas d'un déficit énergétique prononcé, qui entraîne son augmentation, liée à la mobilisation des lipides corporels et à une diminution de la production laitière. Le taux butyreux du lait ne dépend pratiquement pas du niveau d'apport azoté de la ration.

Pour les vaches laitières, ces effets de l'alimentation ont été très clairement validés à l'échelle de l'exploitation, alors que pour les petits ruminants, l'alimentation collective rend souvent difficile la mise en évidence des relations entre la composition du lait et le niveau de couverture des besoins moyens du troupeau.

2.1. Proportion de concentrés dans la ration

En règle générale, pour les trois espèces de ruminants, le taux butyreux du lait diminue lorsque la proportion d'amidon apportée dans la ration par les concentrés augmente. Pour les bovins et les caprins, le taux butyreux du lait est peu modifié jusqu'à environ 35 à 40 % de concentrés dans la matière sèche de la ration. Ce n'est qu'avec des proportions plus importantes d'aliment concentré (40 à 65 %) que le taux butyreux du lait peut diminuer de -3 à -10 g/kg, en particulier avec des céréales riches en amidon et dans le cas de régimes à base de foin ou d'ensilage d'herbe.

À niveau d'apport énergétique constant, la proportion de concentrés n'a pas d'effet marqué sur le taux protéique.

Acides gras

En-deçà de 50 à 60% de concentrés dans la ration, l'augmentation du pourcentage de

concentré entraîne dans le lait une augmentation de l'acide linoléique et des acides gras synthétisés de novo, ainsi que des C18:1trans autres que l'acide vaccénique. Parallèlement, les teneurs en acides oléique, vaccénique, ruménique et α-linolénique diminuent. Si la proportion du concentré dans la ration augmente au-delà de 60 %, le processus de biohydrogénation ruminale s'oriente vers la production de C18:1trans10 au détriment de l'acide vaccénique. Les teneurs du lait en C18:1trans10 et en AG trans augmentent donc, celle de l'acide linoléique n'augmente plus et les teneurs du C14:0 au C18:0 diminuent, induisant une chute de la sécrétion des matières grasses. Ces effets très généraux peuvent être très différents et parfois opposés, selon que l'augmentation du pourcentage de concentrés s'opère sur des rations riches ou pauvres en fibres, mais il est toujours observé une augmentation de l'acide linoléique et du C18:1trans10. Les effets de la proportion de concentrés dans la ration sont d'autant plus importants que la ration est pauvre en fibres.

Chez la chèvre, une augmentation de 30 à 60 % des concentrés dans la ration diminue, dans le lait, les teneurs en acides palmitique et α -linolénique, et augmente celles des AGS (acides caprique et myristique), des acides linoléique, vaccénique et ruménique et des AG *trans*.

Vitamines

Lorsque le concentré se substitue dans la ration à un fourrage riche en β -carotène et vitamines A et E, l'augmentation de la part de concentrés entraîne une diminution des teneurs du lait en ces composés.

L'effet de la proportion de concentrés sur la teneur des autres vitamines dans le lait est peu connu. Il a été relevé des concentrations en vitamine B₅ plus élevées dans le lait de vaches recevant une ration contenant plus de 60 % de concentrés, par rapport à celui de vaches n'en recevant que 30 %, possiblement en raison d'une synthèse ruminale plus active.

2.2. Nature des concentrés

Les concentrés sont souvent considérés en deux grandes familles : les concentrés énergétiques et protéiques. Les concentrés énergétiques peuvent être riches en amidon ou en cellulose; selon les cas, l'amidon peut être rapidement ou lentement fermentescible. Leur teneur en lipides est comprise entre 1,7 et 4,3 % de la matière sèche, ces lipides étant généralement riches en acide linoléique. Les concentrés protéigues les plus fréquemment utilisés sont les tourteaux, qui sont des co-produits d'huilerie résultant de l'extraction des matières grasses de différentes graines protéagineuses ou oléagineuses. En règle générale, ils sont déshuilés et leur teneur en lipides est inférieure à 4% (tableau 17). Les tourteaux non déshuilés (expeller ou fermiers) ont une teneur en lipides plus élevée que les tourteaux déshuilés industriellement (environ +10 %). Les traitements technologiques modifient la teneur en lipides des concentrés protéiques, mais le profil en acides gras reste identique.

Acides gras

Les effets de la proportion de concentrés énergétiques dans la ration sur la composition des laits en acides gras et sur le taux butyreux (décrits ci-dessus) sont amplifiés dans le cas où les concentrés sont riches en amidon rapidement fermentescible (blé, orge), comparativement à des concentrés riches en cellulose ou en amidon lentement fermentescibles (maïs).

La nature des concentrés protéiques introduits dans la ration est susceptible de modifier la composition en acides gras du lait. Ainsi, dans une ration à base d'ensilage de maïs, le remplacement du tourteau de soja par du tourteau de colza industriel conduit à une diminution de la teneur en AGS du lait (-4 à -6 g/100 g d'AGT), notamment celle de l'acide palmitique, et tend à diminuer le rapport n-6/n-3. Dans le cas d'utilisation d'un tourteau de colza fermier, ces effets sont généralement amplifiés. Aussi bien dans le cas de rations à base d'ensilage de maïs que d'herbe conservée (foin ou ensilage d'herbe), l'introduction de tourteau fermier de colza entraîne une diminution considérable de la proportion d'AGS dans le lait, notamment palmitique (de l'ordre de -10 g/100 g d'AGT), au profit de l'acide oléique. Par rapport au tourteau industriel, le tourteau fermier accroît légèrement la teneur du lait en acide ruménique, mais ne modifie pas sensiblement la teneur en acide α-linolénique et le ratio n-6/n-3. L'utilisation du tourteau

	Matière grasse ¹	C16:0	C16:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3
Blé tendre	1,7	17,8	0,4	0,8	15,2	56,4	5,9
Orge	2,1	22,2	0	1,5	12,0	55,4	5,6
Maïs grain	4,3	11,1	0,4	1,8	26,9	56,5	1,0
Pulpe de betterave ²	1,0	20,6		1,4	9,7	57,8	10,5
Luzerne ²	2,8	25,6	1,4	3,8	4,4	19,3	37,0
Tourteau de soja	2,2	10,5	0,2	3,8	21,7	53,1	7,4
Graines de soja ³	20,3		vale	urs identiques à	la ligne précéd	ente	
Tourteau de colza	2,6	4,2	0,4	1,8	58,0	20,5	9,8
Graines de colza	45,6		vale	urs identiques à	la ligne précéd	ente	
Tourteau de tournesol	2,3	6,3	0,4	4,3	20,3	64,9	0,3
Graines de tournesol	48,0	valeurs identiques à la ligne précédente					
Graines de lin	36,2	6,4	0,1	3,4	18,7	14,7	54,2
Huile de palme	100	43,0	0,2	4,4	37,1	53,14	7,45

¹ En % de la matière sèche ² Déshydratée ³ Extrudées ⁴ C18:2w6 ⁵ C18:3w3 Sources Inra 2002, Institut de l'Élevage 2011

Tableau 17. Composition moyenne en acides gras de quelques concentrés, graines oléagineuses et huiles (g/100 g d'AGT).

fermier de colza augmente aussi sensiblement les C18:1*trans* dans le lait (y compris les C18:1*trans* autres que l'acide vaccénique) et fait chuter de façon importante le taux butyreux.

Le tourteau de lin expeller, issu de l'extraction industrielle de l'huile, est particulièrement riche en acide α-linolénique. Dans le cadre d'une ration à base d'ensilage de maïs, lorsque ce tourteau est substitué à du tourteau de soja, la teneur du lait en AGS est réduite de 6 g/100 g d'AGT, avec un impact important sur l'acide palmitique. De façon corollaire, la proportion d'acide oléique augmente, ainsi que celle des AGPI, notamment celle de l'acide α-linolénique, dont la teneur est multipliée par 2,5. Au final le rapport n-6/n-3 est fortement diminué.

Composés phénoliques et terpènes

Les concentrés peuvent apporter une grande diversité de composés phénoliques, notamment des phytœstrogènes. En effet, ils contiennent des plantes notoirement riches en ces composés, au premier rang desquelles figure le soja. Des études récentes ont montré que le lait des vaches alimentées avec du soja contient environ 10 fois plus d'isoflavones que celui de vaches n'en recevant pas. Les concentrés n'apportent en principe pas de terpènes, sauf s'ils sont « aromatisés » avec des huiles essentielles.

3. Graines oléagineuses et huiles

L'introduction de lipides d'origine végétale dans la ration des vaches et des chèvres laitières est utilisée depuis longtemps pour en augmenter la densité énergétique et donc la production laitière. Les principales graines oléagineuses utilisées sont le colza (riche en acide oléique), le soja, le tournesol (riches en acide linoléique) et le lin (riche en acide α-linolénique). Ces graines peuvent être utilisées crues, entières ou broyées, après un traitement industriel (extrusion par exemple), ou sous forme d'huile incorporée dans les concentrés. Par ailleurs, l'huile de palme, compte tenu de son prix attractif, est aussi largement utilisée en alimentation animale; elle est particulièrement riche en acide palmitique et souvent distribuée sous forme de savons calciques (tableau 17). À de rares exceptions près, les supplémentations des rations des vaches en graines et produits oléagineux ont tendance à diminuer l'ingestion, ce qui peut affecter le poids et l'état corporel des animaux, notamment en début de lactation. La production laitière semble peu affectée et le taux protéique du lait est souvent diminué de l'ordre de 1 g/kg (tableau 18). Le taux butyreux est diminué par l'introduction de graines et produits oléagineux dans la ration, sauf s'ils sont protégés des biohydrogénations ruminales (matière grasse encapsulée utilisée en expérimentation). Les diminutions de taux butyreux les plus importantes

sont observées avec les huiles (-3 à -6 g/kg), fortement bio-hydrogénées dans le rumen et ainsi associées à une production ruminale de certains acides gras (C18:1trans10 et CLAtrans10cis12), qui inhibent la synthèse de novo des matières grasses au niveau de la mamelle. La chute du taux butyreux est plus marquée dans le cadre de régimes à base d'ensilage de maïs ou riches en concentrés qu'avec des régimes à base d'herbe.

Les chèvres et les brebis réagissent différemment à l'introduction de lipides dans leur ration, qui entraîne chez les deux espèces une augmentation significative du taux butyreux et pas d'effet dépressif sur l'ingestion. Chez les chèvres, l'introduction d'huile de lin ou de tournesol oléique dans une ration de foin de luzerne a entraîné une élévation notable du taux butyreux (respectivement +7 et +5 g/kg), mais est restée sans effet dans le cas d'une ration d'ensilage de maïs. Dans tous les cas, l'apport de ces huiles a plutôt amélioré le taux protéique. Chez les brebis, l'introduction d'oléagineux dans la ration a permis une augmentation importante du taux butyreux du lait (environ +6 g/kg). Par contre, la quantité de lait et le taux protéique ont diminué (respectivement de l'ordre de -8 % et -1,8 g/kg).

Ces effets des supplémentations lipidiques sur la composition du lait ont été étudiés dans le cadre d'expérimentations de courte durée (< 3 mois) ; un travail récent a montré que ces effets sont aussi observés dans le cadre de supplémentations à long terme (2 lactations successives).

Acides gras

D'une manière générale, l'apport de colza, de soja, de tournesol ou de lin (tous riches en AGI à 18 atomes de carbone) permet de réduire la teneur du lait en AGS, notamment en acide palmitique (-5 à -15 g/100 g d'AGT) et d'augmenter celles en acides stéarique et oléique. Ces apports accroissent également la teneur du lait en AG trans, majoritairement les acides vaccénique et ruménique, mais également celle en autres AG trans non souhaités. Leurs teneurs dans le lait varient en fonction de la quantité d'AGPI ingérée, de l'importance de la biohydrogénation ruminale et de l'interaction des graines oléagineuses avec la nature du fourrage. Ainsi, les concentrations du lait en acide ruménique et C18:1trans sont variables selon les régimes et peuvent s'élever, respectivement, jusqu'à environ 2 et 10 g/100 g d'AGT dans le cas de supplémentation de la ration avec 3 à 4 % d'huile

Oléagineux alimentaires	Production laitière (kg/j) ¹	Taux protéique (g/kg)¹	Taux butyreux (g/kg) ¹	Nombre expérimentations
Colza				
Huile	-1,9	0,0	-5,9	5
Graines ²	+0,8	-0,3	-3,1	11
Tournesol				
Huile	+1,0	-1,1	-3,4	5
Graines ²	+0,7	+0,4	-1,2	8
Soja				
Huile	+0,3	-0,8	-3,3	34
Graines ²	-0,7	-0,8	+1,3	18
Graines extrudées	+2,7	-1,1	-1,9	16
Lin				
Huile	+1,3	-0,9	-1,8	10
Graines ²	-0,4	-0,5	+0,3	8
Graines extrudées	+0,1	-0,8	-4,7	7
Huiles végétales encapsulées	0,0	-0,8	+6,4	26

¹ Effets exprimés en différence intra-essai « ration supplémentée-ration témoin »

Sources Chilliard et Ferlay 2004, Institut de l'Élevage 2011, Lerch 2012

Tableau 18. Effets de différentes supplémentations en huiles et graines oléagineuses chez la vache laitière sur la production et la composition du lait.

² Graines entières, aplaties ou broyées

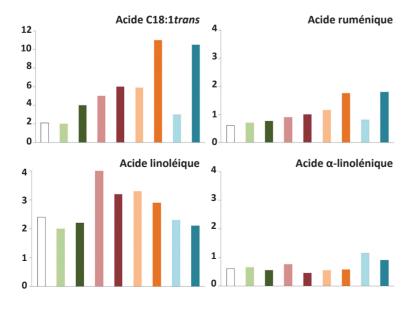
de tournesol ou de lin (figure 14). Par contre, la teneur de ces acides gras dans le lait est faiblement augmentée dans le cas d'apport de colza, riche en acide oléique.

L'ampleur de ces effets est variable selon la forme de présentation du supplément. Lorsque les graines sont utilisées entières, la libération des acides gras disponibles pour les micro-organismes du rumen est progressive, ce qui peut limiter les phénomènes de biohydrogénation, comparativement à l'apport de ces mêmes matières grasses sous forme d'huile, qui perturbent davantage le fonctionnement du rumen. Les effets des graines extrudées sont intermédiaires (tableau 19 et figure 14).

Mis à part les fourrages à base d'herbe, seul le lin permet des apports importants d'acide α-linolénique. Lorsqu'il est incorporé à une ration, la proportion d'acide α-linolénique dans le lait est augmentée de +0,3 à +0,9 g/100 g d'AGT, selon sa forme de présentation. À titre d'exemple, dans une ration à base d'ensilage de maïs, l'addition de 12 % de graines de lin (ou de 3,7 % d'huile de lin) permet la même ingestion d'acide α-linolénique que la consommation de 20 kg de matière sèche d'herbe fraîche. La teneur du lait en cet acide gras augmente de la même façon avec les deux types de rations citées, mais la supplémentation en lin accroît de façon plus importante la teneur du lait en acide linoléique et en C18:1trans (dont C18:1trans10), dont la teneur dans le lait peut être doublée. Ces résultats expérimentaux ont été validés récemment sur le terrain (tableau 20).

L'ingestion de tournesol ou de soja, riches en acide linoléique, augmente généralement la teneur du lait en cet acide gras, cet effet étant plus marqué si les vaches ingèrent des graines plutôt que de l'huile ou des graines traitées.

Les effets de l'introduction de suppléments lipidiques dans la ration des vaches laitières sont variables selon la nature des rations. La supplémentation avec des AGPI entraîne une production ruminale de C18:1trans10 plus marquée avec des rations riches en amidon fermentescible qu'avec des rations plus riches en fibres. Dans le cas des rations riches en amidon, les biohydrogénations ruminales des AGPI sont moins complètes, ce qui explique un meilleur transfert au lait des acides α-linolénique ou linoléique, une plus faible teneur des laits en acides stéarique et oléique, associée en revanche à des augmentations parfois considérables dans le lait du C18:1trans10 et du CLAtrans10cis12. Il semblerait par ailleurs que les effets des suppléments lipidiques puissent varier suivant la race des vaches; ainsi, dans le cas d'une supplémentation de la ration en graines de lin extrudées, l'augmentation des teneurs du lait en acide α-linolénique a été plus marquée chez les vaches de race Prim'Holstein que chez celles de race Montbéliarde.





Sources Glasser et al. 2008, Lerch 2012

Figure 14. Effets de différentes supplémentations en huiles et graines oléagineuses (toutes transformations) sur la composition en acides gras du lait de vache (en g/100 g d'AGT)

En moyenne, 2.9 à $3.9\,\%$ de lipides apportés par le supplément dans diverses rations de base (comparaisons indirectes).

	Huile ¹	Graines extrudées	Graines crues	Huile encapsulée
Diminution de l'acide palmitique	+++	+++	++	++
Taux de transfert d'AG d'intérêt dans le lait ²		+	++	+++
Risque d'apparition d'AG trans non souhaités	+++	++	+	0/+
Risque de chute du taux butyreux	+++	++	+	0/+

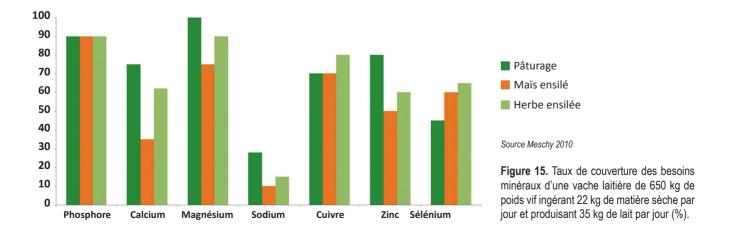
^{0 :} effet nul; + : effet faible; ++ : effet moyen; +++ : effet fort

Source Institut de l'Élevage 2011

Tableau 19. Effets de la forme d'apport d'acides gras polyinsaturés (AGPI) sur le profil en acides gras du lait de vache.

	Fourrage majoritaire dans la ration				
-	Herbe ¹	Ensilage de maïs²	Ensilage de maïs et graines de lin extrudées³		
Acide palmitique	29,2	31,9	26,6		
Acide stéarique	9,7	8,8	10,9		
C18:1trans6+trans7+trans8	0,14	0,17	0,38		
Acide élaïdique	0,16	0,17	0,30		
C18:1trans10	0,10	0,22	0,35		
Acide vaccénique	2,4	1,2	2,3		
Acide oléique	19,1	18,7	21,2		
Acide linoléique	0,97	1,32	1,44		
Acide α-linolénique	0,78	0,44	0,78		
Acide ruménique	0,86	0,44	0,75		
AGS	68,5	70,4	64,4		

Tableau 20. Effet du système d'alimentation sur les acides gras du lait (g/100 g d'AGT).



Sauf huile de palme
 Par suite des modifications des processus de biohydrogénation et d'isomérisation des AGPI

 ¹ Foin et ensilage d'herbe en hiver (80 %), pâturage en été (82 %)
 ² Ensilage de maïs en hiver (64 %), ensilage de maïs et pâturage en été (38 % et 40 % respectivement)
 ³ Ensilage de maïs en hiver (62 %), ensilage de maïs et pâturage en été (46% et 25 % respectivement), et en moyenne 750 g/jour de graines de lin extrudées.

Chez la chèvre, l'apport de matières grasses végétales dans la ration induit des effets très similaires à ceux observés chez la vache. Il semble que la chèvre réponde mieux aux apports alimentaires d'AGPI, avec des teneurs dans le lait en acides linoléique, α-linolénique et ruménique plus élevées et un accroissement de l'acide ruménique stable dans le temps. Ainsi, l'addition de graines extrudées ou d'huile de lin augmente respectivement jusqu'à +1,9 et +0,8 g/100 g d'AGT la teneur du lait en acide α-linolénique. De même, un apport de tournesol ou de soja dans la ration permet un accroissement de +0,5 à +1,9 g/100 g d'AGT de la teneur du lait en acide linoléique. L'élévation des teneurs du lait en acide ruménique peut être importante et atteindre jusqu'à 5 g/100 g d'AGT.

Concernant les brebis, peu de résultats sont disponibles. Comme chez la vache, il a été observé que l'introduction de matières grasses (graines de lin et huile de colza) permet de diminuer la part des AGS dans les AGT (environ -4 g/100 g) et d'augmenter celle des AGI (environ +3,9 g/100 g).

Vitamines

L'apport de matières grasses végétales dans la ration des vaches laitières peut permettre une amélioration de la digestibilité des caroténoïdes qu'elle contient, mais les effets sont assez contrastés selon la forme d'apport et la composition de la ration. Sous forme de graines, les suppléments semblent stimuler l'absorption intestinale des caroténoïdes et de la vitamine E des fourrages, mais seuls les caroténoïdes sont transférés au lait de façon plus importante, dans le cas de rations à base d'herbe pâturée ou ensilée. Sous forme d'huile (tournesol, tournesol oléique, lin), les suppléments n'ont pas affecté les concentrations en caroténoïdes et en vitamines du lait.

Composés phénoliques

Le lait des vaches ayant consommé de la graine de lin, riche en lignane, est enrichi en phytœstrogènes : des concentrations d'entérolactone et d'entérodiol allant, respectivement, jusqu'à 100 et 0,5 µg/L de lait ont été observées. Ces composés antioxydants pourraient par ailleurs être intéressants pour limiter les phénomènes d'oxydation des matières grasses du lait issu de rations enrichies en AGPI. Cet effet

de la graine de lin n'est pas rapporté dans le cas de supplémentations des rations avec de l'huile de lin, car les composés qui en sont responsables sont contenus dans l'enveloppe de la graine.

4. Additifs

L'utilisation d'additifs, en plus des fourrages, des concentrés, des graines oléagineuses et des huiles, est généralisée dans les élevages bovins laitiers. Dans la plupart des cas, ils permettent de pallier des déséquilibres ou des déficits de la ration en minéraux et vitamines, limitant ainsi l'apparition de pathologies, notamment dans les périodes de croissance des animaux ou de production maximale. Ces additifs sont en outre des facteurs d'optimisation de la valorisation des rations ingérées et ils sont susceptibles de modifier la composition du lait.

4.1. Aliment minéral vitaminé (AMV)

Acides gras

La complémentation des rations en vitamines est susceptible de modifier le fonctionnement du rumen et, par voie de conséquence, d'avoir un impact sur la synthèse des constituants non vitaminiques du lait. Par exemple, il a été montré que l'addition de vitamine E à des rations susceptibles d'induire des chutes de taux butyreux (riches en concentré ou en ensilage de maïs supplémenté en oléagineux) permet d'éviter ces chutes en limitant la production ruminale de C18:1*trans*10 au profit de l'acide vaccénique dans le lait.

Vitamines

Les vitamines apportées le plus classiquement par l'AMV sont les formes A et E, de plus en plus souvent complétées par la vitamine D. Plusieurs études ont montré que les teneurs du lait en vitamines A, D et E dépendent directement du niveau de supplémentation vitaminique des animaux.

Ce lien fort entre vitamines apportées dans l'alimentation et mesurées dans le lait a aussi été observé chez la chèvre et la brebis. Par exemple, un apport de β -carotène chez la chèvre a permis d'augmenter de façon marquée la teneur du lait en vitamine A; chez la brebis, une complémentation

en cobalt, qui favorise la synthèse de la vitamine B₁₂, a entraîné une forte augmentation de la teneur de cette vitamine dans le lait.

Minéraux

La quasi-totalité des rations destinées aux ruminants ne peut satisfaire l'ensemble de leurs besoins en minéraux (figure 15). Dans la plupart des rations, l'apport en phosphore est légèrement inférieur aux besoins. Le déficit en calcium est surtout important dans les rations à base d'ensilage de maïs. L'apport en sodium, ne couvrant que 10 à 50 % des besoins, est largement insuffisant. Les oligoéléments sont toujours déficitaires, quel que soit le type de ration.

L'effet des compléments minéraux sur les teneurs du lait en calcium, magnésium et phosphore semble nul, dans la mesure où elles sont fortement régulées par l'organisme de l'animal, qui possède des réserves osseuses importantes. Par contre, bien que peu d'études aient traité ce sujet, il semblerait que les teneurs du lait en chlore, potassium et sodium puissent dans une certaine mesure dépendre des apports. Les apports en oligoéléments ont des effets variables : les teneurs du lait en iode, molybdène et brome sont sensibles à ces apports, en particulier celle en iode, dont la teneur varie dans le lait de façon presque proportionnelle à la quantité apportée. Les teneurs du lait en fer, cuivre, zinc, silicium, plomb, argon et nickel sont pratiquement invariables en fonction des quantités ingérées. Les autres oligoéléments répondent de façon intermédiaire et différenciée aux apports.

4.2. Huiles essentielles et extraits végétaux

Les huiles essentielles et les extraits végétaux, riches en antioxydants (composés phénoliques notamment), sont de plus en plus utilisés en élevage de ruminants, comme traitements vétérinaires préventifs et comme additifs alimentaires.

Acides gras

Des études ont concerné l'effet des tanins (composés hydrosolubles polyphénoliques) sur le profil en acides gras du lait. Les résultats rapportent que, *in vitro*, des tanins condensés (extraits du quebracho, arbre originaire d'Amérique latine)

limiteraient la dernière étape de la biohydrogénation ruminale par inhibition de l'activité des microorganismes du rumen, et permettraient ainsi d'augmenter le transfert des AGPI de la ration au lait. Cependant, ces résultats prometteurs *in vitro* n'ont pas été confirmés *in vivo*, puisque l'apport de 150 g par jour de tanins dans la ration de la vache laitière n'a pas modifié la composition en acides gras du lait.

Composés phénoliques et terpènes

Tout comme dans le cas de consommation de fourrages riches en métabolites secondaires, les composés phénoliques et terpènes apportés par la supplémentation des rations avec des extraits végétaux ou des huiles essentielles se retrouvent dans le lait. Les éventuels effets de ces additifs sur la composition nutritionnelle du lait ne sont pas connus à l'heure actuelle. Cette supplémentation risque de compromettre l'utilisation des terpènes et des composés phénoliques comme traceurs de la nature des fourrages consommés par les animaux.

5. Conduite de traite

Les choix de l'éleveur relatifs au rythme et au mode de traite sont susceptibles de modifier la composition du lait en composés d'intérêt nutritionnel.

5.1. Traite biquotidienne

Dans le cadre d'une traite classique biquotidienne, le lait du matin a une teneur en matières grasses plus faible que celui du soir ; la différence est d'autant plus importante que l'intervalle entre la traite du soir et celle du lendemain matin est plus long. La teneur du lait du matin en composés liposolubles (vitamines A et E, caroténoïdes) est également plus faible, bien que cette concentration exprimée par rapport aux matières grasses soit identique. Par ailleurs, il semble que la proportion des AGS soit plus élevée dans le lait du matin que dans celui du soir ; au contraire, les teneurs du lait en AGMI et en acide oléique semblent plus élevées dans le lait du soir. Les teneurs en matières protéiques et en lactose sont en revanche peu variables.

5.2. Monotraite, suppression d'une traite, robot de traite

Les méthodes alternatives à la traite biquotidienne ont pour objectif d'alléger le temps consacré à la traite, qui représente environ 50 % du travail d'astreinte de l'éleveur.

La monotraite consiste à traire les animaux une seule fois par jour, pendant toute ou partie de la lactation. Cette technique n'est à ce jour pas permise par les cahiers des charges de certains fromages d'AOP, qui précisent que la traite doit être biquotidienne. La monotraite s'accompagne d'une augmentation des taux butyreux et protéique (respectivement +3 et +1,4 g/kg) et d'une diminution du taux de lactose (-1,4 g/kg). Le profil en acides gras du lait n'est pas modifié et l'effet sur sa teneur en vitamines liposolubles et en β -carotène est très limité. La composition minérale du lait est par contre altérée, avec une augmentation modérée de la teneur en calcium, une augmentation plus nette des teneurs en phosphore, sodium et chlore, et une diminution de la concentration en potassium. La monotraite provoque également une augmentation du taux protéique chez les chèvres et les brebis (respectivement +1 à +3 et +1.5 à +2.3 g/kg), mais pas d'augmentation du taux butyreux. Globalement, les effets de la monotraite sur la composition du lait sont transitoires et disparaissent lors du retour à la traite biquotidienne.

La suppression de la traite du dimanche soir est à l'origine d'une forte augmentation transitoire du taux butyreux (+6 g/kg le lundi soir). Le taux protéique, le taux de lactose, la composition minérale, le profil en acides gras et la composition des protéines ne sont pas altérés par cette technique de traite.

Le robot de traite, système automatisé sans intervention manuelle de l'éleveur, permet un rythme de traite différencié suivant les vaches. Ce système s'accompagne souvent d'une augmentation de la fréquence quotidienne de traite, qui se rapproche de trois. L'accroissement de la fréquence de traite entraîne généralement une légère chute du taux butyreux. Les autres constituants du lait sont peu affectés par la traite robotisée, mais, à notre connaissance, une seule étude a été réalisée sur ce sujet. À alimentation comparable, des

teneurs légèrement plus faibles en AGPI et en acide ruménique, et légèrement plus élevées en AGS (acides palmitique et myristique) ont été associées à la traite robotisée; en revanche, les concentrations en caroténoïdes n'ont pas été affectées. En pratique, des modifications plus substantielles du profil en acides gras du lait et une diminution de ses teneurs en vitamines liposolubles et caroténoïdes sont cependant probables, dans la mesure où l'introduction du robot de traite est souvent associée à une évolution des pratiques des éleveurs : suivi plus individualisé de l'alimentation (le robot sert également de distributeur automatique de concentré ou DAC) et réduction, voire suppression, du pâturage.

L'essentiel à retenir

La composition nutritionnelle du lait varie principalement selon les caractéristiques de l'animal et selon son alimentation. Les matières grasses et les vitamines sont les composés les plus variables, contrairement aux matières protéigues et aux minéraux.

Caractéristiques de l'animal

Le lait de brebis se distingue nettement de ceux de chèvre et de vache, en raison des ses teneurs plus élevées en matières grasses et protéiques, en vitamines et en minéraux. Le lait des petits ruminants se caractérise par l'absence de β-carotène et par la présence plus importante d'acides caprique et caprylique, en particulier celui de chèvre.

La race a une faible influence sur la composition du lait en acides gras et, en pratique, son effet est souvent confondu avec ceux de l'alimentation et du mode de conduite associés à chaque race. En revanche, la composition du lait peut varier de façon relativement importante d'un animal à l'autre.

Le stade et le rang de lactation sont, à l'échelle de l'animal, des facteurs de variation importants de la composition du lait en matières grasses, vitamines et minéraux. En pratique, ces effets sont rarement perceptibles dans les laits de mélange, dans la mesure où les vêlages sont étalés.

Compte-tenu de ces éléments, les possibilités de moduler à court terme la composition nutritionnelle du lait en modifiant les caractéristiques des animaux sont très faibles. Il sera peut-être possible à long terme d'obtenir des résultats grâce à la sélection génétique.

Ration fourragère

L'alimentation des vaches est le facteur majeur de variation des composés d'intérêt nutritionnel du lait. Le lait produit au pâturage, par rapport à celui produit avec des fourrages conservés, a une composition globalement plus en accord avec les recommandations alimentaires actuelles, avec des teneurs plus faibles en AGS et plus élevées en acide ruménique, β-carotène, vitamines A et E, et un rapport d'acides n-6/n-3 plus faible. Cet effet positif du pâturage est optimal lorsque l'herbe pâturée est jeune et feuillue, il décroît avec l'avancement du stade de l'herbe. La présence de légumineuses ou la diversité floristique des prairies d'altitude contribuent aussi à améliorer le profil en acides gras du lait, mais de façon moins importante que le stade précoce de l'herbe. La complémentation du pâturage avec des fourrages conservés et des aliments concentrés diminue proportionnellement l'effet du pâturage.

Quand les vaches sont nourries avec des fourrages conservés, les différences de composition entre les laits sont moindres que celles observées entre laits produits au pâturage et avec des fourrages conservés. Les laits de vaches consommant différentes formes d'herbe conservée ont des profils en acides gras proches. Par contre, lorsque les vaches ingèrent de l'ensilage de maïs, les teneurs du lait en acides gras n-3, β -carotène, vitamines A et E diminuent et le rapport des acides n-6/n-3 augmente, de façon d'autant plus prononcée que la part d'ensilage de maïs dans la ration est importante.

La composition fourragère de la ration a peu d'effet sur les teneurs en minéraux du lait. En revanche, elle joue un rôle très important sur ses teneurs en composés phénoliques et en terpènes. Le lait en est beaucoup plus pourvu quand les vaches pâturent, en particulier une herbe très diversifiée, comme celle de montagne. Contrairement aux autres composés considérés, les teneurs du lait en composés phénoliques et terpènes augmentent avec l'avancement du stade végétatif de l'herbe.

Concentrés et additifs

L'introduction de concentrés dans la ration diminue les teneurs du lait en acides oléique, vaccénique, ruménique et α-linolénique (recherchés pour leur intérêt nutritionnel) et en vitamines A et E, et augmente celles en acides linoléique et C18:1*trans*, proportionnellement à la quantité apportée. Ces effets sont amplifiés si le concentré introduit dans la ration est riche en amidon rapidement fermentescible (blé, orge).

L'introduction de graines oléagineuses dans la ration entraîne une diminution significative de la teneur du lait en AGS (surtout acide palmitique) et du rapport des acides n-6/n-3, ainsi qu'une élévation des teneurs des acides oléique et α-linolénique (selon le type de tourteau utilisé), amenant à un lait plus en accord avec les recommandations alimentaires, malgré l'augmentation des acides gras *trans*, indésirables pour certains, recherchés pour d'autres. Ces effets sont en général amplifiés si les suppléments lipidiques sont apportés sous forme d'huile, par rapport aux graines. Le choix de l'espèce végétale permet en outre d'augmenter dans le lait la teneur d'un acide gras particulier : acide α-linolénique avec le lin, acide linoléique avec le tournesol ou le soja, acide oléique avec le colza. L'introduction de tourteaux issus de ces mêmes graines oléagineuses induit le même type de modifications sur les acides gras du lait, mais de façon nettement moins marquée qu'avec l'utilisation des graines, en particulier dans le cas de tourteaux déshuilés.

Les aliments minéraux vitaminés permettent d'améliorer les teneurs du lait en vitamines A, D et E. Ils semblent avoir peu d'effet sur ses teneurs en minéraux, hormis pour quelques oligo-éléments, comme l'iode.

Au final, l'alimentation des animaux est un levier efficace pour moduler à court terme la composition du lait en acides gras et, dans une moindre mesure, en vitamines. Par contre, elle a peu d'effet sur sa composition en matières protéiques et ses teneurs en minéraux.

Chapitre 3

Les liens entre les procédés technologiques de transformation du lait et les composés d'intérêt nutritionnel du fromage

Éric BEUVIER, Valérie GAGNAIRE, Frédéric GAUCHERON

Le fromage est une forme de conservation du lait, en particulier de ses deux principaux constituants insolubles, les caséines et les matières grasses. Les différentes étapes de la fabrication fromagère conduisent en effet à l'élimination d'une partie variable de l'eau et des composés hydrosolubles du lait.

La définition du fromage a été précisée par décret (2007-628 du 27 avril 2007) : « La dénomination fromage est réservée au produit fermenté ou non, affiné ou non, obtenu à partir des matières d'origine exclusivement laitière suivantes : lait, lait partiellement ou totalement écrémé, crème, matières grasses, babeurre, utilisées seules ou en mélange et coagulées en tout ou en partie avant égouttage ou après élimination partielle de la partie aqueuse. La teneur minimale en matière sèche du produit ainsi défini doit être de 23 g/100 g de fromage. »

Tous les fromages répondent à cette définition, qui laisse cependant la place à une très grande variété de types de fromages, liée à la diversité des étapes de la fabrication et de leur enchaînement. Chaque type de technologie fromagère présente des particularités, tout en reposant sur les mêmes phases principales de fabrication traditionnelle : maturation du lait, coagulation, décaillage et égouttage, acidification, salage et affinage (figure 16).

Plusieurs classifications des fromages ont été proposées, la plus connue étant certainement celle de Lenoir et collaborateurs en 1983 (figure 17). Elle distingue les principales familles de fromages sur la base des processus technologiques, les fromages se différenciant selon leur type de pâte et pouvant ensuite être subdivisés selon le type d'affinage et

de croûte. Actuellement, plus particulièrement en Europe du sud, on distingue couramment les pâtes fraîches, les pâtes molles, les pâtes persillées et les pâtes pressées cuites ou non cuites, chaque type de pâte présentant une composition nutritionnelle spécifique (tableau 21).

Dans ce chapitre ne seront abordés que les composants du lait à intérêt nutritionnel susceptibles d'évoluer au cours de la transformation du lait en fromage, c'est-à-dire les composés azotés (caséines, matières protéiques retrouvées dans le fromage; lactoferrine; peptides à activité biologique), le lactose, les minéraux et les vitamines hydrosolubles. Les matières grasses et les vitamines liposolubles du lait sont peu altérées au cours de la transformation fromagère, qui a pour action principale de les concentrer, à un niveau variable selon le type de fromages. Ainsi, la composition des matières grasses de tous les fromages dépend directement et principalement de la composition initiale des matières grasses du lait, ceci étant vrai aussi pour le beurre. Rappelons néanmoins que la teneur des fromages en composés liposolubles augmente proportionnellement à la teneur du fromage en matières grasses, qui elle-même est dépendante de la technologie fromagère.

Principales phases Maturation du lait Développement limité de la microflore acidifiante. (± levain lactique) Formation du gel. Coagulation (+ présure) Rupture du gel, séparation de la majeure partie de l'eau. Décaillage et égouttage Acidification lactique favorisant l'égouttage et inhibant (travail mécanique ou cuisson) certaines bactéries. Poursuite de l'égouttage et de la transformation du Mise en moule lactose en acide lactique. Salage Fin de l'égouttage, influence sur le goût, sélection des microorganismes, influence activités sur les enzymatiques. Destruction complète du lactose, neutralisation de la **Affinage** pâte, perte d'eau, protéolyse et lipolyse avec formation de produits aromatiques, formation de la croûte.

Actions et modifications

Source Alais 1975

Figure 16. Principales phases de la fabrication du fromage.

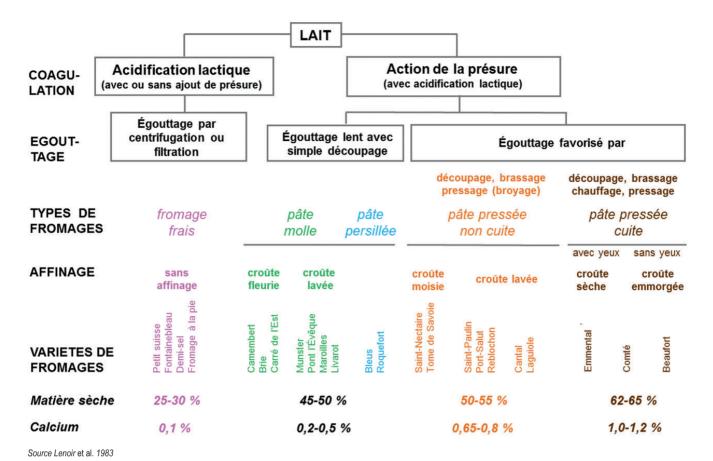


Figure 17. Diversité des fabrications fromagères en France.

Remarque : D'autres fromages (par exemple la Brousse, la Ricotta ou le Gaperon) sont confectionnés à partir du lactosérum (petit lait) issu de la phase d'égouttage de fabrications fromagères.

	Pâte fraîche		Pâte molle		Pâte persillée		Pâte pressée non cuite		Pâte pressée cuite	
Valeur moyenne	basse	haute	basse	haute	basse	haute	basse	haute	basse	haute
Matière sèche (g/kg)	239	332	456	538	553	587	521	640	625	637
Matière grasse (g/kg)	101	134	220	285	290	328	227	335	288	327
Protéines (g/kg)	75	154	197	234	187	202	196	274	266	293
Minéraux (g/kg)										
Calcium	0,8	1,2	2,2	4,5	6,0	7,2	6,4	10,2	9,9	12,0
Sel (NaCl)			17	21	24	34	11	20	4	13
Magnésium	0,1	0,2	0,1	0,4	0,2	0,3	0,1	0,6	0,4	0,5
Phosphore	0,5	1,3	2,2	5,5	3,5	4,3	3,3	5,9	7,4	7,6
Potassium	0,9	1,3	0,7	2,2	1,2	1,3	0,7	3,6	1,0	1,2
Zinc	0,005	0,005	0,02	0,08	0,05	0,06	0,03	0,09	0,04	0,1
Vitamines (/kg)										
B ₂ (mg)			3,0	6,0	5,0	6,0	2,8	5,0	1,9	3,4
B ₆ (mg)			0,6	3,0	1,2	1,7	0,7	0,8	0,5	0,9
B ₉ (µg/kg)	28	289	120	1500	490	940	180	503	42	166
Lactoferrine (g/kg)			0,67	0,70			0,97	1,25	0,99	1,22

Sources Arilait Recherche 2004, Feinberg et al. 1987

Tableau 21. Composition nutritionnelle moyenne des fromages selon la technologie de transformation fromagère.

Partie 1 : Traitements du lait avant mise en fabrication

Le lait peut subir plusieurs traitements avant sa transformation proprement dite. Le refroidissement intervient en premier lieu, pour garantir la bonne conservation du lait pendant son stockage, entre le moment de la traite et celui de sa réception par le transformateur. Ensuite, l'écrémage puis le traitement thermique peuvent être pratiqués pour obtenir une composition du lait adaptée au type de fabrication prévu.

1. Stockage et conservation du lait à basse température

Le refroidissement du lait à la ferme à 4°C, juste après la traite, puis son maintien à cette température jusqu'au transformateur, est aujourd'hui une pratique quasi-systématique dans les situations où le lait n'est pas transformé à la ferme. Ce refroidissement a pour objectif majeur de conserver le lait avant sa transformation, en évitant une prolifération microbienne potentiellement dangereuse pour le consommateur et néfaste à la qualité du lait et du produit laitier. Le stockage du lait à cette température entraîne cependant des modifications au niveau des protéines et des minéraux.

Protéines

Dans le lait, les caséines sont présentes sous forme d'un assemblage entre les quatre caséines (α_{s1} , α_{2} , β et κ) et des minéraux, calcium et phosphore majoritairement. Cet assemblage est en équilibre avec la phase soluble du lait et évolue en fonction des changements de température ou d'acidité du lait pendant les traitements technologiques qu'il subit. Ainsi, il existe une part des caséines présente sous forme soluble dans le lait de vache qui augmente au cours du stockage à 4°C, de +100 % après 24 heures et de + 300 % après 48 heures. D'après la littérature, il est établi que l'augmentation de la quantité de caséines solubles est essentiellement due à une solubilité accrue de la caséine β. En effet, celle-ci étant la plus hydrophobe des quatre caséines, les liaisons qu'elle établit au sein de la micelle font probablement intervenir préférentiellement des interactions hydrophobes. Contrairement aux autres types de liaisons (électrostatiques, ioniques, Van der Waals), ces interactions sont affaiblies aux basses températures, favorisant de ce fait la libération et le départ de la caséine β vers la phase soluble.

Le taux de caséines solubles du lait de chèvre est moins affecté par le stockage à 4°C; il n'évolue pas après 24 heures et est augmenté de seulement 100% après 48 heures. En revanche, le taux de caséines solubles du lait de brebis reste inchangé après 48 heures de stockage à 4°C.

Minéraux

Il est aujourd'hui démontré qu'un abaissement de température à 4°C (ou inférieure à 4°C) affecte les équilibres minéraux du lait. Schématiquement, la solubilité du phosphate de calcium de la phase aqueuse du lait est plus importante à basse température, ce qui a pour conséquence un transfert d'ions calcium et phosphate inorganique de la phase micellaire (phosphate de calcium colloïdal) vers la phase aqueuse. Quantitativement, ce transfert de calcium n'est pas très important : 10 % pour le lait de vache et 7 % pour le lait de chèvre après 48 heures à 4°C. En revanche, la concentration en calcium soluble dans le lait de brebis n'est pas modifiée, ou très légèrement, après 48 heures à 4°C, et les propriétés de coagulation du lait ne sont pas affectées. Après seulement 24 heures de stockage à 3-4°C, l'augmentation de calcium soluble est de 3-4 % dans les laits de vache et de chèvre et très faible dans le lait de brebis. Ces différences entre espèces sont liées à des compositions minérales et protéiques différentes. La solubilisation du phosphate de calcium colloïdal favorise en outre le passage de caséine β de la micelle vers la phase soluble. De plus, la solubilisation de la caséine \beta causée par la dissociation du phosphate de calcium colloïdal engendre elle-même une réduction du calcium micellaire, dans la mesure où elle possède cinq sites de fixation de calcium. Elle est ainsi susceptible d'entraîner avec elle ces ions vers la phase soluble. Ces modifications de composition du lait, solubilisation des caséines et du calcium, sont à l'origine de moins bonnes aptitudes à la coagulation du lait et à l'égouttage du caillé.

En filière Comté, le report (ou conservation) du lait pendant 24 heures à 12°C, au lieu de 4°C, n'a pas entraîné une solubilisation du calcium colloïdal, donc n'a pas eu d'incidence sur la teneur en calcium dans le fromage. Comparativement à un fromage fabriqué avec du lait non refroidi, un fromage fabriqué avec du lait refroidi à 4°C pendant 48 heures contient moins de calcium, car il y a plus de pertes dans le lactosérum. Ces altérations liées au refroidissement du lait sont partiellement réversibles ; il existe des traitements technologiques permettant d'en corriger en partie les effets, comme l'ajout de chlorure de calcium, le maintien à une température de 30°C pendant 2 heures ou une prématuration pendant 15 heures à 10°C.

2. Écrémage du lait

L'écrémage du lait consiste à en retirer une partie de la crème ; il vise à standardiser le taux de gras/sec (G/S) dans le fromage. Il n'est généralement pas nécessaire pour obtenir des fromages avec un G/S compris entre 50 et 57 g/100 g, car la composition du lait est normalement suffisante pour produire un fromage dans cette gamme de G/S. Si l'on souhaite obtenir un fromage plus gras (G/S plus élevé ou ratio caséines/matières grasses plus faible), de la crème doit être ajoutée. Si l'on désire obtenir un fromage à taux réduit en matières grasses (G/S plus faible ou ratio caséines/matières grasses plus élevé), de la crème est enlevée ou du lait écrémé ajouté.

L'écrémage du lait a un effet sur sa teneur en vitamines liposolubles, qui sont localisées dans la fraction grasse du lait. Leur concentration est vraisemblablement plus faible dans un lait ayant subi un écrémage et ceci de manière proportionnelle au taux d'écrémage. L'écrémage n'a pas d'impact sur la fraction protéique du lait ni sur sa teneur en minéraux.

3. Traitement thermique du lait

Le traitement thermique, pratique courante en fromagerie, consiste à réchauffer le lait, à une température plus ou moins élevée pendant une durée variable. Il a comme principal objectif d'assainir microbiologiquement le lait avant sa transformation. Le traitement thermique n'est pas sélectif et détruit l'ensemble des micro-organismes, aussi bien les pathogènes et ceux pouvant gêner la transformation fromagère (à l'exception des bactéries sporulées) que ceux technologiquement utiles. Les barèmes de traitements thermiques sont variables et dépendent du fromage fabriqué. Les effets de traitements thermiques correspondant à une pasteurisation basse, c'est-à-dire ne dépassant pas 74°C pendant 30 secondes, sont les seuls abordés dans ce chapitre. La thermisation du lait correspond à un barème de traitement thermique inférieur à celui de la pasteurisation. Ce barème est généralement compris entre 63 et 68°C pendant 20 à 30 secondes. Le traitement thermique du lait agit sur sa composition minérale et vitaminique, mais n'altère pas, ou très faiblement, les matières protéiques (protéines sériques) pour les barèmes mentionnés.

Minéraux

Au cours d'un traitement thermique à 70-75°C pendant plusieurs secondes, il se produit une insolubilisation/précipitation de phosphate de calcium dans la phase aqueuse du lait, qui est déjà saturée en ce sel. Il est admis que ces modifications d'équilibres minéraux au cours de traitement comme la pasteurisation sont réversibles.

Dans certaines technologies fromagères, le lait, après avoir été refroidi à 4°C puis traité thermiquement, peut être enrichi en calcium, de façon à corriger les défauts de coagulation induits. Le sel le plus utilisé est le chlorure de calcium (CaCl₂). Les quantités ajoutées, le moment de l'addition et la forme (liquide ou en poudre) sont variables et dépendent du schéma technologique.

Vitamines

Une pasteurisation basse (72°C pendant 15 s) diminue le taux de vitamines hydrosolubles du lait : vitamine B_{12} de 5 à 10 %, vitamine B_9 de 0 à 12 %, vitamine B_6 de 3 à 5%, vitamine B_1 de 7 à 9 % et vitamine C de 0 à 17 %. Les diminutions rapportées sont variables en fonction des auteurs. Les teneurs du lait en vitamine B_2 et B_3 ne sont pas affectées par ce traitement thermique, comme celles des vitamines liposolubles A et E.

Matières protéiques

Les caséines sont très thermostables : les caséinates de sodium peuvent supporter un chauffage à 140°C pendant une durée supérieure à 60 minutes et un lait de mélange est stable après un chauffage de 140°C pendant environ 20 minutes. Cette stabilité remarquable aux traitements thermiques des caséinates est due à leur structure particulière et probablement à l'absence de structures secondaire et tertiaire. Ainsi, les caséines du lait ne devraient pas être affectées par un traitement thermique jusqu'à 74°C pendant 30 secondes. Une pasteurisation à 72°C pendant 15 secondes ne semble pas non plus influencer la concentration du lait en lactoferrine.

Partie 2 : Fabrication fromagère et affinage

1. Ferments lactiques et autres ferments (moisissures, levures)

Les ferments sont des cultures microbiennes (bactéries, levures ou moisissures) introduits dans le lait avant la coagulation dans la majorité des technologies fromagères. Les ferments lactiques permettent entre autres d'initier la production d'acide lactique et ainsi de faciliter la coagulation du lait et l'égouttage du caillé. En outre, l'acidification modifie les équilibres minéraux du lait (dissolution du phosphate de calcium colloïdal) et inhibe la croissance de certaines bactéries pathogènes ou indésirables.

Peptides bioactifs

La nature des souches bactériennes des ferments utilisés peut influencer la teneur du lait et du fromage en peptides bioactifs. Par exemple, il a été montré que la biodiversité des souches de bactéries lactiques, ainsi que la combinaison de levains lactiques, notamment des lactobacilles thermophiles (*Lactobacillus helveticus* et *Lb. delbrueckii*) sont des outils puissants pour moduler la quantité de peptides à activité biologique. Ainsi, vingt-et-un peptides avec une activité antihypertensive potentielle ont été identifiés dans des fromages à pâte pressée cuite, quinze provenant de la caséine β , 4 de la caséine α_{s1} et 2 de la caséine α_{s2} .

Vitamines B

Bien que les bactéries lactiques soient auxotrophes pour plusieurs vitamines (c'est-à-dire incapables de les synthétiser), il est reconnu que certaines souches sont capables de synthétiser des vitamines hydrosolubles du groupe B, telles que les vitamines B₉, B₂ et B₁₂. Cependant, dans la fabrication de fromages, seuls *Lactococcus lactis* ou *Streptococcus* utilisés comme levains ont la possibilité de synthétiser la vitamine B₉. Pour la vitamine B₁₂, une synthèse est effectuée par des bactéries d'affinage, les bactéries propioniques à l'origine de l'ouverture (yeux) des fromages de type Suisse. De plus, les quantités de vitamine B₉ trouvées dans des fromages de chèvre affinés, par

rapport à des fromages frais, suggèrent qu'à côté des bactéries lactiques, les micro-organismes de surface, levures et moisissures, sont capables de produire de la vitamine B_{\circ} .

2. Travail en cuve - Acidification/égouttage - Délactosage

Le travail en cuve consiste à modifier physiquement le caillé pour lui donner des propriétés données. Ce travail du caillé est très différent selon le fromage fabriqué. Par exemple, le découpage, le brassage et le chauffage du caillé, ainsi que le moulage, ont une influence sur la minéralisation finale du caillé avant même son démoulage. L'étape d'égouttage du caillé a pour objectif d'éliminer la phase aqueuse (ou lactosérum) et donc de concentrer principalement les matières grasses et protéiques dans le caillé.

Minéraux

La composition des caillés, notamment leur minéralisation, est très dépendante des différentes étapes précédemment décrites. Par exemple, l'intensité du traitement thermique, l'addition de calcium, l'enrichissement protéique, le pH d'emprésurage et le pH obtenu à la fin de l'acidification influent fortement sur la minéralisation des caillés et des lactosérums correspondants. Si le caillé est très minéralisé, le lactosérum correspondant ne le sera pas et inversement. Pour apprécier la minéralisation d'un caillé au cours de sa fabrication, il est important de considérer la chronologie des étapes d'acidification et d'égouttage. Si l'acidification est suivie de l'égouttage, les minéraux solubilisés au cours de l'acidification (comme une grande partie du phosphate de calcium micellaire) sont éliminés dans le lactosérum. C'est le cas des caillés lactiques, qui, au démoulage, ont un pH inférieur à 5, sont très humides, faiblement minéralisés et présentent une structure relativement fragile. À l'inverse, si l'égouttage se fait avant ou pendant l'acidification, les minéraux restent dans le caillé. C'est le cas des caillés présure qui, au démoulage, ont un pH

supérieur à 5, sont très égouttés avec un fort extrait sec et sont très minéralisés, dans la mesure où une partie du phosphate de calcium micellaire est restée associée à la matrice protéique. En technologie fromagère, la majorité des caillés est fabriquée en associant coagulations acide et présure, ce qui permet l'obtention d'une grande diversité de caillés en termes de structure, de composition et évidemment de minéralisation. Pour les technologies où l'acidification précède l'égouttage, comme pour les pâtes fraîches, la teneur en calcium est faible (de l'ordre de 0,1 %); cette teneur augmente progressivement lorsque les étapes d'acidification et d'égouttage s'inversent, comme dans le cas de fabrication de fromages à pâte pressée cuite, pour lesquels la teneur en calcium est de l'ordre de 1,0 à 1,2% (figure 17). Par exemple, l'Abondance (pâte pressée mi-cuite) est caractérisé par une cinétique d'acidification lente avant l'égouttage et le Rocamadour (caillé lactique) par une cinétique d'acidification rapide, les fromages à pâte pressée non cuite, comme le Cantal ou la Tomme de Savoie, par une cinétique d'acidification intermédiaire. De plus, le chauffage en cuve favorisant la fixation de calcium aux caséines, le calcium est donc davantage retenu dans le fromage dans le cas de l'Abondance. En conséquence, parmi ces quatre fromages, le Rocamadour présente globalement les teneurs en minéraux les plus basses et l'Abondance les plus élevées. Malgré la cinétique d'acidification la plus rapide avant l'égouttage, le Rocamadour présente une teneur élevée en potassium, contrairement à celles relatives aux autres minéraux. La plus faible solubilité du potassium contenu dans le lait de chèvre par rapport à celle du potassium du lait de vache, engendrant moins de perte dans le lactosérum lors de la fabrication, pourrait expliquer ce résultat.

Lors d'une étude sur les fromages de chèvre, des résultats similaires ont été observés. Les fromages à pâte molle lactique contenaient moins de calcium et de magnésium que les fromages de « chèvre boîte » (fromage à pâte molle avec un caractère présure plus marqué) : respectivement environ 5 et 22,5 g de calcium/kg d'extrait sec dégraissé (ESD) et respectivement environ 0,30 et 0,65 g de magnésium/kg d'eau¹.

À côté de la teneur en minéraux dans les produits laitiers, leur biodisponibilité doit être également prise en compte d'un point de vue nutritionnel. Cependant, chez l'homme, peu de différences de coefficients d'absorption du calcium ont été rapportées entre le lait et des fromages à pâte ferme tels que le Cheddar ou des fromages frais. La biodisponibilité du calcium semble équivalente quel que soit le type de fromage.

Globalement, la teneur en minéraux des fromages est influencée par la cinétique d'acidification/égouttage. Plus le niveau d'acidification du lait avant l'étape d'égouttage est important et plus les proportions de minéraux entraînés dans le lactosérum sont élevées et moins il en reste dans le fromage. Ainsi, d'une manière générale, les fromages à pâte pressée cuite et non cuite contiennent plus de minéraux que les fromages à pâte molle, qui eux en contiennent plus que les fromages frais.

Lactose

La quantité de lactose restant dans le fromage au début de l'affinage (ou caillé 20 heures) dépend de la technologie utilisée, donc des modalités de la coagulation et de l'égouttage. Interviennent notamment l'activité des levains lactiques (l'utilisation du lactose par les bactéries lactiques conduit à l'acidification du caillé et à la production d'acide lactique ou lactate), le lavage ou non des grains de caillé (appelé aussi délactosage), le degré d'égouttage et les conditions de salage. En général, l'acidité acquise par fermentation du lactose durant la coagulation est faible (0,1 à 0,2 %), mais beaucoup plus importante au cours de l'égouttage (jusqu'à 0,9 à 1,3 %). Le lactose est donc métabolisé très tôt durant les fabrications fromagères.

Dans les fromages très égouttés comme l'Emmental (fromage à pâte pressée cuite), le lactose a totalement disparu après 4 à 5 heures de pressage et, d'une manière générale, après 12 heures de pressage dans les fromages de type suisse.

Dans les fromages type hollandais ou Saint-Paulin (fromages à pâte pressée non cuite), le caillé est lavé pendant la fabrication et la petite quantité

¹ Les composés solubles dans l'eau se retrouvent dans l'eau du fromage. Exprimer leur teneur par kg d'eau permet de faire des comparaisons entre fromages n'ayant pas la même teneur en eau.

de lactose restant dans la pâte est rapidement transformée en lactate avant que le sel ne diffuse dans le fromage pour ralentir le phénomène. Dans des fromages à pâte pressée non cuite, il a été observé des teneurs en lactose dans des caillés 20 heures allant de 0,77 g/kg sans délactosage, à 0,35 g/kg avec 25 % de délactosage et 0,12 g/kg avec 50 % de délactosage (remplacement de 25 % et 50 % de lactosérum par respectivement 25 % et 50 % d'eau).

Dans les fromages à pâte molle, la quantité de lactose en début d'affinage peut être comprise entre 4 et 15,5 g/kg, selon le type de coagulation (présure ou mixte).

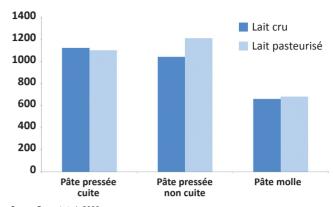
Dans les fromages lactiques, la teneur en sucres résiduels (lactose) peut aller jusqu'à 28 g/kg au démoulage, selon le mécanisme d'égouttage utilisé.

Dans le Roquefort (fromage à pâte persillée), il est noté, avant le salage, une valeur moyenne de lactose résiduel d'environ 4,5 g/kg.

Lactoferrine

En fonction de la technologie fromagère appliquée, les quantités de lactoferrine observées dans le fromage affiné sont variables. Ainsi, des teneurs moyennes en lactoferrine de 670, 1 100 et 1200 mg/kg ont été relevées dans des fromages expérimentaux respectivement de type pâte molle, pâte pressée cuite et pâte pressée non cuite (figure 18). Cela pourrait être en partie expliqué par une interaction entre la lactoferrine et les caséines de charges opposées qui entraînerait un facteur de concentration de la lactoferrine en fonction de celui des caséines dans les caillés. Ces travaux n'ont pas mis en évidence de différence significative de la concentration en lactoferrine entre fromages au lait cru et fromages au lait pasteurisé (pasteurisation du lait 72°C - 15 s).

Selon les auteurs, il est difficile de donner une explication claire aux différences observées, excepté qu'il y ait une différence d'extrait sec entre les trois types de fromages. Cependant, d'autres facteurs pourraient être impliqués, tels qu'une vitesse d'acidification plus rapide dans le cas des fromages à pâte molle, ou une température de chauffage en cuve plus élevée (54°C) dans le cas des fromages à pâte pressée cuite.



Source Dupont et al. 2006

Figure 18. Concentration en lactoferrine (μg/g de fromage) dans des fromages expérimentaux à pâtes pressée cuite, pressée non cuite ou molle, fabriqués à partir de lait cru ou pasteurisé (technique immunochimique ELISA).

3. Matériau de la cuve de fabrication

En règle générale, la fabrication fromagère est réalisée dans une cuve en acier inoxydable, matériau qui, dans ce contexte d'utilisation, ne libère pas de composés pouvant se retrouver dans le produit laitier. Cependant, pour certaines fabrications traditionnelles, d'autres types de matériaux sont autorisés, voire exigés, par les cahiers des charges. Ainsi, les fromages à pâte pressée cuite sont traditionnellement préparés dans des cuves en cuivre.

La fabrication de fromage à pâte pressée cuite de type suisse dans une cuve en cuivre est à l'origine de teneurs en cuivre pouvant atteindre 17 µg/g de fromage, alors que ce fromage fabriqué dans une cuve en acier inoxydable en contient de 0,5 à 1,5 µg/g. Récemment, les teneurs en cuivre mesurées dans vingt-et-un Comtés différents allaient de 3,5 à 13,8 µg/g (8,9 µg en moyenne), ces valeurs élevées étant expliquées par l'utilisation exclusive de cuves en cuivre pour la fabrication, incluse dans le cahier des charges de l'AOP.

La vaisselle laitière en bois peut être utilisée pour certains fromages, par exemple le Salers où la fabrication est réalisée dans une gerle en bois. Cependant, l'effet de l'utilisation de ce type de vaisselle sur les teneurs des fromages en composés d'intérêt nutritionnels n'a pas été étudié.

4. Salage et conditions de salage

En fromagerie, le salage correspond à l'action d'apporter du sel (NaCl) en cours de fabrication, sous forme de sel sec ou de saumure. Il a trois fonctions essentielles.

Le salage permet de compléter l'égouttage. La prise de sel par le caillé est variable selon le fromage désiré et selon la forme d'apport du sel; le salage à sec est surtout utilisé en technologie pâte molle alors que le saumurage est plus utilisé en technologie pâte pressée non cuite et cuite. Dans les pratiques de salage, le sel est dans un premier temps réparti à la surface du caillé et contribue à la formation de la croûte ; dans un second temps, le sel migre de la périphérie vers l'intérieur du caillé. En parallèle de ces migrations de sel dans le caillé, des transferts d'eau se font en sens inverse. Les conséquences de cette double migration de sel et d'eau sont des changements de structure du caillé avec notamment une augmentation de sa compacité. Le salage permet aussi de réduire l'activité de l'eau, ce qui a comme conséquence de modifier les développements microbiens et d'orienter leurs activités enzymatiques qui se mettent en place lors de l'affinage. Le salage permet enfin de modifier les caractéristiques sensorielles du fromage et, notamment, d'apporter un goût salé.

Le salage a évidemment une influence sur le taux de sel présent dans les fromages. La prise de sel des caillés dépend de plusieurs facteurs : le format du caillé et son rapport surface/volume, sa composition et sa structure ; le temps de saumurage (tableau 22) ; la concentration en sel de la saumure utilisée, qui est en général à saturation ; l'agitation et la température de la saumure.

Type de pâte	Poids du caillé	Durée du saumurage
Pâte molle lactique	150 à 200 g	5 à 7 min
Pâte molle format camembert	250 g	30 à 45 min
Pâte pressée	2 à 8 kg	4 à 12 h
Emmental	85 kg	48 h
Grana	40 kg	40 j

Source Mietton et al. 2004

Tableau 22. Variabilité de la durée de saumurage selon le volume et le type de caillé.

L'adjonction précoce de sel au cours de la fabrication fromagère permet une solubilisation partielle du calcium colloïdal associé aux micelles de caséines. Ce phénomène, très dépendant de la valeur du pH, a pour conséquence une solubilisation d'une partie du calcium liée aux micelles de caséines, une modification de la structure et de la texture du fromage. Le salage précoce des fromages en cours de fabrication (très courant en France par le passé) perdure encore dans des productions fermières et dans quelques technologies particulières, fourme de Montbrison par exemple, où le salage est effectué dans la masse au moment du moulage. C'est le cas également du Cantal (et du Cheddar pour les Anglo-saxons), pour lequel une étape d'égouttage et de premier pressage pendant une dizaine d'heures est suivie par un broyage et un salage dans la masse, suivi d'un nouveau moulage puis pressage. Le délactosage à l'eau salée est également une pratique relativement courante. Globalement, un salage précoce engendre moins de calcium dans le fromage.

5. Affinage

L'affinage est en général l'étape qui suit le salage. Il correspond à un ensemble de réactions enzymatiques qui ont comme conséquence de modifier le caillé fromager pour lui donner des caractéristiques texturales et gustatives précises. Ces réactions mises en jeu touchent tous les composants organiques présents dans le caillé, à savoir les fractions protéiques, lipidiques et glucidiques. La fraction minérale est quant à elle quantitativement non modifiée, les minéraux restant dans le fromage et ne changeant pas de nature.

Peptides bioactifs

Un grand nombre de peptides est produit pendant l'affinage des fromages, sous forme de précurseurs de peptides bioactifs ou potentiellement bioactifs. Il est difficile de quantifier ces peptides dans les fromages car cela nécessite de les extraire et de posséder les peptides standards correspondant; seuls certains ont été ciblés comme les peptides agissant sur le système nerveux (opiacés) ou sur le système cardio-vasculaire (anti-hypertensif). Certains peptides ayant une action sur le système nerveux ont été quantifiés par différents auteurs,

entre 0,5 et 1,5 mg/100 g de Brie et de l'ordre de 35 mg/100 g d'Edam. Des peptides transporteurs de minéraux ont été identifiés à hauteur de 1,5 g/100 g de Grana Padano. D'autres types de peptides bioactifs, produits sous forme de précurseurs ou de peptides dérivés, ont été relevés dans différentes variétés de fromage (tableau 23).

Quelques valeurs de variations de la teneur en peptides anti-hypertensifs, susceptibles de faire baisser la pression artérielle de sujets hypertendus, ont été récemment mesurées dans différents types de fromages. Les valeurs de concentration en peptides anti-hypertensifs obtenues montrent une très grande variabilité selon le type de fromages, plus élevées dans les fromages à affinage long (pâte pressée cuite et non cuite) que dans les fromages à pâte molle (tableau 24). Parmi les peptides bioactifs recensés, certains ne sont pas dégradés ultérieurement dans le tube digestif et sont donc à même de passer la barrière intestinale pour atteindre leur cible. D'autres, tels les peptides transporteurs de minéraux, sont présents à des taux relativement élevés compatibles avec une bonne assimilation des minéraux. De plus, une fois produits, ces peptides sont peu dégradés par les enzymes se trouvant dans le fromage.

Vitamines B

Des différences ont été observées sur les teneurs en vitamine B_o dans les fromages, en fonction des technologies. Le Rocamadour contient par exemple plus de vitamine B₉ (1,67 à 1,75 mg/kg d'eau¹) que des fromages à pâte pressée non cuite ou mi-cuite au lait de vache (de 0,50 à 0,63 mg/kg d'eau¹). La plus grande quantité de vitamine Bo observée dans le Rocamadour peut être due à la biosynthèse de cette vitamine par les micro-organismes de surface de ce fromage. En effet, il a été constaté que cette biosynthèse était plus importante dans les couches supérieures du fromage qu'à l'intérieur. Par ailleurs, une teneur importante de vitamine Boa été quantifiée dans un caillé de fromage Cottage (0,40 mg/kg de fromage, soit 0,50 mg/kg d'eau1 pour un fromage avec une teneur en eau d'environ 75 %). Selon les auteurs, les levains lactiques (lactocoques) utilisés dans la production du fromage Cottage étaient à l'origine de la production élevée de cette vitamine. Des fromages de chèvre frais fabriqués avec du lait cru contenaient 0,6 mg de vitamine B₉/kg d'eau¹.

En ce qui concerne la vitamine B₆, elle a été produite en plus grande quantité dans des fromages de chèvre à pâte molle affinés (caillé lactique fabriqué avec du lait cru), soit 5,0 mg/kg d'eau¹, que dans des fromages de chèvre frais fabriqués avec du lait cru, soit 0,9 mg/kg d'eau¹. Là encore, les micro-organismes de surface, notamment des levures, seraient à l'origine de cette production accrue de vitamines B₆ et B₉ dans les fromages de chèvre affinés.

Lactose

Comme indiqué précédemment, les fromages à pâte pressée cuite ou non cuite ne contiennent pas ou peu de lactose au début de l'affinage (1 g/kg au maximum), si l'acidification est bien conduite. Dans le Cheddar, fromage salé dans la masse comme le Cantal, le lactose, présent à 10 g/kg après pressage, a totalement disparu après 8 jours d'affinage; la disparition du lactose est d'autant plus rapide que le fromage est moins salé. Dans le Camembert, le lactose a complètement disparu après 20 à 30 jours d'affinage. Il est consommé notamment par des levures telles que Kluyveromyces marxianus ou Debaryomyces hansenii. Dans le Roquefort, le lactose a disparu en fin d'affinage. Au cours de l'affinage, il peut être assimilé par la moisissure Penicillium roqueforti ou consommé par les levures Debaryomyces hansenii ou Kluyveromyces marxianus.

Ainsi, d'une manière générale, les fromages affinés ne contiennent pas ou très peu de lactose. D'un point de vue biochimique, le lactose est transformé en lactates L ou D (selon les bactéries lactiques présentes), qui seront repris ensuite au cours de l'affinage pour être transformés en différents composés selon les micro-organismes impliqués. Dans les fromages type Suisse, les lactates sont catabolisés en acides acétique et propionique, ainsi qu'en gaz carbonique (CO₂), par *Propionibacterium freudenreichii*, transformation qui est importante pour le développement de

¹ Les composés solubles dans l'eau se retrouvent dans l'eau du fromage. Exprimer leur teneur par kg d'eau permet de faire des comparaisons entre fromages n'ayant pas la même teneur en eau.

Peptides bioactifs	Séquence	Emmental	Camembert Brie	Cheddar	Edam Gouda	Parmigiano Reggiano
Immuno-modulateur	β-CN(193-209)	+	+	+	+	+
Opiacés						
β-casomorphine 7	β-CN(60-66)	Р	+			Р
β-casomorphine 3	β-CN(60-62)	Р	Р	+	+	Р
Anti-hypertensif ¹	α_{s1} -CN(23-34)	+		D		+
Transporteur de minéraux	β-CN(1-25)	+, D		+	D	+, D
Anti-microbien	$\alpha_{s1}(1-23)$	+			+	

^{+ :} identification de la séquence du peptide bioactif

Sources Addeo et al. 1992 et 1994, Gagnaire et al. 2001, Jamolowska et al. 1999, Sabikhi et Mathur 2001, Singh et al. 1997

Tableau 23. Identification de quelques peptides bioactifs dans différentes variétés de fromages.

	Protéines (g/kg)	TCA-SN (g/kg)	VPP (mg/kg)	IPP (mg/kg)	Activité IC ₅₀ ACE ¹
Fromages à pâte pressée cu	ite				
Emmental affinage 4 mois	290,2	7,5	42,6	4,6	10,5 ± 0,6
Gruyère AOP affinage 10 mois	293,3	12,7	68,7	20,4	14,2 ± 0,9
Gouda vieux	306	nd ²	97,7	90,1	2.0 ± 0.3
Fromages à pâte pressée no	n cuite				
Raclette à partir de lait cru	265,5	7,6	12,6	2,6	8,8
Saint- Paulin	259,2	4,9	5,2	1,0	$23,5 \pm 6,3$
Vacherin fribourgeois	261,5	8,3	62,1	46,7	5.0 ± 0.3
Fromages à pâte molle					
Vacherin Mont d'Or	176,6	4,3	0,2	0,1	$21,4 \pm 9,6$
Camembert	203,6	3,9	0,2	0,2	Valeur élevée
Munster	217,3	6,0	1,4	1,7	$14,1 \pm 0,2$
Reblochon	194,3	5,2	0,5	0,0	17.0 ± 0.8
Fromages à pâte persillée					
Roquefort	196,4	14,5	35,4	2,1	$10,2 \pm 2,4$
Gorgonzola	190,8	12,6	4,2	11,1	21.8 ± 4.6

¹ valeurs moyennes ± écart-type des valeurs IC₅₀ en mg de fromage par mL de solution testée. Cela correspond à une solution test qui inhibe 50 % de l'activité *in vitro* de l'enzyme de conversion de l'angiotensine (ACE), enzyme impliquée dans l'hypertension. Les valeurs les plus faibles correspondent aux fromages qui présentent l'activité anti-hypertensive la plus élevée.

² non déterminé

Source Butikofer et al. 2007

Tableau 24. Teneurs en protéines, en petits peptides (TCA-SN, azote soluble dans l'acide trichloacétique), en peptides anti-hypertensifs Valine-Proline-Proline (VPP) et Isoleucine-Proline-Proline (IPP) et activité anti-hypertensive (valeurs d'IC₅₀) des fromages..

P : Identification du (des) précurseurs(s)

D : Identification de peptides dérivés

^{1:} Inhibiteur de l'enzyme de conversion de l'angiotensine (ACE)

l'ouverture (formation des trous ou « yeux »). Les lactates sont catabolisés en gaz carbonique et en eau par *Penicillium camemberti* en surface des fromages à pâte molle à croûte fleurie tels le Camembert et le Brie, ce qui est important pour la formation de la texture. D'autre part, en présence d'oxygène, certaines bactéries lactiques non levains, telles que les pédiocoques, peuvent oxyder les lactates en formate et acétate. Les lactates peuvent aussi être métabolisés en anaérobiose par *Clostridium tyrobutyricum* conduisant au défaut de « gonflement tardif » des fromages.

Au-delà de l'affinage, les fromages subissent de nombreuses manipulations avant d'être consommés. Ils peuvent être conservés à basse température, tranchés, emballés, transportés, exposés dans des étalages, entreposés dans un frigidaire... Ces étapes peuvent faire évoluer la teneur des fromages en certains composés d'intérêt nutritionnel. Les minéraux, les matières protéiques et les matières grasses sont peu susceptibles d'évoluer. En revanche, certaines vitamines sont plus fragiles et peuvent être dégradées, consécutivement à une exposition à la lumière notamment.

Par exemple, dans un fromage type Edam (fromage à pâte pressée non cuite), il a été observé que la teneur en vitamine B₂ décroissait en surface après une exposition à la lumière du soleil et à température ambiante. Après une exposition à une lumière fluorescente, à 5°C pendant 10 jours, la perte de cette vitamine dans le fromage était encore plus conséquente en surface. Un emballage sous vide a permis de réduire la perte en vitamine B₂ dans le fromage.

L'essentiel à retenir

La transformation du lait en fromage n'a quasiment pas d'effet sur la composition des matières grasses et des vitamines liposolubles. En revanche, elle entraîne des modifications majeures des composés azotés (protéines, peptides et lactoferrine), des minéraux, du lactose et des vitamines hydrosolubles.

Préalablement à la fabrication, le refroidissement et/ou la thermisation provoquent une baisse des teneurs du lait en calcium et en vitamines B_1 , B_6 , B_9 , B_{12} et C. La fabrication proprement dite comporte traditionnellement 6 étapes : maturation du lait, coagulation, décaillage et égouttage, acidification, salage et affinage. Elle influence profondément la minéralisation finale du caillé et du fromage, en particulier selon la chronologie des étapes : l'acidification suivie de l'égouttage conduit à un caillé peu minéralisé, alors que l'inverse conduit à un caillé très minéralisé. Le salage, puis surtout l'affinage, permettent la mise en place de la texture, du goût et de l'aspect du fromage. C'est au cours de cette dernière phase que se forment les peptides bioactifs (ou leurs précurseurs) et les vitamines (B_6 et B_9) synthétisées par les micro-organismes de surface.

Ainsi, chaque type de transformation mène à des caractéristiques nutritionnelles spécifiques : les fromages à pâte pressée cuite sont globalement les plus secs, les plus riches en matières grasses et protéiques, en minéraux (en particulier calcium), en lactoferrine, mais aussi les moins riches en vitamines B_2 , B_6 et B_9 . Les fromages à pâte fraîche, et dans une moindre mesure à pâte molle, présentent des caractéristiques opposées, celles des fromages à pâte pressée non cuite étant intermédiaires. Les fromages à pâte persillée se singularisent par des teneurs plus élevées en sel, potassium, vitamines B_2 et B_6 . D'autre part, un affinage long, typique des fromages à pâte pressée (cuite ou non), favorise la formation de peptides bioactifs. Quel que soit le procédé de transformation, les fromages affinés ne contiennent pas, ou très peu, de lactose, et la fabrication au lait cru permet de préserver la lactoferrine, qui semble altérée dans le fromage en cas d'utilisation de lait pasteurisé.

Chapitre 4

La composition nutritionnelle des fromages observée sur le terrain

Cécile SIBRA, Claire AGABRIEL, Bruno MARTIN

L'objectif de ce chapitre est d'illustrer de façon concrète des points abordés dans les deux chapitres précédents ; il est basé sur la présentation d'études de terrain concernant les composés d'intérêt nutritionnel du lait et du fromage, en lien avec les conditions de production ou de transformation du lait. Les études de terrain sont nécessaires pour valider et hiérarchiser des résultats expérimentaux en conditions réelles de production du lait, où de nombreux facteurs interagissent. Elles permettent de décrire les caractéristiques des fromages destinés aux consommateurs et d'identifier dans la pratique les leviers d'action possibles pour moduler la composition nutritionnelle des produits laitiers. La conception et la réalisation de ces études sont le fruit d'un réel partenariat entre des structures de recherche-développement et des partenaires des filières (éleveurs, laiteries, affineurs, organisations professionnelles agricoles).

Les études de terrain décrivant la composition des fromages en composés d'intérêt nutritionnel sont relativement nombreuses. Le tableau 25 rassemble des valeurs relatives à quinze fromages fermiers ou laitiers, fabriqués avec le lait des trois espèces considérées dans cet ouvrage, selon les différentes technologies fromagères. Il donne une vision synthétique pour une vingtaine de composés. Il est cependant délicat de faire des comparaisons entre fromages, dans la mesure où les fromages analysés ne sont pas forcément représentatifs de la diversité existante au sein des filières et où les méthodes analytiques ont pu varier selon les études.

En revanche, peu d'études établissent le lien entre la composition des fromages en composés d'intérêt nutritionnel et les conditions de production et de transformation du lait. Ce chapitre est construit autour d'une étude majeure, *Quatre fromages de terroir*¹, qui a permis de confirmer deux points essentiels (figure 19):

- Le lien fort entre les teneurs du fromage en composés liposolubles et les conditions de production du lait. En effet, la composition des échantillons de fromages et celle des échantillons des laits correspondants mis en fabrication ont été très proches, ce qui traduit le peu de modifications induit par la transformation fromagère sur ces composés.
- Le lien fort entre les teneurs du fromage en composés hydrosolubles et le mode de transformation fromagère. En effet, la composition des échantillons de fromages et celle des échantillons des laits correspondants mis en fabrication ont été très différentes, ce qui suggère que les caractéristiques des fromages pour ces composés sont fortement influencées par la technologie fromagère.

En conséquence, la première partie de ce chapitre montre des relations, observées sur le terrain, entre les conditions de production du lait et les teneurs en composés liposolubles du lait ou du fromage, et la seconde partie illustre des relations entre la technologie et les teneurs du fromage en composés hydrosolubles.

¹ Cette étude (Lucas *et al.* 2006a) visait à identifier le rôle des différents facteurs de production du lait sur les caractéristiques nutritionnelles du fromage et à estimer les parts relatives des pratiques d'élevage et de la transformation fromagère. Elle a concerné simultanément quatre fromages, dont trois au lait de vache (Abondance, Salers/Cantal fermier et tomme de Savoie) et un au lait de chèvre (Rocamadour). Elle s'est déroulée entre août 2002 et décembre 2004, en collaboration avec les syndicats fromagers concernés et avec la participation de 74 éleveurs producteurs de fromage fermier, choisis pour représenter la diversité des conditions de production du lait. Pour caractériser leurs composés d'intérêt nutritionnel (acides gras, vitamines, caroténoïdes et minéraux), des fromages ont été prélevés dans chaque ferme 5 à 7 fois dans l'année (432 au total). Le jour de fabrication, une enquête auprès des éleveurs a permis de relever les conditions de production du lait mis en fabrication, en particulier l'alimentation des vaches et des chèvres en lactation. D'autre part, 53 échantillons de laits mis en fabrication ont été analysés pour faire le lien entre la composition du lait et celle du fromage.

Type de lait					\ \	Vache					S	Chèvre		Brebis	
Type de pâte		Pre	Pressée non cuite	nite		Pressée mi-cuite	Press	Pressée cuite	Persillée	illée	Lact	Lactique	Avec Lacto- sérum	Pressée non cuite	Persillée
	CA	SC	SN	18	TS	AB	品	00	BA	FA	PE	Roc	BR	ō	Roq
	42	109	09	28	105	92	36	10 à 102 ¹	128	128	78	126	49	49	49
Acides gras (g/100 g d'AGT)	37)														
	6,79	70,2	68,5	0,99	70,3	70,1	6,49	6,79	8,79	9'29	72,5	70,5	8,69	73,8	75,2
C12+C14+C16	42,2	43,2	45,6	42,3	43,7	44,4	42,0	43,4	43,9	43,3	38,6	43,3			
	27,1	25,2	27,8	27,3	24,8	24,7	27,8	27,4	27,1	27,3	21,3	24,3	25,3	21,5	20,5
Acide oléique	19,1	18,5	22,8	21,7	17,8	17,8	21,9	19,7	19,5	19,8	17,6	17,3			
	4,4	3,8	3,8	2,0	4,0	4,0	5,3	4,7	4,3	4,3	4,3	4,0	6,4	4,7	4,4
Acide linoléique	1,4	1,8	1,8	2,0	1,8	1,7	2,0	1,5	1,5	1,5	2,3	1,9			
Acide a-linolénique	2,0	8,0	2'0	1,0	8,0	8,0	1,	6,1	2,0	2'0	8,0	2,0			
AG trans	5,3	5,5	2,5	8,4	5,3	5,2	2,5	4,6	2,0	2,0	2,9	2,9			
Acide ruménique	6,0	2'0	1,0	1,4	2,0	2'0	7,5	1,3	6,0	8,0	0,4	2,0			
n-6/n-3 ²	2,0	2,3	2,5	2,0	2,3	2,2	1,8	1,6	2,1	2,1	2,9	2,7			
Caroténoïdes et vitamines liposolubles (mg/kg de matières grasses)	s liposolub.	les (mg/kg t	de matières	grasses)											
β-carotène	3,9	4,6	1,6		3,6	2,9		4,5	2,5	2,6		0			
Vitamine A	10,5	6,1	4,1	6,9	5,9	9,6		8,3	2,8	5,6	,	6,5	9,7	7,7	6,9
Vitamine E	6,9	2'9	3,1		6,2	5,2	٠		5,5	4,8		6,9	5,5	4,2	3,9
Vitamines hydrosolubles (/kg)	(/kg)														
Vitamine B ₉ (mg)	0,23	0,18	0,58	0,27	0,27	0,18			0,38	0,47		0,44	0,87	0,35	0,29
Vitamine B ₁₂ (µg)	22	1	,	•		•	ı	9	12	11,7	•	,	9,5	10,6	2,7
Minéraux (/kg)															
Calcium (g)	7,3	8,1	5,4	0,9	9'9	8,8		9,2	5,2	5,5		1,1	2,8	9,7	6,2
Phosphore (g)	2,0	2,0	3,9	4,5	4,6	5,5		6,1	3,7	3,9		2,2		٠	٠
Potassium (g)	0,94	66'0	06'0	1,20	0,94	1,04	•	26,0	0,84	0,85	•	1,60	1,05	0,46	0,71
Magnésium (g)	0,27	0,29	0,23	0,22	0,25	0,32		0,33	0,19	0,20	,	0,16	0,34	0,36	0,31
Zinc (mg)	32	36	56	31	33	46		40	24	56		22	20	24	21

CA Cantal ; SC Salers/Cantal fermier; SN Saint-Nectaire; TB Tome des Bauges; TS Tomme de Savoie; AB Abondance; BE Beaufort; CO Comté; BA Bleu d'Auvergne; FA Fourme d'Ambert; PE Pélardon; Roc Rocamadour; BR Brocciu; OI Ossau-Iraty; Roq Roquefort

**Nea Roquefort

**In=10 pour les acides gras, 20 pour le β-carotène et les vitamines, 102 pour les minéraux

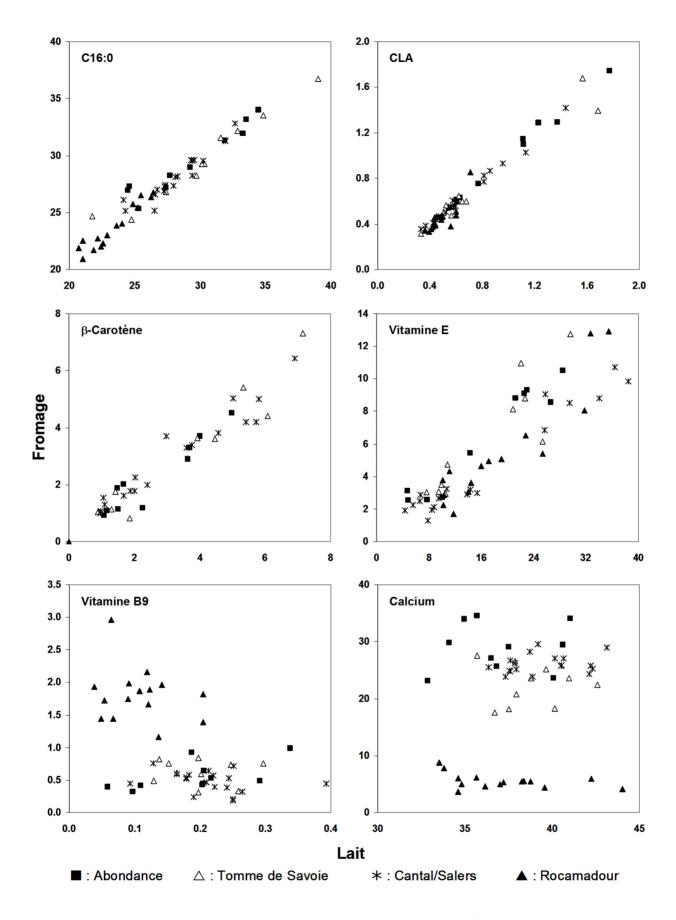
**Adique linolenique/acide α-linolénique

**Adique/acide q-linolénique

**Adique/acide q-linolénique

**Adique/acide q-linolénique

Sources Chatelard 2010, CIGC 2008 non publié, Guiadeur 2012, Lagriffoul et al. 2008, Lucas et al. 2006b, Martin 2008 non publié, Marty 2012



La vitamine B_g étant soluble dans l'eau, exprimer sa teneur par kg d'eau permet de comparer des fromages avec des teneurs en eau différentes. Source Lucas et al. 2006a

Figure 19. Relations entre la composition du fromage et celle du lait en acides palmitique (C16:0) et ruménique (CLA) (g/100 g d'AGT), en β-carotène et vitamine E (mg/kg de matières grasses), en vitamine B_g (mg/kg d'eau) et en calcium (g/kg de protéines).

Partie 1 : Des teneurs en composés liposolubles des laits et des fromages variables selon les conditions de production

Dans les élevages, les facteurs de variation des composés du lait identifiés en expérimentation ne sont pas observés dans tous les cas. Ils sont souvent combinés au sein des systèmes de production (race et conduite alimentaire par exemple), ce qui rend leurs effets difficiles à individualiser. Ainsi, dans les études évoquées dans ce chapitre, la variabilité des caractéristiques des fromages a été associée en premier lieu à la nature de la ration fourragère dans les troupeaux bovins, au stade de lactation et aux pratiques de complémentation des rations dans les troupeaux caprins. Contrairement à ces derniers où les mises-bas étaient groupées, les vêlages étaient répartis sur l'année dans les troupeaux bovins étudiés, ce qui explique l'absence d'effet du stade de lactation. Dans ces élevages bovins et caprins, les faibles effets de la race observés en conditions expérimentales n'ont pas été visibles.

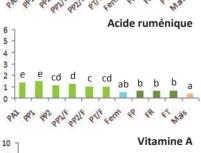
1. Fromages au lait de vache

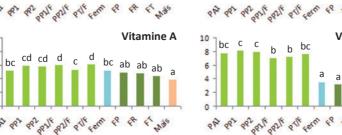
AGMI b bc b 25 20 15 10 PANE ALLERIN ES ES EL PIEN AG trans hors CLA d c d 5 hc h 2 FR FT NAS P 48 61 19 BET BES BAIK BAIK BAIK Acide linoléique Acide a-linolénique 5 5 4 b bc ab b bcbcbccbbcbca Acide ruménique **β-carotène** 10

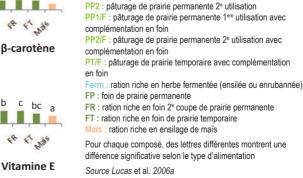
8

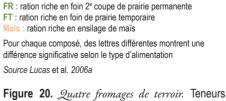
6

Dans l'ensemble des études présentées, le pâturage des vaches, par rapport aux rations hivernales, a été le facteur majeur de variation de la teneur des fromages en acides gras et composés liposolubles. Ainsi, dans l'étude Quatre fromages de terroir, quand les vaches pâturaient, le fromage contenait moins d'AGS (-5,3 g/100 g d'AGT), plus d'AGMI, d'AGPI et d'AG trans (respectivement +3,8, +1,0 et +2,7 g/100 g d'AGT) que









PA1: pâturage de prairie d'alpage 1ère utilisation

PP1 : pâturage de prairie permanente 1ère utilisation

moyennes des trois fromages au lait de vache (Abondance, tomme de Savoie, Cantal/Salers) en acides gras (g/100 g d'AGT), en β-carotène et en vitamines A et E (mg/kg de matières grasses) selon le type de ration fourragère.

6

quand elles recevaient une ration conservée (figure 20). Les fromages fabriqués pendant la période de pâturage contenaient aussi davantage de β-carotène (+2,9 mg/kg MG), de vitamines A (+1,2 mg/kg MG) et E (+4,1 mg/kg MG), par rapport à ceux issus de rations conservées.

D'autres études menées dans le Massif central, le Jura ou les Alpes du nord, concernant différents fromages fabriqués majoritairement en laiteries, ont montré ces mêmes tendances liées au pâturage (tableau 26). Concernant les acides gras, l'amplitude observée a été moins importante pour le Saint-Nectaire et le Comté et plus importante pour l'ensemble des autres fromages. Les variations relatives au β -carotène et aux vitamines ont été peu significatives, hormis pour les fromages à pâte persillée.

Lorsque les vaches étaient au pâturage, la variabilité de la composition en acides gras du lait ou du fromage a été associée à l'altitude de la prairie et à la proportion d'herbe verte pâturée. Lorsque les vaches étaient conduites en altitude, notamment en alpage, l'effet du pâturage était particulièrement important; il était sans doute

AGS C12+C14+C16 80 cd Ч 80 60 60 cd ab 40 40 20 Acide oléique Acide linoléique (ns1) 25 5 b 20 ab ab 4 15 10 PRON ber He ¿és 56W W Acide α -linolénique n-6/n-3 (nt2) 4,0 5 3.0 2.0 es. cen BEC ORCH BW He AG trans Acide ruménique 87654321 d cd C

associé à ceux de la diversité botanique ou du stade de végétation de l'herbe, éléments qu'il n'a pas été possible de dissocier dans les études considérées. L'effet de l'altitude a été observé aussi bien dans l'étude Quatre fromages de terroir que dans l'étude Laits d'altitude zone de Beaufort (tableau 27). Les laits et les fromages produits en alpage ont été plus pauvres en AGS et plus riches en AGMI, AGPI, en acides oléique, linoléique et α-linolénique que ceux issus des autres situations de pâturage à moindre altitude. Par ailleurs, l'étude Laits de Haute-Loire a montré que lorsque la proportion d'herbe a diminué dans la ration, les teneurs en AG trans et acide ruménique ont aussi diminué régulièrement dans le lait (figure 21). Lorsque le pâturage était complété par de l'ensilage de maïs, le lait produit a eu des teneurs en AGS et en AG trans intermédiaires entre celles des laits issus de pâturage et de fourrages conservés, et une teneur en acide α -linolénique comparable à celle des laits issus de rations de fourrages conservés (figure 21).

Lorsque les vaches ingéraient des fourrages d'herbe conservée, les différentes rations ont entraîné peu d'écart de composition entre les laits

ou les fromages, hormis les rations à base d'ensilage d'herbe qui ont été associées à des teneurs en β-carotène supérieures. Cependant, dans les études *Quatre fromages de terroir* et *Laits de Haute-Loire*, la présence d'ensilage de maïs dans la ration a conduit à des laits et des fromages présentant la teneur en acide α-linolénique la plus faible et un rapport n-6/n-3 élevé (figures 20 et 21).

PFo:70 % pâturage, foin et fourrage fermenté dont maïs
PFC:70 % pâturage, 20 % foin et herbe fermentée
PFCM:70 % pâturage, 15 % foin et fourrages fermentés dont
maïs
PM:50 % pâturage, 30 % ensilage de maïs et foin
Ffe:65 % foin et 35 % herbe fermentée
FeF:60 % herbe fermentée et 40 % foin
FeM:45 % herbe fermentée, 35 % ensilage de maïs et foin
M:60 % ensilage de maïs, 20 % herbe fermentée et foin

P: 80 % pâturage, foin et fourrage fermenté

¹ ns non significatif ² nt non testé

Pour chaque composé, des lettres différentes montrent une différence significative selon le type d'alimentation Sources Agabriel et al. 2004, Ferlay et al. 2008

Figure 21. Laits de Haute-Loire. Teneurs moyennes des laits en acides gras selon le type de ration fourragère (g/100 g d'AGT).

84

	Sa	Saint-Nectaire	aire		Cantal			Beaufort		Tome	Tome des Bauges	seßr		Comté		Bleu	Bleu d'Auvergne	gne	Four	Fourme d'Ambert	pert
Alimentation	은	۵		은	_		은	۵		은	۵	,	윤	۵		은	_	,	윤	윤	;
Nombre	56	56	SS	14	14	SS	12	24	8	10	18	SS	2	2	SS	10	10	SS	10	10	SS
Acides gras (g/100 g d'AGT)	1 d'AGT)																				
AGS	9'02	9'99	* * *	72,0	66,1	* * *	70,1	62,3	* * *	7,07	63,5	* *	2,69	1,99	t E	71,0	64,1	* * *	7,07	63,7	* * *
C12+C14+C16	48,9	45,7	nt	46,4	40,3	Ħ	47,8	39,0	* *	47,7	39,3	* *	45,3	41,5	t	48,1	39,5	Ħ	47,6	39,2	t
AGMI	25,9	29,4	* * *	24,0	28,3	* * *	24,2	29,7	* * *	23,4	29,4	* * *	26,0	28,8	ŧ	24,6	30,1	* * *	24,8	30,4	SU
Oléique	21,5	24,0	* * *	18,2	20,6	* * *	21,6	27,2	* * *	18,8	23,2	* * *	18,9	20,5	ŧ	17,9	21,3	* *	18,1	21,4	* * *
AGPI	3,50	3,96	*	4,10	4,40	SU	4,2	5,9	* *	4,0	2,5	* * *	4,4	5,1	ŧ	3,8	4,9	* * *	3,8	2,0	* * *
Linoléique	1,77	1,76	ns	1,32	1,35	SU	1,9	2,1	Ħ	6,1	2,0	Su	1,4	1,5	Ħ	1,6	1,5	Su	1,5	1,6	SU
a-linolénique	69'0	0,73	SU	l	i		8,0	1,2	ŧ	1,0	1,0	Su	0,94	0,89	ŧ	2,0	8,0	*	9,0	2,0	+
AG trans	1,49	3,45	* * *	3,20	6,70	* * *	3,3	9'9	* * *	3,1	2,8	* * *	3,83	5,31	ŧ	3,3	8,9	* * *	3,4	2,0	* * *
Ruménique	0,61	1,28	* * *	0,53	69'0	ns	8,0	2,	* * *	6,0	1,7	* * *	1,04	1,66	ŧ	0,5	6,1	* * *	0,50	1,21	* * *
n-6/n-3 ¹	2,6	2,4	ns	-	!		2,4	1,8	nt	1,9	2,0	nt	1,5	1,7	nt	2,3	1,9	*	2,2	2,3	nt
Caroténoïdes et vitamines liposolubles (mg/kg de matières grasses)	mines lip	yqnlosoc	es (mg/k	g de mai	fières gra	ssses)															
β-carotène	1,5	1,6	ns	2,1	2,5	su					!					1,7	3,3	Ħ	1,9	3,2	ıt
Vitamine A	4,4	4,2	ns	2,6	7,1	*	l			2,6	7,3	* * *	7,1	8,0	ŧ	4,6	0,7	*	9,4	2'9	* *
Vitamine E	3,1	3,0	*													3,8	8,5	* * *	3,4	5,6	*

FC alimentation hivemale à base de fourrages conservés; P alimentation estivale à base de pâturage. ss niveau de signification statistique ; + $P \le 0.1$; * $P \le 0.05$; ** $P \le 0.01$; *** $P \le 0.001$; ns non significatif ; nt non testé 'Rapport acide linoléique/acide α -linolénique

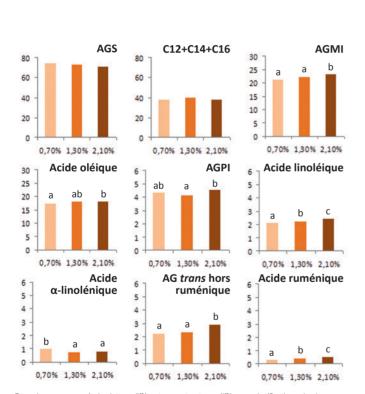
Sources Chatelard 2010, CIGC 2008 non publié, Guiadeur 2012, Martin 2008 non publié, Saulnier 2007

Tableau 26. Teneurs des fromages en acides gras, β-carotène et vitamines A et E selon l'alimentation des vaches.

	Quatre fromages de terroir	Laits d'altitude zone de Beaufort
	écart entre fromages issus de pâturage d'alpage et des autres types de rations de pâturage ¹	écart entre laits issus de pâturage de repousses d'alpage et de pâturage de « montagnette » ²
AGS	-4,0	-4,8
C12-C14-C16	-3,0	-5,1
Acide oléique	+2,0	+3,30
Acide ruménique	+0,14	+0,3
Acide linoléique	+0,24	+0,5
Acide α-linolénique	+0,32	+0,2
n-6/n-3	-0,34	-0,20
Acides gras trans	+0,96	+0,1

¹ Lucas et al. 2006a

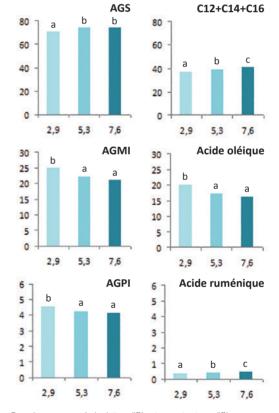
Tableau 27. Écarts de teneurs en acides gras entre fromages et laits issus de vaches pâturant en altitude (en g/100 g d'AGT).



Pour chaque composé, des lettres différentes montrent une différence significative selon la proportion de matières grasses

Source Lucas et al. 2006a

Figure 22. *Quatre fromages de terroir.* Teneurs des fromages de Rocamadour en acides gras (g/100 g d'AGT) selon la proportion de matières grasses apportée par les concentrés dans la ration.



Pour chaque composé, des lettres différentes montrent une différence significative selon le stade de lactation

Source Lucas et al. 2006a

Figure 23. *Quatre fromages de terroir*. Teneurs des fromages de Rocamadour en acides gras (g/100 g d'AGT) selon le stade de lactation des chèvres (en mois).

² Saulnier et al. 2007 - Cette étude a permis de mesurer les teneurs en acides gras de laits de vache travaillés en coopératives, produits au pâturage, en « montagnette » (1 200 m) et en alpage (1 800 m)

2. Fromages au lait de chèvre

Dans les élevages caprins de l'étude *Quatre* fromages de terroir, la nature de la ration fourragère n'a pas été le facteur de variation majeur de la composition du lait et du fromage. Le facteur alimentaire principal a été la proportion de lipides dans la ration.

Ainsi, les fromages de Rocamadour fabriqués avec le lait des chèvres consommant les rations les plus riches en lipides (2,1%) ont eu des teneurs significativement plus élevées en AGMI et en acide vaccénique, en AGPI et en acide linoléique, en AG trans et acide ruménique (figure 22).

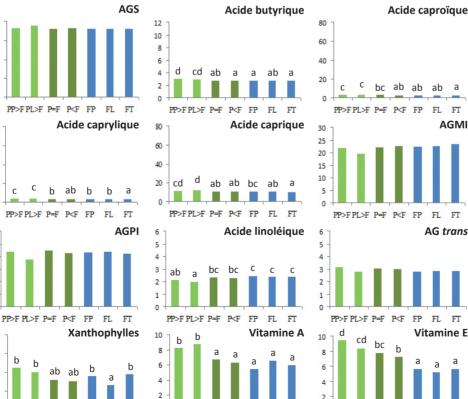
L'effet du stade de lactation a aussi été nettement visible, puisque les fromages fabriqués avec du lait de milieu et fin de lactation (5,3 à 7,6 mois) ont présenté des teneurs en AGS plus élevées que ceux fabriqués avec du lait de début de lactation (figure 23). Parmi les AGS, les teneurs en acides laurique, myristique et palmitique ont progressé régulièrement selon les trois stades de lactation considérés; la teneur en acide ruménique a évolué de façon similaire. Inversement, la teneur en acide stéarique a diminué régulièrement. Les teneurs

des fromages de Rocamadour en AGMI et AGPI (notamment acides oléique et linoléique) ont été plus élevées avec le lait de début de lactation.

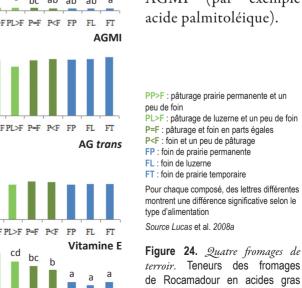
Parmi les facteurs relatifs à la ration fourragère, le pâturage des chèvres a été le plus influent, mais de façon plus nette pour les vitamines que pour les acides gras (figure 24). Seuls certains acides gras courts (butyrique, caproïque, caprylique, caprique) et la vitamine A ont présenté des teneurs significativement plus élevées dans les fromages produits lorsque les chèvres ingéraient majoritairement de l'herbe pâturée, alors que l'acide linoléique a été plus élevé lorsqu'elles recevaient les autres types de rations (pâturage minoritaire et fourrages conservés). La période de pâturage a permis de fabriquer des fromages de Rocamadour plus riches en vitamine E que ceux fabriqués quand elles consommaient des fourrages conservés, avec des teneurs d'autant plus élevées que la part de pâturage était importante.

Une autre étude a permis d'observer un effet spécifique du pâturage sur parcours sur le profil en acides gras du fromage de Pélardon fermier. Par rapport au pâturage de prairies, lors du pâturage sur parcours, le fromage a présenté des teneurs

> plus élevées en certains AGS (par exemple acides caproïque et caprylique) et moins élevées en certains AGMI (par exemple acide palmitoléique).



PP>FPL>F P=F P<F FP FL FT



PP>FPL>F P=F P<F FP FL FT

terroir. Teneurs des fromages de Rocamadour en acides gras (g/100 g d'AGT), en xanthophylles et vitamines A et E (mg/kg de matières grasses) selon le type de la ration.

0.4

0,3

0,2

PP>FPL>F P=F P<F FP FL FT

60

40

80

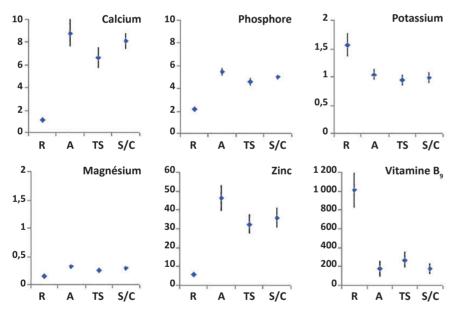
60

40

Partie 2 : Des teneurs en composés hydrosolubles des fromages variables selon les conditions de transformation

Dans l'étude *Quatre fromage de terroir*, la variabilité des teneurs des fromages en composés hydrosolubles a été associée principalement au procédé de transformation du lait. Les fromages étudiés ont été fabriqués selon trois technologies fromagères : pâte pressée non cuite pour le Salers/Cantal fermier et la tomme de Savoie, pâte pressée mi-cuite pour l'Abondance et pâte molle lactique pour le Rocamadour. Ce dernier a présenté les teneurs les plus faibles en calcium, phosphore, zinc et magnésium et les plus élevées en potassium et vitamine B₉ (figure 25).

Inversement, l'Abondance a présenté les teneurs les plus élevées en calcium, phosphore, magnésium et zinc et la plus faible en vitamine B₉. Les deux fromages à pâte pressée non cuite ont présenté des teneurs intermédiaires entre celles relatives au Rocamadour et à l'Abondance.



R Rocamadour; A Abondance; TS tomme de Savoie; S/C Salers/Cantal Sources Lucas et al. 2006b et 2008a

Figure 25. *Quatre fromages de terroir.* Teneurs et variabilités des fromages en calcium, phosphore, potassium et magnésium (g/kg), en zinc (mg/kg) et en vitamine B_9 (μ g/kg).

L'essentiel à retenir

En conditions réelles de production laitière et de transformation fromagère, il a été confirmé que la teneur du fromage en composés liposolubles dépend des conditions de production du lait, alors que sa teneur en composés hydrosolubles dépend des procédés de transformation.

L'effet dominant du pâturage, en particulier d'altitude, sur la composition nutritionnelle du lait et du fromage de vache est très clair ; il masque souvent ceux du stade de lactation et de la race. Pendant l'hivernage, seule une proportion importante d'ensilage de maïs dans la ration conservée entraîne une diminution des acides oléique et α-linolénique dans le lait et le fromage. Les fromages produits pendant le pâturage présentent une composition nutritionnelle d'autant plus intéressante que la part de pâturage est importante, avec moins d'AGS et plus d'AGMI, d'AGPI, d'AG *trans* (dont l'acide ruménique), de β-carotène et de vitamines A et E.

En élevage caprin, le stade de lactation et la complémentation lipidique de la ration ont les effets les plus significatifs sur le profil en acides gras du lait et du fromage, alors que le pâturage des chèvres a des conséquences sur leurs teneurs en β-carotène et vitamines; l'effet de la race n'est généralement pas visible. Les fromages les plus favorables sur le plan de la composition nutritionnelle sont fabriqués avec le lait de chèvres recevant des compléments lipidiques, ou au pâturage, ou avec du lait de début de lactation.

Les effets des différents procédés de transformation décrits dans le chapitre 3 sont confirmés en conditions réelles de transformation du lait, avec des fromages à pâte pressée caractérisés par des teneurs élevées en calcium et en zinc, contrairement au fromage à pâte molle lactique, qui se distingue par une teneur élevée en vitamine B_{\circ} .

Conclusion

Claire AGABRIEL, Cécile SIBRA

Cet ouvrage a dans un premier temps fait le point sur la composition du lait en composés d'intérêt nutritionnel et sur sa place importante dans notre alimentation.

Les différents résultats présentés ensuite montrent que les caractéristiques des animaux et de leur conduite, ainsi que les procédés de transformation, peuvent modifier de manière sensible les caractéristiques nutritionnelles des fromages. Les effets sont cependant variables selon les composés et les facteurs considérés. La variabilité des teneurs en composés liposolubles (acides gras, caroténoïdes, vitamines A et E) du fromage est largement expliquée par les conditions de production du lait, alors que celle des teneurs en composés hydrosolubles (minéraux et vitamines du groupe B principalement) est influencée par les procédés de transformation.

Les compositions des laits de vache, de chèvre et de brebis sont spécifiques, aussi bien pour les composés liposolubles qu'hydrosolubles. Dans le fromage, les différences de teneurs en composés hydrosolubles inter espèces peuvent être exacerbées par la technologie fromagère. Parmi les conditions de production étudiées en expérimentation, l'alimentation des vaches laitières représente le moyen d'action le plus efficace pour moduler à court terme et de façon réversible les teneurs du lait en composés liposolubles. La nature de la ration fourragère (pâturage comparativement aux rations hivernales) ou l'adjonction d'oléagineux ont des effets très importants ; le stade de l'herbe pâturée et la part qu'elle représente dans la ration, ainsi que le stade de lactation du troupeau ont un effet moindre; enfin le mode de conservation des fourrages et la diversité botanique de l'herbe ont des effets plus faibles.

Dans les procédés de transformation, la cinétique d'acidification/égouttage est le facteur majeur de variation des teneurs minérales des fromages, qui ensuite évoluent peu au cours de l'affinage. En revanche, la présence de certaines souches de bactéries lactiques ou la flore d'affinage favorisent la synthèse de vitamines du groupe B.

Dans des conditions réelles de production du lait, en élevage bovin, l'alimentation, et plus particulièrement la présence de pâturage, apparaît comme le facteur majeur de variation de la teneur du lait en composés liposolubles et souvent le seul visible, au détriment d'autres facteurs d'élevage associés, comme le stade physiologique. Par contre, en élevage caprin, le stade de lactation et la proportion de matières grasses dans la ration sont les plus influents. De plus, en conditions réelles de fabrication, les teneurs des fromages en composés hydrosolubles sont différentes selon les technologies.

Le tour d'horizon des connaissances actuelles réalisé dans cet ouvrage met clairement en évidence la variabilité de la composition nutritionnelle des fromages et son lien avec les modes de conduite des troupeaux et les savoir-faire de fabrication, associés étroitement à la géographie des lieux de production. Ces éléments concrets, illustrant le lien au terroir des fromages, peuvent contribuer aux réflexions menées dans les filières autour des pratiques de production et de transformation du lait, dans le contexte évolutif des cahiers des charges des fromages d'AOP. Ils peuvent aussi apporter aux filières des éléments de communication auprès du public, choisis selon les spécificités de leurs fromages respectifs.

■ Fiches synthétiques

Fiche n°1. Le lait

Fiche n°2. Le lactose

Fiche n°3. Les matières protéiques

Fiche n°4. Les matières grasses

Fiche n°5. Les minéraux

Fiche n°6. Les vitamines

Fiche n°7. Les composés phénoliques et terpènes

■ Fiche n°1. Le lait

Cécile SIBRA. Bruno MARTIN

Définition

Le lait est le produit de sécrétion des glandes mammaires des femelles mammifères à partir de la mise-bas ; sa fonction naturelle est de nourrir les jeunes après leur naissance, à un moment où la croissance est rapide et où aucun autre aliment ne peut le remplacer.

La définition légale du lait spécifie « Le lait est le produit intégral de la traite complète et ininterrompue d'une femelle laitière bien portante, bien nourrie et non surmenée ». Cette définition datant de 1908 a été précisée en 1987 au niveau européen : elle est réservée « exclusivement au produit de la sécrétion mammaire normale obtenue par une ou plusieurs traites sans aucune addition ou soustraction ». La dénomination « lait » sans indication d'espèce est réservée au lait de vache.

Sécrétion et origine

Le lait est sécrété pendant la période de lactation, ce qui correspond généralement, dans nos systèmes d'élevage actuels, à environ 10 mois chez la vache, 9 mois chez la chèvre et 6 mois chez la brebis. Pendant les sept premiers jours de lactation, la mamelle sécrète le colostrum.

La glande mammaire synthétise la plupart des constituants organiques du lait (environ 92 % de l'extrait sec du lait de vache); les autres constituants proviennent directement du plasma sanguin, en passant au travers des cellules épithéliales mammaires.

Composition et caractéristiques physiques

L'eau est le composant majoritaire du lait. Viennent ensuite le lactose, les matières grasses et protéiques, considérés comme des nutriments majeurs, ou macronutriments (tableau 1). Les composés mineurs, ou micronutriments, sont principalement des minéraux et des vitamines; le calcium, le potassium, le phosphore, les vitamines C, B₅ et B₂ sont quantitativement les plus

	Eau	Lactose	Matières grasses	Matières protéiques	Minéraux
Vache	87,5	4,6	3,7	3,2	0,8
Chèvre	87,0	4,4	3,8	2,9	0,9
Brebis	82,2	4,8	7,0	5,4	1,0

Tableau 1. Composition moyenne du lait de vache, de chèvre et de brebis (%).

représentés. Le lait contient d'autres éléments à l'état de traces (enzymes, oligoéléments, pigments, cellules diverses).

Selon l'espèce animale, la composition moyenne du lait diffère, le lait de brebis étant globalement plus riche en matières nutritives que celui de vache et de chèvre.

Le lait est un mélange hétérogène composé de la phase aqueuse qui contient l'eau et les produits solubles, de la suspension colloïdale micellaire constituée principalement des caséines et de l'émulsion contenant les globules gras.

Le pH du lait frais est proche de la neutralité, sa masse volumique est légèrement supérieure à 1 kg/L, son point d'ébullition est légèrement supérieur à 100°C et son point de congélation légèrement inférieur à 0°C.

Intérêt nutritionnel

Le lait est un aliment à forte densité nutritionnelle, du fait qu'il contient des quantités significatives de nutriments essentiels à la vie. Il est particulièrement intéressant dans l'alimentation humaine pour son apport en matières protéiques, en minéraux (calcium, phosphore, zinc et sélénium) et en vitamines (A, B₂, B₅ et B₁₂).

Les matières grasses laitières ont souvent été accusées d'augmenter le risque d'apparition de maladies cardiovasculaires, à cause de leurs teneurs importantes en acides gras saturés et en acides gras insaturés de configuration *trans*. La neutralité ou les effets positifs de la plupart des acides gras saturés du lait sont progressivement démontrés ;

seuls les acides palmitique, laurique et myristique font l'objet d'une recommandation de l'Anses. Les bienfaits des acides gras oméga 3 et de l'acide ruménique sont évoqués depuis longtemps. La consommation de lait est susceptible de provoquer chez certaines personnes une intolérance au lactose ou une allergie aux matières protéiques. Cependant, le lait et les produits laitiers constituent un des quatre grands groupes alimentaires reconnus d'une alimentation saine tout au long de la vie.

Facteurs de variation de la composition du lait

La composition du lait est très variable selon l'espèce animale. Elle varie également sous l'influence de facteurs liés à l'animal lui-même (race, rang et stade de lactation), à sa conduite (alimentation principalement, rythme de traite) et à son environnement (saison notamment, altitude). Cependant, dans les élevages, ces facteurs sont souvent associés et il est difficile d'isoler l'effet spécifique de chacun.

Parmi les facteurs liés à l'animal, l'espèce, la race et le stade de lactation ont un effet sensible sur la composition du lait. À ceci s'ajoutent les effets liés à l'individu lui-même.

L'alimentation des animaux a une incidence majeure sur la composition du lait, plus précisément sur ses caractéristiques nutritionnelles ; cet effet de l'alimentation est ponctuel et réversible. Au niveau de la ration fourragère, les principales différences de composition du lait proviennent du fait que les animaux ingèrent de l'herbe fraîche (pâturage), de l'herbe conservée (ensilage, enrubannage ou foin) ou de l'ensilage de maïs. Dans le cas de l'herbe, viennent se superposer les effets du stade (herbe jeune ou âgée), de la composition botanique (différentes espèces de graminées, de légumineuses ou de plantes diverses), de la diversité floristique (nombre d'espèces). La ration fourragère est, dans la plupart des cas, complétée par des apports de concentrés. Cette incorporation agit sur la composition du lait, de façon différenciée selon la proportion de concentré dans la ration, selon sa nature (énergétique ou riche en protéines) et selon la nature des autres composants de la ration. Les concentrés oléagineux, riches en matières grasses, sous forme de graines ou d'huile, ont des effets bien spécifiques, notamment sur le profil en acides gras

du lait. Enfin, les additifs qui peuvent être intégrés à la ration (minéraux, vitamines, huiles essentielles ou extraits végétaux) ont des effets variables sur la composition du lait.

Parmi les facteurs relevant de l'environnement, la saison agit sur la composition du lait, du fait qu'elle induit des différences de durée du jour et de température. L'altitude a une influence indirecte, vu les végétations spécifiques disponibles en plaine et en montagne.

Facteurs de variation de la composition du fromage

Le lait frais est transformé en une grande variété de produits, principalement en yaourts, crème fraîche, beurre et fromages. Chaque type de produit a ses propres caractéristiques nutritionnelles, autres que celles du lait, suite aux différentes technologies appliquées. Le yaourt conserve une composition proche de celle du lait; le beurre et, dans une moindre mesure, la crème fraîche sont riches en matières grasses, donc en vitamine A, au détriment des autres composés. La fabrication fromagère conduit à une concentration des matières protéiques, des matières grasses, des minéraux et des vitamines liposolubles, ainsi qu'à une disparition quasi-complète du lactose. Seul le profil en acides gras est identique entre le produit laitier et le lait dont il est issu. De plus, un même type de technologie peut être appliqué en ferme ou en laiterie, ce qui induit des qualités nutritionnelles différentes du produit obtenu. Le lait utilisé dans les fermes provient d'un seul troupeau et ne subit pas de standardisation du taux de matières grasses, ni d'éventuelles adjonctions de vitamines ou de minéraux. Le lait travaillé dans les laiteries, même s'il est utilisé sans modifications préalables, correspond au mélange des laits de nombreux troupeaux, atténuant ainsi grandement les particularités des laits de troupeaux.

■ Fiche n°2. Le lactose

Lucile THOREL, Thierry JOUVET

Définition

Le lactose est le sucre spécifique du lait, il ne se retrouve dans aucun autre aliment. C'est un glucide énergétique. Il est composé d'une molécule de glucose et d'une molécule de galactose, qui sont des sucres simples.

La teneur en lactose est généralement exprimée en g/L dans le lait et en mg/100 g dans le fromage. Dans le domaine de la nutrition, elle est exprimée en g/kg.

Intérêt nutritionnel

Le lactose représente pour l'Homme la seule source de galactose, qui est un constituant des tissus nerveux. Il est également très favorable à l'assimilation et à la rétention du calcium et de nombreux autres minéraux par l'organisme humain.

La consommation de lactose peut provoquer des manifestations d'intolérance digestive chez certaines personnes adultes. Le lactose est dégradé dans l'intestin grêle par la lactase, enzyme dont l'activité décline progressivement entre 7 et 20 ans, notamment dans les populations peu consommatrices de lait.

Origine dans le lait

Le lactose est synthétisé par la glande mammaire à partir du glucose sanguin. Il contrôle, conjointement avec les minéraux, la pression osmotique du lait. La quantité de lait sécrétée dépend donc des possibilités de synthèse du lactose par la mamelle.

Valeurs moyennes et variabilité

La teneur en lactose du lait varie peu selon les espèces animales. En moyenne, le lait de vache en contient de 47 à 52 g/kg, le lait de chèvre de 41 à 47 g/kg et celui de brebis de 41 à 55 g/kg.

Facteurs de variation dans le lait

De façon générale, la teneur en lactose du lait est inversement proportionnelle à celle des autres constituants dissous et osmotiquement actifs (sels minéraux, protéines sériques), en raison de la régulation de la pression osmotique. Ainsi, plusieurs facteurs sont susceptibles de faire varier la teneur du lait en lactose.

Parmi ces facteurs, la santé de la mamelle est le plus important. La réaction inflammatoire causée par une mammite entraîne une altération et une destruction des cellules de l'épithélium sécrétoire de la glande mammaire. La diminution de la production de lactose est d'autant plus grande que l'inflammation est importante.

Le stade de lactation influe sur la teneur du lait en lactose, qui tend à augmenter durant les premières semaines de lactation, pour diminuer ensuite jusqu'à la fin.

Un rythme d'une seule traite par jour entraîne une diminution de la teneur en lactose du lait, ce phénomène étant annulé lors de la reprise d'une traite biquotidienne.

Facteurs de variation dans le fromage

Le lactose joue un rôle clef en technologie fromagère, car c'est sa transformation en acide lactique qui permet aux réactions biochimiques de se produire durant l'affinage. Le métabolisme du lactate, produit à partir de l'acide lactique, est spécifique à chaque type de fromage et permet d'en développer les caractéristiques propres. Ce métabolisme dépend des espèces de bactéries lactiques présentes, qui produisent plus ou moins d'acide lactique (voie homofermentaire ou hétérofermentaire).

La majeure partie du lactose est évacuée dans le lactosérum lors de la coagulation du lait. La quantité retenue dans le caillé dépend de la technologie utilisée. Au démoulage, les pâtes pressées (cuites ou non) contiennent très peu de lactose, les pâtes molles en contiennent des quantités variables et les fromages lactiques en contiennent des quantités beaucoup plus importantes.

Au cours de l'affinage, la cinétique de dégradation du lactose est très dépendante de la technologie. Ainsi, dans les fabrications où le salage intervient après le pressage, le lactose a totalement disparu après 4 à 5 heures de pressage. À l'inverse, dans les fromages salés durant la fabrication, la quantité de lactose résiduel est importante après pressage. Enfin, dans les pâtes molles à croûte fleurie, la vitesse de dégradation du lactose diffère entre la surface et l'intérieur du fromage, 15 et 30 jours d'affinage étant respectivement nécessaires à l'élimination du lactose.

Dans tous les cas, la fermentation de la totalité du lactose est nécessaire pour éviter le développement d'une flore secondaire indésirable et, dans les fromages en fin d'affinage, il ne reste que de faibles quantités de lactose dans seulement environ 10 % des fromages.

■ Fiche n°3. Les matières protéiques

Éric BEUVIER, Valérie GAGNAIRE

Définition

Les protéines constituent le principal matériau de construction des êtres vivants (muscles, peau, membranes cellulaires, parois végétales...) et assurent la majorité des fonctions de la cellule.

Une protéine est une molécule biologique composée d'un enchaînement, dans un ordre précis et particulier à chaque protéine, d'éléments chimiques appelés acides aminés, reliés entre eux par une liaison dite peptidique, tels des perles sur un collier.

Les acides aminés, au nombre de 20, sont les unités de base des protéines. Parmi les 20 acides aminés existants, huit sont indispensables à l'homme, car l'organisme est incapable de les synthétiser : le tryptophane, la lysine, la méthionine, la phénylalanine, la thréonine, la valine, la leucine et l'isoleucine. Deux autres, l'histidine et l'arginine, sont dits semi-essentiels, car les nourrissons ont besoin d'un apport exogène. Selon le nombre d'acides aminés contenus dans la chaîne, l'assemblage (ou séquence) s'appelle un peptide (< 50 acides aminés) ou une protéine (> 50 acides aminés).

Une enzyme est une protéine qui permet d'accélérer des réactions chimiques. Les enzymes protéolytiques sont capables de dégrader d'autres protéines en fragments plus petits (depuis les peptides jusqu'aux acides aminés). Il existe deux types d'enzymes protéolytiques : les protéases qui dégradent les protéines à l'intérieur des chaînes en peptides de taille variable, et les peptidases qui dégradent les peptides en peptides plus petits et en acides aminés libres.

Un peptide dit bioactif est présent à l'état inactif dans les séquences des protéines et peut être libéré dans les produits alimentaires sous l'action des enzymes protéolytiques, lors des procédés de transformation par exemple. Ce peptide, une fois libéré et selon sa séquence en acides aminés, peut devenir bioactif lorsqu'il est ingéré par l'homme.

Intérêt nutritionnel

Le lait et les produits laitiers sont d'excellentes sources de protéines. Ils permettent de combler les besoins quotidiens en protéines des très jeunes enfants et, chez l'adulte, consommer 250 mL de lait permet d'en couvrir environ 15 %. Les matières protéiques du lait sont hautement digestibles (>95 %) et présentent une composition en acides aminés adaptée aux besoins de l'organisme humain : elles comportent 40 à 50 % d'acides aminés essentiels, elles sont riches en lysine et moins pourvues en acides aminés soufrés (méthionine et cystéine).

Certaines protéines laitières sont dotées d'activités biologiques. Par exemple, les caséines permettent le transport de minéraux comme le calcium et le magnésium. La lactoferrine possède plusieurs propriétés bénéfiques à la santé humaine : réguler certaines fonctions cellulaires, transporter du fer ; elle pourrait également moduler le système immunitaire et empêcher le développement de certaines formes de cancer. Les immunoglobulines assurent la défense immunitaire des nouveaux-nés au niveau de leur système digestif, évitant ainsi les diarrhées.

Certains peptides et acides aminés possèdent des activités biologiques sur les systèmes cardiovasculaire, immunitaire, endocrinien, digestif et nerveux. Parmi les nombreux peptides bioactifs identifiés, il en est qui permettent le transport des minéraux et leur absorption intestinale et qui sont impliqués dans la formation des os ou la protection de l'émail des dents contre les caries. D'autres, identifiés récemment, auraient des activités antihypertensives et pourraient permettre de diminuer les risques de maladies cardiovasculaires.

Origine dans le lait

Les matières protéiques du lait sont majoritairement synthétisées dans les cellules épithéliales de la glande mammaire à partir des acides aminés issus de l'alimentation des animaux et prélevés dans le sang. Par ailleurs, une partie des protéines contenues dans le plasma sanguin migre dans le lait ; il s'agit notamment des protéines mineures ayant une activité enzymatique.

Les peptides bioactifs présents dans la protéine initiale peuvent être libérés dans notre tractus digestif sous l'action du pool d'enzymes impliqués dans la digestion, ou au cours de la fabrication et l'affinage des fromages.

Dans le cas des produits laitiers, les enzymes protéolytiques sont soit déjà présentes naturellement dans le lait (plasmine par exemple), soit ajoutées pour faire coaguler le lait (chymosine, pepsine, coagulant fongique...), soit produites par les flores microbiennes internes aux fromages ou présentes en surface au cours de la fabrication et de l'affinage.

Valeurs moyennes et variabilité

Le lait de brebis contient presque deux fois plus de matières protéiques que ceux de vache et de chèvre (tableau 1). Les matières protéiques du lait sont divisées en deux classes, les caséines (80 %) et les protéines sériques (20 %), leur répartition étant identique quelle que soit l'espèce de ruminants. Les protéines sériques comprennent un très grand

nombre de protéines dites mineures dont la teneur dans le lait est de l'ordre du mg/L, voire très inférieure. Le lait de chèvre présente une teneur plus élevée en caséines β et κ et moins élevée en caséine α_s que les laits de vache et de brebis. Les protéines sériques totales se répartissent de façon différente dans le lait des trois espèces, sauf pour l'albumine sérique bovine.

Facteurs de variation dans le lait

Les facteurs majeurs de variation de la teneur du lait en matières protéiques sont le stade de lactation, le niveau d'apport énergétique et la nature de la ration, la race, l'individu et l'espèce.

La teneur du lait en matières protéiques varie fortement dans les premiers jours de lactation, où le colostrum est composé essentiellement d'immunoglobulines. Après ces premiers jours, la composition des matières protéiques du lait se stabilise et leur teneur évolue de façon inverse à la quantité de lait produite.

La teneur en matières protéiques du lait s'accroît avec le niveau d'apport énergétique de la ration. Cet effet concerne à la fois les caséines et les protéines solubles, le ratio caséines/protéines totales restant constant.

	Vac	che	Chè	vre	Bre	bis
	g/L	%	g/L	%	g/L	%
Caséines totales	26,0	100	26,0	100	44,6	100
Caséine ας	12,0	46	7,0	27	21,0	47
Caséine β	9,0	36	13,0	50	16,1	36
Caséine κ	3,5	13	5,7	22	4,5	10
Caséine γ	1,5	6			3,0	6
Protéines sériques totales	6,0	100	8,1	100	12,6	100
α-lactalbumine	1,5	45	2,0	25	1,3	10
β-lactoglobuline	2,7	25	4,4	55	8,4	67
Albumine sérique bovine	0,3	5	0,6	7	0,6	5
Immunoglobulines	0,7	12	0,5	6	2,3	18
Lactoferrine (mg/l)	20-200	0,3-3	20-200	0,3-3	< 100¹	<1
Autres ²	0,6	10	0,6	7		
Protéines totales	32,0		34,1		57,2	

¹Dans le colostrum 4 jours après agnelage

Sources FAO et Park et al. 2007

Tableau 1. Distribution des protéines dans le lait de vache, de chèvre et de brebis et composition moyenne.

² Protéines dites mineures et peptides dérivés de la caséine β appelés protéoses peptones.

À même niveau d'apport énergétique, la supplémentation des rations avec des lipides s'accompagne généralement d'une baisse modérée du taux protéique. En outre, les rations à base de foin ou d'ensilage de maïs conduisent à des laits légèrement plus riches en matières protéiques que les rations à base d'ensilage d'herbe.

Des différences de taux protéique du lait sont également relevées selon les races, bien qu'il existe une très forte variabilité individuelle au sein des races.

Dans le lait de chèvre, la teneur et la nature des caséines dépend fortement du polymorphisme génétique de la caséine α_{c1} .

Facteurs de variation dans le fromage

La teneur totale en matières protéiques du fromage est très variable selon le type de fromage; elle est d'autant plus élevée que les fromages sont plus secs et moins gras. Ces matières protéiques, essentiellement constituées de caséines, sont à l'origine de nombreux peptides libérés sous l'action de multiples enzymes protéolytiques. La composition des fromages en peptides bioactifs est ainsi très variable selon la nature des protéases actives dans le fromage, dépendantes de la technologie fromagère.

Un grand nombre de peptides est produit pendant l'affinage des fromages, sous forme de précurseurs de peptides bioactifs ou potentiellement bioactifs. Les teneurs en peptides bioactifs sont très variables selon la technologie appliquée, les plus élevées étant relevées dans les fromages à affinage long (pâte cuite ou non) par rapport aux fromages à pâte molle.

D'autre part, les quantités de lactoferrine sont plus élevées dans les fromages à pâte pressée (cuite ou non cuite) par rapport aux fromages à pâte molle.

■ Fiche n°4. Les matières grasses

Catherine HURTAUD, Anne FERLAY

Définition et classification

Les matières grasses laitières sont constituées par plus de 97 % de triglycérides, les autres constituants étant des phospholipides (1 %), des stérols et des vitamines liposolubles. Sur le plan chimique, les triglycérides sont des esters de glycérol comportant trois acides gras.

Un acide gras est constitué d'une chaîne linéaire d'atomes de carbone et d'hydrogène (-CH₂- ou -CH=), les liaisons entre les atomes de carbone pouvant être simple ou double. La chaîne d'atomes est terminée à une extrémité par un groupement méthyle (CH₃) et à l'autre extrémité par un groupement carboxyle (-COOH). Les acides gras diffèrent par la longueur de leur chaîne, la présence ou non de doubles liaisons, le positionnement sur la chaîne carbonée et la configuration géométrique de ces doubles liaisons (forme cis ou trans) et enfin par la présence de chaînes ramifiées qui ont un groupe terminal (-CH(CH₂)-CH₂). Les acides gras saturés (AGS) n'ont pas de double liaison dans leur chaîne d'atomes, alors que les acides gras insaturés (AGI) ont au moins une double liaison. Les AGI comportant une seule double liaison sont regroupés sous le terme d'acides gras monoinsaturés (AGMI) et ceux comportant plusieurs doubles liaisons sont rassemblés sous l'appellation acides gras polyinsaturés (AGPI). Lorsqu'il y a au moins deux doubles liaisons, les acides gras sont qualifiés de « conjugués » lorsque deux doubles liaisons sont séparées par une seule simple liaison (-CH=CH-CH=CH-).

Plus de 400 acides gras ont été détectés dans le lait. Malgré cette diversité, seuls environ 15 d'entre eux sont présents à raison de plus de 1 % dans les matières grasses du lait. Les noms, caractéristiques, notations et teneurs des principaux acides gras du lait sont donnés dans le tableau 1.

Intérêt nutritionnel

Il est reconnu que les matières grasses du lait sont riches en AGS: en cas de consommation régulière en quantité importante, ils sont supposés avoir un effet négatif sur la santé humaine. Cependant, il serait erroné de considérer les acides gras du lait « en bloc », puisque certains agissent positivement sur la santé humaine et que d'autres sont spécifiques aux matières grasses laitières.

Parmi les AGS, les acides laurique, myristique et plus particulièrement palmitique (le plus important dans le lait) sont supposés favoriser les maladies cardio-vasculaires. Les autres AGS sont considérés comme neutres ou favorables à la santé humaine. Par exemple, l'acide butyrique aurait un rôle protecteur vis-à-vis du cancer du côlon. Les AGS à chaînes moyennes (C6:0, C8:0 et C10:0) auraient un effet hypocholestérolémiant et, à même niveau d'apport énergétique, génèreraient moins de dépôts adipeux que les acides gras à chaînes longues. L'acide myristique aurait par ailleurs un rôle essentiel dans l'activation de nombreuses protéines et la régulation de nombreuses fonctions cellulaires, par sa fonction de myristoylation.

Les AGI sont considérés comme plutôt bénéfiques à la santé humaine. L'acide oléique (le plus important des AGMI du lait) semble avoir un effet neutre. Les AGPI de la série n-3 (ou ω3, principalement l'acide α-linolénique) et n-6 (ou ω6, principalement l'acide linoléique), sont dits essentiels : ils doivent être apportés par l'alimentation. Ils réduiraient le risque d'apparition de maladies cardiovasculaires et de cancers, dans la mesure où notre alimentation respecte un rapport n-6/n-3 inférieur ou égal à 5. Les acides gras EPA et DHA (n-3 à très longue chaîne) auraient un effet positif sur le développement des capacités cognitives chez les jeunes mammifères. L'acide ruménique (AG trans conjugué) présente, en conditions expérimentales, une activité anti-cancéreuse. Les autres AGI trans contenus dans les matières grasses laitières étaient jusqu'à présent supposés

néfastes à la santé humaine. Une différence est maintenant clairement établie entre les AGI trans des huiles végétales partiellement hydrogénées par traitement industriel et ceux présents naturellement dans les produits des ruminants (lait et viande). Consommés régulièrement, les AGI trans traités industriellement augmentent le risque d'apparition d'obésité, de diabète et de maladies cardiovasculaires. Les AGI trans du lait ne semblent pas présenter de risque pour la santé humaine et auraient au contraire des effets bénéfiques.

L'ensemble de ces effets a été observé dans le cadre de protocoles expérimentaux sur animaux ou d'études cliniques sur des humains et nécessitent encore des validations.

Origine dans le lait

Les acides gras du lait ont une double origine. Les acides gras à chaîne courte et moyenne (C4:0 à C14:0 et une partie du C16:0) sont synthétisés par la glande mammaire, cette synthèse *de novo* contribuant à environ 40 % à la production des matières grasses laitières. Les acides gras à chaîne longue (18 atomes de carbone et plus) et une partie du C16:0 sont captés par la mamelle directement dans le plasma sanguin et représentent environ 60 % des acides gras totaux (AGT) du lait. Ils sont apportés par l'alimentation ou issus de la mobilisation de réserves corporelles. Ces acides gras sont ensuite en partie désaturés par la mamelle.

	Vache	Chèvre	Brebis
Acides gras saturés	67,5	73,0	68,0
butyrique (C4:0)	3,5	2,5	3,7
caproïque (C6:0)	2,2	2,6	2,8
caprylique (C8:0)	1,3	3,2	2,5
caprique (C10:0)	3,0	10,5	7,4
laurique (C12:0)	3,6	5,0	4,6
myristique (C14:0)	11,8	11,0	11,0
pentadécylique (C15:0)	1,3		1,1
palmitique (C16:0)	29,2	23,4	24,1
stéarique (C18:0)	9,4	9,6	8,8
Acides gras monoinsaturés	24,2	22,9	24,0
myréolistique (C14:1 <i>cis</i> 9)	0,97	0,23	0,25
palmitoléique (C16:1cis9)	1,5		1,2
oléique (C18:1 <i>cis</i> 9)	19,3	18,2	16,9
élaïdique (C18:1trans9)	0,19		
C18:1trans10	0,24		1,00
vaccénique (C18:1trans11)	1,7	1,1	2,8
Acides gras polyinsaturés	3,0	4,2	6,00
linoléique (C18:2cis9cis12, n-6)	1,4	2,3	2,4
ruménique (C18:2cis9trans11)	0,88	0,50	1,21
α-linolénique (C18:3 c9, c12, c15, n-3)	0,66	0,82	0,95
EPA (eicosapentaènoïque, C20:5 cis5cis8cis11cis14cis17, n-3)	0,06		
DHA (docosahexaènoïque, C22:6 cis4cis7cis10cis13cis16cis19, n-3)	0,01		0,07

Source Coppa et al. 2013

Tableau 1. Composition moyenne du lait de vache, de chèvre et de brebis en acides gras (en g/100 g d'AGT).

Valeurs moyennes et variabilité

Le lait de vache contient en moyenne 40 g de matières grasses par litre. Les matières grasses du lait sont caractérisées par une forte proportion d'AGS, qui représentent près des deux tiers des AGT (tableau 1). L'acide palmitique est le plus important (presque 30 % des AGT en moyenne), avec une fourchette de variation importante (22 à 42 %); les acides myristique et stéarique représentent chacun environ 10 % des AGT. Les AGS courts (jusqu'à 8 atomes de carbone), à nombre pair et impair d'atomes de carbone, représentent respectivement 7 et 0.05 % des AGT.

Les AGMI correspondent à environ un tiers des AGT. L'acide oléique représente à lui seul plus des trois quarts des AGMI (soit 19 % des AGT). Les AGPI sont quantitativement peu présents puisqu'ils représentent moins de 5 % des AGT; l'acide linoléique en constitue environ un tiers. Les AGPI à très longue chaîne ne sont présents qu'en très faible proportion (moins de 0,5 % des AGT).

Les AG trans, dont plus de 80 % sont des AGMI, représentent en général 3 à 4 % des AGT. L'acide vaccénique est quantitativement le plus important (plus de la moitié). L'acide élaïdique et le C18:1trans10 représentent en général environ 10 % des AG trans. Parmi les acides C18:2 conjugués (CLA), l'acide ruménique est de loin le plus important (plus de 80 % des AG conjugués, soit environ 1 % des AGT).

Facteurs de variation dans le lait

L'alimentation des femelles laitières est le facteur majeur et réversible de variation de la composition en acides gras des laits. Les rations à base d'herbe pâturée sont à l'origine des laits les plus riches en AGI et, au contraire, les rations à base d'ensilage de maïs conduisent aux laits les plus riches en AGS. Les laits issus de rations à base d'herbe conservée (foin, ensilage) sont intermédiaires.

Le stade de lactation joue un rôle important sur le profil en acides gras du lait, notamment en début de lactation, lorsque les animaux mobilisent leurs réserves corporelles. La race des femelles laitières a un effet plus faible que ceux de l'alimentation et du stade de lactation. Il existe cependant une variabilité inter-individuelle importante qui laisse entrevoir la possibilité de sélectionner les animaux selon le profil en acides gras de leur lait.

Facteurs de variation dans le fromage

La teneur en matières grasses des fromages est très variable selon les types de fromages ; elle est d'autant plus élevée que la teneur en matière sèche du fromage est plus forte. Lorsqu'elle est exprimée en pourcentage de la matière sèche (gras/sec), la matière grasse des fromages dépend du rapport matières grasses/matières protéiques du lait mis en fabrication.

La composition en acides gras des produits laitiers est très similaire à celle du lait dont ils sont issus. De ce fait, la composition en acides gras des produits laitiers découle majoritairement des conditions de production du lait, et plus particulièrement de l'alimentation des femelles laitières. Le profil en acides gras des produits laitiers joue un rôle important sur leurs propriétés fonctionnelles, dans la mesure où les acides gras ont des points de fusion très différents. Par exemple, la tartinabilité du beurre et la texture plus ou moins fondante des fromages sont liées au rapport entre AGS et AGI, plus particulièrement au rapport entre les acides palmitique et oléique, qui sont les plus représentatifs de chacune de ces catégories.

■ Fiche n°5. Les minéraux

Frédéric GAUCHERON

Définition et classification

Les minéraux sont des éléments inorganiques qui ne contiennent pas de carbone, d'azote ou d'oxygène dans leur structure chimique. Ils sont souvent désignés par leur symbole chimique (tableau 1).

	Vache	Chèvre	Brebis
Macroéléments (mg/L)			
Calcium (Ca)	1 200	1260	1 950
Phosphore (P)	920	970	1 240
Potassium (K)	1 500	1900	1 380
Sodium (Na)	450	380	500
Chlorure (CI)	1 100	1600	1 100
Magnésium (Mg)	110	130	190
Oligo-éléments (µg/L)			
Zinc (Zn)	3 800	3400	6 300
Fer (Fe)	460	550	1000
Cuivre (Cu)	220	300	500
Manganèse (Mn)	60	80	70
Sélénium (Se)	30	20	31

Tableau 1. Composition minérale moyenne des laits de vache, chèvre et brebis.

Dans le lait et les produits laitiers, ces éléments sont soit sous forme de cations (éléments présentant des charges positives dues à la perte d'électrons), soit sous forme d'anions (éléments présentant des charges négatives dues à la présence supplémentaire d'électrons).

Concernant le lait, ces minéraux sont classés en macroéléments (concentration supérieure à 10 mg/L) et oligoéléments (concentration inférieure au mg/L). Parmi les macroéléments, le calcium, le magnésium, le potassium et le sodium sont des cations, le phosphore et le chlorure sont des anions. Des oligoéléments comme le zinc, le fer, le cuivre, le manganèse et le sélénium sont également présents.

Intérêt nutritionnel

Les minéraux laitiers sont tous intéressants d'un point de vue nutritionnel puisqu'ils participent à la croissance et au développement du nouveau-né puis au fonctionnement de l'organisme adulte. En comparaison avec les autres sources alimentaires, il est admis que le lait et les produits laitiers sont des sources significatives de calcium, magnésium, zinc et sélénium.

Le calcium représente environ 1,8 % du poids corporel de l'homme adulte, soit 1250 g pour un sujet de 70 kg. La majeure partie est localisée dans le squelette où, en association avec le phosphate, il assure sa rigidité et sa solidité. Par ailleurs, il joue des rôles essentiels dans l'excitabilité neuromusculaire. la conduction nerveuse, la contraction musculaire, la coagulation sanguine, la perméabilité membranaire, etc. L'apport de calcium se fait via l'alimentation, en particulier par le lait et les produits laitiers, qui procurent 70 % de notre apport en calcium. Si ces apports ne sont pas respectés, des carences peuvent apparaître et contribuer sur du long terme à l'ostéoporose. Le calcium du lait et des produits laitiers est particulièrement bien absorbé, notamment en présence de vitamine D.

Les autres minéraux, comme le sodium, le potassium, le chlorure ou le magnésium interviennent dans les équilibres ioniques des liquides intra et extracellulaires, ainsi que dans de nombreuses fonctions vitales en tant qu'éléments structurants ou fonctionnels.

Origine et localisation dans le lait

Les minéraux du lait proviennent exclusivement de l'alimentation des animaux, qui ne peuvent pas les synthétiser. Ils passent de la circulation sanguine au lait via les cellules de la glande mammaire. Les minéraux du sang proviennent soit de l'alimentation, soit des réserves osseuses, où le calcium, le magnésium et le phosphore sont stockés.

Dans le lait, les minéraux ont des localisations complexes qui dépendent de l'ion considéré. Le calcium, le magnésium et le phosphore sont d'une part associés aux molécules de caséines pour contribuer à la structure et à la stabilité d'un assemblage protéique appelé micelle de caséines ; c'est d'ailleurs à ce titre que la micelle de caséines est considérée comme vectrice d'importantes quantités de calcium. D'autre part, dans la phase aqueuse du lait, ces ions peuvent être liés à d'autres ions pour former des sels ou être libres (cas des ions sodium et potassium). Ces associations, communément appelées équilibres salins, sont dynamiques et réversibles. Ils dépendent des conditions physicochimiques du lait et notamment du pH et de la température.

Valeurs moyennes et variabilité

Comparativement aux fractions protéique, lipidique ou glucidique du lait, la fraction minérale est quantitativement la plus faible. Elle est classiquement mesurée par une détermination de la quantité des cendres du lait, qui va en général de 7 à 9 g/L. Les concentrations en minéraux sont relativement constantes pour une même espèce mais sont différentes selon les espèces (tableau 1). Le lait de brebis est en moyenne le plus riche en calcium, phosphore, zinc, fer et cuivre, alors que les laits de vache et de chèvre ont des teneurs en potassium plus élevées.

Facteurs de variation dans le lait

La concentration en minéraux dans le lait semble peu influencée par les facteurs d'élevage comme le type d'alimentation, la saison, la race, le stade ou le rang de lactation. La santé de la mamelle joue par contre un rôle important. En cas de mammites (lait non consommé), les concentrations en ions chlore et sodium augmentent fortement, celle en potassium diminue de façon importante, et les teneurs en phosphore, calcium et magnésium sont également réduites, mais de façon moindre.

Il est à noter que les laits transformés en industrie laitière sont des laits de grand mélange issus de nombreux troupeaux et qu'en conséquence, les variations pouvant exister sur des laits individuels passent souvent inaperçues.

Facteurs de variation dans le fromage

La fraction minérale du lait, et tout particulièrement le calcium et le phosphore, peut être plus ou moins modifiée par les traitements technologiques. Ces modifications sont quantitatives (perte de calcium) ou qualitatives (modifications des équilibres salins avec un changement de répartition entre phase aqueuse et phase micellaire).

Un traitement thermique peu intense entraîne une modification réversible des équilibres salins, alors qu'un traitement thermique plus intense affecte les équilibres minéraux de façon irréversible. Lors du refroidissement du lait à 4°C, l'effet observé est inverse de celui décrit pour les traitements thermiques : une partie du phosphate de calcium micellaire (jusqu'à 10%) peut se solubiliser, ceci étant réversible après réchauffage du lait. Lors de l'acidification pratiquée en fabrication de laits fermentés ou de caillés fromagers, les ions associés à la micelle de caséines sont solubilisés et passent dans la phase aqueuse appelée lactosérum. S'il y a élimination de ce lactosérum par égouttage, les ions sont perdus, en quantité variable selon la valeur du pH et le moment de l'égouttage par rapport à l'acidification. Ainsi, les fromages obtenus sont différemment minéralisés selon leur cinétique d'acidification et d'égouttage, les fromages frais étant les moins riches en calcium et ceux à pâte pressée cuite les plus riches. Le salage a une influence sur le taux de sel présent dans les fromages. Les minéraux présents dans le caillé ne sont ni perdus ni modifiés au cours de l'affinage, quelles que soient sa durée et ses conditions. A partir d'un caillé donné, la teneur du fromage en minéraux augmente au cours de l'affinage, proportionnellement à l'augmentation de sa teneur en matière sèche.

■ Fiche n°6. Les vitamines

Benoît GRAULET

Définition et classification

Les vitamines forment un ensemble de composés organiques actifs, indispensables à la vie d'organismes incapables de les synthétiser ; elles (ou leurs précurseurs) doivent leur être apportées par l'alimentation, en quantités infimes. Elles sont, pour la plupart, synthétisées par les plantes et les micro-organismes, très rarement par les animaux.

Il existe 13 classes de vitamines chimiquement très différentes les unes des autres, dont 4 correspondent aux vitamines liposolubles (A, D, E et K) et 9 aux vitamines hydrosolubles (C et groupe B) (tableau 1). Une classe peut être constituée d'un seul composé ou rassembler plus d'une dizaine de composés apparentés, présentant des activités biologiques le plus souvent communes mais des efficacités variables.

Intérêt nutritionnel

vitamines présentent des fonctions biologiques nombreuses, diverses et spécifiques à chacune d'elles (tableau 1). Ces fonctions ont le plus souvent été mises en évidence en établissant un rapprochement entre des conditions nutritionnelles particulières (entraînant l'état de carence en la vitamine) et l'apparition d'une maladie: vitamine C et scorbut, vitamine A et xérophtalmie (maladie de la cornée), vitamine D et rachitisme... À l'heure actuelle, les carences en vitamines sont plus fréquemment observées dans les pays en voie de développement, principalement chez la femme enceinte et le jeune enfant. Dans les pays industrialisés, les symptômes cliniques de déficience en vitamines sont rares ; cependant, des études épidémiologiques ont montré que des apports inférieurs aux recommandations sont liés à une prédisposition à des maladies chroniques telles que l'ostéoporose, le diabète, l'obésité ou encore certaines formes de cancers. Une couverture adéquate des besoins en vitamines pour la population humaine reste donc un sujet d'actualité, aussi bien dans les sociétés occidentales que dans les pays économiquement moins favorisés.

Le lait de vache contient des vitamines des 13 classes; la consommation de 250 mL de lait par jour contribue de façon non négligeable aux apports journaliers recommandés (AJR), en particulier pour les vitamines A (10 à 20 %), B_2 (30 à 50 %), B_8 (15 à 75 %) et B_{12} (40 à 60 %).

Origine dans le lait

Les vitamines A et E sont apportées dans le lait exclusivement par la ration distribuée aux ruminants. La vitamine A est présente dans les matières premières végétales (en particulier les fourrages verts), sous forme de composés précurseurs (carotènes pro-vitaminiques A) activés dans l'organisme après absorption, et/ou sous forme pré-formée (rétinol) dans l'aliment concentré et le complément vitaminique. Les vitamines C et D peuvent provenir de la ration ou être synthétisées directement par l'animal au niveau de la peau sous l'action des rayons ultra-violets du soleil pour la vitamine D, au niveau du foie pour la vitamine C. Les vitamines K et la plupart des vitamines B (B, à B_o) sont présentes dans les plantes et également synthétisées par les micro-organismes, incluant notamment les bactéries du rumen. La vitamine B₁₂ est la seule qui résulte exclusivement d'une synthèse microbienne, d'où le rôle privilégié des produits de ruminants (laitiers et carnés) comme source d'apport pour la nutrition humaine.

Valeurs moyennes et variabilité

Selon les vitamines, l'ordre de grandeur des concentrations moyennes dans le lait est extrêmement différent (tableau 2) ; ainsi, pour le lait de vache, la concentration moyenne en vitamine B₅ est supérieure à 3 mg par litre, alors qu'elle est seulement de l'ordre de quelques µg par litre pour les vitamines K ou B₁₂.

	13 classes de vitamines	Origine dans le lait	Principales fonctions biologiques	Symptômes de carences, cliniques ou sub-cliniques	AJR	Part des AJR dans 250 mL de lait (%)
⋖	Rétinol Liposoluble	Alimentation et synthèse animale	Vision, reproduction, immunité, croissance	Xérophtalmie, retard de croissance, anémie, réduction des performances de reproduction	600-900 µg/j	10-22
B_	Thiamine Hydrosoluble	Alimentation et synthèse microbienne	Métabolisme énergétique	Troubles neurologiques et cardiaques (béri-béri)	1,2 mg/j	6-13
2	Riboflavine Hydrosoluble	Alimentation et synthèse microbienne	Respiration cellulaire, métabolisme énergétique et lipidique, antioxydant cellulaire, métabolisme des bases nucléiques et des acides aminés	Inflammation des lèvres et de la langue (ariboflavinose), anémie	1,3 mg/j	31-49
മ്	Niacine Hydrosoluble	Alimentation et synthèse microbienne	Respiration cellulaire, métabolisme énergétique et lipidique, antioxydant cellulaire, métabolisme des bases nucléiques et des sucres pentoses	Dermatite, démence et diarrhée (pellagre)	12-16 mg/j	1-2
മ്	Acide pantothénique Hydrosoluble	Alimentation et synthèse microbienne	Respiration cellulaire, métabolisme énergétique et lipidique, métabolismes des bases nucléiques et des acides aminés, transmission du signal nerveux, transport des gaz sanguins	Pas de symptôme référencé	5 mg/j	16-23
മ്	Pyridoxal Hydrosoluble	Alimentation et synthèse microbienne	Métabolisme des acides aminés, transport des gaz sanguins, activation d'autres vitamines ($B_{\rm g}$ et $B_{\rm g}$)	Convulsions, anémie, atteinte rénale et dermatite, augmentation du risque de maladies cardiovasculaires, d'infarctus, de cancer et de la maladie d'Alzheimer	1,3-1,7 mg/j	5-15
å	Biotine Hydrosoluble	Alimentation et synthèse microbienne	Métabolisme énergétique et lipidique des acides aminés, d'autres vitamines (B _g et B ₁₂), régulation de l'expression de gènes	Symptômes neurologiques, chute de cheveux, plaques rouges sur le visage	20-30 µg/j	17-75
മ	Acide folique Hydrosoluble	Alimentation et synthèse microbienne	Synthèse des bases nucléiques, métabolisme des groupements monocarbonés	Anémie mégaloblastique, risques élevés de mauvais développement neurologique chez le fœtus (spina bifida, anencéphalie), augmentation du risque de maladies cardio-vasculaires	400 µg/j	41
B ₁₂	Cobalamines Hydrosoluble	Synthèse microbienne	Métabolisme de la vitamine B ₉ , métabolisme énergétique	Anémie pernicieuse, augmentation du risque de maladies cardio-vasculaires, de carcinogenèse	2,4 µg/j	36-62
O	Acide ascorbique Hydrosoluble	Alimentation	Antioxydant, métabolisme d'acides aminés, activation d'hormones, synthèse de neurotransmetteurs	Douleur des gencives, des extrémités, évènements hémorragiques, ulcération et mort (scorbut)	90 mg/j	9-0
٥	Calciférols Liposoluble	Alimentation et synthèse animale	Homéostasie du calcium	Retard de croissance et rachitisme, ostéoporose et fragilisation osseuse	200-1000 UI/j	0,5-4
ш	Tocophérols Liposoluble	Alimentation	Antioxydant, immunité	Réduction des performances de reproduction, dystrophie musculaire, nécrose hépatique, néphrose	15 mg/j	1-2
\times	Phyllo- et ménaquinones Liposoluble	Alimentation et synthèse microbienne	Antihémorragique, homéostasie du calcium, inhibition de l'apoptose, antioxydant	Syndrome hémorragique du nouveau-né, fragilisation osseuse	120 µg/j	1-16
Source	Source Tables USDA (United States Department of Agriculture) 2012	nt of Agriculture) 2012				

Tableau 1. Classification des vitamines, fonctions principales, symptômes de carences, apports journaliers recommandés (AJR) et part du lait dans les AJR.

Ces chiffres montrent également des différences notables entre espèces. Le lait de brebis est globalement plus riche en vitamines que ceux de vache et de chèvre. Le lait de chèvre semble, quant à lui, relativement pauvre en vitamines B₉ et B₁₂, et celui de vache en vitamine B₃.

Facteurs de variation dans le lait

Les facteurs de variation des teneurs du lait de vache en vitamines A (rétinol et carotènes) sont relativement bien décrits dans la littérature scientifique, mais les connaissances relatives aux autres vitamines sont moins avancées. La composition de la ration distribuée est le principal facteur de variation des teneurs vitaminiques du lait de vache. L'alimentation de la vache agit soit directement comme source de vitamines ou de leurs précurseurs, soit indirectement par la modulation des fermentations microbiennes qui peuvent jouer sur la dégradation des vitamines ou sur leur synthèse dans le tube digestif du ruminant.

Actuellement, les industriels laitiers standardisent de manière courante la composition du lait, en particulier le taux de matières grasses, ce qui entraîne par voie de conséquence la standardisation partielle des concentrations en vitamines liposolubles (A, D, E et K). De plus, ils proposent aux consommateurs des produits technologiquement supplémentés en vitamines, comme c'est le cas pour la vitamine D.

Facteurs de variation dans le fromage

Lors de la transformation du lait, les traitements technologiques peuvent conduire à une concentration des vitamines, en particulier des vitamines liposolubles associées aux matières grasses, qui vont se retrouver plus concentrées dans le beurre, la crème ou les fromages que dans le lait dont ces produits sont issus. La teneur des produits laitiers en vitamines liposolubles dépend ainsi en partie de celle du lait, même si une fraction d'entre elles, associée à la membrane du globule gras ou à des protéines du lactosérum, peut être perdue au cours du process. Les vitamines hydrosolubles du lait sont quant à elles largement perdues dans le lactosérum lors de la transformation fromagère; les vitamines du groupe B du fromage sont synthétisées par les micro-organismes au cours de la transformation et de l'affinage. Par ailleurs, la plupart des vitamines est relativement sensible aux facteurs physico-chimiques intervenant aux cours des procédés de transformation. Par exemple, les vitamines A ou E sont sensibles à l'oxydation, que ce soit par l'oxygène de l'air, la photo-oxydation ou tout autre type d'agents oxydants. Le chauffage du lait, de même que son acidification, entraînent une dégradation partielle de ces composés, du lait cru aux produits laitiers.

	Vache	Chèvre	Brebis
Référence USDA	01077	01106	01109
Vitamines liposolubles			
Α	295 à 520	400 à 622	438 à 830
D	0,3 à 0,8	0,6 à 1,1	1,8
Е	700 à 1100	300 à 700	1100
K	3 à 38	3	non déterminé
Vitamines hydrosolubles			
B ₁	300 à 460	400 à 680	650 à 800
$B_{\!\scriptscriptstyle 2}$	1600 à 1750	1300 à 2100	3200 à 3820
B_3	800 à 955	1870 à 3100	4100 à 4270
B ₅	3200 à 3730	3 100 à 4 100	3640 à 4500
B ₆	360 à 600	70 à 600	600 à 800
B ₈	20 à 60	10 à 39	9 à 93
B_{g}	19 à 53	2 à 30	2 à 70
B ₁₂	3,5 à 4,5	0,6 à 1,0	6,0 à 7,1
C ¹	0 à 10 000	10 000 à 15 000	41600 à 50000

¹La valeur nulle en vitamine C du lait de vache (référence 01077, taux butyreux à 3,25%) doit être considérée avec précaution, puisque pour la référence 01078 correspondant également à du lait de vache (taux butyreux à 3,7%), la concentration de vitamine C est 15 000 µg/litre.

Tableau 2. Concentrations en vitamines des laits de vache, chèvre et brebis (en μg/L).

Source Tables USDA (United States Department of Agriculture) 2012

■ Fiche n°7. Les composés phénoliques et les terpènes

Agnès CORNU

Définition et classification

Composés phénoliques et terpènes sont des métabolites secondaires des plantes, c'est-à-dire des composés organiques qui ne participent pas directement à leurs processus vitaux, mais assurent des fonctions importantes, physiologiques comme la résistance aux maladies, ou écologiques, notamment dans les relations des plantes entre elles ou avec les animaux. Les composés phénoliques et les terpènes ont des propriétés odorantes et anti-microbiennes; ce sont les composants majoritaires des huiles essentielles, largement utilisées en pharmacie et en cosmétologie. Dans notre alimentation, ils sont à considérer comme des micronutriments, au même titre que les vitamines.

Les composés phénoliques et les terpènes comprennent des molécules de taille très importante, voire infinie (exemple des lignines pour les composés phénoliques, du latex pour les terpènes). Si des terpènes de grande taille sont retrouvés dans le lait, c'est aux terpènes volatils, monoterpènes (10 atomes de carbone) et sesquiterpènes (15 atomes de carbone), en tant qu'éléments de la typicité des produits laitiers, que les chercheurs se sont intéressés depuis une quarantaine d'années. Les terpènes sont lipophiles et associés à la matière grasse du lait. Les composés phénoliques sont plutôt hydrophiles et majoritairement associés à la phase aqueuse du lait. On peut classer les composés phénoliques solubles en phénols simples, acides phénoliques, flavonoïdes, lignanes et stilbènes. La taille maximale des polyphénols alimentaires que l'on retrouve dans le lait semble être celle des lignanes (18 atomes de carbone). La majorité des composés phénoliques correspond à des phénols simples et dérivés d'acides phénoliques issus de la dégradation de structures de plus grande taille. Ils sont fréquemment liés à des sucres, à des sulfates ou à des phosphates, ce qui augmente leur solubilité.

Intérêt nutritionnel

Les terpènes et composés phénoliques contenus dans les fruits et légumes, le thé, le café, ou le chocolat, sont des antioxydants et certains ont des propriétés intéressantes pour la santé humaine, pour la prévention de certains cancers et des maladies cardiovasculaires. L'intérêt anti-oxydant des terpènes et des composés phénoliques du lait est négligeable, eu égard aux faibles quantités apportées par rapport à celles fournies par les fruits et légumes. Leurs propriétés æstrogéno-mimétiques, en revanche, sont aujourd'hui très surveillées. Les phytoestrogènes sont des composés produits par les plantes qui ont une structure ressemblant à celle de l'estradiol, hormone féminine qui intervient dans la reproduction, mais aussi dans d'autres processus physiologiques comme la calcification osseuse. Les phytoestrogènes appartiennent aux familles des flavonoïdes, des coumestanes et des isoflavones. Certains acquièrent leurs propriétés lors de leur passage dans le tube digestif des mammifères. C'est le cas de l'équol ou des «lignanes de mammifères». Ces composés se retrouvent dans le lait.

Bien que la concentration d'un lait de vache riche en isoflavones ne dépasse pas 0,12 ppm, alors que celle du jus de soja est plutôt de l'ordre de 60 ppm, le lait peut être une source non négligeable de phytoestrogènes pour les populations occidentales, qui consomment peu de soja. Les phytoestrogènes sont intéressants pour certaines populations comme les femmes ménopausées, mais peuvent présenter un risque pour d'autres (enfants par exemple).

Origine dans le lait

Les terpènes et les composés phénoliques sont principalement issus des fourrages ingérés par les animaux. Ils peuvent également avoir pour origine le catabolisme des protéines corporelles ou une contamination (pollution, peintures, produits d'entretien, etc.). Des compléments alimentaires ou des traitements par phytothérapie peuvent aussi apporter des quantités importantes

de terpènes ou de composés phénoliques. Les terpènes sont transférés des fourrages au lait puis au fromage avec très peu de modifications. Les composés phénoliques subissent au contraire des modifications parfois importantes dans le tractus digestif et dans le foie avant d'être transférés dans le lait via la circulation sanguine.

Valeurs moyennes et variabilité

La concentration en composés phénoliques dans le lait ne dépasse pas le mg/kg ou ppm. Les données disponibles actuellement proviennent d'expérimentations et ne sont pas généralisables à la production laitière en exploitation. Des différences existent entre lait de vache, de chèvre et de brebis, vu les différences d'alimentation.

La concentration en terpènes dans le lait a été rarement quantifiée de façon directe ; par des mesures indirectes, elle a été estimée à environ $1~\mu L/L$ dans du lait issu d'animaux pâturant des prairies permanentes de montagne très diversifiées, elle est environ dix fois plus faible lorsque les vaches sont nourries avec des fourrages conservés.

Facteurs de variation dans le lait

Il existe une relation forte entre les terpènes et composés phénoliques contenus dans les fourrages consommés par les animaux et ceux contenus dans leur lait.

Les composés phénoliques et les terpènes varient dans le lait en quantité et en diversité selon les familles botaniques des fourrages ingérés. Les plantes fourragères cultivées contiennent très peu de terpènes, alors que certaines plantes de prairies naturelles en contiennent une grande variété. En revanche, toutes les plantes, y compris les graminées et légumineuses, contiennent des jeux relativement spécifiques de composés phénoliques.

Les composés phénoliques et les terpènes varient également selon le stade de maturité et la localisation géographique des plantes. En moyenne, les teneurs en terpènes sont plus élevées dans les laits de pâturage que dans les laits d'hiver, quand les animaux ingèrent des fourrages conservés ; elles sont aussi plus élevées dans les laits d'altitude que dans les laits de plaine, où la diversité floristique et

la part d'herbe dans la ration sont en général plus faibles.

Les composés phénoliques et les terpènes présentent un intérêt tout particulier en tant qu'éléments de typicité (lien au terroir) du lait et des produits laitiers. La relation entre alimentation et composés phénoliques et terpènes dans le lait est suffisamment forte pour que ces derniers soient utilisés comme traceurs de l'alimentation des vaches.

Facteurs de variation dans le fromage

Les terpènes et les composés phénoliques se retrouvent également dans le fromage. Certains terpènes peuvent disparaître sous l'action des microorganismes lors de la transformation fromagère, mais les profils terpéniques du fromage reflètent encore suffisamment ceux de l'alimentation des vaches pour permettre de la tracer. L'influence des différentes pratiques de transformation fromagère sur les teneurs et la composition des composés phénoliques dans le fromage n'est pas connue à l'heure actuelle.

■ Références bibliographiques

Abilleira E., de Renobales M., Najer, A.I., Virto M., de Gordoa J.C.R., Perez-Elortondo F.J., Albisu M, Barron L.J.R., 2010. An accurate quantitative method for the analysis of terpenes in milk fat by headspace solid-phase microextraction coupled to gas chromatography-mass spectrometry. Food Chemistry, 120(4), 1162-1169.

Addeo F., Chianese L., Salzano A., Sacchi R., Cappuccio U., Ferranti P., Malorni A., 1992. Characterisation of the 12% trichloroacetic acid-insoluble oligopeptides of Parmigiano-Reggiano cheese. Journal of Dairy Research, 59, 401-411.

Addeo F., Chianese L., Sacchi R., Spagna Musso S., Ferranti P., Malorni A., 1994. Characterization of the oligopeptides of Parmigiano-Reggiano cheese soluble in 120g trichloroacetic acid/l. Journal of Dairy Research, 61, 365-374.

Addis M., Pinna G., Molle G., Fiori M., Spada S., Decandia M., Scintu M.F., Piredda G., Pirisi A., 2006. The inclusion of a daisy plant (Chrysanthemum coronarium) in dairy sheep diet: 2. Effect on the volatile fraction of milk and cheese. Livestock Science, 101, 68-80.

Adler S.A., 2012. Fatty acid composition and fat-soluble vitamin concentration in organically produced bovine milk: effect of botanical composition in forages from short-term or long-term grasslands. Norwegian University of Life Science, Philosophiae Doctor Thesis, 281p.

Afssa, 2010. Avis de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments relatif à l'actualisation des apports nutritionnels conseillés pour les acides gras. Saisine n°2006-SA-0359, 10p.

Agabriel C., Ferlay A., Journal C., Sibra C., Teissier D., Grolier P., Bonnefoy J.C., Rock E., Chilliard Y., Martin B., 2004. Composés d'intérêt nutritionnel de laits de grand mélange : teneurs en acides gras et en vitamines selon l'altitude et la saison. Rencontres Recherches Ruminants, 11, 51-54.

Alais C., 1974. Science du lait, principes des techniques laitières. 3° édition, 807p.

Alais, C, 1975. Science du lait, principes des techniques laitières, 3° édition, Edition SEPAIC, Paris, 807p.

Ali A.E., Andrews A.T., Cheeseman G.C., 1980. Influence of storage of milk on casein distribution between the micellar and soluble phases and its relationship to cheese making parameters. Journal of Dairy Research, 47, 371-382.

Amram Y., Delespaul G., Vandeweghe J., Schneid N., Lenoir J., 1982. Le refroidissement du lait et son comportement en fromagerie. II. Efficacité de divers traitements de correction. Revue Laitière Française, 404, 53-57.

Andersen C., Nielsen T.S., Purup S., Kristensen T., Eriksen J., Soegaard K., Sorensen J., Frette X. C., 2009a. Phyto-oestrogens in herbage and milk from cows grazing white clover, red clover, lucerne or chicory-rich pastures. Animal, 3(8), 1189-1195.

Andersen C., Weisbjerg M.R., Hansen-Moller J., Sejrsen K., 2009b. Effect of forage on the content of phyto-oestrogens in bovine milk. Animal, 3(4), 617-622.

Andersson I., Öste R., 1994. Nutritional quality of pasteurized. Vitamin B₁₂, folate and ascorbic acid content during storage. International Dairy Journal, 4, 161-172.

Andersson I., Öste R., 1995. Nutritional quality of heat processed liquid milk. In Heat induced changes in milk. IDF, Brussels, Belgium, 279-307.

Anses, 2011. Actualisation des apports nutritionnels conseillés pour les acides gras. Rapport d'expertise collective. Edition scientifique, 323 p.

Antignac J.P., Cariou R., Le Bizec B., Andre, F., 2004. New data regarding phytoestrogens content in bovine milk. Food Chemistry, 87(2), 275-281.

Arilait Recherche, 2004. Manuel du salage en fromagerie, 69p.

Arnould V., Hammami H., Soyeurt H., Gengler N., 2010. Short communication: Genetic variation of saturated fatty acids in Holsteins in the Walloon region of Belgium. Journal of Dairy Science, 93, 4391-4397.

Baldi A., 2005. Vitamin E in dairy cows. Livestock Production Science, 98, 117-122.

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. Journal of Dairy Science, 92, 3392-3396.

Bérodier A., 2010. Assemblée générale du Centre Technique des Fromages Comtois, 18 mars 2010, Chaffois.

Besle J.M., Lamaison J.L. et al., 2005. «Flavonoids and other phenolics in milk as a putative tool for traceability dairy production systems.» Indicators of Milk and Beef Quality (112), 345-350.

Besle J.M., Viala D., Martin B., Pradel P., Meunier B., Berdagué J.L., Fraisse D., Lamaison J.L., Coulon J.B., 2010, Ultraviolet-absorbing compounds in milk are related to forage polyphenols. Journal of Dairy Science, 93, 2846-2856.

Billom P., Pomiès D., 2006. Le point sur la robotisation de la traite 15 ans après l'apparition des premiers systèmes dans les fermes. Rencontres Recherches Ruminants, 13, 143-150.

Bleck G.T., Wheeler M.B., Hansen L.B., Chester-Jones H., Miller D.J., 2009. Reproduction in Domestic animal, 44, 2, 241-247.

Bocquier F. et Caja G., 2001. Production et composition du lait de brebis : effets de l'alimentation. Inra Productions Animales, 14, 2, 129-140.

Boubezari M.T., 2010. Contribution à l'étude des caractéristiques physicochimiques et mycologiques du lait chez quelques races bovines, ovines et caprines dans quelques élevages de la région de Jijel. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Magister en médecine vétérinaire, Université Mentouri de Constantine, 112p.

Boufaïed H., Chouinard P.Y., Tremblay G.F., Petit H.V., Michaud R., Bélanger G., Fatty acid in forages. I. Factors affecting concentrations. Canadian Journal of Animal Science, 83, 501-511.

Bramley P.M., Elmadfa I., Kafatos A., Kelly F.J., Manios Y., Roxborough H.E., Schuch W., Sheehy P.J.A., Wagner K-H., 2000. Review. Vitamin E. Journal of the Science of Food and Agriculture, 80, 913-938.

Brandt M., Haeussermann A., Hartung E., 2010. Invited review: technical solutions for analysis of milk constituents and abnormal milk. Journal of Dairy Science, 93, 427-36.

Brunschwig G., Sibra C., Chevillot B., Michelin Y., Delbruel B., Valadier G., Puthod R., 2000. Terroirs d'élevage laitier du Massif central : identification et caractérisation. Editions ENITA. Collection Etudes n°6, Clermont-Ferrand, 224p.

Butcha, R,. 1991. Ovine lactoferrin - Isolation from colostrum and characterization. Journal of Dairy Research, 58, 211-218.

Butikofer U., Meyer J., Sieber R., Wechsler D., 2007. Quantification of the angiotensin-converting enzyme-inhibiting tripeptides Val-Pro-Pro and Ile-Pro-Pro in hard, semi-hard and soft cheeses. International Dairy Journal, 17, 968-975.

Butikofer U., Meyer J., Sieber R., Walther B., Wechsler D., 2008. Occurrence of the angiotensin-converting enzyme inhibiting tripeptides Val-Pro-Pro and Ile-Pro-Pro in different cheese varieties of Swiss origin. Journal of Dairy Science, 91, 29-38.

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. Journal of Dairy Science, 90, 5651-5664.

Cantor M.D., van den Tempel T., Hansen T.K., Ardö Y., 2004. Blue cheese. In Cheese: chemistry, physics & microbiology. Vol. 2, 3rd edition, Fox P., McSweeney P., Cogan T., Guinee T. Elsevier, 175-198.

Carpino S., Mallia S. et al., 2004. Composition and aroma compounds of Ragusano cheese: Native pasture and total mixed rations. Journal of Dairy Science 87(4), 816-830.

Ceballos L.S., Morales E.R., Martínez L.P., Extremera F.G., Sampelayo M.R.. 2009. Utilization of nitrogen and energy from diets containing protein and fat derived from either goat milk or cow milk. Journal of Dairy Research, 76,497-504.

CEPIL, 1987. Le lait matière première de l'industrie laitière, Inra publication, 393p.

Chardigny J.M., 2008. Mise au point sur les acides gras *trans*. Science des aliments, 28, 24-28.CNIEL, 2007. Histoire, sociologie et image du lait. Questions sur, hors série n°2, 8p.

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. 10th International Meeting on Mountain Cheese, 14-15 september 2011, Dronero, Italy.

Chatelard C., 2010. Détermination des teneurs en composés d'intérêt nutritionnel dans les fromages AOP Saint-Nectaire fermiers et laitiers, 34p.

Chauveau-Duriot B., Thomas D., Portelli J., Doreau M., 2005. Effet du mode de conservation sur la teneur en caroténoïdes des fourrages. Rencontres Recherches Ruminants, 12, 117.

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

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. European Journal of Lipid Science and Technology, 109, 828-855.

Chilliard Y., Glasser F., Enjalbert F., Ferlay A., Bocquier F., Schmidely P., 2007. Données récentes sur les effets de l'alimentation sur la composition en acides gras du lait de vache, chèvre et brebis. Rencontres Recherches Ruminants, 14, 321-328

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. Cahiers de nutrition et de diététique, 45, 310-319.

Chilliard Y., Graulet B., Glasser F., Martin B., Ferlay A., 2012. Alimentation animale et qualité du lait. Nutrition, Aliments Fonctionnels, Aliments Santé, 10, 53-58.

Choisy C., Desmazeaud M., Gripon J-C., Lamberet G., Lenoir J., 1997. La biochimie de l'affinage. In Le fromage, 3° édition, coordonné par Eck A. et Gillis J.-C., Tec et Doc Lavoisier, Paris, 86-161.

CIGC, 2008. Composition nutritionnelle du Comté, 109p., non publié.

Clare D.A., Catignani G. L., Swaisgood H. E., 2003. Biodefense properties of milk: the role of antimicrobial proteins and peptides. Current Pharmaceutical Design, 9, 1239-1255.

CNAOL, 2013. Produits laitiers AOP/AOC, les chiffres clé 2012, 4p.

CNERNA-CNRS, AFSSA, 2002. Apports nutritionnels conseillés pour la population française. Coordonné par Ambroise Martin, Editions TEC et DOC, 605p.CNIEL, 2012.

CNIEL, 2014. L'économie laitière en chiffres, 184p.

CNIEL, 2012. Les grandes études nutrition santé et produits laitiers, best of 2012. Produits laitiers et diminution du risque cardiovasculaire. 20p.

CNIEL, s.d. « Apports nutritionnels des produits laitiers ». In Les produits laitiers Le lait la vie !. En ligne. http://www.produits-laitiers.com/alimentation-et-sante/apports-nutritionnels>. Consulté le 21 novembre 2012.

CNRS-CNERNA, 1994. Apports nutritionnels conseillés pour la population française. Sous la direction de Dupin H., Abraham J. et Giachetti I, coordonné par Guéguen L., Lemarchal P. et Potier de Courcy G., Editions TEC et DOC, 146p.

Collomb M., Bisig W., Bütikofer U., Sieber R., Bregy M., Etter L., 2008. Fatty acid composition of mountain milk from Switzerland: comparison of organic and integrated farming systems. International Dairy Journal, 18, 976-982.

Coppa M., Verdier-Metz I., Ferlay A., Pradel Ph., Didienne R., Farruggia A., Montel M.C., Martin B., 2011. Effect of different grazing systems on upland pastures compared with hay diet on cheese sensory properties evaluated at different ripening times. International. Dairy Journal, 2, 815-822.

Coppa M., Ferlay A., Monsallier F., Verdier-Metz I., Pradel P., Didienne R., Montel M.C., Pomiès D., Martin B., Farruggia A., 2012. Le système de pâturage influence-t-il les caractéristiques nutritionnelles et sensorielles des fromages ? Fourrages, 209, 33-41.

Coppa M., Ferlay A., Chassaing C., Agabriel C., Glasser F., Chilliard Y., Borreani G., Barcarolo R., Baars T., Kusche D., Harstad O.M., Verbič J., Golecký J., Martin B., 2013. Prediction of bulk milk fatty acid composition based on farming practices collected through on-farm surveys. Journal of Dairy Science, 96, 1-15.

Cornu A., Carnat A.P., Martin B., Coulon J.B., Lamaison J.L., Berdagué J L., 2001. Solid-phase microextraction of volatile components from natural grassland plants. Journal of Agricultural and Food Chemistry 49 (1), 203-209.

Cornu A., Kondjoyan N., Martin B., Ferlay A., Pradel P., Coulon J.B., Berdagué J.L., 2002. Vers une reconnaissance des principaux régimes alimentaires des vaches à l'aide des profils terpéniques du lait. Rencontres Recherches Ruminants, 9, 370.

Cornu A., Kondjoyan N., Carnat A.P., Martin B., Berdagué J.L., 2003. Nature des composés terpéniques de laits de vaches alimentées avec différents régimes. Rencontres Recherches Ruminants, 10, 236.

Cornu A., Kondjoyan N., Martin B., Verdier-Metz I., Pradel P., Berdague J.L., Coulon J.B.. 2005. Terpene profiles in Cantal and Saint-Nectaire-type cheese made from raw or pasteurised milk. Journal of the Science of Food and Agriculture ,85, 2040-2046.

Cornu A., Viala D., Reynaud A., Kerveillant I., Besle J.M., Graulet B., 2009. Discrimination de laits obtenus avec différents régimes sur la base de leurs profils en composés phénoliques. Rencontres Recherches Ruminants, 16, 167.

Coudray C., 2003. Intérêt et rôle des oligoéléments en nutrition préventive, contribution du lait et des produits laitiers, dans Minéraux et produits laitiers, ouvrage collectif coordonné par Gaucheron F., éditions Tec et Doc, 922p., 740-761.

Coulon J.B., Chilliard Y., Rémond B., 1991. Effets du stade physiologique et de la saison sur la composition chimique du lait de vache et ses caractéristiques technologiques (aptitude à la coagulation, lipolyse). Inra Productions Animales, 4 (3), 219-228.

Coulon J.B., D'Hour P., 1994. Effet du niveau des apports énergétiques sur les performances de vaches laitières de race Holstein ou Tarentaise. Annales de Zootechnie, 43, 355-368.

Coulon J.B., Chamba J.F., Martin B., 1996. Qualité du lait et des fromages, Gis Alpes du Nord, coordonné par Hauwuy A., 89p.

Coulon J.B., Pradel P., Verdier I., 1997. Effect of forage conservation (hay or silage) on chemical composition of milk. Annales de Zootechnie, 46, 21-26.

Coulon J.B., Gasqui P., Barnouin J., Ollier A., Pradel P., Pomiès D., 2002. Effect of mastitis and related-germ on milk yield and composition during naturally-occuring udder infections in dairy cows. Anima Research, 51, 383-393.

Coulon J.B., Delacroix-Buchet A., Martin B., Pirisi A., 2005. Facteurs de production et qualité sensorielle des fromages. Inra Productions Animales, 18, 49-62.

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. Journal of Dairy Science, 89, 1956-1969.

Croguennec T., Li N., Phelebon L., Garnier-Lambrouin F., Gesan-Guiziou G., 2012. Interaction between lactoferrin and casein micelles in skimmed milk. International Dairy Journal, 27, 34-39.

Daly D.F.M., McSweeney P.L.H., Sheehan J.J., 2010. Split defect and secondary fermentation in Swiss-type cheeses - A review. Dairy Science and Technology, 90, 3-26.

Debier C., Pottier J., Goffe C., Larondelle Y., 2005. Present knowledge and unexpected behaviours of vitamins A and E in colostrum and milk. Livestock Production Science, 98, 135-147.

Debry G., 2001. Lait, nutrition et santé, coordonné par G. Debry, Technique et Documentation, 566p.

De la Fuente M.A., Requena T., Juarez M., 1997. Salt balance in ewe's and goat's milk during storage at chilling and freezing temperatures. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 45, 82-88.

De Luca H.F., 2004. Overview of general physiologic features and functions of vitamin D. American Journal of Clinical Nutrition, 80 (Suppl.), 1689S-1696S.

Depeint F., Robert Bruce W., Shangari N., Mehta R., O'Brien P.J., 2006. Mitochondrial function and toxicity: role of the B vitamin family on mitochondrial energy metabolism. Chemico-biological Interactions, 163, 94-112.

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. Animal Feed Science Technology, 131, 168-206.

Institute of Medecine (US) Standing Committee on the scientific evaluation of Dietary Reference Intakes, 1997. Dietary Reference Intakes for Calcium, Phosphorous, Magnesium, Vitamin D and Fluoride. Recommended Dietary Allowances, Xth ed. Washington, DC: National Academy of Sciences, 448p.

Institute of Medecine (US) Standing Committee on the scientific evaluation of Dietary Reference Intakes, 2000. Dietary Reference Intakes for vitamin C, vitamin E, Selenium and Carotenoids. Recommended Dietary Allowances, Xth ed. Washington, DC: National Academy of Sciences, 529p.

Drewnowski A., 2010a. Nutrient rich foods index helps identify healthy, affordable foods. American Journal of Clinical Nutrition, 91:1095S-1101S.

Drewnowski A., 2010b. The costs of US foods as related to their nutritional value. American Journal of Clinical Nutrition, 92:1181-1188.

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 Chemistry, 126, 762-771.

Dumont J. P. et Adda J., 1978. Occurrence of Sesquiterpenes in Mountain Cheese Volatiles. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 26 (2), 364-367.

Dupont D., Arnould C., Rolet-Repecaud O., Duboz G., Faurie F., Martin B., Beuvier E., 2006. Determination of bovine lactoferrin concentrations in cheese with specific monoclonal antibodies. International Dairy Journal, 16, 1081-1087.

Duriot B., Pradel P., Nozière P., Troquier O., Martin B., Cirié C., Graulet B., 2010. Couleur et teneur en caroténoïdes et vitamine A du plasma et du lait chez la vache au cours de la lactation. Rencontres Recherches Ruminants, 17, 400.

Elgersma A., Tamminga S., Dijkstra J., 2006. Lipids in herbage. Pages 175-194 in Fresh herbage for dairy cattle. Elgersma A., Dijkstra J., Tamminga S., editions Springer, Netherlands.

European Food Safety Authority, 2008. Scientific opinion of the panel on additives and products or substances used in animal feed on a request from the European Commission on the consequences for the consumer of the use of vitamin A in animal nutrition. European Food Safety Authority Journal, 873, 1-81.

Esvan S., Dragan C., Varenne A., Astruc J.M., Barillet F., Boichard D., Brunschwig P., Dubrulle A., Faucon-Lahalle F., Ferlay A., Lagriffoul G., Larroque H., Legarto J., Palhière I., Peuraud J.L., Rupp R., Brochard M., 2010. PhénoFinlait, 1^{cts} résultats: influence de l'alimentation, de l'état physiologique et de la génétique sur la composition en acides gras des laits de vache, brebis et chèvre. Rencontres Recherches Ruminants, 17, 385-388.

FAO, 1981. Teneur des aliments en acides aminés et données biologiques sur les protéines, Partie I, Section I 10. Lait et produits laitiers, 3° édition.

FAO, 1995. Le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine. Collection FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture), Alimentation et nutrition, 28, 271p.

FAO, 2011. Dietary protein quality evaluation in human nutrition. Report of an FAO Expert Consultation, 92, 31 March–2 April 2011, Auckland, New Zealand, 66p.

Farnaud S., Evans R.W., 2003. Lactoferrin - a multifunctional protein with antimicrobial properties. Molecular Immunology, 40,395-405.

Faye B., Landais E., Coulon J.B., Lescourret F., 1994. Incidence des troubles sanitaires chez la vache laitière : bilan de 20 années d'observation dans trois troupeaux expérimentaux. Inra Productions Animales, 7 (3), 191-206.

Feinberg M., Favier J.C., Ireland-Ripert J., 1987. Répertoire général des aliments. Tome 2 – Table de composition des produits laitiers. Eitions Tec & Doc Lavoisier, Paris.

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 Science and Technology, 88, 193-215.

Ferlay A., Andrieu J.P., Pomies D., Martin-Rosset W., Chilliard Y., 2002. Effet de l'ensilage enrubanné d'herbe de demi-montagne sur la composition en acides gras d'intérêt nutritionnel du lait de vache. Rencontres Recherches Ruminants, 9, 365.

Ferlay A., Martin B., Pradel P., 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. Journal of Dairy Science, 89, 4026-4041.

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 v. evening milking on milk fatty acid profiles in Holstein and Montbeliarde cows. Animal, 4, 4, 627-640.

Fernandez C., Astie, C., Rock E., Coulon J.B., Berdagué J.L., 2003. Characterization of milk by analysis of its terpene fractions. International Journal of Food Science and Technology, 38 (4), 445-451.

Ferranti P., Barone F., Chianese L., Addeo F., Scaloni A., Pellegrino L., Resmini P., 1997. Phosphopeptides from Grana Padano cheese: nature, origin and changes during ripening. Journal of Dairy Research, 64, 601-615.

Ferreres F., Andrade P.B., Valentao P., Gil-Izquierdo A., 2008. Further knowledge on barley (Hordeum vulgate L.) leaves O-glycosyl-C-glycosyl flavones by liquid chromatography-UV diode-array detection-electrospray ionisation mass spectrometry. Journal of Chromatography A, 1182 (1), 56-64.

Fondation de technologie laitière du Québec, 2002, réimprimé en 2010. Science et technologie du lait, transformation du lait, 599p.

Fournier S., 1992. Les paramètres de fabrication des fromages à pâte pressée non cuite. Etude sur fromage modèle. Etude ITG DC,1992 - 10 - B.

Fox P.F., 1982. Heat-induced coagulation of milk. In Fox P.F. (ed.), Developments in dairy chemistry, vol. 1, Applied Science Publishers, 189-228.

Fraisse D., Carnat A., Viala D., Pradel P., Besle J.M., Coulon J.B., Felgines C., Lamaison J.L., 2007. Polyphenolic composition of a permanent pasture: Variations related to the period of harvesting. Journal of the Science of Food and Agriculture, 87, 2427-2435.

Gagnaire V., Mollé D., Herrouin M., Léonil J., 2001. Peptides identified during Emmental cheese ripening: origin and proteolytic systems involved. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 49, 4402-4413.

Gagnaire V., Piot M., Mollé D., Jardin J., Ferré A., Duboz G., Buchin S., 2009. Phosphopeptides in hard cooked type cheeses are only partially degraded by peptidases of thermophilic lactic acid bacteria. 4th IDF Dairy Science & Technology week. Rennes, France. 20-4-2009, poster.

Gagnaire V., Lortal S., Berthier F., Buchin S., 2012. Modulating the bioactive peptides content in swiss cheeses by combinations of thermophilic lactobacilli strains and species. 6th IDF Cheese Ripening & Technology Symposium, May 21-24, 2012. p.66.

Gaucheron F., 2005. The minerals of milk. Reproduction Nutrition Development., 45, 473-483.

Girard C. L., Matte J. J., Tremblay G. F., 1995. Gestation and lactation of dairy cows: a role for folic acid? Journal of Dairy Science, 78, 404-411.

Girard C. L., Lapierre H., Matte J. J., Lobley G. E., 2005. Effects of dietary supplements of folic acid and rumen-protected methionine on lactational performance and folate metabolism of dairy cows. Journal of Dairy Science, 88, 660-670.

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

Graulet, B., 2010. Vitamins naturally occuring in bovine milk. In: M. Griffiths, Woodhead Publishing Ltd (Eds) Improving the safety and quality of milk (2): Improving quality in milk products. Cambridge, UK, pp 229-251.

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 $\rm B_{12}$ on metabolism of dairy cows in early lactation. Journal of Dairy Science, 90, 3442-3455.

Graulet B, Martin B, Pomiès D, 2009. Effets de la réduction de la fréquence de traite sur les concentrations en vitamines et caroténoïdes du lait de vache. Rencontres Recherches Ruminants, 16, 166.

Graulet B., Martin B., Agabriel C., Girard C.L., 2012. Vitamins in milks. In: Y.W. Park and G.F.W. Haenlein, John Wiley & Sons Ltd (Eds) Milk and dairy products in human nutrition: production, composition and health. First Edition, Hoboken, USA, 200-219.

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.

Griffoul B., 2012. La monotraite, une solution pour réduire l'astreinte. Pâtre, 595, 31-32.

Gueguen L., Pointillart A., 2000. The bioavailability of dietary calcium. Journal of the American College of Nutrutrition, 19, 119S-136S.

Guiadeur M., 2012. Détermination des teneurs en composés d'intérêt nutritionnel des fromages AOP Bleu d'Auvergne, Fourme d'Ambert et Cantal, 62p.

Ha J.K., Lindsay R.C., 1991. Contributions of cow, sheep and goat milks to characterizing branched-chain fatty acid and phenolic flavours in varietal cheeses. Journal of Dairy Science, 71, 3267-3274.

Haug A., Hostmark A., Harstad O., 2007. Bovine milk in human nutrition - a review. Lipids in Health and Disease, 6, 25.

Hoikkal, A., Mustonen E., Saastamolnen I., Jokela T., Taponen J., Hannu S., Wahala K., 2007. High levels of equol in organic skimmed Finnish cow milk. Molecular Nutrition & Food Research, 51 (7), 782-786.

Holick M.F., Chen T.C., 2008. Vitamin D deficiency: a worldwide problem with health consequences. American Journal of Clinical Nutrition, 87 (suppl.), 1080S-1086S.

Hormaetxe K., Esteban R., Becerril J., Garcia-Plazaola J.I., 2005. Dynamics of the α -tocopherol pool as affected by external (environmental) and internal (leaf age) factors in Buxus Sempervirens leaves. Physiologica Plantarum 125, 333-344.

Hurtaud C., Dutreuil M., Coppa M., Agabriel C., Martin B, 2014. Characterization of milk from feeding systems based on herbage or corn silage with or without flaxseed and authentication through fatty acid profile. Dairy Science and Technology, 94, 103-123.

INRA, 2007. Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux - Valeurs des aliments. Tables Inra 2007. Editions Quae, 307p.

INRA et AFZ, 2002. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage. Coordonné par Sauvant D., Perez J.M. et Tran G., Inra Editions, 301p.

Institut de l'Elevage, 2011. Les acides gras du lait de vache. Composition et maîtrise par l'alimentation. En partenariat avec UMT Riel, Cniel, Inra. Collection Synthèse, 36p.

Institut de l'élevage, 2013. Chiffres clé 2012, Productions bovines lait et viande, Groupe économie du bétail (GEB), supplément à Tendance n°227, 12p.

Institut de l'élevage, 2013. Chiffres clé 2012, Productions caprines lait et viande, Groupe économie du bétail (GEB), 10p.

Institut de l'élevage, 2013. Chiffres clé 2012, Productions ovines lait et viande, Groupe économie du bétail (GEB), 12p.

Institut de l'Elevage et France Conseil Elevage, 2012. Résultats du contrôle laitier des espèces bovine, caprine et ovine, France 2012. Compte rendu n°001372011 MD/JMA, 151p.

Jahreis G., Fritsche J., Kraft J., 1999. Species-dependent, seasonal and dietary variation of CLA in milk. In: Advances in Conjugated Linoleic Acid Research, pp.215-225 [Yurawecz MP, Mossoba MM, Kramer JKG, Pariza MW, Nelson GJ (eds.)]. 1st ed., AOCS Publishing, Champaign, IL.

Jarmolowska B., Kostyra E., Krawczuk S., Kostyra H.. 1999. b-casomorphin-7 isolated from Brie cheese. Journal of Science of Food and Agriculture, 79, 1788-1792.

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

Jensen S. K., Johannsen A. K., Hermansen J. E., 1999. Quantitative secretion and maximal secretion capacity of retinol, beta-carotene and alpha-tocopherol into cows' milk. Journal of. Dairy Research, 66, 511-522.

Johnson M., Law B.A., 2010. The origins, development and basic operations of cheesemaking Technology. In Technology of cheesemaking 2nd edition, Law B.A., Tamine A.Y., Wyley-Blackwell, 68-97.

Johnston L. A., Chew B. P., 1984. Peripartum changes of plasma and milk vitamin A and beta-carotene among dairy cows with or without mastitis. Journal of Dairy Science, 67, 1832-1840

Journal Officiel de la République Française, 1987. Règlement CEE n°1898/87 du conseil du 2 juillet 1987, concernant la protection de la dénomination du lait et des produits laitiers lors de leur commercialisation. JO L 182 du 3 juillet 1987, 36-40.

Journal Officiel de l'Union Européenne, 2011. Règlement UE n°1169/2011 du Parlement européen et du Conseil du 25 octobre 2011, concernant l'information des consommateurs sur les denrées alimentaires, modifiant les règlements (CE) n°1924/2006 et CE n°1925/2006 du Parlement européen et du Conseil et abrogeant la directive 87/250/CEE de la Commission, la directive 90/496/CEE du Conseil, la directive 1999/10/CE de la Commission, la directive 2000/13/CE du Parlement européen et du Conseil, les directives 2002/67/CE et 2008/5/CE de la Commission et le règlement (CE) n°608/2004 de la Commission. JO L 304 du 22 novembre 2011, 18-63.

Kälber T., Meier J.S., Kreuzer M., Leiber F., 2011. Flowering catch crops used as forage plants for dairy cows: influence on fatty acids and tocopherols in milk. Journal of Dairy Science, 94, 1477-1489.

Kamiya Y., Kamiya M., Tanaka M., 2010. The effect of high ambient temperature on Ca, P and Mg balance and bone turnover in high-yielding dairy cows. Animal Science Journal, 81, 4, 482–486.

Kelsey J.A., Corl B.A., Collier R.J., Bauman D.E., 2003. The effect of breed, parity, and stage of lactation on conjugated linoleic acid (CLA) in milk fat from dairy cows. Journal of Dairy Science, 86 (8), 2588-2597.

Kilic M., Lindsay R.C., 2005. Distribution of conjugates of alkylphenols in milk from different ruminant species. Journal of Dairy Science, 88, 7-12.

Kilic M., Lindsay R.C., 2005. Enrichment of cheeses manufactured from cow's and sheep's milk blends with sheep-like species-related alkylphenols. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 53, 1707-1712.

Kilic M., Lindsay R.C., 2006. Arylsulphatase activity in milk and rennet from different sources. International Dairy Journal, 16, 88-91.

Komara M, Marnet P.G., 2009. Conduite en monotraite chez la chèvre alpine : application dès la mise bas ou après une à trois semaines de traite biquotidienne ou de conduite mixte monotraite/tétée. Rencontres Recherches Ruminants, 16, 179-182.

Kondily E., Katsiari M., Voutsinas L., 2007. Variations of vitamin and mineral contents in raw goat milk in the indigenous Greek breed during lactation. Food Chemistry, 100, 226-230.

Krajcova A., Schulzova V., Lojza J., Krizova L., Hajslova J., 2010. Phytoestrogens in bovine plasma and milk - LC-MS/MS Analysis. Czech Journal of Food Sciences, 28 (4), 264-274.

Kuhnle G.G.C., Dell'Aquila C., Aspinall S.M., Runswick S.A., Mulligan A.A., Bingham S.A., 2008. Phytoestrogen content of foods of animal origin: dairy products, eggs, meat, fish and seafood. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 56, 10099-10104.

Lagriffoul G., Barillet F., Rupp R., Berthelot X., Bergonier D., 2006. Somatic cell counts in dairy sheep milk. Proceedings of the 12th Annual Great Lakes Dairy Sheep Symposium, November 9-11, 2006, La Crosse, Wisconsin, US, 38-55.

Lagriffoul G., Chilliard Y., Rock E., Soustre Y., Verdaguer M., Bailly C., Millet F., Masle I., Pinelli J.M., 2008. Composition fine du lait et des fromages de brebis. Document de synthèse, 6p.

Lawless F., Stanton C., L'Escop P., Devery R., Dillon P., Murphy J.J., 1999. Influence of breed on bovine milk *cis-*9, *trans-*11-conjugated linoleic acid content. Livestock Production Science, 62, 43-49.

Lecerf J.M., de Lorgeril M., 2008. Cholestérol alimentaire : de la physiologie au risque vasculaire. Science des aliments, 28, 12-23.

Lee M.R.F., Winter A.L., de Olmos Colmenero J.J., Scollan N.D., Minchin F.R., 2006. Polyphenol oxidase activity in grass and its effect on plant mediated lipolysis and proteolysis of Dactylis glomerata (cocksfoot) in a rumen simulated environment. Journal of the science of Food and Agricultural, 86, 1503-1511.

Le Blanc J.G., Laino J.E., Juarez del Valle M., Vannini V., van Sinderen D., Taranto M.P., Font de Valdez G., Savoy de Giori G., Sesma F., 2011. B-Group vitamin production by lactic acid bacteria – current knowledge and potential applications. Journal of Applied Microbiology, 111, 1297-1309.

Ledoux M., Laloux L., 2008. Etudes récentes sur les teneurs en acide ruménique dans la matière grasse laitière en France. Science des aliments, 28, 12-23.

Lefier D., Arnould C., Duployer M.H., Martin B., Dupont D., Beuvier E., 2010. Effects of two different diets on lactoferrin concentrations in bovine milk. Milchwiss. Milk Sciences International, 65, 356-359.

Lefrileux Y., Pommaret A., Raynaud S., 2008. Impacts de la monotraite dans une exploitation caprine fromagère à haut niveau de production. Rencontres Recherches Ruminants, 15, 167-170.

Legrand, D., E. Elass, A. Pierce, and J. Mazurier. 2004. Lactoferrin and host defence: an overview of its immuno-modulating and anti-inflammatory properties. Biometals 17, 225-229.

Legrand P., 2008. Intérêt nutritionnel des principaux acides gras des lipides laitiers. Science des aliments, 28, 34-43.

Lenoir J., Veisseyre R., Choisy C., 1974. Le lait réfrigéré, matière première de la fromagerie moderne. Revue Laitière Française, 322, 1-7.

Lenoir J., Lamberet G., Schmidt J.L., 1983. L'élaboration d'un fromage : exemple du Camembert. Pour la Science, 69, 30-42

Le Maréchal C., Thiéry R., Vautor E., Le Loir Y., 2011. Mastitis impact on technological properties of milk and quality of milk products - a review. Dairy Science and Technology, 91, 247-282.

Léonil J., 2013. Peptides bioactifs du lait : bénéfice-santé. Cholé-Doc, Cerin, 35, 8p.

Léonil J., Maubois J. L., 2002. Milk-derived bioactive peptides and proteins: future perspectives. Science des Aliments, 22, 383-392.

Lerch Sylvain, 2012. Supplémentation en colza ou en lin de rations à base d'herbe chez la vache laitière durant deux lactations consécutives : effets sur les performances zootechniques et la composition fine en acides gras du lait. Thèse Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 157p.

Le Scouarnec J., Arranz J.M., Poivre M., Sallato O., 2012. Effet de l'utilisation d'aliment gras sur la production de brebis laitières Basco-Béarnaises. Rencontres Recherches Ruminants, 19, 216.

Lonnerdal B., Iyer S., 1995. Lactoferrin: Molecular structure and biological function. Annual Review of Nutrition, 15, 93-

Lopez V., Lindsay R.C., 1993, Metabolic conjugates as precursors for characterizing flavour compounds in ruminant milks. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 41, 446-454.

Lucas A., 2005. Relations entre les conditions de production du lait et les teneurs en composés d'intérêt nutritionnel dans le fromage. Thèse Université Blaise Pascal et Université d'Auvergne, 180p.

Lucas A., Hulin S., Michel V., Agabriel C., Chamba J.-F., Rock E., Coulon J.B., 2006a. Relations entre les conditions de production du lait et les teneurs en composes d'intérêt nutritionnel dans le fromage : étude en conditions réelles de production. INRA Productions Animales, 19, 15-28.

Lucas A, Agabriel C, Martin B, Ferlay A, Verdier-Metz I, Coulon JB and Rock E, 2006b. Relationships between the conditions of cow's milk production and the contents of components of nutritional interest in raw milk farmhouse cheese. Lait, 86, 177-182.

Lucas A., Rock E., Chamba J.-F., Verdier-Metz I., Brachet P., Coulon J.B., 2006c. Respective effects of milk composition and the cheese-making process on cheese compositional variability in components of nutritional interest. Lait, 86, 21-41.

Lucas A., Coulon J.B., Agabriel C., Chilliard Y., Rock E., 2008a. Relationships between the conditions of goat's milk production and the contents of some components on nutritional interest in Rocamadour cheese. Small Ruminant Research, 74, 91-106.

Lucas A., Rock E., Agabriel C., Chilliard Y., Coulon J.B., 2008b. Relationships between animal species (cow versus goat) and some nutritional constituents in raw milk farmhouse cheeses. Small Ruminant Research, 74, 243-248.

Maas S., Lucot E., Gimbert F., Crini N., Badot P.-M., 2011. Trace metals in raw cows' milk and assessment of transfer to Comté cheese. Food Chemistry, 129, 7-12.

Manach C, Scalbert A, Morand C, Remesy C, Jimenez L, 2004, Polyphenols: food sources and bioavailability. American Journal of Clinical Nutrition, 79, 727-747.

Mariaca R.G., Berger T.F.H., Gauch R., Imhof M. I., Jeangros B., Bosset J.O., 1997. Occurrence of volatile monoand sesquiterpenoids in highland and lowland plant species as possible precursors for flavor compounds in milk and dairy products. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 45 (11), 4423-4434.

Marsh R., Kajda P., Ryley J., 1994. The effect of light on the vitamin- B_2 and the vitamin-A content of cheese. Nahrung-Food, 38, 527-532.

Martin B., Buchin S., Hauwuy A., 2005. Influence of the botanical composition of the highland pastures on the sensory characteristics of the Beaufort cheeses. Sciences des Aliments, 25,67-75.

Martin B., Hurtaud C., Graulet B., Ferlay A., Chilliard Y., Coulon JB., 2009. Herbe et qualités nutritionnelles et organoleptiques des produits laitiers. Fourrages, 199, 291-310.

Martin B., Pomiès D., Pradel P., Verdier-Metz I., Rémond B., 2009. Yield and sensory properties of cheese made with milk from Holstein or Montbéliarde cows milked twice or once daily. Journal of Dairy Science, 92, 4730-4737.

Martin B., 2012. Conditions de production et caractéristiques des laits et des fromages de montagne. Mémoire pour l'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Blaise Pascal Clermont II, UFR Sciences et Technologie, 48p.

Martin P., Szymanowska M., Zwierzchowski L., Leroux C., 2002. The impact of genetic polymorphisms on the protein composition of ruminant milks. Reproduction Nutrition Development, 42, 433-459.

Marty P., 2012. Caractérisation du lien au terroir du fromage AOP Pélardon. Approche par la mise en relation des caractéristiques du fromage à celles des ressources végétales de sa zone de production. Mémoire d'ingénieur, INP Toulouse, 31p.

Maubois J.L., 2010. Grandeur, décadence et renouveau de la matière grasse laitière. Science des aliments, 29, 105-110.

McSweeney P.L.H., Fox P.F., 2004. Metabolism of residual lactose and of lactate and citrate, In: Cheese: Chemistry, physics and microbiology, Vol. 1: General Aspects, 3° edn, Elsevier, Paris, 361-372.

Meffe N., Tache C., Gaudin V., Marnet P.G., 2003. Suppression d'une traite par semaine pendant toute la lactation chez lez vaches laitières à haut potentiel : effets zootechniques et caractéristiques physico-chimiques du lait. Rencontres Recherches Ruminants, 10, 85-88.

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

Meschy F., 2010. Nutrition minérale des ruminants. Editions Quae. 280p.

Messina M., 2010. Brief Historical Overview of the Past Two Decades of Soy and Isoflavone Research. Journal of Nutrition, 140 (7), 1350s-1354s.

Mietton B., 1994. Cours de fromagerie, ENILBio, Poligny.

Mietton B., Gaucheron F., Salaun F., 2004. Minéraux et transformations fromagères. In « Minéraux et produits laitiers », Editions Tec et Doc, Paris, 471-563.

Moio L., Dekimpe J., Etievant P., Addeo F., 1993. Neutral volatile compounds in the raw milks from different species. Journal of Dairy Research, 60, 199-213.

Mungatana N.K., Ngure R.M., Shitandi A., Onyiego B., Mutumba M, 2011. Effect of experimental Staphylococcus aureus mastitis on compositional quality of goat milk. International Journal of Dairy Technology, 64, 360-364.

Munro G.L., Grieve P.A., Kitchen B.J., 1984. Effect of mastitis on milk yield, milk composition, processing properties and yield and quality of milk products. Australian Journal of Dairy Technology, 39, 7-16.

Mustonen E.A., Tuori M., Saastamoinen I., Taponen J., Wahala K., Saloniemi H., Vanhatalo A., 2009. Equol in milk of dairy cows is derived from forage legumes such as red clover. British Journal of Nutrition, 102 (11), 1552-1556.

National Research Council, 2001. Nutrient requirments of dairy cattle. 7^{th} revised edition. National Academy Press, Washington, DC.

Noël Y., 2002. Vers une approche globale de la caractérisation des fromages. Actes du colloque Enita Clermont/Inra « Moyenne montagne en devenir », 14 et 15 novembre 2002. 85-89.

Nozière P., Graulet B., Lucas A., Martin B., Grolier P., Doreau M., 2006. Carotenoids for ruminants: from forages to dairy products. Animal Feed Science and Technology, 131, 418-450

O'Connell J.E., Fox P.F., 2001, Significance and applications of phenolic compounds in the production and quality of milk and dairy products: a review. International Dairy Journal, 11, 103-120.

Ogola H., Shitandi A., Nanua J., 2007. Effect of mastitis on raw milk compositional quality. Journal of Veterinary Science, 8 (3), 237-242.

Okano T, Shimomura Y, Yamane M, Suhara Y, Kamao M, Sugiura M and Nakagawa K, 2008. Conversion of phylloquinone (vitamin K_1) into menaquinone-4 (vitamin K_2) in mice. Two possible routes for menaquinone-4 accumulation in cerebra of mice. Journal of Biological Chemistry, 283, 11270-11279.

Palupi E., Jayanegara A., Ploeger A., Kahl J., 2012. Journal of Science of Food and Agriculture, 92, 2774-2781.

Park Y.W., Anderson M.J., Walters J.L., Mahoney A.W., 1983. Effects of processing methods and agronomic variables on carotene contents in forages and predicting carotene in alfalfa hay with near-Infrared-Reflectance Spectroscopy. Journal of Dairy Science, 66, 235-245.

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

Pellegrini O., Remeuf F., Rivermale M., 1994. Evolution des caractéristiques physico-chimiques et des paramètres de coagulation du lait de brebis collecté dans la région de Roquefort. Lait, 74, 425-442.

Pernet N., Notz E., Beuvier E., Roustel S., Buchin F., Moindrot C., Belot P.E., 2012. Substitution du tourteau de soja par du tourteau de colza à 3 ou 9% de matière grasse dans l'alimentation des troupeaux laitiers : impact sur le profil en acides gras du lait et du Comté. Colloque UMT, 15 juin 2012, Paris, poster.

Petyaev I.M., Bashmakov Y. K., 2012. Could cheese be the missing piece in the French paradox puzzle? Medical Hypotheses, 6,746-749.

Peyraud J.L., Rouillé B., Hurtaud C., Brunschwig P., 2011. Les acides gras du lait de vache. Composition et maîtrise par l'alimentation. Collection Synthèse, UMT RIEL, Cniel, Inra, Institut de l'Elevage, 36p.

Phénofinlait, 2012. Outils et perspectives en filière bovine laitière : fruits de 5 ans de recherche. Programme Recherche et Développement pour les filières laitières de demain, 19p.

Phénofinlait, 2012. Outils et perspectives en filière caprine laitière : fruits de 5 ans de recherche. Programme Recherche et Développement pour les filières laitières de demain, 19p.

Phénofinlait, 2012. Outils et perspectives en filière ovine laitière : fruits de 5 ans de recherche. Programme Recherche et Développement pour les filières laitières de demain, 19p.

Pierre A., Brulé, G., 1981. Mineral and protein equilibria between the colloidal and soluble phases of milk at low temperature. Journal of Dairy Research, 48, 417-428.

Pointillart A. et Guéguen L., 2003. Intérêts nutritionnels du calcium et du phosphore des produits laitiers, dans Minéraux et produits laitiers, ouvrage collectif coordonné par Gaucheron F., éditions Tec et Doc, 922p., 733-738.

Pôle fromager AOC Massif central, Inra, GIS Alpes du Nord, 2004. Caractéristiques sensorielles des fromages : quelles influences des conditions de production du lait ? Coordonné par Catherine Regnault, 91p.

Pomiès D., Martin B., Chilliard Y., Pradel P., Rémond B., 2007. Once-a-day milking of Holstein and Montbéliarde cows for 7 weeks in mid-lactation. Animal, 1, 10, 1497-1505.

Pomiès D., Marnet P.G., Cournut S., Barillet F., Guinard-Flament J., Rémond B., 2008. Les conduites de traite simplifiées en élevage laitier : vers la levée de l'astreinte biquotidienne. Inra Productions Animales, 21 (1) 59-70.

Pomiès D., 2010. Quelles solutions pour réduire l'astreinte de la traite ? Quelles conséquences sur la production et la qualité du lait ? Réseau Fromage de Terroirs, CNAOL, 10p.

Ragaller V., Lebzien P., Südekum K.-H., Lüther L., Flachowsky G., 2010. Pantothenic acid in ruminant nutrition: a review. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition. 95, 6-16.

Raynal K., Remeuf F., 2000. Effect of storage at 4 degrees C on the physicochemical and renneting properties of milk: a comparison of caprine, ovine and bovine milks. Journal of Dairy Research, 67, 199-207.

Raynal-Ljutovac K., Pirisi A., de Crémoux R., Gonzalo C., 2007. Somatic cells of goat and sheep milk: analytical, sanitary, productive and technological aspects. Small Ruminant Research, 68, 126-144.

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

Raynal-Ljutovac K., Lagriffoul G., 2010. La matière grasse laitière (I), cas particulier des laits de chèvre et de brebis, Science des aliments, 29, 89-104.

Raynal-Ljutovac K., Barrucand P., Gaborit P., Barral J., Guillet J., 2010. Impact de l'alimentation (régimes de base et supplémentation en tourteau de colza gras) sur les teneurs en acides gras des produits laitiers caprins : aspects nutritionnels et sensoriels. Rencontres Recherches Ruminants, 17, 395.

Raynal-Ljutovac K., Le Pape M., Gaborit P., Barrucand P., 2011. French goat milk cheeses: An overview on their nutritional and sensorial characteristics and their impacts on consumers' acceptance. Small Ruminant Research, 101, 64-72.

Regnault C., Martin B., Coulon J.B., Bugaud C., 2004. Caractéristiques sensorielles des fromages, quelles influences des conditions de production du lait ? Pôle fromager AOC Massif Central, Inra, GIS Alpes du Nord, 91p.

Reif G.D., Shahani K.M., Vakil J.R., Crowe L.K., 1976. Factors affecting B-complex vitamin content of Cottage cheese. Journal of Dairy Science, 59, 410-415.

Remond B., 1987. Influence du stade de lactation et de l'âge sur la composition du lait. In Le lait, matière première de l'industrie laitière. Edition INRA-CEPIL, Paris, 152-170.

Reynaud A., Fraisse D., Cornu A., Farruggia A., Pujosguillot E., Besle J.M., Martin B., Lamaison J.L., Paquet D., Doreau M., Graulet B., 2010. Variation in content and composition of phenolic compounds in permanent pastures according to botanical variation. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 58, 5485-5494.

Rochfort S., Parker A.J., Dunshea F.R., 2008. Plant bioactives for ruminant health and productivity. Phytochemistry, 69 (2), 299-322.

Rodriguez Rodriguez E.M., Sanz Alaejos M., Dias Romero C., 2001. Mineral concentrations in cow's milk from the Canary island. Journal of food composition and analysis, 14, 419-430.

Roje S., 2007. Vitamin B biosynthesis in plants. Phytochem, 68, 1904-1921.

Rouel J., Gaborit P., Chabosseau J.M., Raynal K., Ferlay A., Lauret A., Chilliard Y., 2002. Effets de la nature du fourrage et de la supplémentation lipidique sur la composition en acides gras du lait et sur la qualité sensorielle des produits laitiers caprins. Rencontres Recherches Ruminants, 9, 359-362.

Ruas-Madiedo P., Bascaran V., Brana A.F., Bada-Gancedo J.C., de los Reyes-Gavilan C.G., 1998. Influence of carbon dioxide addition to raw milk on microbial levels and some fat-soluble vitamin contents of raw and pasteurized milk. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 46, 1552-1555.

Sabikhi, L., Mathur B. N., 2001. Qualitative and quantitative analysis of b-casomorphins in Edam cheese. Milchwissenschaft, 56, 198-200.

Sakakibara H., Viala D., Ollier A., Combeau A., Besle J.M., 2004. Isoflavones in several clover species and in milk from goats fed clovers, Biofactors, 22, 237-239.

Salovuo H., Ronkainen P., Heino A., Suokannas A., Ryhänen E-L., 2005. Introduction of automatic milking system in Finland: effect on milk quality. Agricultural and Food Science, 14, 346-353.

Sanchez L., Peiro J. M., Castillo H., Perez M. D., Ena J. M., Calvo, M., 1992. Kinetic parameters for denaturation of bovine milk lactoferrin. Journal of Food Science, 57, 873-879.

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. Journal of Dairy Science, 88, 2043-2054.

Saulnier M., Ferlay A., Michel V., Laurent P., Martin B., 2007. Composition en acides gras des laits et des fromages de la zone Beaufort. Rencontres Recherches Ruminants, 14, 346.

Sepe L., Cornu A., Graulet B., Claps S., Rufrano D., 2011. Phenolic content of forage, milk, whey and cheese from goats fed Avena Sativa. Dairy production in mountain: farming systems, milk and cheese quality and implications for the future. Proceedings of the 10th international meeting on mountain cheese, 14-15 september 2011, Dronero, Italy, 31-32.

Shearer M.J., Bach A., Kohlmeier M., 1996. Chemistry, nutritional sources, tissue distribution and metabolism of vitamin K with special reference to bone health. Journal of Nutrition, 126, 1181S-1186S.

Shingfield K; J., Salo-Väänänen P., Pahkala E., Troivonen V., Jaakkola S., Piironen V., Huhtanen P., 2005. Effect of forage conservation method, concentrate level and propylene glycol on the fatty acid composition and vitamin content of cows' milk. Journal of Dairy research, 72, 349-361.

Shingfield K.J., Chilliard Y., Toivonen V., Kairenius P., Givens D.I., 2008. Trans fatty acids and bioactive lipids in ruminant milk. Advances in Experimental Medicine and Biology, 606, 3-65.

Shingfield K.J., Bernard L., Leroux C., Chilliard Y., 2010. Role of *trans* fatty acids in the nutritional regulation of mammary lipogenesis in ruminants. Animal, 4, 1140-1166.

Singh T., Fox P., Healy A., 1995. Water-soluble peptides in Cheddar cheese: isolation and identification of peptides in the diafiltration retentate of the water-soluble fraction. Journal of Dairy Research, 62, 629-640.

Singh T.K., Fox P. F., Healy A., 1997. Isolation and identification of further peptides in the diafiltration retentate of the water-soluble fraction of Cheddar cheese. Journal of Dairy Research, 64, 433-443.

Singh T., Gripon J., Fox P, 1999. Chromatographic analysis and identification of peptides in cheese. Bulletin FIL-IDF, 337, 17-23.

Spinnler H.-E., Gripon J.-C., 2004. Surface Mould-ripened Cheeses. In Cheese: chemistry, physics & microbiology. Vol. 2, 3rd Edn P. Fox, P. McSweeney, T. Cogan & T. Guinee. Elsevier, 157-174.

Steinshamn H., Purup S., Thuen E., Hansen-Moller J., 2008. Effects of clover-grass silages and concentrate supplementation on the content of phytoestrogens in dairy cow milk. Journal of Dairy Science, 91 (7), 2715-2725.

Stergiadis S., Leifert C., Seal C.J., Eyre M.D., Nielsen J.H., Larsen M.K., Slots T., Steinshamn H., Butler G., 2012. Effect of feeding intensity and milking system on nutritionally relevant milk components in dairy farming systems in the north east of England. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 60, 7270-7281

Soustre Y., 2005. Questions sur les qualités nutritionnelles des protéines laitières. Dossier de la maison du lait, 16, 8p.

Tham D.M., Gardner C.D., Haskell W.L., 1997. Potential health benefits of dietary phytoestogens: a review of the clinical, epidemiological and mechanistic evidence. Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism, 83 (7), 2223-2235.

Tornambé G., Cornu A., Martin B., Pradel P., Kondjoyan N., Carnat A.P., Petit M., Martin B., 2006. Changes in terpene content in milk from pasture-fed cows. Journal of Dairy Science, 89, 2309-2319.

Tornambé G., Ferlay A., Farruggia A., Chilliard Y., Loiseau P., Garel J.P., Martin B., 2007. Effet de la diversité floristique des pâturages de montagne sur le profil en acides gras et les caractéristques sensorielles des laits. Rencontres Recherches Ruminants, 14, 333-336.

Tornambé G., Cornu A., Verdier-Metz I., Pradel P., Kondjoyan N., Figueredo G., Hulin S., Martin B., 2008. Addition of pasture plant essential oil in milk: Influence on chemical and sensory properties of milk and cheese. Journal of Dairy Science, 91 (1), 58-69.

U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 2012. USDA National Nutrient Database for Standard Reference, Release 25. Nutrient Data Laboratory Home Page, http://www.ars.usda.gov/ba/bhnrc/ndl.

Van Winckel M., De Bruyne R., Van De Velde S., Van Biervliet S., 2009. Vitamin K, an uptade for the paediatrician. European Journal of Pediatrics, 168, 127-134.

Vasta V., Makkar H.P.S., Mele M., Priolo A., 2009. Ruminal biohydrogenation as affected by tannins in vitro. British Journal of Nutrition, 102, 82-92.

Varenne A., 2010. Phénofinlait, programme national de phénotypage des composants fins du lait : bilan et premières valorisations de la phase de collecte des données ovines laitières. Mémoire de fin d'étude, Ensat, 63p. + annexes.

Walstra P., 1990. On the stability of casein micelles. Journal of Dairy Science, 63, 1965-1979.

White S. L., Bertrand J. A., Wade M. R., Washburn S. P., Green J. T. Jr., Jenkins T. C., 2001. Comparison of fatty acid content of milk from Jersey and Holstein Cows consuming pasture or a total mixed ration. Journal of Dairy Science, 84, 2295-2301.

Williams P., Ballet E.V., Robert J.C., 1998. A review of the provision of vitamins for ruminants. Proceedings of the preconference symposium of the Cornell Nutrition Conference, 7-18.

Zulueta A., Maurizi A., Frigola A., Esteve M.J., Coli R., Burini G., 2009. Antioxidant capacity of cow milk, whey and deproteinized milk. International Dairy Journal, 19, 380-385.

Ouvrage collectif réa	lisé dans le cadre du RMT « F ilièr	ES FROMAGÈRES VALORISANT LEUR	TERROIR » ANIMÉ PAR LE CNAOI
PAO Volcanographics (04	73 62 11 07 - www.volcanograp	hics.com)	
MPRESSION Diazo1 (0473 1969	00 - www.diazo.fr)		
CRÉDITS PHOTOGRAPHIQU	JES (PHOTOGRAPHIES DE COUVERTURE)	
© CNAOL	© VetAgro Sup	© CNAOL	© D. Hardy (Institut de l'Elevage)
		© VetAgro Sup	
© CNAOL	© VetAgro Sup	© GIS id64	© CNAOL



Les Partenaires du Réseau Fromages de Terroirs







Avec la contribution financière du compte d'affectation spéciale «développement agricole et rural»

RMT Filières Fromagères Valorisant leur Terroir

Appelé « Réseau fromages de terroirs », il a pour vocation de répondre aux sollicitations de filières organisées valorisant les ressources de leurs terroirs (AOP, IGP, fermiers...). Ce RMT regroupe une dizaine de partenaires professionnels, techniques, de la recherche et de la formation.

Ses actions concernent l'expression du terroir dans les savoirfaire et la valorisation des ressources, l'ancrage et la durabilité des filières et de leurs acteurs sur le territoire et leurs interactions avec les attentes sociales.

Des ouvrages et fiches de synthèse, des outils ou encore des journées de formation/information sont proposés aux filières valorisant leurs terroirs.

Le RMT est animé par le CNAOL.

www.rmtfromagesdeterroirs.com