

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université A. MIRA-BEJAIA**  
**Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie**  
**Département des Sciences Alimentaires**

**Polycopié du cours**

# **Biochimie et propriétés du lait**

**Présenté par**

**Naima TOUATI**

**DOCTEUR EN SCIENCES**

**Cours destiné pour les étudiants :**

Master en Production et Transformation Laitière

**Année Universitaire: 2020-2021.**

## Liste des Tableaux

Tableau I: Composition du lait chez différentes espèces animales.....	4
Tableau II: Constantes physiques du lactose.....	6
Tableau III: Composition moyenne des micelles de caséine bovine (g/100 g d'extrait sec)....	15
Tableau IV: Constituants lipidiques du lait de vache et localisation dans les fractions physicochimiques (g/100 g de matière grasse). ....	28
Tableau V: Distribution des principaux acides gras de la graisse du lait de vache (%). ....	29
Tableau VI: les vitamines dans le lait. ....	31
Tableau VII: Vitamines liposolubles.....	33
Tableau VIII: Vitamines hydrosolubles .....	37
Tableau IX: Constituants majeurs des matières salines du lait de vache (g/litre). ....	38
Tableau X: Teneurs en oligo-éléments du lait de vache (µg/litre). ....	40

## Liste des Figures

Figure 1: Structure du Béta et de l'Alpha - lactose .....	5
Figure 2: Schéma des différentes étapes de la réaction de Maillard. ....	9
Figure 3: Mécanismes de formation des produits d'Amadori. ....	10
Figure 4: Mécanisme de formation des produits de Heyns. ....	10
Figure 5: Enolisation 1-2 et 2-3 des composés de Amadori et de Heyns pour aboutir à la formation de mélanoïdines .....	11
Figure 6: Structure linéaire de la caseine Alpha S1 .....	16
Figure 7: Structure linéaire de la caseine Alpha S2 .....	17
Figure 8: Structure linéaire de la caseine Béta.....	18
Figure 9: Structure linéaire de la caseine Kappa.....	19
Figure 10: Différents modèles structuraux de la micelle de caséine. ....	20
Figure 11: Structure de la Béta-lactoglobuline .....	22
Figure 12: Structure de l'Alpha-lactalbumine.....	23
Figure 13: Structure des immunoglobulines .....	24
Figure 14: Structure de la lactoferrine.....	25
Figure 15: Structure de la Bovin serum Albumin (BSA). ....	26
Figure 16: Structure d'un globule gras. ....	28

# Sommaire

Introduction .....	1
I. Historique.....	3
II. Caractéristiques et valeur nutritionnelle des constituants du lait. ....	3
II.1. Définition du lait .....	3
II.2. Composition du lait.....	4
II.2.1. L'eau .....	4
II.2.2. Sucres (Le lactose).....	5
II.2.2.1.1. Hydrolyse du lactose .....	7
II.2.2.1.2. Propriétés réductrices .....	8
II.2.2.1.3. Réaction avec des substances azotées .....	8
II.2.2.1.4. Dégradation du lactose par la chaleur .....	12
II.2.2.1.5. Fermentation lactique .....	12
II.2.2.2. Importance en technologie laitière .....	13
II.2.2.3. Valeur nutritionnelle des sucres du lait .....	13
II.2.3. Matières azotées.....	14
II.2.3.1. Matières azotées non protéiques .....	14
II.2.3.2. Matières azotées protéiques .....	14
II.2.3.2.1. Caséines.....	14
II.2.3.2.2. Protéines sériques.....	22
II.2.4. Matière grasse .....	27
II.2.4.1. Lipides simples.....	29
II.2.4.2. Lipides complexes.....	30
II.2.4.3. Stérols.....	30
II.2.4.4. Valeur nutritionnelle des lipides du lait .....	30
II.2.5. Vitamines .....	31
II.2.5.1. Vitamines liposolubles .....	31
II.2.5.2. Vitamines hydrosolubles .....	34
II.2.6. Sels minéraux.....	38
II.2.7. Oligo-éléments du lait.....	39

## Introduction

Le lait a été l'une des pierres angulaires de la nutrition humaine depuis des siècles. Le lait contient des protéines d'origine animale, la graisse, le lactose, les vitamines et les minéraux qui sont nécessaires pour une alimentation suffisante et équilibrée (Ramdane et al., 2019). Le groupe du lait et produits laitiers occupe la deuxième place parmi les produits alimentaires importés en Algérie, il représente en moyenne 15,43% de la facture alimentaire totale (Direction des Etudes et de la Prospective, 2019).

Sa consommation est universelle, mais variable selon les populations, en fonction des traditions, de la disponibilité et de l'histoire des peuples. Des populations pastorales africaines telles que les Masaïs ou les Fulani en sont de gros consommateurs, alors que d'autres, tels que les Eskimos ou les Thaïs en consomment peu (Ramdane et al., 2019).

Le lait est une matière première aux ressources considérables ; et face à la demande du consommateur qui sollicite de plus en plus de produits innovants à la qualité constante, l'industrie doit exploiter toutes les richesses de cette matière première à la fois si simple en apparence et si complexe dans sa composition (Pougheon, 2001).

Pendant de nombreuses années, le lait a souffert d'une mauvaise réputation sur le plan des maladies cardio-vasculaires en raison de sa richesse en acides gras saturés. Pour certaines personnes, il se voit même progressivement et partiellement remplacé par des laits de substitution comme le lait de soja. Pourtant, des études récentes montrent que le lait ne doit pas être diabolisé. Outre sa teneur bien connue en calcium et en protéines, il peut posséder des vertus dans la lutte contre certaines maladies notamment cardio-vasculaires et néoplasiques. Une partie de ces vertus sont le résultat de son profil en acide gras remarquable. Ce point de la composition peut être largement influencé par l'alimentation des vaches laitières. La voie zootechnique peut donc être une solution à l'amélioration des qualités nutritionnelles du lait sans modification des habitudes alimentaires.

Alors que certaines firmes agro-alimentaires ont pris le parti de compléter artificiellement le lait qu'ils mettent en vente, il est possible en modifiant les rations de nos vaches de produire un lait plus sain qui intègre complètement la notion d' « alicament ». (Courtet Leymarios, 2010).

Pour mieux faire face aux contraintes naturelles du lait découlant de ses variations quantitatives et qualitatives, les technologues ont imaginé des solutions qui ont contribué à augmenter la diversité de la gamme des produits laitiers tout en répondant aux exigences économiques et hygiéniques (Pougheon, 2001).

L'objectif de ce document, destiné aux étudiants de master Production et transformation laitière (PTL), est de se focaliser sur un aliment d'une grande valeur nutritionnelle et technologique, connue depuis la nuit des temps, à savoir le lait. Nous allons nous intéresser à ses constituants, leurs propriétés physicochimiques et leur valeur nutritionnelle et pour certains comme les sucres et les protéines leur importance dans la technologie des produits laitiers.

## **I. Historique**

L'homme a commencé à boire du lait dès qu'il a pu y avoir accès. C'est-à-dire quand il est devenu éleveur et qu'il a su domestiquer des animaux. Cela date de la préhistoire et plus précisément du Néolithique, période de domestication. Vers 8700 avant J.C., les premiers indices d'élevage apparaissent au Proche-Orient et avec eux la consommation de lait. Les données scientifiques de cette consommation et exploitation laitière par les hommes du néolithique sont multiples : traces archéologiques, traces chimiques de résidus laitiers dans des contenants, étude des squelettes des animaux et courbes d'abattage, gravures rupestres représentant des scènes de traite. Des traces archéologiques et écrites (plaquettes) témoignent de l'existence d'une laiterie en 2500 avant J.C. en Mésopotamie. Pendant longtemps le lait et les produits laitiers ont été consommés frais par les éleveurs ou dans leur région de production pour des raisons évidentes de transport et de conservation (Courtet Leymarios, 2010).

Le lait de vache a toujours été un aliment essentiel du régime occidental. L'augmentation des échanges commerciaux a rapidement posé des problèmes de qualité de ce lait. A cette époque, le lait était régulièrement coupé à l'eau et la qualité sanitaire parfois catastrophique de l'eau était responsable de nombreux cas d'intoxication. En 1969, la loi Godefroy a défini le paiement du lait à la qualité ; elle visait à élever la qualité bactériologique du lait et le niveau moyen de la composition en matières grasses et en matières azotées, grâce à un système d'incitation financière (paiement différentiel). Au fil des années, la liste des critères de rémunération du lait à l'éleveur s'est allongée avec notamment l'introduction du comptage des germes totaux (Courtet Leymarios, 2010).

## **II. Caractéristiques et valeur nutritionnelle des constituants du lait.**

### **II.1. Définition du lait**

Le lait destiné à l'alimentation humaine a été défini en 1908, lors du premier congrès international pour la répression des fraudes alimentaires, comme « produit intégral de la traite totale et ininterrompue d'une femelle laitière bien portante, bien nourrie et non surmenée. Il doit être recueilli, proprement et ne pas contenir de colostrum » (Larpen, 1997).

Selon le journal officiel de la république démocratique algérienne, la dénomination « Lait » est réservée exclusivement au produit de la sécrétion mammaire normale, obtenue par une ou plusieurs traites sans aucune addition ou soustraction et n'ayant pas été soumis à un traitement thermique (J.O.R.A., 1993).

## II.2. Composition du lait

Le lait est un complexe nutritionnel qui contient plus de 100 substances différentes qui sont en solution, en émulsion ou en suspension dans l'eau. Le tableau I représente la composition chez différentes espèces animales.

**Tableau I:** Composition du lait chez différentes espèces animales (Bylund, 1995).

<b>Animal</b>	<b>Potines totales (%)</b>	<b>Caséines (%)</b>	<b>Protéines sériques (%)</b>	<b>Matière grasse (%)</b>	<b>Hydrates de carbone (%)</b>	<b>Cendres (%)</b>
<b>Humain</b>	1.2	0.5	0.7	3.8	7.0	0.2
<b>Cheval</b>	2.2	1.3	0.9	1.7	6.2	0.5
<b>Vache</b>	3.5	2.8	0.7	3.7	4.8	0.7
<b>Bufflonne</b>	4.0	3.5	0.5	7.5	4.8	0.7
<b>Chèvre</b>	3.6	2.7	0.9	4.1	4.7	0.8
<b>Brebis</b>	5.8	4.9	0.9	7.9	4.5	0.8

### II.2.1. L'eau

L'eau est considérée comme le constituant majeur de la plupart des aliments. Elle influence la structure, l'apparence, le goût des aliments et leur susceptibilité à la dégradation. Toutefois, elle n'apporte aucune valeur énergétique aux aliments.

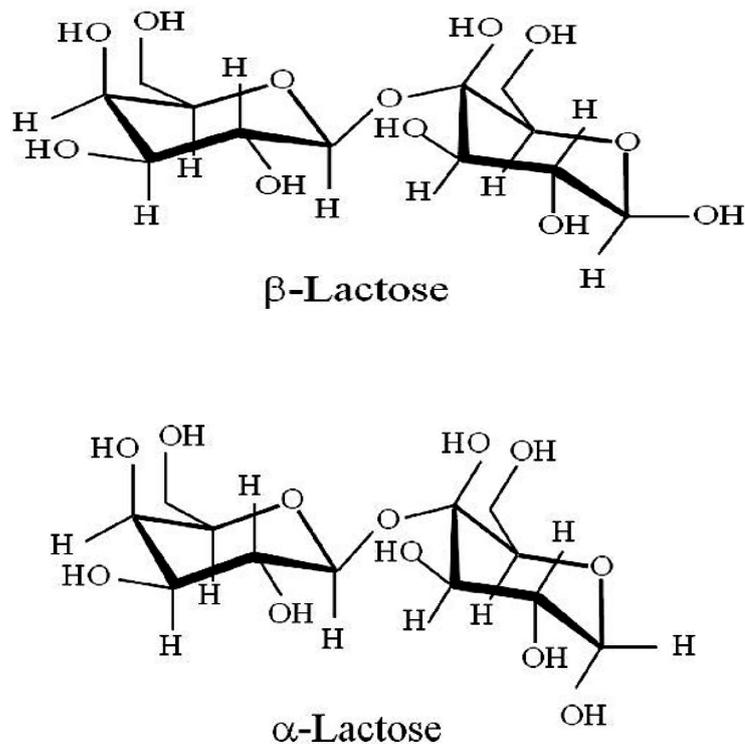
La valeur nutritive du lait est particulièrement élevée grâce à l'équilibre entre les nutriments qu'il contient. La quantité d'eau dans le lait reflète cet équilibre. Chez tous les animaux, l'eau est le nutriment requis en quantité la plus élevée, et le lait contient beaucoup d'eau (90%) (Wattiaux, 2014).

La quantité d'eau dans le lait est contrôlée par la quantité de lactose synthétisé par les cellules sécrétrices de la glande mammaire. L'eau nécessaire pour la formation du lait est prélevée du sang. La production de lait diminue rapidement lorsque l'eau n'est pas disponible:

elle chute le jour même que la vache ne peut consommer la quantité d'eau requise. Il est donc important de fournir aux vaches laitières une source d'eau potable continuellement (Wattiaux, 2014).

## II.2. 2. Sucres (Le lactose)

Le lactose est un diholoside (ou disaccharide), composé d'une molécule de  $\beta$ -D galactose (Gal) et d'une molécule de  $\alpha/\beta$ -D-glucose (Glc) reliées entre elles par une liaison osidique  $\beta$  (1-4) (Figures 1). Le nom officiel du lactose est le  $\beta$ -D-galactopyrannosyl (1-4) D-glucopyrannose. Il peut être symbolisé par Gal  $\beta$ (1-4) Glc (Eloutassi et al., 2011). Le lactose peut se présenter sous forme a ou b selon la configuration stéréochimique du carbone 1 réducteur du glucose. Les 2 anomères présentent des caractéristiques différentes (Tableau II).



**Figure 1:** Structure du Béta et de l'Alpha - lactose (Yamauchi et al., 2013).

**Tableau II:** Constantes physiques du lactose (Morrissey, 1985)

Constantes	L $\alpha$	L $\beta$	L $\alpha+\beta$
Pouvoir rotatoire	+89,4°rd	+35°rd	+55°rd
Point de fusion	221°C	235°C	203°C
Masse molaire (g/mol)	342	342	
Solubilité initiale à 15°C (g/100G d'eau)	7	50	17

Le lactose est le seul glucide libre du lait présent en quantités importantes, sa teneur est très stable entre 48 et 50 g/L. Cette teneur présente de faibles variations à la différence du taux butyreux (Courtet Leymarios, 2010).

Il est synthétisé par la glande mammaire à partir du glucose prélevé dans le sang. Sa faible contribution à l'apport énergétique du lait (30%), ne fait pas de ce dernier un aliment équilibré en termes de répartition calorique (les recommandations théoriques prônent un apport de 50 à 60% de calories glucidiques) (Courtet Leymarios, 2010).

La saveur sucrée du lactose est faible; lorsqu'on impute au saccharose une valeur arbitraire de 100%, celle du lactose atteint environ le tiers (de 27 à 39%) (Courtet Leymarios, 2010).

La forme  $\beta$  plus soluble prédomine jusqu'à 93°C mais au-delà, cette forme  $\beta$  perd sa solubilité. À 15°C, la solubilité initiale est assez faible (10 fois plus faible qu'un sucre ordinaire) mais elle s'élève après une agitation prolongée (de 7.3 à 17 g / 100g d'eau). La solubilité augmente avec la température (à 25°C, elle est de 22g / 100g d'eau) (Pougheon, 2001).

Le lait contient en quantités souvent négligeables (0,1g/L) d'oligosaccharides notamment du glucose et du galactose issus de la dégradation du lactose. Certains industriels ont récemment mis sur le marché un lait allégé en lactose qui contient 90% de lactose en moins qu'un lait classique, ce qui permet à ces patients de continuer à boire du lait de vache sans subir les désagréments de cette intolérance (Courtet Leymarios, 2010).

### II.2.2.1. Propriétés physico-chimiques du lactose

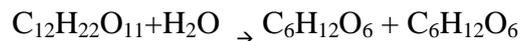
Le lactose est le constituant du lait, le plus rapidement attaqué par action microbienne, les bactéries transforment le lactose en acide lactique, cette transformation parfois gênante est souvent utilisée en industrie laitière et notamment pour l'obtention des laits fermentés.

#### II.2.2.1.1. Hydrolyse du lactose

Cette action est assez difficile car le lactose est stable vis à vis des agents chimiques (Pougheon, 2001).. Il est donc nécessaire d'utiliser soit :

✓ **un acide à haute température**

Le lactose est converti en deux monosaccharides, le galactose et le glucose, dans des conditions de températures entre 180°C et 220°C et des concentrations d'acides sulfurique (entre 0.15 et 0.5M) et l'acide chlorhydrique (entre 0.5 et 1M) donnant un pH= 3,7 (Eloutassi et al., 2011) selon la réaction suivante :



L'hydrolyse acide est un procédé industriel fortement concurrencé par le procédé enzymatique.

✓ **Soit la voie enzymatique par action d'une lactase (ou  $\beta$ -galactosidase).**

Des enzymes d'origines diverses, lactases d'origine microbienne (*Saccharomyces lactis* ; *Escherichia coli*) ou d'origine fongique (*Aspergillus niger*) ont été proposées pour l'hydrolyse du lactose du lait destiné à la consommation humaine ou à la fromagerie et du lactosérum. Mais l'industrialisation de cette technique est limitée par le coût élevé de l'enzyme qui doit être commercialisée sous une forme hautement purifiée puisque les produits obtenus sont destinés à l'alimentation humaine (Roger, 1976).

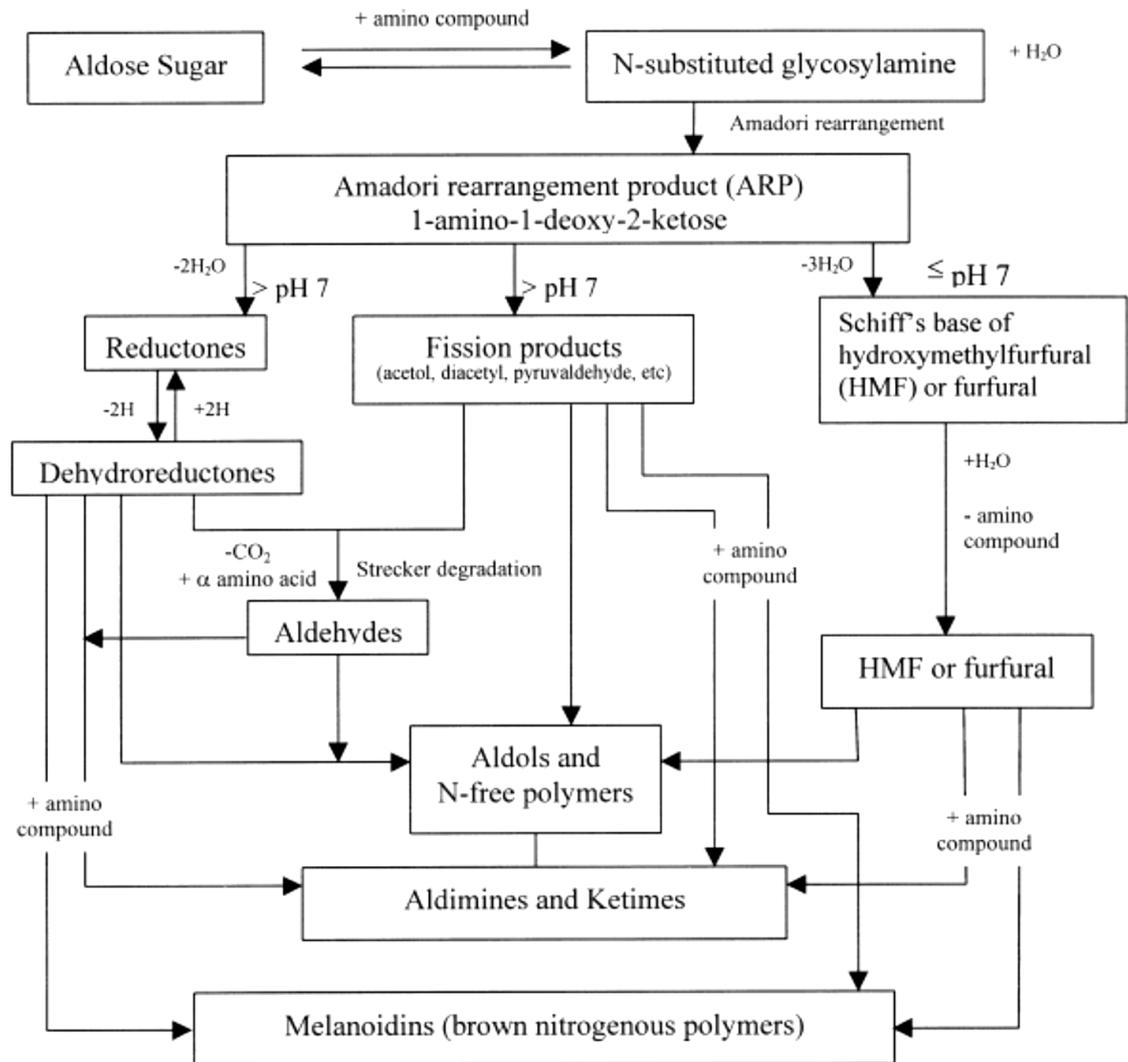
On utilise cette technique dans différentes opérations industrielles conduisant à des produits à lactose hydrolysé contenant du galactose et du glucose.

#### **II.2.2.1.2. Propriétés réductrices**

Le lactose est un sucre réducteur du fait de la présence d'un groupe aldéhyde libre (contrairement au saccharose). Il en résulte une méthode de dosage couramment employée à la liqueur cuprique alcaline de Fehling (Norme NF V04-213 de janvier 1971). Mais aujourd'hui la méthode de dosage par la liqueur de Fehling devient obsolète et on lui préfère des méthodes telles que l'HPLC (chromatographie liquide à haute pression) ou par spectrophotométrie IR utilisées dans l'industrie (Pougheon, 2001).

#### **II.2.2.1.3. Réaction avec des substances azotées**

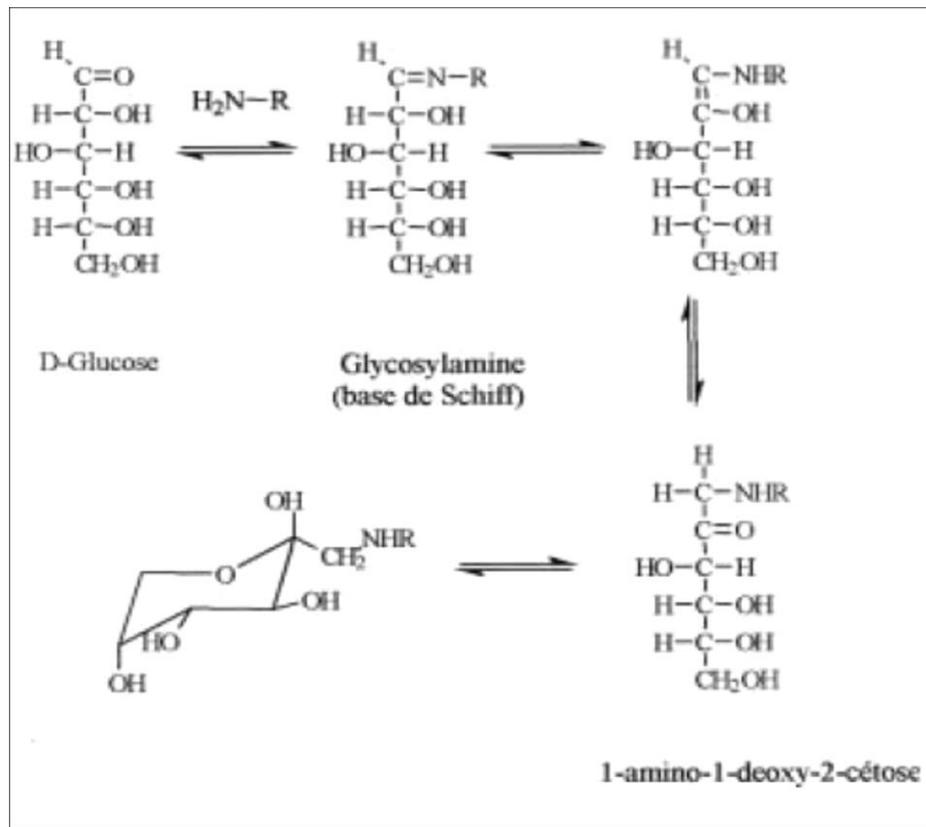
La réaction de Maillard doit son nom au chimiste français Louis Maillard qui l'a décrit le premier mais ce n'est qu'en 1953 que le premier schéma cohérent a été proposé par Hodge (Martins et al., 2000) (Figure 3). La réaction de Maillard est l'ensemble des interactions résultant de la réaction initiale entre un sucre réducteur et un groupement aminé. Cette réaction a une importance énorme dans la chimie des aliments. Elle est la responsable principale de la production des odeurs, des arômes et des pigments caractéristiques des aliments cuits. Elle peut aussi donner naissance à des composés cancérigènes et également réduire la valeur nutritionnelle des aliments en dégradant des acides aminés essentiels. In vivo, elle intervient dans les processus de dégradation du collagène. On peut subdiviser la réaction de Maillard en trois étapes principales (Machiels et Istasse, 2002)



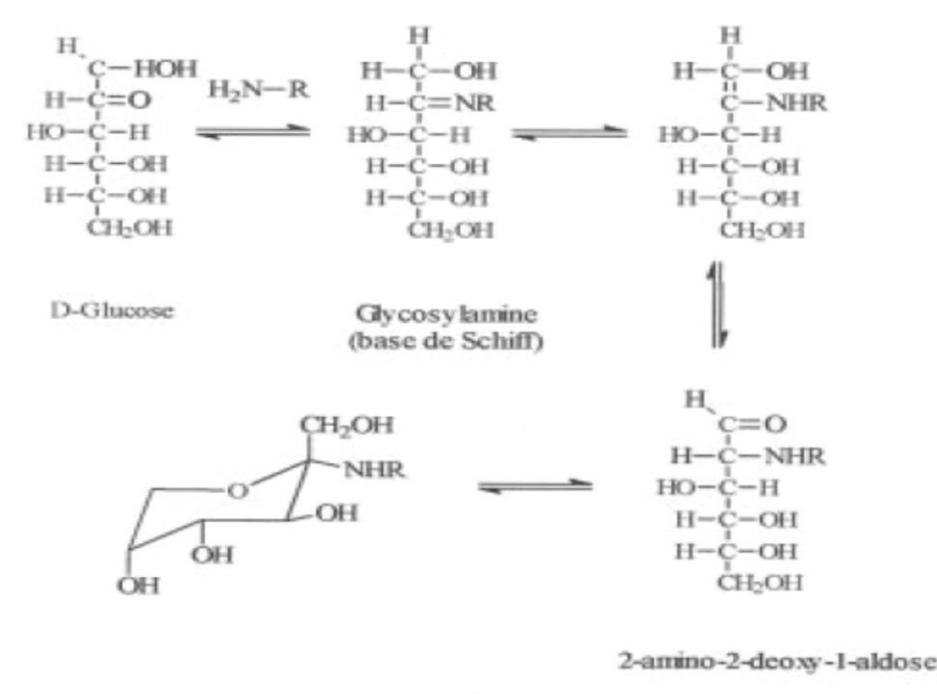
**Figure 2:** Schéma des différentes étapes de la réaction de Maillard (Martins et al., 2000).

La première étape de la réaction de Maillard fait partie d'un large spectre de réactions appelées réactions carbonyles-amines. Ces réactions interviennent dans un certain nombre de processus enzymatiques et biologiques tels que la vision, le vieillissement et la détérioration des tissus. La réaction est initiée par la condensation entre un sucre réducteur dans sa forme ouverte et le groupe amine d'un acide aminé. Les réactions entre carbonyles et amines sont favorisées dans des conditions faiblement acides. Cette phase initiale étant autocatalysée par le groupement acide de l'acide aminé, la vitesse de formation des bases de Schiff est rapide. La phase suivante est, dans le cas des aldoses, le réarrangement d'Amadori (figure 4), et dans le cas des cétooses, le réarrangement de Heyns (figure 5) Les deux

réarrangements sont catalysés par les acides. Il en résulte la formation de 1-amino-1-désoxy-2- cétose ou de 2-amino-2-désoxy-1-aldose (Machiels et Istasse, 2002).



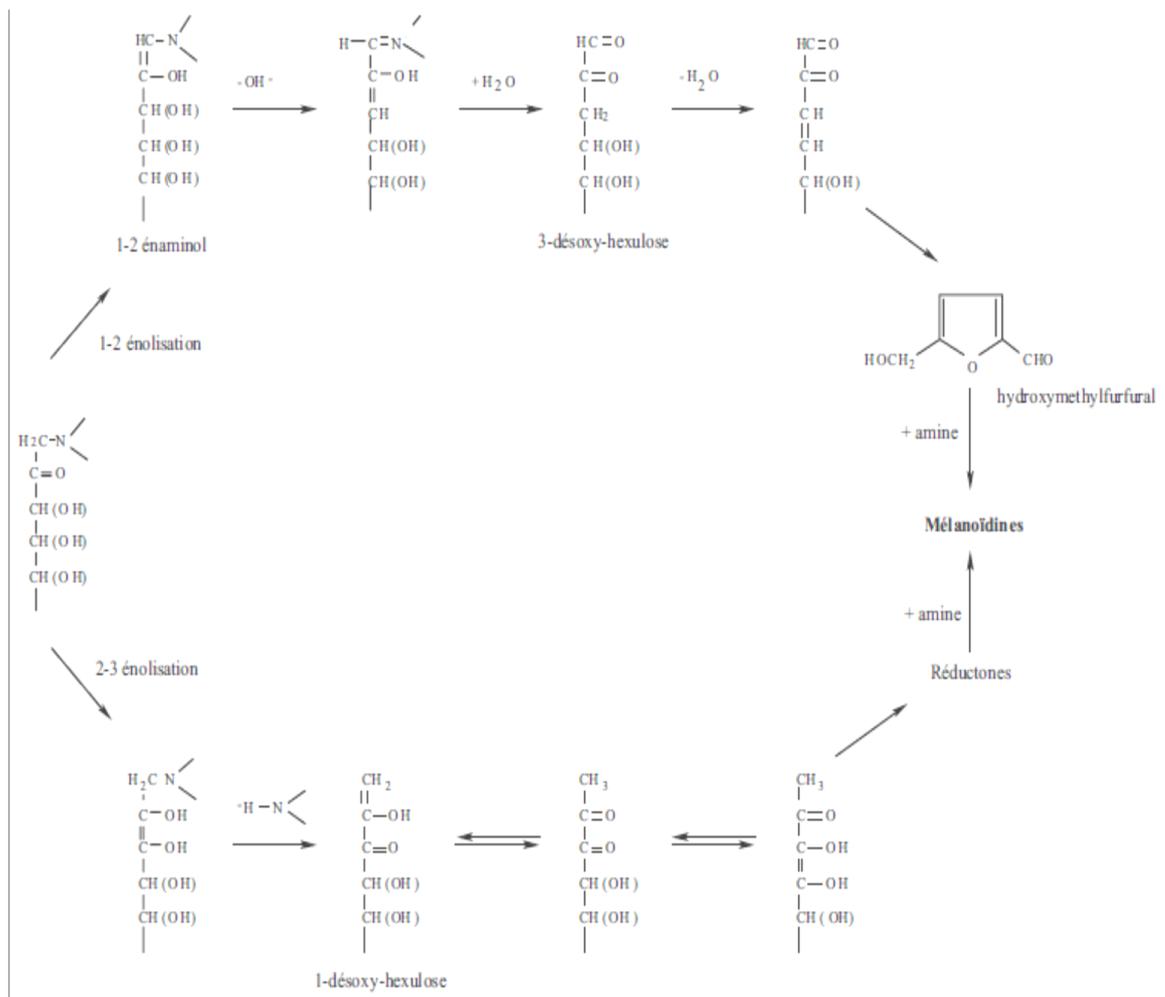
**Figure 3:** Mécanismes de formation des produits d'Amadori (Machiels et Istasse, 2002).



**Figure 4:** Mécanisme de formation des produits de Heyns (Machiels et Istasse, 2002).

Plusieurs mécanismes de formation ont été proposés pour la seconde étape de la réaction de Maillard. Certains chemins réactionnels commencent directement à partir des composés d'Amadori et de Heyns, tandis que d'autres impliquent des composés dicarboxylés dérivant indirectement des produits de la réaction initiale (Machiels et Istasse, 2002).

Une des caractéristiques les plus marquées des produits d'Amadori est leur tendance à former des énols. Leur formation peut se faire aussi bien entre les carbones 1 et 2 du sucre que entre les carbones 2 et 3 du même résidu. A pH 7 et à des pH plus faibles, l'énolisation 1-2 est favorisée tandis qu'à un pH plus élevé, la dégradation des produits d'Amadori se fait principalement via l'énolisation 2-3 (Martins et al., 2001). Dans les deux cas, une décomposition caractéristique est observée (Figure 6).



**Figure 5:** Enolisation 1-2 et 2-3 des composés de Amadori et de Heyns pour aboutir à la formation de mélanoïdines (Machiels et Istasse, 2002).

Les mélanoidines qui constituent les pigments bruns des aliments sont produites dans la troisième et dernière étape de la réaction de Maillard. Il s'agit de polymères bruns, de haut poids moléculaire qui contiennent des furanes et de l'azote et qui peuvent contenir des groupes carbonyle, carboxyle, amine, amide, pyrrole, indole, ester, anhydride, éther, méthyle et/ou hydroxyles. Leur formation est le résultat de la polymérisation de composés très réactifs produits au cours de la deuxième étape et spécialement des composés carbonylés insaturés et le furfural. La température, le temps de réaction, la teneur en eau ainsi que la concentration et la nature des précurseurs influencent la réaction de Maillard. Les applications industrielles de la réaction de Maillard sont multiples (Machiels et Istasse, 2002).

#### II.3.2.1.4. Dégradation du lactose par la chaleur

Comme tous les autres sucres, l'action de la chaleur sur le lactose conduit à la formation d'un caramel vers 175°C ; cependant dans le lait chauffé le brunissement apparaît dès 120°C avec un goût de cuit différent de celui du caramel (Pougheon, 2001).

A la chaleur, la transformation du lactose aboutit à la formation d'un acide organique :



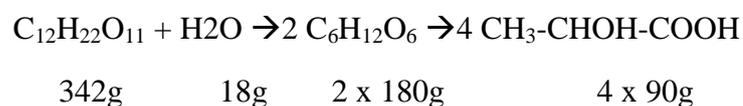
L'hydroxyméthylfurfural est un corps labile qui tend à se décomposer en acides lévulique et formique.

Par ailleurs le chauffage du lait entraîne une certaine transformation du lactose en lactulose (par isomérisation du résidu glucose en fructose), ce qui est un traceur de mise en évidence de l'intensité du traitement thermique appliqué (Pougheon, 2001).

Transformation biologique du lactose

#### II.2.2.1.5. Fermentation lactique

Quelques bactéries adaptées au métabolisme du lactose (car possédant une  $\beta$ -galactosidase) réalisent cette fermentation qui donne comme métabolite final essentiellement de l'acide lactique:



Ces bactéries lactiques (lactobacille et streptocoque) sont utilisées en industrie pour l'obtention de laits fermentés ou de fromages frais (par baisse du pH lors de l'acidification lactique) ou encore pour la fabrication de fromages affinés (Pougheon, 2001).

### **II.2.2.2. Importance en technologie laitière**

Le lactose est le substrat essentiel des ferments lactiques. Sa teneur initiale peut conditionner le déroulement de la fermentation lactique : une teneur trop élevée peut être responsable de post-acidification préjudiciable pour la qualité du fromage. Une réduction de sa teneur peut limiter le déroulement de la fermentation et réduire en conséquence la baisse du pH, ce qui aura des effets sur la texture et le déroulement de l'affinage.

En industrie, l'utilisation du lactose est multiple : support d'arômes, diluant ou excipient en industrie pharmaceutique, en diététique en tant que charge glucidique à faible caractère sucré, substrat de culture pour les ferments de maturation en charcuterie.

L'industrie de l'alimentation du bétail utilise du lactose hydrolysé sous forme d'un aliment liquide complémentaire pour veaux de boucherie (Pougheon, 2001).

### **II.2.2.3. Valeur nutritionnelle des sucres du lait**

Le lactose a une faible contribution à l'apport énergétique du lait (30 %), (les recommandations théoriques prônent un apport de 50 à 60 % de calories glucidiques)

Le lactose favoriserait l'absorption de certains minéraux (calcium, magnésium, phosphore) et d'oligo-éléments (zinc notamment). Cet effet n'est pas direct, mais dû à l'acide lactique (métabolisme microbien). A pH acide, les sels calciques sont plus solubles et donc mieux résorbés.

Le lactose est le seul sucre qui puisse être utilisé correctement par le jeune animal car son tube digestif possède une lactase mais ne possède ni saccharase, ni maltase, ni amylase. Les capacités lactasiques diminuent avec l'âge et certaines personnes peuvent présenter des difficultés à digérer le lactose par défaut d'activité enzymatique (Courtet Leymarios, 2010).

### **II.2.3. Matières azotées**

La dénomination « matières azotées totales » regroupe les protéines (Taux Protéique), ainsi que l'azote non protéique (dont l'urée). Le TP est une caractéristique importante du lait. Comme le taux butyreux, le TP conditionne la valeur marchande du lait, plus le TP sera élevé par rapport à une référence et plus le lait sera payé cher au producteur (paiement du point de TP). En effet plus le taux protéique (TP) est élevé et plus le rendement de transformation fromagère sera bon. La teneur totale avoisine 34 à 35 g/L (Courtet Leymarios, 2010).

#### **II.2.3.1. Matières azotées non protéiques**

L'azote non protéique (ANP) comprend principalement de l'urée, mais en proportion très variable : de 20 à 75 %. La teneur en azote uréique peut en effet varier de 7 à 15 mg par 100 g de lait de vache dans des conditions assez normales et de 5 à 30 mg dans des conditions extrêmes. Les autres composants de l'ANP sont les acides aminés (10 à 20 % de l'ANP), la créatine (3 à 6 %), l'acide urique (2 à 4 %), l'ammoniaque (1 à 5 %) et la créatinine (environ 1%), etc. Les variations de la teneur en ANP du lait sont dues essentiellement à celles de l'urée (Journet et al., 1975).

La fraction azotée non protéique du lait a une valeur nutritionnelle presque nulle aussi bien pour les humains que pour les jeunes ruminants si l'on excepte le peu d'acides aminés libres qu'elle renferme (15 % en moyenne de l'azote non protéique). Elle n'intéresse pas non plus le fromager puisqu'elle n'est pas coagulable. S'il importe de connaître ses variations, c'est principalement parce que le dosage d'azote total par la méthode Kjeldahl peut donner une idée inexacte de la valeur protéique du lait puisqu'il mesure en fait la somme de l'azote protéique et de l'azote non protéique (Journet et al., 1975).

#### **II.2.3.2. Matières azotées protéiques**

##### **II.2.3.2.1. Caséines**

Les caséines présentent à la fois la plus grande importance pondérale et alimentaire. Elles ont une certaine originalité dans leur structure native qui est d'ailleurs très controversée. Ce complexe micellaire protéique phosphorylé glycosylé a une structure spatiale qui confère au lait son aspect laiteux. Même après détermination des structures primaires des différents constituants, il est encore difficile d'avoir une vision précise de cette structure. Les nombreux

schémas de modèle décrits depuis 20 ans aussi bien que le tableau de composition de la micelle, révèlent la présence de 8 % d'ions Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, phosphate et citrate qui participent activement, sous forme de ponts ioniques, à la structure quaternaire, la partie protéique étant elle-même constituée de 4 caséines  $\alpha_{S1}$ ,  $\alpha_{S2}$ ,  $\beta$  et  $\kappa$  (92 % en proportion variable). La micelle est capable de contenir 65 % d'eau grâce à sa structure spongieuse très souple (Cheftel et Lorient, 1982).

Les caseines  $\alpha_{S1}$ ,  $\alpha_{S2}$ ,  $\beta$  et  $\kappa$  sont des molécules originales. Avec les caseines  $\gamma$ , elles forment plus de 75% du total azoté. Elles sont phosphorylées par une liaison ester avec la sérine ou la thréonine, ce qui accentue leur réaction acide. Elles précipitent à pH 4,65 à température ambiante et ne sont pas solubilisées par le chauffage à 100°C. Leurs masses moléculaires sont de 20.000 à 25.000Da ; or, à l'état natif, on les trouve toujours fortement associées, entre elles, dans des micelles relativement grosses et minéralisées (Cheftel, et al., 1985).

**Tableau III:** Composition moyenne des micelles de caséine bovine (g/100 g d'extrait sec) (FAO, 1995)

Constituants	Moyennes
Constituants protéiques	92
Caséine $\alpha_{S1}$	33
Caséine $\alpha_{S2}$	11
Caséine $\beta$	33
Caséine $\kappa$	11
Caseine $\gamma$	4
Constituants minéraux	8,0
Ca	2,9
Mg	0,1
	4.3
Ions citrate	0.5

- a- Caséine  $\alpha_{S1}$  :** c'est une molécule qui possède un pôle hydrophobe ; décelé sur trois tronçons compris entre les résidus 1-44, 30-113 et 132-199 et une partie hydrophile (résidu 41-80) ce qui confère à la caséine un comportement dipolaire (Figure 7). La structure secondaire de la caseine est suffisamment lâche pour permettre une accessibilité de la molécule aux protéases (Cheftel, et al., 1985).

1	Arg <b>Pro</b> Lys His <b>Pro</b> Ile Lys His Gln Gly Leu <b>Pro</b> Gln Glu Val	15
16	Leu Asn Glu Asn Leu Leu Arg Phe Phe Val Ala <b>Pro</b> Phe <b>Pro</b> Glu	30
31	Val Phe Gly Lys Glu Lys Val Asn Glu Leu Ser Lys Asp Ile Gly	45
46	<b>Ser</b> Glu <b>Ser</b> Thr Glu Asp Gln Ala Met Glu Asp Ile Lys Gln Met	60
61	Glu Ala Glu <b>Ser</b> Ile <b>Ser Ser Ser</b> Glu Glu Ile Val <b>Pro</b> Asn <b>Ser</b>	75
76	Val Glu Gln Lys His Ile Gln Lys Glu Asp Val <b>Pro</b> Ser Glu Arg	90
91	Tyr Leu Gly Tyr Leu Glu Gln Leu Leu Arg Leu Lys Lys Tyr Lys	105
106	Val <b>Pro</b> Gln Leu Glu Ile Val <b>Pro</b> Asn <b>Ser</b> Ala Glu Glu Arg Leu	120
121	His Ser Met Lys Glu Gly Ile His Ala Gln Gln Lys Glu <b>Pro</b> Met	135
136	Ile Gly Val Asn Gln Glu Leu Ala Tyr Phe Tyr <b>Pro</b> Glu Leu Phe	150
151	Arg Gln Phe Tyr Gln Leu Asp Ala Tyr <b>Pro</b> Ser Gly Ala Trp Tyr	165
166	Tyr Val <b>Pro</b> Leu Gly Thr Gln Tyr Thr Asp Ala <b>Pro</b> Ser Phe Ser	180
181	Asp Ile <b>Pro</b> Asn Pro Ile Gly Ser Glu Asn Ser Glu Lys Thr Thr	195
196	Met <b>Pro</b> Leu Trp	

**Figure 6:** Structure linéaire de la caseine Alpha S1(Bouquelet, 2016).

**b- Caséine  $\alpha_{S2}$  :** c'est la plus hydrophile de toutes les caséines car c'est la plus phosphorylée (10 à 13 résidus phosphorylés/mol) et la plus riche en résidus cationiques (Figure 8). Les résidus phosphorylés sont groupés en 3 pôles (résidus 8-16, 56-61 et 129-133) alors que les parties hydrophobes se limitent aux portions 160-207 (séquence C-terminale) et 90-120 (séquence centrale). Une telle structure suggère que les interactions électrostatiques sont très importantes et dépendent du pH ; il en résulte aussi une très grande sensibilité aux ions calcium (Cheftel, et al., 1985).

1	Lys Asn Thr Met <b>Glu</b> His Val <b>Ser Ser Ser Glu Glu</b> Ser Ile Ile	15
16	<b>Ser</b> Gln <b>Glu</b> Thr Tyr Lys Gln <b>Glu</b> Lys Asn Met Ala Ile Asn <b>Pro</b>	30
31	Ser Lys <b>Glu</b> Asn Leu Cys Ser Thr Phe Cys Lys Glu Val Val Arg	45
46	Asn Ala Asn <b>Glu Glu Glu</b> Tyr Ser Ile Gly <b>Ser Ser Ser Glu Glu</b>	60
61	<b>Ser</b> Ala <b>Glu</b> Val Ala Thr <b>Glu Glu</b> Val Lys Ile Thr Val Asp Asp	75
76	Lys His Tyr Gln Lys Ala Leu Asn <b>Glu</b> Ile Asn Gln Phe Tyr Gln	90
91	Lys Phe <b>Pro</b> Gln Tyr Leu Gln Tyr Leu Tyr Gln Gly <b>Pro</b> Ile Val	105
106	Leu Asn <b>Pro</b> Trp Asp Gln Val Lys Arg Asn Ala Val <b>Pro</b> Ile Thr	120
121	<b>Pro</b> Thr Leu Asn Arg <b>Glu</b> Gln Leu <b>Ser</b> Thr <b>Ser Glu Glu</b> Asn Ser	135
136	Lys Lys Thr Val Asp Met <b>Glu Ser</b> Thr <b>Glu</b> Val Phe Thr Lys Lys	150
151	Thr Lys Leu Thr <b>Glu Glu Glu</b> Lys Asn Arg Leu Asn Phe Leu Lys	165
166	Lys Ile Ser Gln Arg Tyr Gln Lys Phe Ala Leu <b>Pro</b> Gln Tyr Leu	180
181	Lys Thr Val Tyr Gln His Gln Lys Ala Met Lys <b>Pro</b> Trp Ile Gln	195
196	<b>Pro</b> Lys Thr Lys Val Ile <b>Pro</b> Tyr Val Arg Tyr Leu	

**Figure 7:** Structure linéaire de la caseine Alpha S2 (Bouquelet, 2016).

- c- **Caseine  $\beta$**  : c'est la plus hydrophobe des caseines. La molécule présente un caractère amphipolaire : une partie N-terminale très polaire (résidus 1-21) contient 4 à 5 atomes de phosphore et une partie C-terminale hydrophobe comprenant les 2/3 de la molécule (non chargée (Figure 9)). Le comportement de la caseine  $\beta$  *vis-à-vis* des protéases diffère selon qu'elle se trouve sous forme monomère ou incluse dans la micelle. A basses températures (4°C), la caseine  $\beta$  peut quitter la structure micellaire et devenir plus sensible aux protéases (Cheftel, et al., 1985).

1 Arg Glu Leu Glu Glu Leu Asn Val **Pro** Gly Glu Ile Val Glu **Ser** 15  
 16 Leu **Ser Ser Ser** Glu Glu Ser Ile Thr Arg Ile Asn Lys Lys Ile 30  
 31 Glu Lys Phe Gln **Ser** Glu Glu Gln Gln Gln Thr Glu Asp Glu Leu 45  
 46 Gln Asp Lys Ile His **Pro** Phe Ala Gln Thr Gln Ser Leu Val Tyr 60  
 61 **Pro** Phe **Pro** Gly **Pro** Ile **Pro** Asn Ser Leu **Pro** Gln Asn Ile **Pro** 75  
 76 **Pro** Leu Thr Gln Thr **Pro** Val Val Val **Pro Pro** Phe Leu Gln **Pro** 90  
 91 Glu Val Met Gly Val Ser Lys Val Lys Glu Ala Met Ala **Pro** Lys 105  
 106 His Lys Glu Met **Pro** Phe **Pro** Lys Tyr **Pro** Val Glu **Pro** Phe Thr 120  
 121 Glu Ser Gln Ser Leu Thr Leu Thr Asp Val Glu Asn Leu His Leu 135  
 136 **Pro** Leu **Pro** Leu Leu Gln Ser Trp Met His Gln **Pro** His Gln **Pro** 150  
 151 Leu **Pro Pro** Thr Val Met Phe **Pro Pro** Gln Ser Val Leu Ser Leu 165  
 166 Ser Gln Ser Lys Val Leu **Pro** Val **Pro** Gln Lys Ala Val **Pro** Tyr 180  
 181 **Pro** Gln Arg Asp Met **Pro** Ile Gln Ala Phe Leu Leu Tyr Gln Glu 195  
 196 **Pro** Val Leu Gly **Pro** Val Arg Gly **Pro** Phe **Pro** Ile Ile Val

**Figure 8:** Structure linéaire de la caseine Béta (Bouquelet, 2016).

**d- Caseine  $\kappa$  :** ne contient qu'un seul résidu phosphorylé (Ser 149), elle fixe peu d'ions calcium et sa solubilité n'est pas affectée par leur présence. Elle possède un caractère amphipolaire : sa partie N-terminale est hydrophobe et sa partie C-terminale à tri ou tetra-saccharides est hydrophile (Cheftel, et al., 1985).

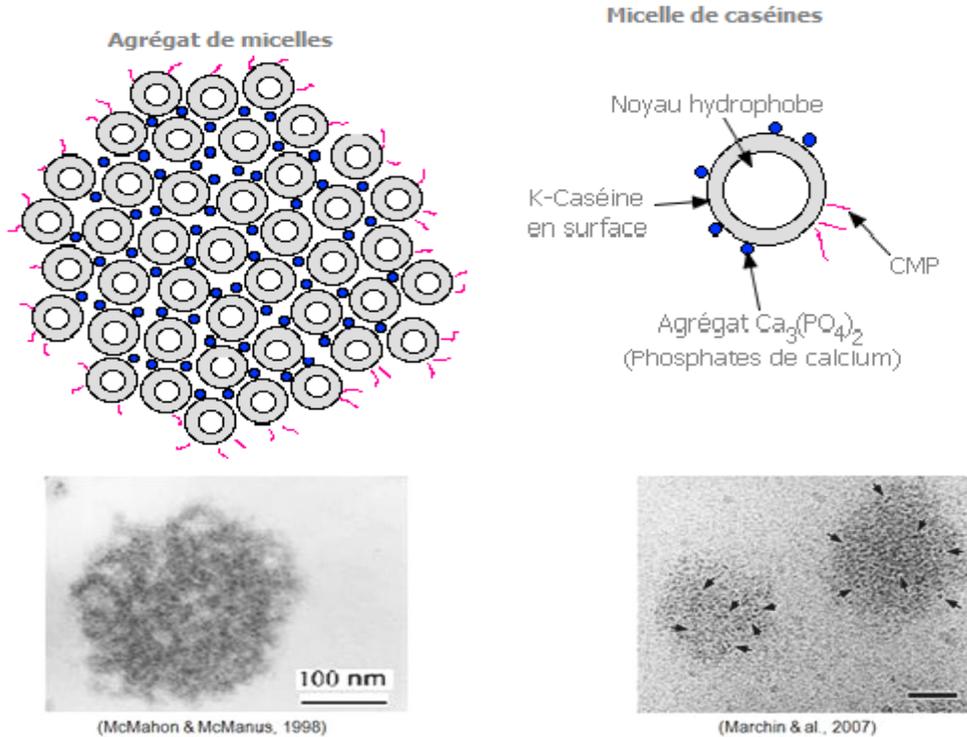
La caractéristique amphipolaire de cette caseine se manifeste surtout lors de la coagulation par la présure, qui hydrolyse la caseine  $\kappa$  entre le résidu Phe<sub>105</sub> et Met<sub>106</sub>. Le caseino-macropéptide libéré (106-169) contient dans sa séquence les résidus phosphorylés (149) et glycosylés (131, 133, 135 ou 136) ainsi que les substitutions des acides aminés des variants A et B (136 et 148) ; il est très polaire et soluble. La partie N-terminale (1-105) encore appelée para-caseine  $\kappa$ , chargée positivement à pH 6,6, est très hydrophobe et peu soluble ; elle contient les deux résidus cystéinyl (Cys 11 et Cys 88) (Cheftel, et al., 1985).

1	Gln Glu Gln Asn Gln Glu Gln <b>Pro</b> Ile Arg <b>Cys</b> Glu Lys Asp Glu	15
16	Arg Phe Phe Ser Asp Lys Ile Ala Lys Tyr Ile <b>Pro</b> Ile Gln Tyr	30
31	Val Leu Ser Arg Tyr <b>Pro</b> Ser Tyr Gly Leu Asn Tyr Tyr Gln Gln	45
46	Lys <b>Pro</b> Val Ala Leu Ile Asn Asn Gln Phe Leu <b>Pro</b> Tyr <b>Pro</b> Tyr	60
61	Tyr Ala Lys <b>Pro</b> Ala Ala Val Arg Ser <b>Pro</b> Ala Gln Ile Leu Gln	75
76	Trp Gln Val Leu Ser Asn Thr Val <b>Pro</b> Ala Lys Ser <b>Cys</b> Gln Ala	90
91	Gln <b>Pro</b> Thr Thr Met Ala Arg His <b>Pro</b> His Pro His Leu Ser <b>Phe</b>	105
106	Met Ala Ile <b>Pro Pro</b> Lys Lys Asn Gln Asp Lys Thr Glu Ile <b>Pro</b>	120
121	<b>Thr</b> Ile Asn Thr Ile Ala Ser Gly Glu <b>Pro Thr</b> Ser <b>Thr Pro Thr</b>	135
136	Thr Glu Ala Val Glu Ser <b>Thr</b> Val Ala Thr Leu Glu Asp <b>Ser Pro</b>	150
151	Glu Val Ile Glu Ser <b>Pro Pro</b> Glu Ile Asn Thr Val Gln Val <b>Thr</b>	165
166	Ser Thr Ala Val	

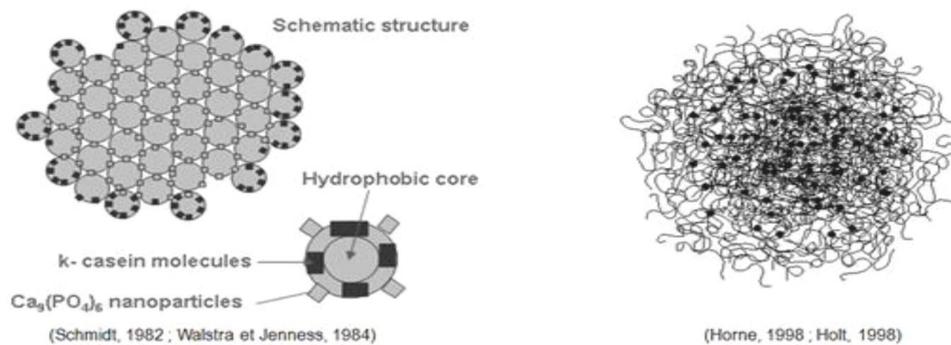
**Figure 9:** Structure linéaire de la caseine Kappa (Bouquelet, 2016).

La submicelle de caséine n'a pas une structure homogène elle possède un cœur hydrophobe constitué par la caséine  $\beta$  associée aux parties hydrophobes des autres caséines. En périphérie on retrouvera les parties hydrophiles des différentes caséines (partie phosphorylée pour les caséines  $\alpha_{S1}$  et  $\alpha_{S2}$ ) ainsi que la partie glycosylée de la caséine  $\kappa$ . La caséine kappa serait susceptible de stabiliser 10 fois son propre poids en caséine  $\alpha_{S1}$ ,  $\alpha_{S2}$  et  $\beta$ .

La micelle de caséine est constituée de 10 à 100 submicelles reliées entre elles par l'intermédiaire de pont phospho-calcique. Les résidus phosphosérines et les groupements acides des acides aminés participent à l'interaction des submicelles avec le calcium. Dans le lait il y a environ 34 mmoles par litre de calcium dont 24 mmoles appartiennent aux micelles sous la forme de phosphate de calcium ( $Ca/Pi = 1,5$  à  $2$ ), le tiers restant est sous forme soluble de citrate de calcium. Dans la micelle de caséine, 10 à 15 mmoles de calcium servent à la stabilisation de la micelle, le reste du calcium est interchangeable. On peut remarquer qu'un réseau de microgranules de brushite ( $CaHPO_4, 2H_2O$ ) participe à la cohésion de la micelle. Le magnésium ne peut pas remplacer le calcium dans les interactions. Ce sont les caséines alpha et béta qui vont fixer le calcium. La caséine  $S_2$  est la plus sensible à l'action des ions calcium (Bouquelet, 2016).



**Les modèles de la micelle de caséines**



**Figure 10:** Différents modèles structuraux de la micelle de caséine.

**e- Valeur nutritionnelle des caséines**

La caséine est souvent utilisée comme protéine de référence dans les travaux nutritionnels mais, elle est connue pour avoir une faible valeur nutritionnelle par rapport à des protéines animales et certaines protéines végétales. Les acides aminés les plus retrouvés dans les caséines sont Leu, Pro et Gln, alors que les acides aminés essentiels comme Cys, Trp et Met sont plus rares. Les acides aminés essentiels contenant du soufre, Met et Cys, sont les plus limitant, en particulier la Cys. Dans des séquences alignées de caséines  $\beta$  et  $\gamma$  de différentes espèces, les acides aminés essentiels, Cys et Trp, qui sont normalement bien conservés dans les protéines globulaires, sont plus susceptibles de muter que les Glu et Ser

non essentiels. Ainsi, l'adéquation nutritionnelle fournit une mauvaise base pour comprendre la composition et la structure de la caséine (De Kruif et Holt, 2003 ; Béraud, 2013).

#### **f- Coagulation des caséines**

Les propriétés fonctionnelles utilisables en technologie alimentaire (rétention d'eau et de substances volatiles, solubilité, coagulation, gélification, émulsification, moussage ...) dépendent étroitement des propriétés d'hydratation et de surface qui elles-mêmes résultent d'interactions des divers éléments de structure des protéines (Cheftel et Lorient, 1982).

La coagulation du lait résulte de l'association des micelles de caséine plus au moins modifiées. Cette agglomération mène à la formation d'un coagulum dont le volume est égal à celui du lait mis en oeuvre. Ces modifications physico-chimiques des caséines sont induites soit par acidification soit par action d'enzymes coagulantes. L'acidification du lait peut être obtenue par les produits de fermentation de bactéries acidifiantes ou par des composés chimiques d'action acidifiante directe ou indirecte. La diminution concomitante du pH a pour effet de faire régresser l'ionisation des fonctions acides des caséines induisant le déplacement progressif du calcium et du phosphate inorganique de la micelle vers la phase aqueuse. Ceci induit la désorganisation des micelles et une réorganisation des sous unités micellaires. L'acidification microbienne du lait est un processus progressif, lent et uniforme. Il est caractérisé par des difficultés liées à la maîtrise du développement microbien (cinétique de multiplication, état physiologique, facteurs de croissance, produits de métabolismes et autres). Le coagulum édifié est un ensemble de flocons caséiniques emboîtés les uns sur les autres. Le taux et l'importance de l'acidification influencent la texture du gel en contrôlant son taux de déminéralisation. Le gel acide obtenu est friable, lisse et homogène.

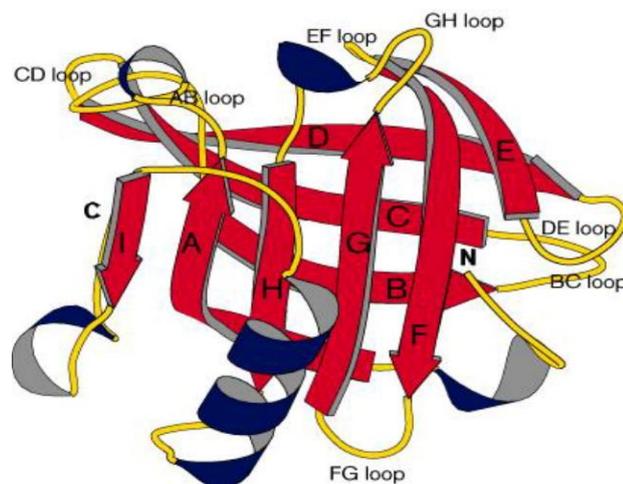
Dans la coagulation enzymatiques, plusieurs enzymes protéolytiques d'origine animale (veau, taurillons, porc et poulets), végétale (artichaut, chardon) et microbienne (*Kluyvermyces*, *Mucor miehi*, *Mucorpusills* et *Endothia parasitica*) sont utilisés. L'enzyme la plus fréquente en fromagerie est la présure, sécrétée dans la caillette des jeunes ruminants nourris au lait. Son mécanisme d'action fait apparaître trois étapes : hydrolyse enzymatique de la liaison peptidique phe105-Met106 de la caséine k, ensuite agrégation des micelles de caséines déstabilisées et puis développement d'un réseau par réticulation et formation d'un gel. Les gels obtenus sont élastiques et peu friables. Leur raffermissement est rapide et important par rapport au gel lactique. Leur porosité est bonne, mais leur imperméabilité est forte (Zidoune, 2017).

### II.2.3.2.2. Protéines sériques

Les protéines solubles représentent environ 20% des protéines totales du lait de vache. Elles flocculent difficilement en présence d'acide ou de présure. Par contre, à l'exception des protéoses peptones, elles sont dénaturées par la chaleur et sont entraînées lors de la coagulation de la caséine sous l'action de la présure. Un chauffage à 80°C pendant une minute en dénature environ 20%, mais, lors de la pasteurisation UHT (72°C pendant 15 à 20 secondes), la dénaturation est négligeable.

#### a- Béta-Lactoglobuline ( $\beta$ -LG)

La  $\beta$ -LG est quantitativement la protéine dominante du lactosérum (58% (w / w)), a été découverte pour la première fois en 1934. Sous sa forme isolée, elle présente une faible solubilité (malgré sa nature globulaire) et une faible force ionique. Synthétisée dans la glande mammaire des ruminants (et d'autres espèces), cette protéine a plusieurs variants génétiques - dont  $\beta$ -LG A est le plus courant. Elle est composée principalement de motifs de feuillet  $\beta$ , composée de 162 résidus d'acides aminés - qui conduisent à un poids moléculaire d'environ 18,277 kDa. Sa structure quaternaire dépend du pH du milieu : il se présente principalement sous forme d'un dimère stable, avec un poids moléculaire de 36 700 kDa, à des valeurs de pH entre 7 et 5,2 ; comme octamère, avec un poids moléculaire d'environ 140 000 kDa, à des valeurs de pH comprises entre 5,2 et 3,5 ; et en tant que monomère, avec deux résidus cystéine par monomère, à pH 3,0 et supérieur à 8,0 (Madureira et al., 2007).

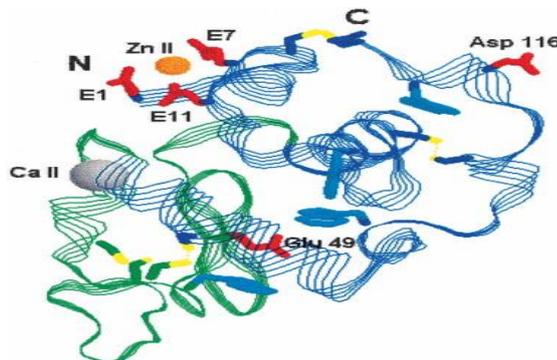


**Figure 11:** Structure de la Béta-lactoglobuline (Brownlow et al., 1997).

### b- Alpha-Lactalbumine ( $\alpha$ -LA)

$\alpha$ -LA est quantitativement la deuxième protéine la plus importante dans le lactosérum – représentant environ 20% (w/w) du lactosérum total, et est entièrement synthétisée dans le mammaire glande. Elle y agit comme coenzyme pour la biosynthèse du lactose – une importante source d'énergie pour le nouveau-né. Elle contient 123 résidus d'acides aminés (sa séquence génétique est assez homologue à celle du lysozyme), qui conduit à un poids moléculaire de 14 175 kDa. Trois variantes génétiques ont déjà été identifiées – A, B et C (Fox, 1989). Sa structure globulaire est stabilisée par quatre liaisons disulfures, à des pH compris entre 5,4 et 9,0 (Madureira et al., 2007).

La petite protéine du lait  $\alpha$ -lactalbumine (protéine-LA), un composant de la lactose synthase, est un modèle simple de protéine de liaison au  $\text{Ca}^{2+}$ , qui n'appartient pas aux protéines de la main EF, et un exemple classique d'état de globule fondu. Il possède un site de liaison  $\text{Ca}^{2+}$  puissant, qui lie  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ , et plusieurs sites de liaison  $\text{Zn}^{2+}$  distincts. La liaison des cations au site  $\text{Ca}^{2+}$  augmente la stabilité de la protéine contre l'action de la chaleur et de divers agents dénaturants, tandis que la liaison du  $\text{Zn}^{2+}$  à la protéine chargée en  $\text{Ca}^{2+}$  diminue sa stabilité. Le fonctionnement de l'-LA nécessite ses interactions avec les membranes, les protéines, les peptides et les substrats et produits de faible poids moléculaire. Il a été montré que ces interactions sont modulées par la liaison de cations métalliques. Récemment, il a été découvert que certaines variantes de repliement de  $\alpha$ -LA présentent une activité bactéricide et que certaines d'entre elles provoquent l'apoptose des cellules tumorales (Permyakov, et Berliner, 2000).

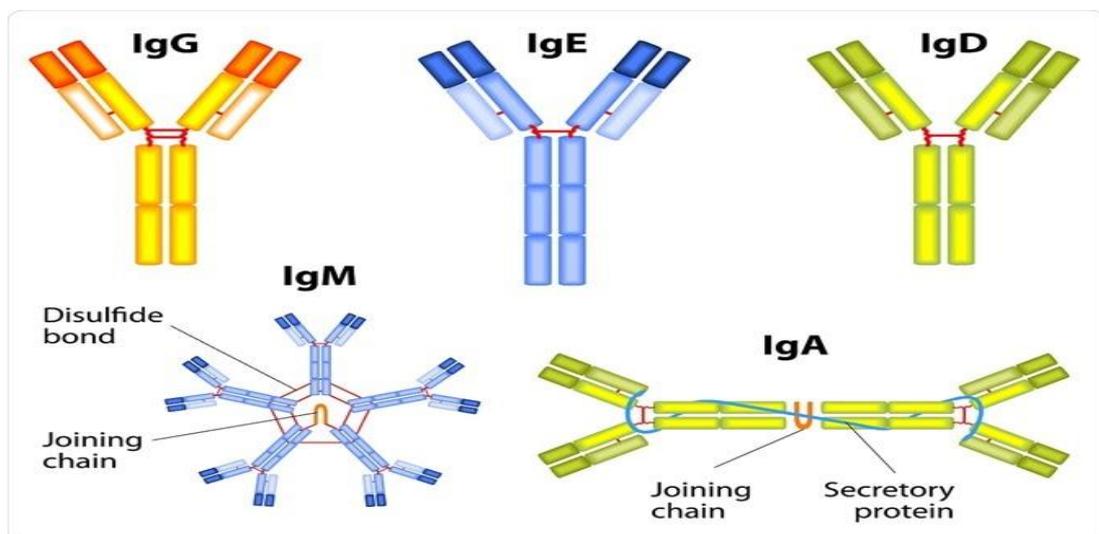


**Figure 12:** Structure de l'Alpha-lactalbumine ( $\alpha$ -LA) (Permyakov et Berliner,2000).

### c- Immunoglobulines (G1, G2, A et M)

Les IG constituent un groupe complexe dont les éléments sont produits par les lymphocytes B; ils contribuent significativement à la teneur en protéines du lactosérum - en plus d'exercer une fonction immunologique importante (en particulier dans le colostrum). Ces protéines sont présentes dans le sérum et fluides physiologiques de tous les mammifères; certains d'entre eux s'attachent aux surfaces, où ils se comportent comme des récepteurs, tandis que d'autres fonctionnent comme des anticorps, qui sont libérés dans le sang et lymphé. Les IG sont soumis à un transfert postnatal via le colostrum – car le placenta ne permet pas le passage des macromolécules. La structure et la fonction de l'IG bovine ont été revues par Korhonen, Marnila et Gill (2000).

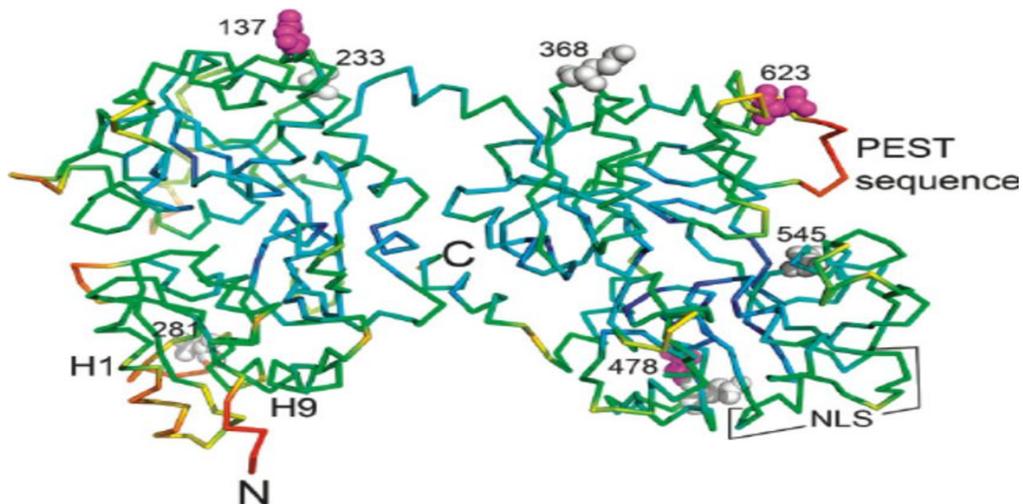
En termes de structure quaternaire, les IG sont soit des monomères ou des polymères d'une molécule à quatre chaînes, constitués de deux chaînes polypeptidiques légères (avec un poids moléculaire de 25 000 kDa) et deux chaînes lourdes (avec poids de 50 000 à 70 000 kDa). La nomenclature des éléments de cette famille est sur la base de leur réaction immunologique croisée avec la référence protéines, de préférence d'origine humaine, comme proposé par l'OMS. Il existe cependant trois classes d'immunoglobuline : IGG, IGA et IGM, bien que IGG soit souvent subdivisé en deux sous-classes – IGG1 et IGG2. Jusqu'à 80 % de toutes les IG dans le lait ou le lactosérum sont comptabilisés par IGG mais qualitativement, la famille des IG retrouvée chez le lactosérum bovin et le colostrum comprennent les IGA et les IGA sécrétoires, Fragments IGG1, IGG2 et IGG, IGM, IGE, chaîne J ou composant, et un composant sécréteur libre (Madureira et al., 2007).



**Figure 13:** Structure des immunoglobulines

#### d- Lactoferrine ou lactotransferrine

Isolée en 1960, la lactoferrine appartient à la famille des transferrines : lactoferrines (Lf) et transferrines (Tf) fixent réversiblement deux ions ferriques et possèdent non seulement une structure primaire (59 % homologie) mais également une conformation spatiale très proche avec des sites de liaison du fer identiques. Elles diffèrent par leur charge de surface (pHi de 8,4-9 pour la Lf et de 5,4-5,9 pour la Tf) et la stabilité de la liaison protéine-fer. En effet, la stabilité de fixation du fer ferrique en fonction du pH de la Lf est supérieure à celle de la Tf. Il faut en effet un pH inférieur à 2 pour dissocier le fer de la Lf, alors qu'un pH inférieur à 6 suffit à le dissocier de la Tf. Cette caractéristique, associée à une affinité pour le fer sensiblement supérieure à celle de la Tf à pH neutre, attribue un rôle de chélateur du fer à la Lf, plutôt que celui de transporteur du fer, propre à la Tf (Pierce et al., 2009).

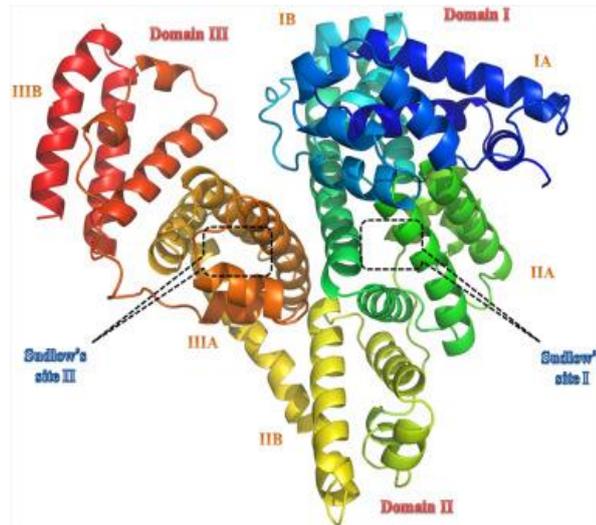


**Figure 14:** Structure de la lactoferrine (Baker et Baker, 2012).

#### e- Sérumalbumine

La BSA n'est pas synthétisée dans la glande mammaire, mais apparaît dans le lait suite à une fuite passive de la circulation sanguine. Elle contient 582 résidus d'acides aminés, avec un poids moléculaire de 66 267 kDa ; elle possède aussi 17 ponts disulfure intermoléculaires et un groupe thiol au résidu 34. En raison de sa taille et des niveaux de

structure plus élevés, la BSA peut se lier aux acides gras libres et autres lipides, ainsi qu'à des composés aromatiques une caractéristique qui est gravement entravée par la dénaturation. Sa gélification par la chaleur à pH 6,5 est initiée par un échange intermoléculaire de thiol-disulfure, similaire à ce qui se passe avec  $\beta$ -LG (Madureira et al., 2007).



**Figure 15:** Structure de la Bovin serum Albumin (BSA) (Jahanban-Esfahlan et al., 2019).

#### f- Enzymes

Ce sont des substances organiques de nature protidique, produites par des cellules ou des organismes vivants, agissant comme catalyseurs dans les réactions biochimiques. Environ 60 enzymes principales ont été répertoriées dans le lait dont 20 sont des constituants natifs. Une grande partie se retrouve dans la membrane des globules gras mais le lait contient de nombreuses cellules (leucocytes, bactéries) qui élaborent des enzymes : la distinction entre éléments natifs et éléments extérieurs n'est donc pas facile.

Ces enzymes peuvent jouer un rôle très important en fonction de leurs propriétés:

- lyses des constituants originels du lait ayant des conséquences importantes sur le plan technologique et sur les qualités organoleptiques du lait (lipase, protéase) ;
- rôle antibactérien, elles apportent une protection au lait (lactoperoxydase et lysozyme) ;
- indicateurs de qualité hygiénique (certaines enzymes sont produites par des bactéries et des leucocytes), de traitement thermique (phosphatase alcaline, peroxydase, acétyl estérase, sont des enzymes thermosensibles) et d'espèces (test de la xanthine-oxydase pour détecter le lait de vache dans le lait de chèvre) (Pougheon, 2001).

### **g- Valeur nutritionnelle des protéines du lactosérum**

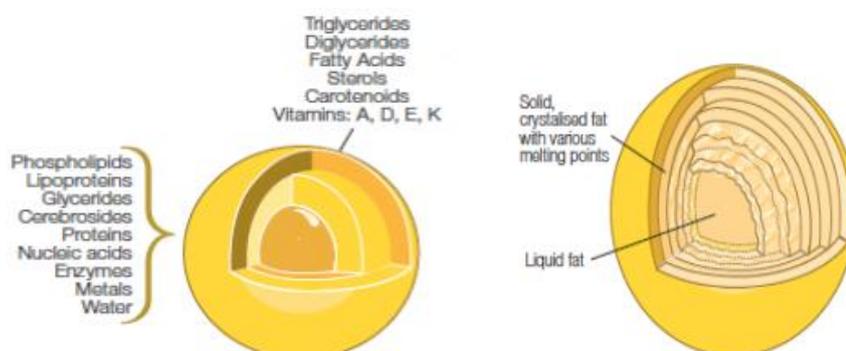
Les protéines du lactosérum ont une valeur nutritive majeure en nutrition humaine, car elles sont riches en acides aminés essentiels. Les protéines des laits de vache et de femme ont un profil en acides aminés différent. En conséquence, lorsqu'une formule lactée adaptée au lait maternel (laits infantiles dits «à prédominance ou enrichis en lactalbumines») est choisie pour alimenter un enfant, les protéines du lactosérum induisent dans le plasma du nourrisson un profil en acides aminés tout différent de celui obtenu par l'administration d'un lait de vache non modifié.

Son constituant essentiel (50-55%) est la  $\beta$ -lactoglobuline bovine, totalement absente du lait humain. Son rôle n'est pas connu. La deuxième protéine soluble (20-25%) du lait bovin est, par ordre d'importance, l' $\alpha$ -lactalbumine. Elle est présente dans le lait de tous les mammifères qui sécrètent du lactose puisque cette protéine est partie intégrante de l'enzyme de synthèse du lactose. Parmi les protéines solubles restantes certaines, comme la sérum-albumine, ont une faible valeur nutritionnelle. D'autres comme les immunoglobulines et la lactoferrine n'en ont pas du tout. Le taux de lactoferrine est très bas dans le lait de vache (0,2 g/litre). La lactoferrine bovine est nettement plus saturée en fer que la lactoferrine humaine (environ 30% contre 5%) et ce fer lié est peu biodisponible pour l'absorption digestive tant chez l'enfant que chez l'adulte.

### **II.2.4. Matière grasse**

Les matières grasses sont présentes dans le lait sous forme d'une émulsion de globules gras (Bylund, 1995) (Figure 17). La teneur en matières grasses du lait est appelée taux butyreux (TB). Les termes «matières grasses» et «lipides» ne sont pas synonymes. En effet, la matière grasse obtenue par des moyens mécaniques (produit de l'écémage obtenu par centrifugation) représente le contenu du globule gras. De ce fait, elle ne contient pas les lipides polaires ou complexes (phospholipides, etc.), mais contient par contre des composés liposolubles qui ne sont pas des lipides au sens strict et que l'on nomme «substance lipoïde». Il s'agit essentiellement d'« hydrocarbures » (dont le carotène), d'alcools (dont le cholestérol et la vitamine E) et de vitamines liposolubles (A, D, K). Cette fraction encore appelée insaponifiable regroupe donc des composés variés et nombreux qui représentent moins de 1% de la matière grasse totale du lait. Les lipides (fraction saponifiable) constituent donc l'essentiel de la matière grasse (>98%). Le tableau IV détaille à la fois la teneur (par 100 g de

matière grasse) et la (ou les) localisation(s) principale(s) des lipides du lait (Courtet Leymarios, 2010).



**Figure 16:** Structure d'un globule gras (Bylund, 1995).

La majorité de la matière grasse du lait se trouve sous forme de triglycérides formés par l'union de trois acides gras au glycérol. La longueur des acides gras détermine le point de fusion des matières grasses et donc la consistance du beurre qui en dérive (Wattiaux, 2014).

Elle se présente sous forme globulaire et dispersée dans la phase aqueuse; une émulsion de type huile dans l'eau, relativement instable en raison de la taille importante des globules gras (0,1 à 20  $\mu\text{m}$ ) constitués majoritairement de triglycérides qui sont entourés d'une membrane protectrice (Bylund, 1995).

**Tableau IV:** Constituants lipidiques du lait de vache et localisation dans les fractions physicochimiques (g/100 g de matière grasse) (FAO, 1995).

Constituants lipidiques	Proportions	Localisation
<b>Triglycérides</b>	96-98	Globule gras
<b>Diglycérides</b>	0,3-1,6	Globule gras
<b>Monoglycérides</b>	00-0,1	Globule gras
<b>Phospholipides</b>	0,2-1,0	Membrane du globule gras et lactosérum
<b>Cérébrosides</b>	00-0,08	Membrane du globule gras
<b>Stéroïdes</b>	0,2-0,4	Globule gras
<b>Acides gras libres</b>	0,1-0,4	Membrane du globule gras
<b>Esters du cholestérol</b>	Traces	Membrane du globule gras
<b>Vitamines</b>	0,1-0,2	Globule gras

### II.2.4.1. Lipides simples

Ils sont essentiellement constitués de glycérides (98% de la matière grasse) avec, en faibles quantités, des stérides et des cérébrosides. Les glycérides (lipides neutres) sont constituées par des triglycérides (plus de 98%), des diglycérides (de 0,2 à 1,5%) et des monoglycérides (traces) (Courtet Leymarios, 2010).

Les acides gras saturés, à nombre pair de carbone, dominent très largement puisqu'ils représentent à eux seuls près de la moitié des acides gras. De fait, 34% des triglycérides ne contiennent que des acides gras saturés, 39% un seul insaturé, 25% deux insaturés et 2% seulement trois insaturés (FAO, 1995). La composition moyenne en acides gras du lait est présentée dans le tableau 5.

**Tableau V:** Distribution des principaux acides gras de la graisse du lait de vache (%) (FAO, 1995).

Acide gras	Nomenclature	Moyenne
<b>Saturés</b>		
Butyrique	C4 :0	3,6
Caproïque	C6 :0	2,3
Caprylique	C8 :0	1,3
Caprique	C10 :0	2,7
Laurique	C12 :0	3,3
Myristique	C14 :0	10,7
Pentadécanoïque	C15 :0	1,2
Palmitique	C16 :0	27,6
Stéarique	C18 :0	10,1
Arachidique	C20 :0	0,2
<b>Mono-insaturés</b>		
Myristoléique	C14 :1	1,4
Palmitoléique	C16 :1	2,6
Oléique	C18 :1	26,0
<b>Polyinsaturés</b>		
<b>Non conjugués</b>		
Linoléique	C18 :2	2,5
Linolénique	C18 :3	1,4
Arachidonique	C20 :4	0,3
<b>Conjugués</b>		
Diène	C18 :2	0,8

### II.2.4.2. Lipides complexes

Ces lipides sont complexés avec du phosphore et/ou de l'azote. Les plus importants sont les phospholipides (de 0,3 à 0,5 g/L), jouent le rôle de constituant du globule gras et de stabilisant de l'émulsion. Leurs caractéristiques à la fois lipo- et hydrophiles leur permettent de former des ponts entre phases grasse et aqueuse. On en retrouve donc tant dans la crème (environ 60%) et le beurre que dans le lait écrémé (40%) ou le babeurre. Les phospholipides forment trois groupes principaux : lécithines, céphalines et sphingomyélines. Environ 85% des acides gras constituant des phospholipides sont des acides gras à chaîne longue (Courtet Leymarios, 2010).

### II.2.4.3. Stérols

Les stérols (non saponifiables) sont présents à l'état libre (>80%) ou estérifiés par des acides gras. Ils représentent de 0,3 à 0,4% de la matière grasse totale du lait (environ 0,1 g/L). Le cholestérol en est le constituant majeur (70 mg/L). Son taux n'accuse pas de variation saisonnière. Les stérols entrent surtout dans la composition de la membrane lipoprotéique du globule gras (de 0,3 à 3,5% des lipides membranaires) et ils contribuent à la stabilité de l'émulsion (Courtet Leymarios, 2010).

### II.2.4.4. Valeur nutritionnelle des lipides du lait

Avec 9 kcal/g, les lipides sont les macronutriments les plus énergétiques. Ils sont indispensables pour nos activités quotidiennes (activité musculaire, régulation de la température corporelle) et lorsque l'on en consomme plus que nécessaire, ils sont mis en réserve, stockés dans les cellules graisseuses (FAO, 1995).

Les lipides sont très importants pour la santé parce qu'ils constituent la structure des membranes de nos cellules et par là conditionnent leur bon fonctionnement et donc celui des organes auxquels elles appartiennent (FAO, 1995).

Les cellules humaines sont capables de synthétiser tous les acides gras saturés et l'acide oléique (à partir du glucose). En revanche, le corps est incapable de fabriquer deux acides gras polyinsaturés. Le premier est l'acide linoléique (oméga-6). Le second est l'acide alpha-linolénique (oméga-3). Ils sont retrouvés dans l'alimentation. Ce sont des acides gras indispensables (FAO, 1995).

La teneur en lipide et/ou matière grasse dans le lait dépend essentiellement de l'alimentation de la vache.

### II.2.5. Vitamines

Le lait est un aliment vivant, il renferme les vitamines liposolubles (A, D, E et K) et hydrosolubles (B, C,...)les teneurs moyennes en ces différentes vitamines sont représentées dans le tableau VI. Les pertes vitaminiques varient considérablement selon les propriétés de chaque vitamine ainsi que selon la nature des traitements et leurs modalités (FAVIER, 1985).

**Tableau VI:** les vitamines dans le lait (FAO, 1995).

<b>Vitamines</b>	<b>Moyennes</b>
<b>Vitamines hydrosolubles</b>	
<b>B. (thiamine)</b>	0,42
<b>B2 (riboflavine)</b>	1,72
<b>B6 (pyridoxine)</b>	0,48
<b>B12 (cobalamine)</b>	0,0045
<b>Acide nicotinique</b>	0,92
<b>Acide folique</b>	0,053
<b>Acide pantothénique</b>	3,6
<b>Inositol</b>	1 60
<b>Biotine</b>	0,036
<b>Choline</b>	1 70
<b>C (acide ascorbique)</b>	8
<b>Vitamines liposolubles</b>	
<b>A</b>	0,37
<b>β-carotène</b>	0,21
<b>D (cholécalférol)</b>	0,0008
<b>E (tocophérol)</b>	1, 1
<b>K</b>	0,03

#### II.2.5.1. Vitamines liposolubles

**Vitamine A (rétinol):** La vitamine A, facteur principal de croissance, existe en abondance dans le lait qui pendant de, longs mois est l'aliment exclusif du nourrisson et convient à son développement (Lesné et Vagliano, 1925).

La résistance de cette vitamine aux agents physiques est moyenne; de hautes-températures prolongées la détruisent lentement; la stérilisation du lait aux températures utilisées dans l'industrie ne l'attaque pas de façon appréciable. Au contraire, une température de 1000 en coopération avec l'oxydation par apport d'oxygène ou tout simplement par un courant d'air détruit très rapidement la vitamine A; aussi bien l'oxydation à la température

ordinaire la détruit lentement. Cette vitamine résiste mal aux rayons ultra-violet (Lesné et Vagliano, 1925).

La vitamine A possède un rôle important dans la vision en contribuant à l'adaptation de l'oeil à l'obscurité mais également à la santé de la peau, à la santé des muqueuses et à la régulation du système immunitaire. Elle participe aussi à la croissance des os, à la reproduction (joue un rôle clé dans le développement des organes de l'embryon) et à la régulation de l'expression du génome par l'acide rétinoïque (Castelli, 2020).

**Vitamine D (vitamine D3 ou cholécalciférol) :** La teneur varie selon les régions et les saisons. La vitamine D possède une double origine (alimentaire et endogène), elle contribue à augmenter la capacité de l'intestin à absorber le calcium et le phosphore (Courtet Leymarios, 2010 ; Castelli, 2020).

Elle joue un rôle important au métabolisme du calcium et du phosphore, en augmentant leur absorption intestinale et en diminuant leur élimination dans les urines. Pour assurer la minéralisation des tissus (cartilage, os et dents), la vitamine D va subir une conversion en 1,25-dihydroxyvitamine D. Durant la croissance et (même) après, elle contribue, avec l'hormone parathyroïdienne (parathormone), au maintien de l'homéostasie calcique (Castelli, 2020).

Plusieurs tranches d'âge de population sont à risque de carence en vitamine D : > les nouveau-nés, nourrissons et femmes enceintes, Les personnes âgées, les personnes s'exposant peu au soleil ou portant des vêtements couvrants toute l'année (Courtet Leymarios, 2010).

**Vitamine E ou Tocophérol :** de 2 à 5 mg/100 g MG, est un antioxydant qui protège les lipides des altérations oxydatives. Plus de 95 pour cent de la vitamine E est de l' $\alpha$ -tocophérol, le composé biologique le plus actif, le reste étant composé de gamma-tocophérol uniquement. La vitamine E a la capacité de piégeage et inhibition de la propagation de radicaux libres peroxy (Courtet Leymarios, 2010 ).

**Vitamine K :** synthétisée dans le rumen, se trouve en quantités faibles, mais suffisantes pour l'homme (de 0,1 à 0,5 mg /100 g de lipides). La vitamine K se présente sous différentes formes, avec principalement :

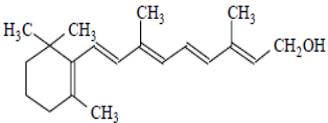
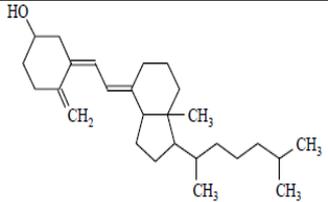
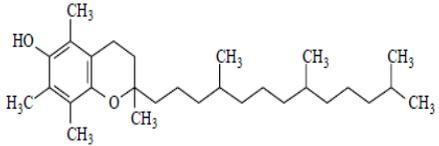
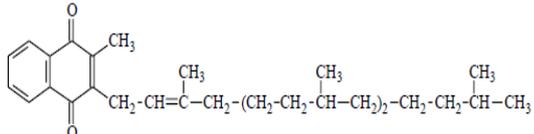
- La vitamine K1, également appelée la phytoménadione, la phylloquinone ou la phytonadione, est synthétisée uniquement par les plantes.

- La vitamine K2, également appelée ménaquinone, est synthétisée par les bactéries de la flore intestinale à partir du bol alimentaire (Castelli, 2020).

Cette vitamine est indispensable à la coagulation sanguine et favorise la fixation du calcium sur la matrice protidique de l'os (Courtet Leymarios, 2010).

Le tableau VII représente les quatre vitamines liposolubles, leur structure, les besoins journaliers pour chacune ainsi que les pathologies qui peuvent être liées à leur déficit.

**Tableau VII: Vitamines liposolubles**

Vitamine ⇒ Forme(s) active(s)	Structure	Besoins journaliers	Pathologies associées à un déficit	Formes actives
<b>Vitamine A</b> ⇒ rétinal		1 à 2 mg.jour <sup>-1</sup>	Dégénérescence rétinienne Cécité nocturne Cécité	Rétinol Rétinal Acide rétinoïque
<b>Vitamine D</b> ⇒ calciol		10 µg.jour <sup>-1</sup>	Rachitisme chez l'enfant Ostéomalacie chez l'adulte	Calcitriol
<b>Vitamine E</b> ⇒ tocophérol		12 à 15 mg.jour <sup>-1</sup>	Signes discrets	Tocophérol
<b>Vitamine K</b> ⇒ phylloquinone		Non fixés	Anomalies de la coagulation	Phyllohydroquinone

Il est bien connu que lorsque les vaches sont exposées aux radiations solaires ultra-violettes et lorsqu'elles broutent une herbe riche en carotènes et tocophérols, leur lait devient plus riche en vitamines liposolubles A, D et E. Les facteurs génétiques jouent également parfois un rôle (Favier, 1985).

L'ensemble de ces facteurs explique que certains laits soient, plus riches que d'autres selon les races prédominantes, le climat, la saison, le mode d'élevage.

Les teneurs des laits en vitamines liposolubles dépendent essentiellement du taux de matière grasse. Le lait entier peut contenir des quantités importantes de ces vitamines alors que le lait écrémé n'en contient que des traces. Pour les teneurs en rétinal et en β-carotène de

lait à même taux de matière grasse il n'existe pas de différence significative entre le lait pasteurisé de haute qualité, le lait pasteurisé, le lait UHT et le lait stérilisé (Favier, 1985).

### II.2.5.2. Vitamines hydrosolubles

Parfois dépendantes de facteurs génétiques, les vitamines hydrosolubles (Tableau VIII) sont généralement moins sensibles que les vitamines A, D et E aux facteurs saisonniers, alimentaires, ou au stade de lactation. En effet, pour le ruminant, les vitamines hydrosolubles sont principalement fournies par synthèse : synthèse de vitamines du groupe B par la flore du rumen, synthèse de vitamine C par l'organisme de l'animal lui-même. Certains facteurs peuvent cependant jouer un rôle dans quelques cas (Favier, 1985).

Le stade de lactation peut également intervenir surtout dans les tout premiers jours après le vêlage. Par la suite, dans le lait définitif, les teneurs ont tendance à se stabiliser, sauf celles de la vitamine B6 et de l'acide pantothénique qui continuent à s'abaisser pendant plusieurs mois. Enfin, l'alimentation des vaches et la saison peuvent influencer les taux de niacine et de vitamine B6 qui diminuent en hiver (Favier, 1985).

**Vitamine B1 (thiamine, anciennement aneurine) :** est un coenzyme essentiel du métabolisme des hydrocarbures, par le biais de son dérivé phosphoré (thiamine pyrophosphate). La thiamine pyrophosphate est essentielle à la décarboxylation oxydative des cétoacides (alpha-cétoglutarate, pyruvate...) et est le coenzyme de la transacétolase qui, dans le cycle de phosphorylation des pentoses, transforme le pentose phosphate en hexose phosphate

La carence en thiamine est responsable du SGW initialement réversible (mais qui, si elle n'est pas corrigée, évolue vers un syndrome de Korsakoff définitif) et du bériberi (béri signifiant faiblesse en cingalais) pour lequel on décrit une forme sèche (essentiellement polynévritique) et une forme humide (où l'atteinte cardiaque est au premier plan) (Maury et al., 2013). Elle est en partie libre, liée aux protéines ou phosphorylée. Résistante à des chauffages forts (145-150 °C) et brefs (quelques minutes) (Courtet Leymarios, 2010).

**Vitamine B2 (riboflavine):** libre ou associée à des protéines et des phosphates à la surface des globules gras. Elle est très photosensible (perte de 50 à 80% après une longue exposition au soleil). Vitamine B2 (Riboflavine) Entre dans le métabolisme des protéines et dans les réactions de productions de l'énergie, en tant que composant enzymatique (Courtet Leymarios, 2010).

**Vitamine B3 (niacine, acide nicotinique ou nicotinamide) :** Cette vitamine hydrosoluble est essentielle aux fonctions cellulaires et intervient chez l'homme comme cofacteur de plus de 100 enzymes dont la nicotinamide adénine dinucléotide (NAD) et sa forme phosphate nicotinamide adénine dinucléotide phosphate (NADP). La NAD est impliquée dans le catabolisme des glucides, des lipides, des protéines et de l'alcool. La niacine peut être synthétisée à partir du tryptophane (Maury et al., 2013).

**Vitamine PP (vitamine antipellagreuse ou niacine) :** ne se trouve qu'en faibles quantités dans le lait de vache et entièrement à l'état libre. Par contre, on y trouve en abondance du tryptophane, un précurseur de la niacine. Cette vitamine est stable à l'air et à la lumière et peu sensible à la chaleur. 60 mg de L-Tryptophane donne 1 mg de nicotinamide (Courtet Leymarios, 2010).

**Vitamine B5 (acide pantothénique) :** Se trouve presque totalement à l'état libre, facteur de croissance pour divers micro-organismes, dont les lactobacilles. Stable à l'air et à la lumière mais, très sensible à la chaleur et aux modifications du pH. La vitamine B5 entre dans le cycle de Krebs; comme un composant du coenzyme A. Maintient la division des graisses en acides gras libres. Cette vitamine est idéale pour transformer les aliments en énergie (Courtet Leymarios, 2010).

**Vitamine B6 (pyridoxine) :** La pyridoxine est un cofacteur de la glutamate décarboxylase qui participe, à partir de l'acide glutamique, à la synthèse de l'acide  $\gamma$ -aminobutyrique (GABA), puissant neurotransmetteur inhibiteur. se trouve essentiellement à l'état libre. La pasteurisation et la stérilisation UHT du lait la laissent intacte, mais la stérilisation classique en détruit 50%. Vitamine B6 (Pyridoxine) Effet antioxydant (opposition aux radicaux libres). synthèse des protéines et métabolisme des acides aminés (Maury et al., 2013).

**Vitamine B9 (acide folique) :** est lié aux protéines. Facteur de croissance pour divers micro-organismes, il est sensible à la lumière et à l'oxygène, mais stable à la chaleur et à des pH supérieurs à 4. Acide folique Participe à la formation de l'hémoglobine; Synthèse des acides nucléiques. La flore intestinale est capable d'aider l'organisme à la synthétiser. Excès d'acide folique = dégradation de la vitamine B12 = un dysfonctionnement de la marche, troubles de la coordination et un ramollissement de la masse osseuse (Courtet Leymarios, 2010).

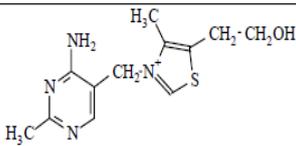
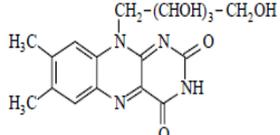
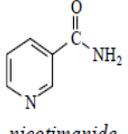
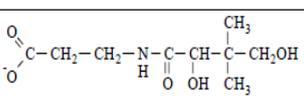
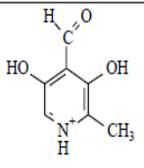
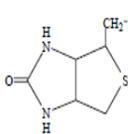
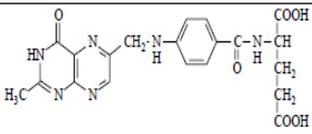
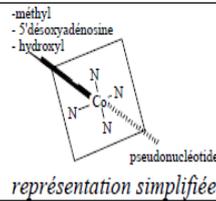
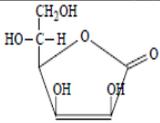
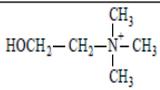
**Vitamine B8 (biotine) :** Se trouve totalement à l'état libre, mais en faibles quantités dans le lait. Elle est stable à la chaleur et à la lumière, mais sensible à l'air. La biotine est le composant de différents systèmes enzymatiques. Elle est utile à la formation de glucose, à la dégradation d'acide lactique et à la synthèse des acides gras (Courtet Leymarios, 2010).

**Vitamine B12 (cyanocobalamine):** intervient au cours de nombreux processus biochimiques comme la synthèse de l'acide désoxyribonucléique (ADN), la conversion de méthylmalonyl-coenzyme A (CoA) en succinyl-CoA ou la synthèse de la méthionine à partir de l'homocystéine (Courtet Leymarios, 2010). Liée au lactosérum (95 %), stable à l'air, mais sensible à la lumière et au chauffage.

**Vitamine C (acide L-ascorbique) :** Contrairement aux autres vitamines, celle-ci est peu résistante: la chaleur, la réaction du milieu, le temps, l'oxydation la détruisent plus ou moins rapidement, aussi avons-nous recherché tout particulièrement les modifications qu'elle peut subir dans les laits employés pour l'alimentation des enfants (Lesné et Vagliano, 1925).

La vitamine C aussi nommée acide ascorbique, a un rôle de coenzyme et participe au fonctionnement d'un nombre limité d'enzymes. Elle intervient notamment dans la synthèse de la carnitine et l'hydroxylation de la proline du collagène. Elle joue donc un rôle dans la formation des fibres élastiques (collagènes) ainsi que dans l'absorption et le stockage du fer. (Castelli, 2020).

**Tableau VIII: Vitamines hydrosolubles**

Vitamine ⇒ Forme(s) active(s)	Structure	Besoins journaliers	Pathologies associées à un déficit	Coenzymes dérivés
<b>Vitamine B1</b> ⇒ thiamine		1,5 à 2,0 mg.jour <sup>-1</sup>	Béribéri Syndrome de Wernicke	TPP (thiamine pyrophosphate)
<b>Vitamine B2</b> ⇒ riboflavine		1,5 à 2,0 mg.jour <sup>-1</sup>	Dermatoses	FAD (flavine adénine dinucléotide) FMN (flavine mononucléotide)
<b>Vitamine B3</b> ou <b>Vitamine PP</b> (Pellagra Preventing) ⇒ acide nicotinique ⇒ nicotinamide (niacine)	 <i>nicotinamide</i>	18 mg.jour <sup>-1</sup>	Pellagre (maladie des 3 D : dermatose, diarrhée, démence)	NAD <sup>+</sup> (nicotinamide dinucléotide) NADP <sup>+</sup> (nicotinamide dinucléotide phosphate)
<b>Vitamine B5</b> ou <b>Acide pantothénique</b> ⇒ acide pantothénique		15 mg.jour <sup>-1</sup>	Pas de déficit connu	Coenzyme A
<b>Vitamine B6</b> ⇒ pyridoxol (pyridoxine) ⇒ pyridoxal ⇒ pyridoxamine	 <i>pyridoxal</i>	2 à 3 mg.jour <sup>-1</sup>	Pas de déficit connu	PLP (phosphate de pyrioxal)
<b>Vitamine B8</b> ou <b>Vitamine H</b> ou <b>Biotine</b> ⇒ biotine		20 mg.jour <sup>-1</sup>	Pas de déficit connu	Biotine
<b>Vitamine B9</b> ou <b>Acide folique</b> ⇒ acide pteroylmonoglutamique		15 mg.jour <sup>-1</sup>	Anémie macrocytaire	THF (tétrahydrofolate)
<b>Vitamine B12</b> ou <b>Cobalamine</b> ⇒ adenosylcobalamine ⇒ hydroxycobalamine ⇒ méthylcobalamine	 <i>représentation simplifiée</i>	2 mg.jour <sup>-1</sup>	Anémie macrocytaire (anémie mégalo-blastique, anémie de Biermer, anémie pernicieuse)	Vitamine B12
<b>Vitamine C</b> ⇒ acide L-ascorbique		60 mg.jour <sup>-1</sup>	Scorbut	Acide L-ascorbique
<b>Choline</b>		500 mg.jour <sup>-1</sup>	Pas de déficit connu	Aucun coenzyme

### II.2.6. Sels minéraux

Les minéraux (ou matières salines) sont présents dans le lait à hauteur de 7,3 g/litre environ (Tableau IX). Les minéraux représentent 4% de la masse totale d'un individu, sont des constituants des enzymes, des hormones et des vitamines, ils contribuent à la structure de os et des dents et sont associés au rythme cardiaque, à la contraction musculaire, à la conduction nerveuse et à l'équilibre hydrique et acido-basique de l'organisme (FAO, 1995).

**Tableau IX:** Constituants majeurs des matières salines du lait de vache (g/litre) (FAO, 1995).

Constituants	Teneurs moyennes
Potassium (K <sub>2</sub> O)	1 ,50
Sodium (Na <sub>2</sub> O)	0,50
Calcium (CaO)	1 .25
Magnésium (Mgo)	0,12
Phosphore (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,95
Chlore (NaCl)	1 ,00
Soufre	0,35
Acide citrique	1 ,80

Note: Les teneurs indiquées sont exprimées en g de cation ou de l'anion ou de sel ou de l'oxyde le plus fréquent.

Certains minéraux se trouvent exclusivement à l'état dissous sous forme d'ions (sodium, potassium et chlore) et sont particulièrement biodisponibles. Les autres (calcium, phosphore, magnésium et soufre) existent dans deux fractions.

La fraction saline colloïdale renferme environ les deux tiers (2/3) du calcium, la moitié (1/2) du phosphore et le tiers (1/3) du magnésium, tous ces minéraux étant plus ou moins liés à la caséine., alors que la fraction dissoute renferme quasiment tout le sodium, le chlore et le potassium, un tiers (1/3) du calcium (libre ou salin), la moitié (1/2) du phosphore (salin et organique soluble) et les deux tiers (2/3) du magnésium salin.

**Le calcium :** Constituant principal du squelette (99%), assure sa rigidité. représente jusqu'à 1,2kg du poids du corps. Le reste est sous forme ionisé libre et participe à l'excitabilité neuromusculaire, la conduction nerveuse, la contraction musculaire, la coagulation sanguine (FAO, 1995 ; Castelli, 2020).

L'excès de calcium entraine une lithiase urinaire (formation de calcul), une néphrocalcinose (excès de dépôts calcaire dans le rein) et au niveau digestif une diminution de

l'absorption de certains minéraux (magnésium, zinc et fer notamment). hyperparathyroïdie et perte de masse osseuse (déficit et excès de Potassium) (FAO, 1995).

**Le phosphore :** Le phosphore (P) est un minéral sous forme de phosphates (surtout calcium et potassium) dans notre organisme. Il est présent à 85 % dans les os et les dents ; à 14 % dans les tissus mous comme les muscles, le foie, le coeur et les reins ; à 1 % dans les fluides extracellulaires. Le phosphore est le 2<sup>e</sup> minéral le plus présent dans l'organisme (après le calcium). C'est un des composants de la structure cellulaire. Il est intégré dans de nombreux processus biologiques comme la réserve et le transport de l'énergie, la gestion de l'équilibre acido-basique corporel, la signalisation cellulaire et la minéralisation osseuse et dentaire. L'homéostasie du phosphore est étroitement liée à celle du calcium (Castelli, 2020).

Un manque de phosphore peut entraîner des douleurs osseuses, une fatigue intense et une perte de l'appétit. Un excès de phosphore à long peut perturber le métabolisme du calcium et menacer la calcification et la rigidité du squelette

**Le sodium et le potassium :** Indispensable à la conduction de l'influx nerveux et facteurs essentiels de l'équilibre hydroélectrique. Une restriction sévère provoque une altération des fonctions du système nerveux.

**Le magnésium :** Chez l'adulte, le magnésium (Mg) représente 25 g dont 50 à 60 % dans les os et 25 % dans les muscles et 1 % est extracellulaire. Il est après le potassium le cation intracellulaire le plus abondant et est le quatrième cation le plus abondant de l'organisme. Le magnésium participe aux réactions d'utilisation ou de stockage de l'énergie cellulaire. Il joue un rôle dans la synthèse des acides nucléiques, de l'AMP cyclique et participe au métabolisme glucidique, lipidique et protéique (Castelli, 2020).

### **II.2.7. Oligo-éléments du lait**

Les teneurs en oligo-éléments du lait données dans la littérature (Tableau X) sont seulement indicatives, dans la mesure où elles subissent l'influence de divers facteurs (alimentation, stade de lactation, etc.) et dépendent aussi des méthodes utilisées.

**Tableau X:** Teneurs en oligo-éléments du lait de vache ( $\mu\text{g/litre}$ ) (FAO, 1995).

Oligo-éléments	Teneurs
Aluminium	600-1 000
Arsenic	<50
Bore	150-300
Brome	150
Cadmium	<1
Chrome	1 5-30
Cobalt	0,5
Cuivre	20-40
Etain	100-1 000
Fer	200-500
Fluor	70-200
Iode	10-300
Manganèse	10-30
Mercure	<1
Molybdène	70
Plomb	2- 10
Sélénium	1 0-30
Silicium	1 000-6 000
Strontium	350
Zinc	3 000-6 000

**Le fer :** le lait de vache est pour l'homme une mauvaise source de fer, moins en raison de sa teneur (comparable à celle du lait humain) qu'en raison de sa biodisponibilité (fer non lié à la lacto-ferrine porteuses. Le fer du lait de vache est lié à la caséine (FAO, 1995). Composant central de l'hémoglobine, il participe, en tant que cofacteur d'oxydoréduction, au transport d'électrons dans la mitochondrie et à la synthèse de l'ADN (Castelli, 2020).

**Le zinc :** le zinc se trouve dans le lait de vache à des taux et sous forme nettement plus favorables pour la nutrition humaine. Il est fortement lié à la caséine (80 pour cent) mais aussi aux immunoglobulines 20% (FAO, 1995). Indispensable à plus de 200 réactions enzymatiques, synthèse protéique, activation des ARN et ADN polymérase, possède une fonction antioxydante, anti-inflammatoire et le métabolisme de la vitamine A, des acides gras polyinsaturés et des prostaglandines (Castelli, 2020).

**L'iode, le fluor et le brome:** ils ne sont trouvés dans le lait que dans la mesure où l'eau et le sol en sont pourvus. L'iode est surtout lié aux protéines, mais existe aussi sous

forme libre. L'iode et le brome sont plus abondants dans les régions côtières puisque ces éléments sont apportés par les embruns et les pluies marines (FAO, 1995).

**Le cuivre :** le cuivre est très peu abondant dans le lait de vache et est lié aux protéines. Sous régime lacté strict, des enfants en état nutritionnel précaire ont présenté des carences cupriques avérées (FAO, 1995).

**Le cuivre :** est un oligoélément essentiel qui a une régulation homéostatique. Il intervient dans des réactions d'oxydoréduction. Il intervient aussi dans la formation des tendons et des cartilages, dans la minéralisation des os, dans la production des globules rouges, et dans la synthèse de la mélanine. Il a un rôle ambivalent dans le stress oxydant (Castelli, 2020).

**Le manganèse:** le manganèse est d'ordinaire seulement présent dans le lait à des concentrations faibles (FAO, 1995). Il est présent sous de nombreux états d'oxydation, les ions  $Mn^{2+}$  et  $Mn^{3+}$  étant les plus actifs. Il doit être apporté par notre alimentation quotidienne car un tiers de nos réserves est renouvelé chaque jour. Il participe à la composition ou à l'activation de nombreuses enzymes. Il est impliqué dans le métabolisme des glucides, des lipides, la formation du cartilage et de l'os, dans la cicatrisation, la synthèse du monoxyde d'azote et la protection antioxydants. Son absorption chez l'adulte est faible (moins de 5 %), sa biodisponibilité est réduite par les nutriments comme le fer, le calcium, les polyphénols et les fibres (Castelli, 2020).

**Le sélénium :** le sélénium consommé par le cheptel provient d'herbes produites sur un sol sélénifère. Les carences se rencontrent chez l'animal comme chez l'homme dans les régions où le sol en est particulièrement dépourvu (Nouvelle-Zélande, Chine, etc.). Le sélénium semble exister sous forme ionique à l'état libre) (FAO, 1995). Elimination des espèces réactives de l'oxygène (radicaux libres), régénération des formes réduites des vitamines C et E (Castelli, 2020).

**Références bibliographiques**

1. **Baker H. M. and Baker E. N. (2012).** A structural perspective on lactoferrin function. *Biochem. Cell Biol.* 90: 320–328.
2. **Béraud, P. (2013).** Les structures supramoléculaires du lait. *INRA Prod Anim*, 26(2), 129-144.
3. **Bouquelet S., (2016).** Cours proteines alimentaires, Université des Sciences et Technologies de Lille [https://biochim-agro.univ-lille.fr/proteines/co/ch4\\_II\\_e.html](https://biochim-agro.univ-lille.fr/proteines/co/ch4_II_e.html).
4. **Brownlow, S., Cabral, J. H. M., Cooper, R., Flower, D. R., Yewdall, S. J., Polikarpov, I., ... & Sawyer, L. (1997).** Bovine  $\beta$ -lactoglobulin at 1.8 Å resolution—still an enigmatic lipocalin. *Structure*, 5(4), 481-495.
5. **Bylund, G. (1995 ).** Dairy Processing Handbook. Tetra Pak Processing Systems AB S-221 86 Lund, Sweden.
6. **Castelli, P. (2020).** Les compléments alimentaires: les risques d'une surconsommation.
7. **Cheftel, J. C., & Lorient, D. (1982).** Les propriétés fonctionnelles des protéines laitières et leur amélioration. *Le lait*, 62(617-620), 435-483.
8. **Cheftel, J. C., J.L. Cuq & Lorient, D. (1985).** Proteines alimentaires: biochimie, propriétés fonctionnelles, valeurs nutritionnelles et modifications chimiques. Edition Lavoisier. Paris.
9. **Codex alimentarius 2<sup>ème</sup> Edition 2011.** Lait et produit laitiers. Rome.
10. **Courtet Leymarios, F (2010).** Qualité nutritionnelle du lait de vache et de ses acides gras. Voies d'amélioration par l'alimentation. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Veterinaire D'alfort. p111.
11. **De Kruif, C. G., & Holt, C. (2003).** Casein micelle structure, functions and interactions. In *Advanced dairy chemistry—1 proteins* (pp. 233-276). Springer, Boston, MA.
12. **Direction des Etudes et de la Prospective. (2019).** Statistiques du commerce extérieur de l'algerie. Direction Générale des Douanes. Ministère des Finances.
13. **Eloutassi, N., and M. Chaouch, (2011).** Production Des Sucres Simples A Partir Du Lactose Issu Du Lactosérum. 39-53.
14. **Eloutassi, N., Louasté, B., & Chaouch, M. (2011).** Production des sucres simples à partir du lactose issu du lactosérum. *Rev. Microbiol. Ind. San et Environn*, 5(2), 39-53.

15. **FAO, (1995).** Le lait et les produits dans la nutrition humaine. Collection FAO : Alimentation et nutrition n028. Amazon, Rome, Italie.
16. **Favier J.C. (1985).** Composition du Lait de Vache :II - Laites de Consommation. Cah. Nutr. Diét., XX, 5, 1985.
17. **Jahanban-Esfahlan, A., Ostadrahimi, A., Jahanban-Esfahlan, R., Roufegarinejad, L., Tabibiazar, M., & Amarowicz, R. (2019).** Recent developments in the detection of bovine serum albumin. International journal of biological macromolecules, 138, 602-617.
18. **J.O.R.A.n°69, (1993).** Arrêté interministériel du 29 Safar 1414 correspondant au 18 août 1993 relatif aux spécifications et à la représentation de certains laits de consommation. P. 16.
19. **Journet, M., Verite, R., & Vignon, B. (1975).** L'azote non protéique du lait: facteurs de variation. Le lait, 55(543-544), 212-223.
20. **Larpen J.P., 1997.** Microbiologie alimentaire. Techniques de laboratoire. Paris. Ed. Technique et documentation. 273 p.
21. **Lesné, E., & Vagliano, H. (1925).** Les vitamines du lait. le Lait, 5(50), 955-964.
22. **Machiels, D., & Istasse, L. (2002).** La réaction de Maillard: importance et applications en chimie des aliments. Ann. Méd. Vét, 146, 347-352.
23. **Madureira, A. R., Pereira, C. I., Gomes, A. M., Pintado, M. E., & Malcata, F. X. (2007).** Bovine whey proteins—Overview on their main biological properties. Food Research International, 40(10), 1197-1211.
24. **Martins, S. I., Jongen, W. M., & Van Boekel, M. A. (2000).** A review of Maillard reaction in food and implications to kinetic modelling. Trends in food science & technology, 11(9-10), 364-373.
25. **Maury, E., Bigé, N., Alves, M., Galbois, A., Ait-Oufella, H., Baudel, J. L., ... & Guidet, B. (2013).** Syndromes carenciels sévères. Réanimation, 22(2), 417-427.
26. **Morrissey, P. A. (1985).** Lactose: chemical and physicochemical properties. In Developments in dairy chemistry—3 (pp. 1-34). Springer, Dordrecht.
27. **Permyakov, E. A., & Berliner, L. J. (2000).**  $\alpha$ -Lactalbumin: structure and function. FEBS letters, 473(3), 269-274.
28. **Pierce, A., Legrand, D., & Mazurier, J. (2009).** La lactoferrine: une protéine multifonctionnelle. médecine/sciences, 25(4), 361-369.

29. **Pougheon, S. (2001).** Contribution à l'étude des variations de la composition du lait et leurs conséquences en technologies laitières (Doctoral dissertation).
30. **Ramdane, S., Brahim, M., Tlemsani, A., Djermoun, A., & Hadjsadok, T. (2019).** Quelles disparités de consommation du lait et produits laitiers en algérie á travers les régions?. *Revue Agrobiologia* (2019) 9(1): 1449-1457.
31. **Roger, L., Thapon, J. L., Maubois, J. L., & Brule, G. (1976).** Hydrolyse du lactose contenu dans l'ultrafiltrat de lait ou de lactosérum en réacteur enzymatique à membrane. *Le lait*, 56(551-552), 56-75.
32. **Savado A., Alfred S., (2011).** La flore microbienne et les propriétés fonctionnelles des yaourts et laits fermentés Traore. *Int. J. Biol. Chem. Sci-Ouagadougou, Burkina Faso...* 5(5): 2057-2075
33. **Wattiaux, Michel A. (2014).** Composition Et Valeur Nutritive Du Lait. l'Institut Babcock pour la Recherche et le Développement International du Secteur Laitier. Université du Wisconsin à Madison.
34. **Yamauchi S., Hatakeyam S., Imai Y., Tonouchi M. (2013).** Terahertz Time-Domain Spectroscopy to Identify and Evaluate Anomer in Lactose. *American Journal of Analytical Chemistry*, 2013, 4, 756-762.
35. **Zidoune, M. N. (2017).** Fabrication et caractérisation d'un fromage traditionnel algérien «Bouhezza». Thèse de doctorat ; université constantine 1. p141.