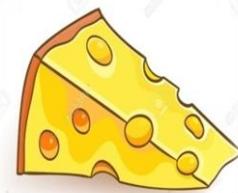


Université : Larbi Ben M'Hidi, Oum el Bouaghi
Faculté : Institut des sciences techniques et appliquées (ISTA)
Département : Génie Biologique
Filière : Sciences alimentaires
Spécialités : Valorisation et qualité des produits agroalimentaires
Niveau : L3/S5 (2025/2026)
Nombre des heures : 48h



Module : Lait et dérivés



Introduction

Les produits laitiers désignent le lait et les produits dérivés du lait tels que les yogourts et les fromages. Les produits laitiers sont connus notamment pour leurs effets sur la flore intestinale, mais surtout parce qu'ils constituent la principale source de calcium dans l'alimentation. Le calcium est un élément indispensable pour la bonne santé et la solidité des os et des dents. Les portions quotidiennes de calcium recommandées varient entre 600 et 1000 mg pour les enfants, et sont de 900 mg pour les adultes et 1 200 mg pour les personnes âgées. Idéalement, pour atteindre ces doses, au moins un produit laitier devrait être consommé par repas.

Le lait est produit par les cellules sécrétrices des glandes mammaires des mammifères. Il est destiné à l'alimentation des nourrissons. Il est riche en protéines et en glucides. De nombreux produits laitiers sont fabriqués à partir du lait. Ses composants sont utilisés en ingrédient dans les produits industriels. Le lait de vache est un allergène à déclaration obligatoire.

Un peu d'histoire

Le lait est symbole de fertilité, richesse et abondance. Le lait des animaux a été utilisé dans l'alimentation humaine dès qu'ils ont été domestiqués. Les animaux ont été élevés en premier pour leur viande et leur peau, mais les élever pour leur lait s'est avéré une méthode efficace pour transformer des pâturages incultes en nourriture. Les premières traces d'élevage laitier remontent à 10 000 ans au Moyen-Orient.

Dans l'Antiquité, Grecs et Romains prisaient le lait de brebis et de chèvre. Les Gaulois possédaient des troupeaux de vaches.

La race bovine est devenue la principale productrice de lait. Cependant, le lait, privilège des paysans, restait un produit rare et cher dans les villes, car il ne se conservait pas plus d'une journée.

Au XX^e siècle, le développement de la prophylaxie et la sélection de plus en plus scientifique des espèces ont apporté des progrès considérables dans le rendement laitier.

Qu'est-ce que le lait ?

Le lait est un aliment de couleur blanchâtre produit par les cellules sécrétrices des glandes mammaires des mammifères femelles. Le lait sécrété dans les premiers jours après la parturition s'appelle le colostrum.

Quelle que soit l'espèce, la fonction première du lait est de nourrir la progéniture jusqu'à ce qu'elle soit sevrée. Selon les espèces, la lactation dure plus ou moins longtemps ; pour les vaches, la lactation dure dix mois. Elle est entretenue par la tétée du veau ou la traite. Selon les races, elle peut atteindre à certaines périodes plus de 30 litres par jour. Dans la plupart des civilisations humaines, le lait des animaux domestiques (vache, brebis, chèvre, jument, yak, chameau, dromadaire, bufflonne, renne) est couramment consommé, mais l'industrialisation concerne principalement le lait de vache, et à plus petite échelle, le lait de brebis et de chèvre.

Législation

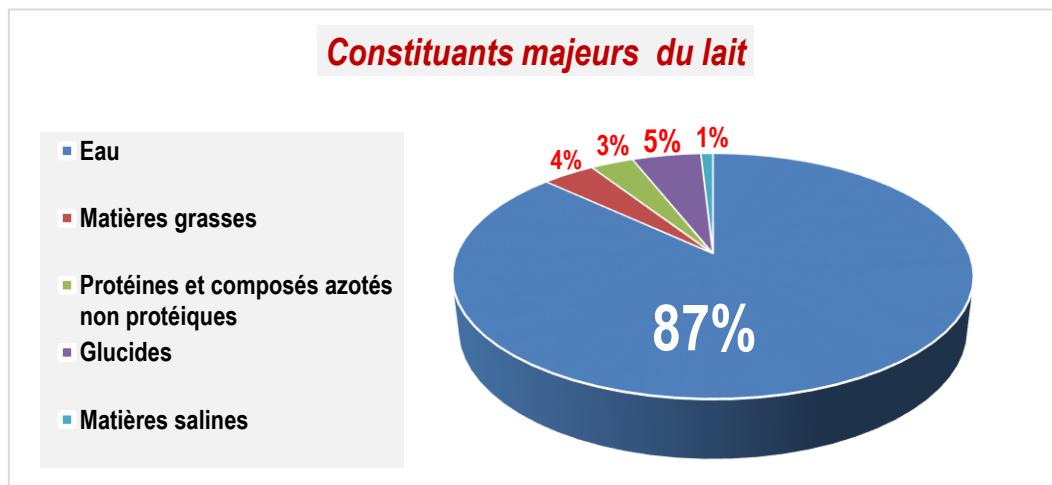
Le décret du 25 mars 1924 portant application de la loi du 1^{er} août 1905 en ce qui concerne le lait et les produits de la laiterie précise : « Le mot lait, sans indication de l'espèce, désigne en France le lait de vache ; il est le produit intégral de la traite totale et ininterrompue d'une femelle laitière bien portante, bien nourrie et non surmenée ; il doit être recueilli proprement et ne pas contenir de colostrum. Tout lait provenant d'une femelle laitière autre que la vache doit être désigné par la dénomination « lait », suivie de l'indication de l'espèce animale dont il provient : lait de chèvre, lait de brebis, etc. »

Unité 01 : La chimie du lait

Les principaux constituants du lait sont l'eau, la matière grasse, les protéines, le lactose (sucre du lait) et les minéraux (sels). Le lait contient également des traces d'autres substances, telles que des pigments, des enzymes, des vitamines, des phospholipides (substances avec propriétés lipoïdes), et des gaz.

Le résidu qui reste une fois l'eau et les gaz éliminés est appelé matière sèche ou teneur en matière sèche totale du lait.

Composition générale du lait	
Constituants majeurs	%
Eau	86,9
Matières grasses	3,9
Protéines et composés azotés non protéiques	3,2
Glucides	5,1
Matières salines	0,9
Constituants mineurs	
Enzymes	
Vitamines	
Pigments (carotènes, xanthophylles, riboflavine)	
Cellules diverses (cellules épithéliales, leucocytes, bactéries, levures, moisissures)	
Éléments divers (oxyde de carbone, oxygène, azote et autres gaz)	
Matières étrangères	

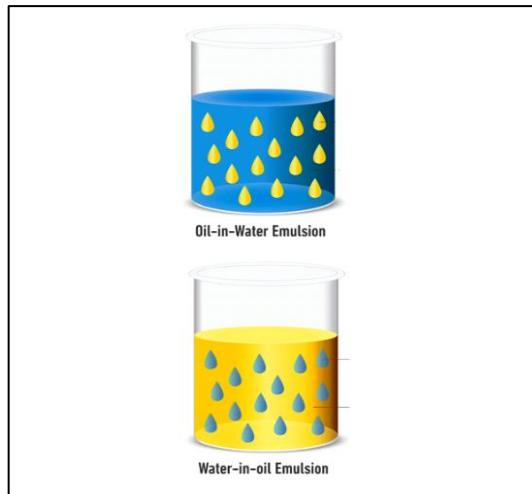


Propriétés physico-chimiques du lait de vache

Définitions

Emulsion : suspension de gouttelettes d'un liquide dans un autre. Le lait est une émulsion de type huile dans l'eau, le beurre une émulsion de type eau dans l'huile.

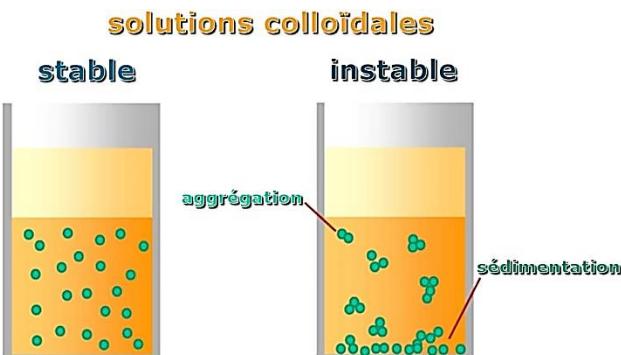
Le liquide finement divisé s'appelle la phase dispersée ; l'autre phase est la phase continue.



Solution colloïdale : lorsque la matière existe dans un état de division intermédiaire entre la solution vraie (le sucre dans l'eau, par exemple) et la suspension (la craie dans l'eau), on dit qu'il s'agit d'une solution colloïdale ou d'une suspension colloïdale.

Les caractéristiques types d'un colloïde sont :

- Ses particules de petite taille.
- Sa charge électrique.
- L'affinité de ses particules pour les molécules d'eau.



Etat physico-chimique du lait de vache.

	Composition moyenne %	Emulsion de type huile dans l'eau	Solution/suspension colloïdale	Solution vraie
Humidité	87,0			
Matière grasse	4,0	X		
Protéines	3,5		X	
Lactose	4,7			X
Cendres	0,8			X

Tailles relatives des particules dans le lait.

Taille (mm)	Type de particules
10^{-2} à 10^{-3}	Globules gras
10^{-4} à 10^{-5}	Caséine-phosphates de calcium
10^{-5} à 10^{-6}	Protéines du sérum de fromagerie
10^{-6} à 10^{-7}	Lactose, sels et autres substances dans des solutions vraies

Réf. : *A Dictionary of Dairying par J.G. Davis*

L'acidité des solutions

Lorsque l'on mélange de l'acide (par exemple, de l'acide chlorhydrique, HCl) à de l'eau, il libère des ions hydrogène (protons) avec charge positive (H^+), qui s'attachent rapidement aux molécules d'eau pour former des ions hydronium (H_3O^+).

Lorsque l'on ajoute une base (oxyde métallique ou hydroxyde) à de l'eau, elle forme une solution basique ou alcaline.

Lorsque la base se dissout, elle libère des ions hydroxyde (OH^-).

- Une solution est dite neutre si elle contient un nombre égal d'ions hydroxyde et hydronium.
- Une solution est dite alcaline si elle contient plus d'ions hydroxyde que d'ions hydronium.
- Une solution est dite acide si elle contient plus d'ions hydronium que d'ions hydroxyde.

pH

L'acidité d'une solution dépend de sa concentration en ions hydronium. Elle varie cependant beaucoup d'une solution à l'autre. Le symbole pH désigne la concentration en ions hydronium. Mathématiquement, le pH est défini comme étant le logarithme négatif de base 10 de la concentration en ions hydronium exprimée en molarité, c'est à- dire $pH = - \log [H^+]$.

Cela donne la règle suivante à 25°C :

- pH > 7 ► solution alcaline**
pH = 7 ► solution neutre
pH < 7 ► solution acide

Point d'ébullition

À la pression atmosphérique normale, le point d'ébullition de l'eau est 100°C et celui du lait est 100,5°C. Il est fonction du nombre de particules en solution et, par conséquent, il augmente avec la concentration de lait et diminue avec la pression. Ce phénomène est appliqué dans les procédés de concentration du lait.

Densité du lait

Le poids d'une substance par unité de volume est la masse volumique ; tandis que la densité est le rapport de la masse volumique avec celle de l'eau. Étant donné que la masse volumique de toute substance varie avec la température, il importe de spécifier cette dernière en rapportant les résultats. En pratique, la masse volumique de l'eau à 40°C est 1 000 et, par conséquent, à cette température densité et masse volumique sont identiques. La densité du lait à 15°C/15°C est en moyenne 1 032 (1 028- 1 035). Elle est la résultante de la densité de chacun des constituants du lait. Pour le lait entier, il convient de mesurer la densité à 30°C pour que les matières grasses soient à l'état liquide, car autrement, à

l'état solide, les matières grasses ont une densité supérieure et variable. Retenons aussi que s'il y a présence d'air dans le lait, la densité sera plus faible. La densité des constituants laitiers à 30°C s'établit comme suit :

- Matières grasses = 0,913
- Extrait sec dégraissé = 1,592
- Lactose = 1,63
- Protéines = 1,35
- Cendres = 5,5

En connaissant la composition du lait, on peut calculer la densité d'après l'équation suivante :

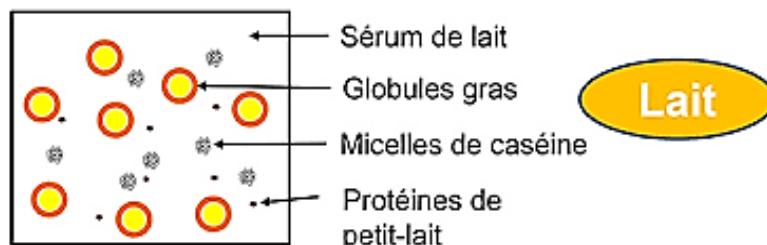
$$\text{Densité du lait à } 30^{\circ}\text{C} = \frac{100}{\frac{\% \text{ MG}}{0,913} + \frac{\% \text{ L}}{1,63} + \frac{\% \text{ P}}{1,35} + \frac{\% \text{ C}}{5,5} + \frac{\% \text{ Eau}}{1}}$$

MG Matière grasse
L Lactose
P Protéine
C Cendre

La composition du lait de vache

Les quantités des différents constituants principaux du lait peuvent varier considérablement d'une race à l'autre et d'un individu à l'autre d'une même race.

En plus du terme matières sèches totales du lait (EST), le terme matière sèche dégraissée(ESD) est utilisé pour décrire la composition du lait. La matière sèche dégraissée est égale à la teneur en matière sèche totale moins la teneur en matière grasse (ESD = EST-MG).



Composition quantitative du lait

Constituants principaux	Limites des variations		Valeur moyenne
Eau	85,5	–	89,5
Matières sèches totales	10,5	–	14,5
Matière grasse	2,5	–	6,0
Protéines	2,9	–	5,0
Lactose	3,6	–	5,5
Minéraux	0,6	–	0,9
			87,5
			13,0
			3,9
			3,4
			4,8
			0,8

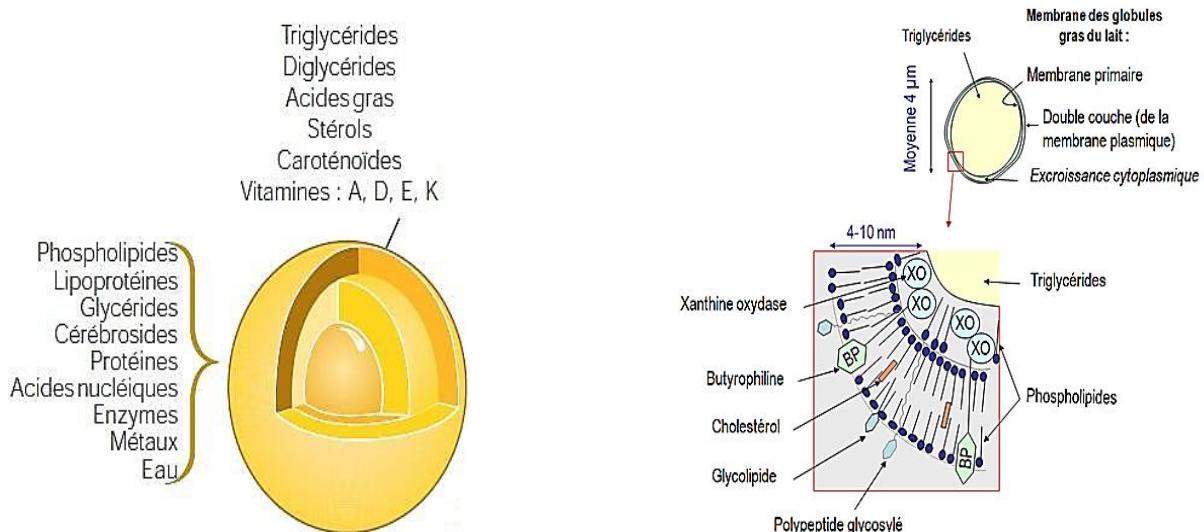
La matière grasse du lait

La matière grasse du lait existe sous la forme de petits globules ou de petites gouttelettes dispersés dans le lactosérum. Leur diamètre est compris entre 0,1 et 20 mm. La taille moyenne est de 3 à 4 mm, et il y a quelque 15 milliards de globules par millilitre du lait.

L'émulsion est stabilisée par une très fine membrane qui entoure les globules et a une composition complexe.

La matière grasse du lait se compose de triglycérides (les composants dominants), de diglycérides et monoglycérides, d'acides gras, de stérols, de caroténoïdes (la couleur jaune de la matière grasse), de vitamines (A, D, E et K), et tous les autres, les oligo-éléments, sont des constituants mineurs.

La membrane est constituée de phospholipides, de lipoprotéines, de cérèbrosides, de protéines, d'acides nucléiques, d'enzymes et d'oligo-éléments (métaux) et d'eau.



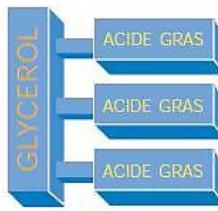
La structure chimique de la matière grasse du lait

La matière grasse du lait est liquide lorsque le lait sort du pis à 37°C. Cela signifie que les globules gras peuvent changer facilement de forme lorsqu'ils subissent un traitement mécanique modéré, tel que le pompage et le transfert par canalisation, sans qu'ils soient libérés de leur membrane.

Tous les corps gras appartiennent à un groupe de substances chimiques appelées esters, qui sont des composés d'alcools et d'acides. La matière grasse du lait est un mélange de différents esters d'acides gras appelés triglycérides, qui sont composés d'un alcool appelé glycérol, et de divers acides gras.

Les acides gras constituent environ 90% de la matière grasse du lait.

Une molécule d'acide gras est constituée d'une chaîne hydrocarbonée et d'un groupe carboxyle (formule RCOOH). Dans les acides gras saturés, les atomes de carbone sont reliés par des liaisons simples, alors que dans les acides gras insaturés, il existe une ou plusieurs doubles liaisons dans la chaîne hydrocarbonée. Chaque molécule de glycérol peut se lier à trois molécules d'acide gras, et comme il n'est pas nécessaire que les trois soit de même type, le nombre de glycérides différents dans le lait est extrêmement grand.



Note / La matière grasse du lait est caractérisée par la présence de quantités relativement importantes d'acide butyrique et caproïque.

Propriétés des matières grasses du lait

À cause de la complexité de la matière grasse du lait, il est souvent utile de la désigner au moyen d'indices et de constantes.

Avec l'avènement de la chromatographie en phase gazeuse, il est facile de déterminer quantitativement l'importance relative de chacun des acides gras dans la matière grasse du lait. Plusieurs des constantes traditionnelles ont depuis perdu de l'intérêt. Toutefois, il peut être pratique de les connaître à l'occasion pour comprendre ou expliquer des comportements technologiques particuliers.

Oxydation des matières grasses

L'oxydation des matières grasses est un des problèmes les plus importants en technologie laitière. Les matières grasses sont à l'origine d'une série de goûts d'oxydation qu'on désigne souvent en termes descriptifs : goût de papier, de carton, de capsule, d'émeri, de métal, d'oxydé, d'huile, de suif, de brûlé et autres. Ces goûts peuvent se ramener à trois catégories selon le substrat affecté. Le goût d'oxydé ou métallique est le défaut qui résulte du début de l'oxydation des phospholipides. Le goût de graisse oxydée (suiffeuse) provient de l'oxydation des glycérides. Le goût de brûlé (lumière solaire) est dû à l'oxydation des protéines par les rayons lumineux. Le plus courant de ces défauts est le goût d'oxydé parce que les phospholipides de par leur nature et leur accessibilité sont beaucoup plus sujets à l'oxydation que les glycérides. Les principaux facteurs qui favorisent l'oxydation des matières grasses sont le degré d'instauration des acides gras et la présence d'oxygène et de catalyseurs (cuivre, fer). L'acidité, la lumière, la chaleur ainsi que la présence d'agents inhibiteurs ou d'antioxydants interviennent également. C'est ainsi que toutes choses restant égales par ailleurs, la résistance du lait à l'oxydation varie avec la saison, le régime alimentaire, la race et l'individualité de l'animal.

Parmi les moyens à mettre en œuvre pour prévenir les goûts d'oxydation, il faut avant tout protéger le lait et les produits laitiers contre toute contamination en cuivre et en fer. Il faut ensuite songer que les réactions d'oxydation sont accélérées par la chaleur, la lumière et l'acidité. On a souvent recours à l'exclusion de l'oxygène par l'emballage sous vide ou sous gaz inerte (N₂, CO₂). Enfin, la libération de groupements sulfhydryles par traitements thermiques appropriés et l'homogénéisation sont d'autres moyens de prévention des goûts d'oxydation. Les antioxydants chimiques (substances phénoliques, gallates, substances sulfhydryles) et les antioxydants naturels (tocophérols, vitamine C) sont très efficaces pour prévenir l'oxydation des matières grasses.

Le point de fusion de la matière grasse

Les quatre acides gras les plus abondants dans le lait sont l'acide myristique (حمض الميرستيك), l'acide palmitique (حمض الپالمیتیک), l'acide stéarique (حمض الشمع) et l'acide oléique (حمض الزيت).

- Acide myristique : $C_{14}H_{28}O_2$
- Acide palmitique : $C_{16}H_{32}O_2$
- Acide stéarique : $C_{18}H_{36}O_2$
- Acide oléique : $C_{18}H_{34}O_2$

Les trois premiers sont solides et le dernier est liquide à température ambiante.

Comme l'indiquent les chiffres du tableau précédent, la quantité relative des différents acides gras peut varier considérablement. Cette variation affecte la fermeté de la matière grasse. La matière grasse avec forte teneur en acides gras à point de fusion élevé, tels que l'acide palmitique, sera ferme ; par contre, la matière grasse avec forte teneur en acide oléique à point de fusion peu élevé attendrit le beurre.

La détermination de la quantité de chacun des acides gras est purement une question d'intérêt scientifique. Pour des raisons pratiques, la détermination d'une ou plusieurs constantes ou indices suffit à connaître les informations liées à la composition de la matière grasse.

Note / La matière grasse à forte teneur en acides gras à point de fusion élevé est ferme.

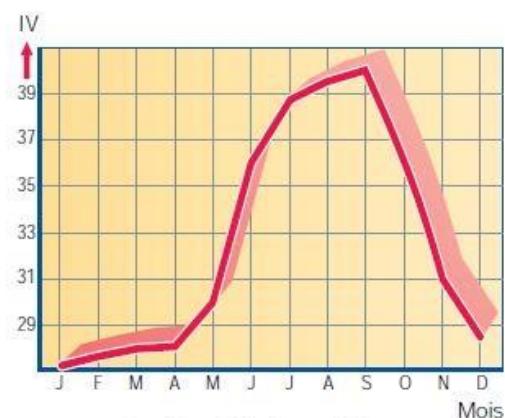
La matière grasse à forte teneur en acides gras à point de fusion peu élevé est molle.

L'indice d'iode

Les acides gras avec le même nombre d'atomes C et H mais avec différents nombres de liaisons simples et doubles ont des caractéristiques complètement différentes. La méthode la plus importante et la plus largement utilisée pour indiquer leurs caractéristiques spécifiques consiste à mesurer l'indice d'iode de la matière grasse. L'indice d'iode indique le pourcentage d'iode que la matière grasse peut lier.

L'iode est fixé par les doubles liaisons des acides gras insaturés. Comme l'acide oléique est de loin le plus abondant des acides gras insaturés, qui sont liquides à température ambiante, l'indice d'iode est souvent le moyen utilisé pour évaluer la teneur en acide oléique et, par conséquent, la fermeté de la matière grasse.

L'indice d'iode de la matière grasse du lait varie généralement entre 24 et 46. Les variations dépendent de la nourriture des vaches. Il est par conséquent possible d'influencer la consistance de la matière grasse du lait en donnant aux vaches des aliments appropriés. Pour obtenir un lait de consistance optimale, l'indice d'iode doit être compris entre 32 et 37.



→ Indice d'iode à différents moments de l'année. L'indice d'iode permet d'évaluer directement la teneur en acide oléique de la matière grasse.

L'indice de réfraction

La répartition des différents acides gras dans la matière grasse affecte également la façon dont elle réfracte la lumière. A partir de là, il est courant de déterminer l'indice de réfraction de la matière grasse pour calculer l'indice d'iode. C'est une méthode rapide pour évaluer la fermeté de la matière grasse. En général, l'indice de réfraction varie entre 40 et 46.

Les protéines du lait

Les protéines sont des éléments constitutifs essentiels de toute cellule vivante et occupent une place prédominante dans le lait et les produits laitiers. Le lait contient en moyenne 3,2% de protéines dont 80% est constitué de caséine. On distingue habituellement la caséine, qui précipite au pH 4,6, et les autres que l'on désigne comme protéines du lactosérum. Celles-ci ne précipitent pas avec la caséine, à moins d'avoir été préalablement dénaturées par la chaleur ou autrement. Les protéines du lactosérum comprennent les lactalbumines et les lactoglobulines.

Concentration des protéines dans le lait		
	Concentration dans le lait g/kg	% du total protéine en poids (P/P)
Caseine		
α_{s1} -caséine*)	10,0	30,6
α_{s2} -caséine*)	2,6	8,0
β -caséine**) Y compris γ -caséine	10,1	30,8
κ -caséine	3,3	10,1
Total caséine	26,0	79,5
Protéines du sérum		
α -lactalbumine	1,2	3,7
β -lactoglobuline	3,2	9,8
Albumine du sérum sanguin	0,4	1,2
Immunoglobulines	0,7	2,1
Divers (y compris protéose-peptone)	0,8	2,4
Total protéines du sérum	6,3	19,3
Protéines membranaires des globules gras	0,4	1,2
Total protéine	32,7	100

*) appelée dorénavant α_s -caséine
**) Y compris γ -caséine
Ref.: Wielstra & Jennis

Les protéines sont des molécules géantes constituées d'unités plus petites, appelées aminoacides. Une molécule protéique est composée d'une ou plusieurs chaînes d'aminoacides, liées ensemble, où les aminoacides sont organisés dans un ordre particulier. Une molécule protéique contient généralement environ 100 à 200 aminoacides liés, mais certaines en ont moins ou beaucoup plus.

Composition chimique des protéines

Les protéines sont des polymères d'acides aminés, et certaines peuvent contenir des constituants autres que des acides aminés. Les acides aminés sont des corps organiques azotés à caractère ampholyte en ce sens qu'ils possèdent à la fois une fonction carboxyle (acide) (COOH) et une fonction aminée (basique) (NH₂). Une caractéristique commune à tous les acides aminés est que le groupement aminé est toujours fixé sur le carbone commun au groupement carboxyle.

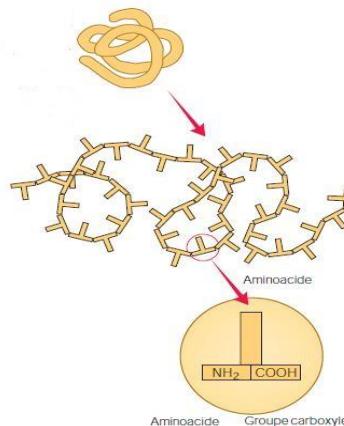
Les acides aminés appartiennent à un groupe de composés chimiques qui peuvent émettre des ions hydronium dans les solutions alcalines et les absorber dans les solutions acides. Les acides aminés peuvent apparaître :

- Chargés négativement dans les solutions alcalines ($\text{pH} > 7$).
- Neutres avec charges + et - égales ($\text{pH} = 7$).
- Chargés positivement dans les solutions acides ($\text{pH} < 7$).

Les protéines sont construites à partir de 20 aminoacides environ, dont 18 se trouvent dans les protéines du lait. Comme ils sont nécessaires au maintien d'un bon métabolisme, ils doivent être fourni par la nourriture. Ces aminoacides s'appellent les aminoacides essentiels ; ils sont tous présents dans la protéine du lait.

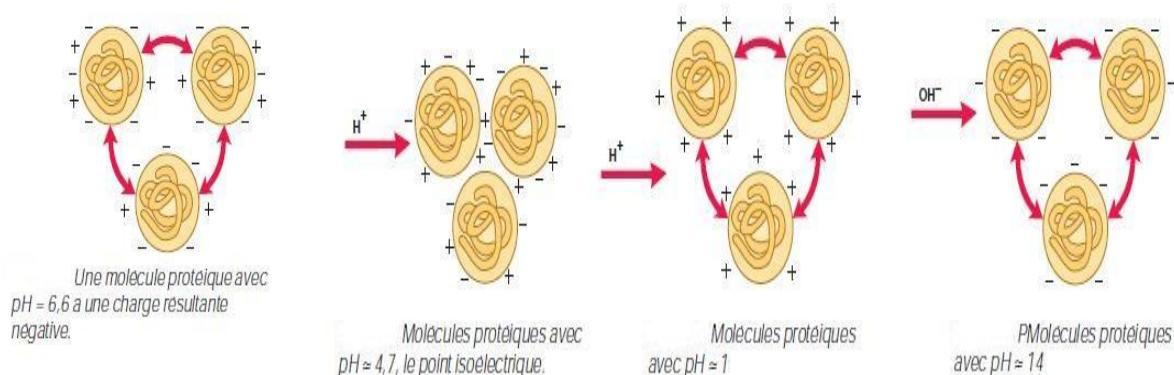
Le type et l'ordre des aminoacides dans la molécule protéique déterminent la nature de la protéine. Tout changement dans les aminoacides affectant le type ou la place dans la chaîne moléculaire peut donner une protéine aux propriétés différentes.

Comme le nombre possible de combinaisons des 18 aminoacides dans une chaîne contenant 100 à 200 aminoacides est quasiment infini, le nombre de protéines aux propriétés différentes est également quasiment infini. Les aminoacides se caractérisent par le fait qu'ils contiennent à la fois un groupe amino légèrement basique (NH_2) et un groupe carboxyle légèrement acide (COOH). Ces groupes sont reliés à une chaîne latérale (R).



L'état électrique des protéines du lait

Les chaînes latérales de certains aminoacides dans les protéines du lait porte une charge électrique qui dépend du pH du lait. Lorsque l'on modifie le pH du lait en ajoutant un acide ou une base, la répartition de la charge des protéines change également.



Au pH normal du lait (pH ≈ 6,6), une molécule protéique a une charge résultante négative. Comme les charges de même polarité se repoussent, les molécules protéiques restent séparées.

Si l'on ajoute des ions hydrogène, ils sont adsorbés par les molécules protéiques. A un pH où la charge positive de la protéine est égale à la charge négative, c'est-à-dire où le nombre de groupes NH_3^+ et COO^- est égal sur les chaînes latérales, la charge nette totale de la protéine est nulle. Les molécules protéiques ne se repoussent plus mais les charges positives d'une molécule s'enchaînent aux charges négatives des molécules voisines, et de gros agrégats protéiques se forment. La protéine se précipite alors à partir de la solution. Le pH auquel cela se produit est le point isoélectrique de la protéine.

En présence d'un excès d'ions hydrogène, les molécules acquièrent une charge résultante positive. Elles se repoussent donc de nouveau et, par suite, restent en solution.

Si, en revanche, on ajoute une solution fortement alcaline (NaOH), toutes les protéines acquièrent des charges négatives et se dissolvent.

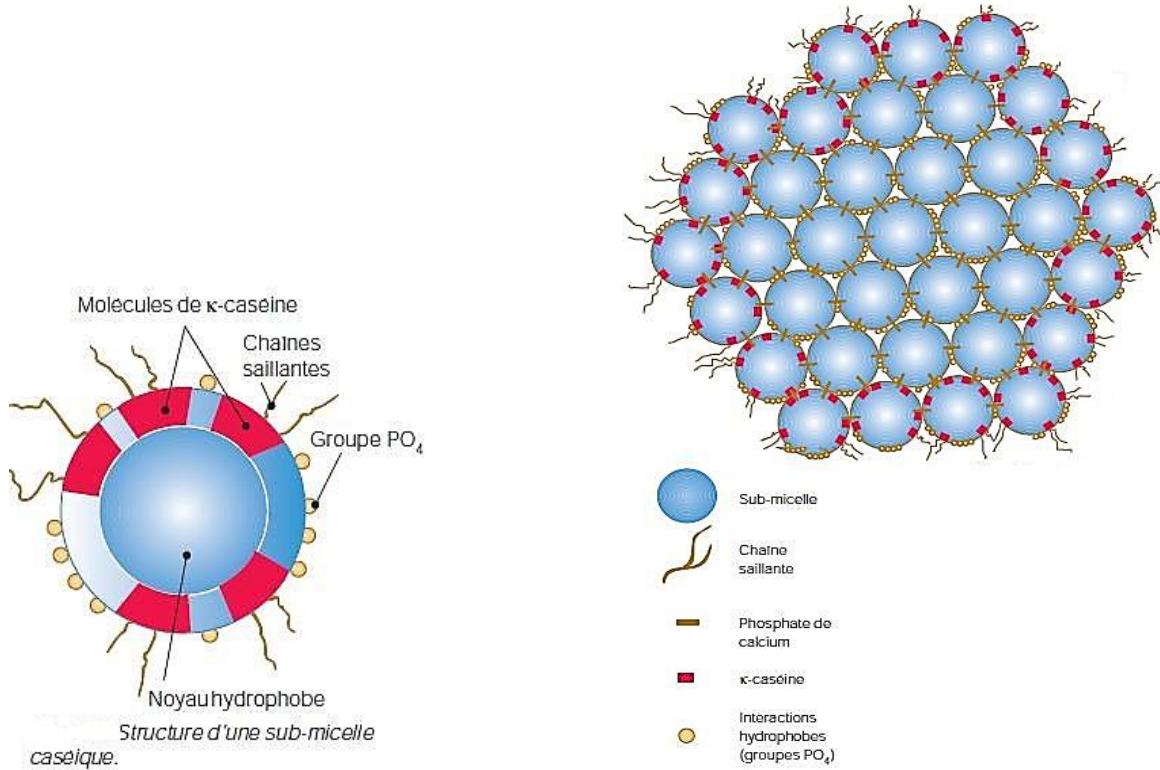
Les classes de protéines du lait

Le lait contient des centaines de types de protéines, la plupart en infimes quantités. Il est possible de classer les protéines de différentes façons, selon leurs propriétés chimiques ou physiques et leurs fonctions biologiques. L'ancienne méthode de regroupement des protéines de lait en caséine, albumine et globuline a été remplacée par un système de classification plus approprié.

Le terme « protéine lactosérique » est souvent utilisé pour désigner à la fois la « protéine du sérum de fromagerie» et la « protéine du lactosérum » (ou protéine du sérum du lait). A la différence de la protéine du lactosérum, la protéine du sérum de fromagerie contient également des fragments de molécules caséïques. Certaines des protéines du lactosérum sont également présentes dans des concentrations moins importantes que dans le lait cru. Cela est dû à la dénaturation par la chaleur au cours de la pasteurisation du lait avant la fabrication du fromage. Les trois principaux groupes de protéines du lait se distinguent par leur comportement et leur forme d'existence très différents. Il est facile de précipiter les caséines du lait de différentes manières, alors que les protéines du sérum restent généralement en solution. Comme leur nom l'indique, les protéines membranaires des globules gras adhèrent à la surface des globules gras, et s'en libèrent seulement par action mécanique, c'est-à-dire par le barattage de la crème en beurre.

La caséine

Caséine est le nom de groupe de la classe dominante des protéines du lait. La caséine du lait est sous forme de **phosphocaséinate de calcium**. Elle peut être précipitée par acidification à son point isoélectrique moyen de pH 4,6. La caséine naturelle peut être obtenue par ultracentrifugation ou par précipitation saline (saturation au NaCl). C'est alors qu'on se rend compte qu'à l'ultracentrifuge toute la caséine n'est pas à l'état de micelles sédimentables. Il existe une fraction soluble (5-10%) qui augmente avec l'abaissement de la température. La coagulation enzymatique de la caséine, comme en industrie fromagère, provoque une rupture de la micelle et donne du **phospho-paracaséinate de calcium**.



Les caséines existent dans le lait sous deux états : l'état polymérisé en micelles sphériques de 30 à 300 nm de diamètre, et l'état monomère qui est soluble et non centrifugeable. Les caséines α , β et κ se présentent généralement sous forme de polymères mais forment ensemble des complexes micellaires en présence d'ions calcium. L'association de ces trois fractions est dans le rapport général 1 κ : 3 β : 5 α . La proportion de caséine κ « (10- 30%) varie inversement avec la taille des micelles, tandis que la caséine β est en relation directe avec la taille. Ce rapport correspond assez bien aux proportions relatives de ces fractions dans le lait.

Les trois sous-groupes de caséines, α -caséine, β -caséine et κ -caséine, sont tous hétérogènes et constitués de 2 à 8 variantes génétiques. Les trois sous-groupes ont en commun le fait qu'un ou deux aminoacides contenant des groupes hydroxy sont estérifiés en acide phosphorique. L'acide phosphorique lie le calcium et le magnésium et certains des sels complexes pour former les liaisons entre les molécules et au sein de celles-ci.

Les micelles caséiques sont constituées d'un complexe de sub-micelles de 10 à 15 nm de diamètre. La teneur en α , β et κ -caséine est répartie de façon hétérogène dans les différentes micelles.

Les sels calciques d' α_s -caséine et de β -caséine sont quasi insolubles dans l'eau, alors que les sels calciques de κ -caséine sont facilement solubles. En raison de la localisation dominante de la κ -caséine à la surface des micelles, la solubilité du κ -caséinate calcique l'emporte sur l'insolubilité des deux autres caséines dans les micelles, et l'ensemble de la micelle est soluble sous la forme de colloïde.

Le phosphate de calcium et les interactions hydrophobes entre les sub-micelles sont responsables de l'intégrité des micelles caséiques. Les parties C-terminales hydrophiles de κ -caséine contenant un groupe glucide se projettent vers l'extérieur des micelles complexes, ce qui leur donne un aspect "chevelu" mais, ce qui est important, c'est qu'elles stabilisent les micelles.

Ce phénomène est dû essentiellement à la forte charge négative des glucides.

Si l'extrémité C-terminale hydrophile de la κ -caséine sur la surface des micelles est scindée, par exemple, par la pression, les micelles perdent leur solubilité et commencent à s'agréger pour former le caillé de caséine.

Les molécules d'eau que retiennent les parties hydrophiles de κ -caséine constituent une partie importante de cet équilibre. Si l'on supprime les parties hydrophiles, l'eau se met à quitter la structure, ce qui donne aux forces d'attraction la liberté d'agir. De nouvelles liaisons se forment, l'une de type salé, où le calcium est actif, l'autre de type hydrophobe. Ensuite, ces liaisons améliorent l'expulsion de l'eau et la structure finit par s'effondrer en un caillé dense.

Une basse température a des conséquences défavorables sur les micelles, car les chaînes de β -caséine commencent à se dissocier, et l'hydroxyphosphate de calcium quitte la structure micellaire, où il existait sous forme colloïdale, et entre en solution. L'explication de ce phénomène réside dans le fait que la β -caséine est la caséine la plus hydrophobe et que les interactions hydrophobes s'affaiblissent lorsque la température baisse. Du fait de ces changements, le lait se prête moins à la fabrication du fromage, car le temps d'emprésurage est plus long et le caillé plus mou.

La β -caséine est également plus facilement hydrolysée par les différentes protéases du lait après avoir quitté la micelle. L'hydrolyse de la β -caséine en γ -caséine et protéoses-peptones se traduit par une baisse de la production de fromage car les fractions protéose-peptone sont perdues dans le sérum de fromagerie.

La décomposition de la β -caséine peut également entraîner la formation de peptides amers, responsables des problèmes de goût atypique dans le fromage.

La courbe suivante présente la quantité approximative (en %) de β -caséine quittant une micelle à +5°C pendant une période de stockage de 20 heures.

Note / Dans ce contexte, il est intéressant de noter également que lorsque le lait cru ou le lait pasteurisé refroidi est chauffé jusqu'à 62/65°C pendant environ 20 secondes, la β -caséine et l'hydroxyphosphate de calcium reviennent à la micelle, restaurant ainsi, au moins partiellement, les propriétés initiales du lait.

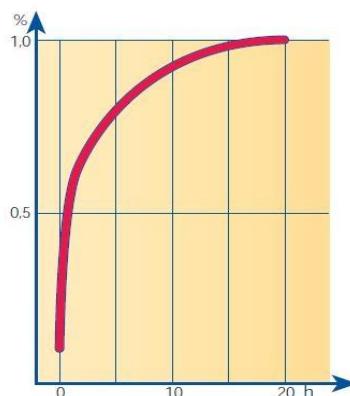


Fig. β -caséine dans le lactosérum
à +5°C.

Précipitation de la caséine

Une propriété caractéristique de la caséine est sa capacité à précipiter. Du fait de la nature complexe des molécules caséiques, et de celle des micelles formées à partir celles-ci, la précipitation peut être causée par de nombreux agents différents. Il convient de remarquer qu'il existe une grande différence entre les conditions optimales de précipitation de la caséine sous la forme micellaire et non micellaire, par exemple comme caséinate sodique. La description suivante concerne principalement la précipitation de la caséine micellaire.

Précipitation par l'acide

Le pH baisse si l'on ajoute un acide au lait ou si l'on laisse des bactéries acidogènes se développer dans le lait.

Les points isoélectriques des composants caséiques dépendent des ions d'autres natures, présents dans la solution. Les valeurs théoriques, valides dans certaines conditions, sont pH 5,1 à 5,3. Dans les solutions salines, similaires à la condition du lait, la précipitation optimale est comprise dans une plage pH 4,5 à 4,9.

Un pH de 4,7 est une valeur pratique de la précipitation de la caséine du lait.

La précipitation par les enzymes

La chaîne d'aminoacides qui forme la molécule de k-caséine est constituée de 169 aminoacides. D'un point de vue enzymatique, la liaison entre l'aminoacide 105 (phénylalanine) et 106 (méthionine) est facilement accessible par beaucoup d'enzymes protéolitiques.

Certains enzymes protéolytiques attaquent cette liaison et scindent la chaîne.

L'extrémité amino soluble contient les aminoacides 106 à 169, qui sont dominés par les aminoacides polaires et les glucides, ce qui donne à cette séquence des propriétés hydrophiles. Cette partie de la molécule de k-caséine s'appelle le glycomacro-peptide; il est libéré dans le sérum de fromagerie pendant la fabrication du fromage.

La partie restante de la k-caséine, constituée des aminoacides 1 à 105, est insoluble et reste dans le caillé avec la α-caséine et la β-caséine. Cette partie s'appelle la para-k-caséine. On disait autrefois que tout le caillé était composé de para-caséine.

Les protéines du sérum

Si l'on supprime la caséine du lait écrémé par une méthode de précipitation, en ajoutant, par exemple, un acide minéral, il reste dans la solution un groupe de protéines appelées protéines du lactosérum.

Les protéines du sérum en général, et l'α-lactalbumine en particulier, ont des valeurs nutritionnelles très élevées. Leur composition en aminoacides est très proche de ce qui est considéré comme un optimum biologique. Les dérivés des protéines du sérum de fromagerie sont très largement utilisés dans l'industrie alimentaire.

α-lactalbumine

Cette protéine peut être considérée comme la protéine type du sérum. On la trouve dans le lait de tous les mammifères ; elle joue un rôle important dans la synthèse du lactose dans le pôle.

β-lactoglobuline

Cette protéine se trouve exclusivement chez les ongulés ; chez la vache, c'est la principale protéine du sérum. Si l'on chauffe le lait à plus de 60°C, la dénaturation démarre aux endroits où la réactivité du soufre-aminoacide de β-lactoglobuline joue un rôle important. Des ponts de soufre commencent à se former entre les molécules de β-lactoglobuline, entre une molécule de β-lactoglobuline et une molécule de k-caséine, et entre la β-lactoglobuline et l'α-lactalbumine. Aux températures élevées, les composés sulfureux, tels que l'hydrogène sulfuré, sont libérés progressivement. Ces composés sulfureux sont responsables du goût de cuit du lait traité thermiquement.

Dans le futur, beaucoup de substances importantes seront probablement isolées sur une échelle commerciale dans le lactosérum ou le sérum de fromagerie. La lactoferrine et la lactoperoxydase sont des substances potentiellement utilisables dans l'industrie pharmaceutique et alimentaire ; il existe maintenant un procédé de type commercial qui permet de les isoler du sérum.

Les protéines membranaires

Les protéines membranaires sont un groupe de protéines formant une couche de protection à la périphérie des globules gras, qui stabilise l'émulsion. Certaines peuvent avoir une consistance molle et gélatineuse, d'autres plutôt ferme et dure. Certains protéines, appelées lipoprotéines, contiennent des résidus lipidiques. Les lipides et les aminoacides hydrophobes de ces protéines orientent les parties hydrophobes des molécules en direction de la surface de matière grasse, alors que les parties moins hydrophobes sont orientées vers l'eau.

Les protéines membranaires faiblement hydrophobes attaquent ces couches protéiques de la même manière, formant un gradient d'hydrophobie qui part de la surface de matière grasse en direction de l'eau.

Les protéines dénaturées

Tant que les protéines restent dans un environnement avec température et pH dans leurs limites de tolérance, celles-ci conservent leurs fonctions biologiques. Mais si on les chauffe à des températures dépassant un maximum donné, leur structure se modifie. On dit alors qu'elles sont dénaturées. La même chose se produit si les protéines sont exposées aux acides ou aux bases, aux rayonnements ou à une agitation violente. Les protéines sont dénaturées et perdent leur solubilité initiale.

Lorsque les protéines sont dénaturées, leur activité biologique cesse. Les enzymes, une classe de protéines dont le rôle est de catalyser certaines réactions, perdent cette capacité une fois dénaturées. La raison est que certaines liaisons dans la molécule sont brisées, ce qui change la structure de la protéine.

Après une dénaturation limitée, les protéines peuvent parfois reprendre leur état initial et voir leurs fonctions biologiques restaurées. Mais souvent la dénaturation est irréversible. Les protéines d'un oeuf dur, par exemple, ne peuvent pas reprendre leur état initial.

Les enzymes du lait

Les enzymes sont un groupe de protéines produites par les organismes vivants. Ils ont la propriété de déclencher des réactions chimiques et d'affecter le cours et la vitesse de ces réactions. Les enzymes le font sans être eux même

affectés ; c'est pourquoi on les appelle parfois biocatalyseurs. L'action des enzymes est spécifique ; chaque type d'enzyme ne catalyse qu'un seul type de réaction.

Deux facteurs qui influencent fortement l'action enzymatique sont la température et le pH. En règle générale, les enzymes sont très actifs dans une plage de température optimale, entre 25 et 50°C. Leur activité baisse dès que cette plage optimale est dépassée, et cesse tout à fait entre 50 et 120°C. A ces températures, les enzymes sont plus ou moins complètement dénaturés (inactivés). La température d'inactivation varie d'un type d'enzyme à l'autre, un fait qui a été largement utilisé pour déterminer le degré de pasteurisation du lait. Les enzymes ont également leur plage pH optimale ; certains sont plus actifs dans les solutions acides, d'autres dans un environnement alcalin.

Les enzymes du lait proviennent soit du pis de la vache soit des bactéries. Les premiers sont les constituants normaux du lait ; on les appelle enzymes originaux. Les derniers, les enzymes bactériens, varient en type et en abondance suivant la nature et la taille de la population bactérienne. Plusieurs des enzymes du lait sont utilisés pour le contrôle de la qualité. Parmi les plus importants, citons la peroxydase, la catalase, la phosphatase et la lipase.

Les enzymes du lait sont :

- La peroxydase
- La catalase
- La phosphatase
- La lipase

Le lactose

Le lactose est un sucre présent uniquement dans le lait ; il appartient au groupe de composés chimiques organiques appelés glucides.

Les glucides représentent la source d'énergie la plus importante de notre alimentation. Le pain et les pommes de terre, par exemple, sont riches en glucides et offrent un réservoir de nourriture. Ils se décomposent en composés à haute valeur énergétique, qui peuvent participer à toutes les réactions biochimiques, dans lesquelles ils fournissent l'énergie nécessaire.

La teneur en lactose du lait varie entre 3,6 et 5,5%. Lorsque les bactéries lactiques attaquent le lactose. Ces bactéries contiennent un enzyme appelé lactase, qui attaque le lactose en décomposant ses molécules en glucose et galactose. Les autres enzymes des bactéries lactiques attaquent ensuite le glucose et le galactose, qui sont ensuite convertis principalement en acide lactique par le biais de réactions intermédiaires compliquées.

C'est ce qui se produit lorsque le lait devient sûr ; le lactose se transforme en acide lactique par fermentation. D'autres micro-organismes dans le lait génèrent d'autres produits.

Lorsque l'on chauffe le lait à une haute température et qu'on l'y maintient, il brunit et acquiert un goût de caramel. Ce processus s'appelle la caramélisation ; c'est le résultat d'une réaction chimique entre le lactose et les protéines appelée réaction de Maillard.

Le lactose est soluble dans l'eau et se présente comme solution moléculaire dans le lait. Dans la fabrication du fromage, la plupart du lactose reste dissout dans le sérum de fromagerie. L'évaporation du sérum de fromagerie dans la fabrication du fromage augmente encore la concentration. Le lactose n'est pas aussi sucré que d'autres sucres ; il est environ 30 % moins sucré que le sucre de canne, par exemple.

Les vitamines du lait

Les vitamines sont des substances organiques que l'on rencontre dans de très faibles concentrations chez les animaux et dans les végétaux. Elles sont essentielles aux processus vitaux élémentaires. Bien que généralement très complexe, la composition chimique des vitamines est maintenant connue. Les différentes vitamines sont désignées par des lettres majuscules suivies parfois de chiffres en indice : A, B1, B2, par exemple.

Le lait contient de nombreuses vitamines. Parmi les plus connues, citons les vitamines A, B1, B2, C et D. Les vitamines A et D sont solubles dans les graisses, ou solvants des matières grasses, alors les autres sont solubles dans l'eau.

Les minéraux et les sels du lait

Le lait contient un certain nombre de minéraux. Leur concentration totale est inférieure à 1%. Les sels minéraux se rencontrent en solution dans le lactosérum ou dans les composés caséiques. Les sels les plus importants sont les sels du calcium, sodium, potassium et magnésium. Ils se présentent sous la forme de phosphates, chlorures, citrates et caséinates. Les sels de potassium et de calcium sont les plus abondants dans le lait ordinaire. Leur quantité respective n'est pas constante. Vers la fin de la lactation, et surtout dans le cas de maladie du pis, la teneur en chlorure de sodium augmente et donne au lait un goût salé, tandis que la quantité des autres sels diminue en conséquence.

Les autres constituants du lait

Le lait contient toujours des cellules somatiques (globules blancs ou leucocytes). Leur taux est faible dans le lait d'un pis sain, mais augmente si le pis est malade, généralement dans les mêmes proportions que la sévérité de la maladie. Le taux de cellules somatiques dans le lait des animaux sains est généralement inférieur à 200000 cellules/ml, mais il peut y en avoir jusqu'à 400000/ml. Le lait contient des gaz, quelque 5 à 6 % par volume dans le lait frais du pis, mais à l'arrivée à la laiterie, la teneur en gaz peut atteindre 10% par volume. Les gaz sont constitués essentiellement de dioxyde de carbone, d'azote et d'oxygène. Ils existent dans le lait dans trois états :

- 1- dissous dans le lait.
- 2- liés et non séparables du lait.
- 3- dispersés dans le lait.

Les gaz dispersés et dissous représentent un sérieux problème dans le traitement du lait. En effet, lorsque le lait contient trop de gaz, il est susceptible de d'encrasser sur les surfaces de chauffe.

Les modifications dans le lait et ses constituants

Les modifications au cours du stockage

La matière grasse et les protéines du lait peuvent subir des modifications chimiques pendant le stockage. Ces modifications sont normalement de deux types : l'oxydation et la lipolyse. Les produits de réaction résultants peuvent introduire des goûts atypiques, principalement dans le lait et le beurre.

L'oxydation de la matière grasse

L'oxydation de la matière grasse donne un goût de métal, et celle du beurre un goût huileux de suif.

L'oxydation intervient aux doubles liaisons des acides gras insaturés, celles de la lécithine étant les plus exposées aux attaques. La présence des sels ferrique et cuivrique accélère le démarrage de l'oxydation et le développement du goût de métal, de même que la présence d'oxygène dissous et l'exposition à la lumière, en particulier à la lumière directe du soleil ou celle des tubes fluorescents.

Le goût atypique dû à l'oxydation risque davantage de se produire aux basses températures, car ces bactéries sont alors moins actives. La solubilité de l'oxygène dans le lait est également plus élevée aux basses températures. La pasteurisation haute température est utile, car des composés réducteurs, groupes (SH^-), se forment lorsque le lait est chauffé.

Le goût atypique de métal dû à l'oxydation est plus fréquent en hiver qu'en été. Cela résulte généralement de la faible température ambiante et en partie des différences dans le régime des vaches. L'alimentation en été est plus riche en vitamines A et C, qui augmentent la quantité de substances réductrices dans le lait.

L'oxydation des protéines

Lorsqu'il est exposé à la lumière, l'aminoacide méthionine se dégrade en méthional avec une participation compliquée de riboflavine (vitamine B2) et d'acide ascorbique (vitamine C). Le méthional, ou 3-mercaptop-méthylpropionaldéhyde, est le principal contributeur à ce goût particulier, appelé goût de lumière.

Comme la méthionine n'existe pas sous cette forme comme tel dans le lait mais comme l'un des composants des protéines du lait, la fragmentation des protéines doit se produire à l'occasion du développement du goût atypique.

Les facteurs associés au développement du goût de lumière sont :

- L'intensité de la lumière (solaire et/ou artificielle, en particulier des tubes fluorescents).
- La durée d'exposition.
- Certaines propriétés du lait : le lait homogénéisé s'est révélé plus sensible que le lait non homogénéisé.
- La nature de l'emballage : les emballages opaques, tels que le plastique et le papier assure une bonne protection dans les conditions normales.

La lipolyse

La décomposition de la matière grasse en glycérol et acides gras s'appelle la lipolyse. La matière grasse lipolyisée a un goût et une odeur rance, causés par la présence d'acides gras libres de faible poids moléculaire (acide butyrique et acide caproïque).

La lipolyse est provoquée par l'action des lipases et favorisée par des températures de stockage élevées. Mais la lipase ne peut agir que si les globules ont été endommagés de façon à exposer la matière grasse.

Au cours des traitements en laiterie, les globules gras ont souvent l'occasion d'être endommagés, par exemple, par le pompage, le brassage et la pulvérisation. Il est par conséquent recommandé d'éviter d'agiter inutilement le lait non pasteurisé, car cela risque de généraliser l'action de la lipase et de libérer des acides gras, qui donnent un goût rance au lait.

Les effets du traitement thermique

Le traitement thermique effectué à la laiterie permet de tuer les micro-organismes pathogènes qui pourraient se trouver dans le lait. Le traitement thermique provoque également des modifications dans les constituants du lait. Plus la température est élevée et la durée de l'exposition prolongée, plus grandes sont les modifications.

Dans certaines limites, il est possible d'équilibrer mutuellement la durée et la température. Un chauffage très court avec une haute température peut avoir le même effet qu'une exposition longue avec une température moins élevée. C'est pourquoi le traitement thermique doit toujours prendre en compte les facteurs temps et température.

Sur la matière grasse

Il a été démontré que le phénomène de "bouchon de crème" se produit dès 74°C lorsque le lait est pasteurisé entre 70 et 80°C pendant 15 secondes. Différentes théories ont été étudiées, mais il semble que la matière grasse libre libérée cimente les globules gras lorsqu'ils entrent en collision. L'homogénéisation est recommandée car elle évite la formation du bouchon de crème.

Des études ont démontré que la matière grasse libre s'échappe des globules dans la crème à 30% de matière grasse, qu'elle soit homogénisée ou non, lorsqu'elle est chauffée à une température comprise entre 105 et 135°C. On pense que cela est dû à la déstabilisation de la membrane des globules, qui accroît la perméabilité ; ensuite, la matière grasse libre agit comme un ciment entre les globules gras qui se collent, et produisent des agrégats stables.

Au-dessus de 135°C, les protéines déposées sur la membrane du globule gras forment un réseau qui densifie la membrane et la rend moins perméable.

L'homogénéisation en aval du stérilisateur est par conséquent recommandée dans le traitement UHT des produits à forte teneur en matière grasse.

Sur les protéines

On a observé que la principale protéine, la caséine, ne peut pas être dénaturée par la chaleur dans les plages normales du pH et de teneur en sel et protéines.

Par contre, les protéines du sérum de fromagerie, en particulier la β -lactoglobuline, qui constitue environ 50% des protéines du sérum de fromagerie, sont relativement sensibles à la chaleur. La dénaturation commence à 65°C et elle presque totale lorsque l'on chauffe les protéines à 90°C pendant 5 minutes.

La dénaturation par la chaleur des protéines du sérum du lait est une réaction irréversible. Les protéines, enroulées au hasard, s'ouvrent, et la β -lactoglobuline en particulier, se lie à la fraction k-caséine par des ponts de soufre.

Le blocage d'une grande proportion de la k-caséine interfère avec l'aptitude à l'emprésurage du lait, car la présure que l'on utilise dans la fabrication du fromage facilite la scission des micelles caséiques aux emplacements de la k-caséine.

Plus la température de pasteurisation est élevée pour un même temps de séjour, plus le coagulum devient mou ; c'est un phénomène indésirable dans la fabrication du fromage à pâte pressée et demi-pressée. C'est pourquoi il ne faut pas pasteuriser le lait destiné à la fabrication du fromage, et de toute manière pas à des températures telles que 72°C pendant 15 à 20 secondes.

Dans le lait destiné aux produits laitiers de culture (yogourt, etc.), la dénaturation des protéines du sérum de fromagerie et l'interaction avec la caséine obtenue à 90- 95°C pendant 3 à 5 minutes contribuent à améliorer la qualité en réduisant la synérèse et en obtenant une meilleure viscosité.

Le lait chauffé à 75°C pendant 20 à 60 secondes commence à sentir et à avoir un goût de "cuit". Cela est dû à la libération de composés sulfureux de la β -globuline et d'autres protéines sulfurées.

Sur les enzymes

Les enzymes peuvent être inactivés par le chauffage. La température d'inactivation varie en fonction du type d'enzyme. Souvent citées de nos jours parmi la flore de dégradation du lait cru refroidi et des produits laitiers traités thermiquement, certaines bactéries, de l'espèce *Pseudomonas*, ont des enzymes lipolytiques et protéolytiques extrêmement résistants à la chaleur. Seule une fraction de leur activité est inhibée par la pasteurisation ou le traitement UHT du lait.

Sur le lactose

Le lactose subit des modifications plus rapidement dans le lait qu'à l'état sec. Aux températures supérieures à 100°C, une réaction se produit entre le lactose et la protéine, qui donne une couleur brunâtre. La série de réactions qui se produisent entre les groupes amino de résidus aminoacides et les groupes aldéhydes des glucides du lait est appelée réaction de Maillard ou réaction de brunissement. Elles ont pour effet de brunir le produit, de modifier le goût et de réduire la valeur nutritionnelle, notamment la lysine, l'un des aminoacides essentiels.

Il semble possible de distinguer le lait pasteurisé, le lait UHT et le lait stérilisé par leur teneur en lactulose. Le lactulose est un épimère du lactose, formé dans le lait chauffé. Des études ont démontré que le lait pasteurisé, le lait UHT et le lait stérilisé contiennent différents taux de lactulose : la teneur en lactulose augmente en même temps que l'intensité du traitement thermique.

Sur les vitamines

La vitamine C est la plus sensible à la chaleur, surtout en présence d'air et de certains métaux. Il est possible cependant d'utiliser un échangeur de chaleur à plaques pour réaliser la pasteurisation en perdant très peu de vitamine C. Les autres vitamines subissent peu de dommages voire pas du tout avec un chauffage modéré.

Sur les minéraux

De tous les minéraux du lait, seul le très important hydroxyphosphate de calcium dans les micelles caséiques est affecté par le chauffage. Lorsqu'elle est chauffée à plus de 75°C, cette substance perd de l'eau et forme de l'orthophosphate de calcium insoluble, qui altère les propriétés du lait pour la fabrication du fromage. Il convient par conséquent de choisir judicieusement la température du traitement.