UNIVERSITE DU BURUNDI (UB)

FACULTE D'AGRONOMIE ET DE BIO-INGENIERIE (FABI)

Département des Sciences et Technologie des Aliments (STA)

Cours de Technologie du Lait et Produits Laitiers

Théorie : 20 heures

Exercices et travaux pratiques : 10 heures

Année Académique 2024-2025

Pôle d'excellence (STA IV)

Préparé par Pr. Séverin SINDAYIKENGERA

Table des matières

Table des matières i
Liste des tableaux iv
Liste des figures iv
INTRODUCTION 1
1. Avant-propos 1
2. Objectifs du cours 2
3. Contenu du cours 2
4. Modalités d'enseignement-apprentissage 2
CHAPITRE I. COMPOSITION ET STRUCTURE PHYSICO-CHIMIQUE DU LAIT 3
I.1. Composition du lait 3
I.1.1. Matières grasses du lait 4
I.1.1.1. Glycérides 5
I.1.1.2. Phospholipides 6
I.1.1.3. Oxydation des matières grasses 7
I.1.2. Protéines du lait 8
I.1.2.1. Caséines 11
I.1.2.2. Protéines du lactosérum 11
I.1.2.3. Protéines mineures 12
I.1.2.4. Dénaturation des protéines 13
I.1.3. Lactose 13
I.1.4. Enzymes du lait 15
I.1.5. Matières salines du lait 18
I.1.6. Vitamines du lait 19
I.2. Propriétés physico-chimiques du lait 20
I.2.1. Saveur et couleur 21
I.2.2. Acidité 21
I.2.3. Point de congélation et densité 22
I.2.4. Chaleur spécifique et tension superficielle 22
I.2.5. Viscosité et indice de réfraction 23
I.2.6. Pression osmotique et potentiel d'oxydo-réduction 23
CHAPITRE II. TRAITEMENTS ET PROCEDES EN INDUSTRIE LAITIERE 25
II.1. Pasteurisation 25
II.1.1. Types de pasteurisation 26

II.1.2. Méthodes de pasteurisation 27
II.2. Stérilisation 28
II.2.1. Conditions de stérilisation 28
II.2.2. Types de stérilisation 29
II.3. Homogénéisation 29
II.3.1. Types d'homogénéisation 30
II.3.2. Matériel d'homogénéisation 30
II.4. Séchage 31
II.4.1. Séchage sur darres (rouleaux) 32
II.4.2. Séchage par atomisation (spray drying) 32
II.4.3. Séchage en écume (foam-mate drying) 33
II.4.4. Séchage en pâte – sous-vide 33
II.5. Procédés de séparation 33
II.5.1. Centrifugation 33
II.5.2. Ultrafiltration 35
CHAPITRE III. FABRICATIONS LAITIERES INDUSTRIELLES 36
III.1. Lait de consommation et produits secondaires 36
III.1.1. Lait de consommation 36
III.1.2. Produits secondaires 39
III.1.2.1. Crèmes 40
III.1.2.2. Laits aromatisés 40
III.2. Beurre 41
III.2.1. Fabrication du beurre en discontinu 41
III.2.1.1. Prétraitement du lait 43
III.2.1.2. Barattage 43
III.2.1.3. Salage et malaxage 45
III.2.2. Fabrication du beurre en continu 46
III.2.2.1. Principe "par flottation ou agglomération" 46
III.2.2.2. Principe "par concentration" 47
III.2.2.3. Méthode "par émulsion ou combinaison" 47
III.2.3. Emballage et entreposage du beurre 47
III.2.3.1. Emballage 47
III.2.3.2. Entreposage 48
III.3. Fromages 48

III.3.1. Etapes de base en fabrication fromagère 51
III.3.1.1. Coagulation du lait 51
III.3.1.1.1. Coagulation par acidification 51
III.3.1.1.2. Coagulation présure 52
III.3.1.2. Egouttage du caillé 53
III.3.1.3. Affinage du fromage 54
III.4. Produits laitiers fermentés 56
III.4.1. Types de fermentation 56
III.4.2. Propriétés particulières des produits laitiers fermentés 58
III.4.2.1. Influence sur la microflore intestinale 58
III.4.2.2. Influence sur le système immunitaire 58
III.4.2.3. Valeur nutritive 58
III.4.2.4. Propriétés organoleptiques 59
III.4.3. Quelques exemples de produits laitiers fermentés 59
III.4.3.1. Yaourt commercial 59
III.4.3.2. Yaourt domestique 61
III.4.3.3. Crème sûre 62
III.4.3.4. Kéfir 62
III.4.3.5. Yaourt parfumé et yaourt aux fruits 62
III.4.3.6. Koumis 63
III.4.3.7. Lait à l'acidophile 63
III.4.3.8. Divers laits fermentés 64
III.5. Crèmes glacées 64
III.5.1. Choix de la composition du mélange 64
III.5.2. Rôle des constituants 65
III.5.3. Préparation et propriétés du mélange 66
III.6. Produits dérivés du lait 66
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 68

Liste des tableaux

Tableau 1 : Acides gras du lait 6
Tableau 2 : Composition azotée du lait 9
Tableau 3 : Composition en acides aminés des protéines du lait 10
Tableau 4 : Classification des enzymes du lait 16
Tableau 5 : Composition saline du lait 18
Tableau 6 : Composition vitaminique du lait 19
Tableau 7: Principales fermentations applicables aux produits laitiers 57
Tableau 8 : Teneur en vitamines de quelques produits laitiers fermentés par rapport au lait frais entier 59

Liste des figures

Figure 1 : Etapes de la fabrication du beurre de crème douce 42
Figure 2 : Etapes essentielles de la fabrication du beurre en continu (d'après le procédé Simon) 46
Figure 3 : Fabrication des fromages (en grandes lignes) 49
Figure 4 : Etapes de la fabrication conventionnelle du yaourt ferme et du yaourt brassé 61
Figure 5 : Synthèse des diverses possibilités de produits laitiers 69
Figure 6 : Fabrication du lait concentré non sucré 70
Figure 7 : Fabrication du lait concentré sucré 71
Figure 8 : Fabrication des yaourts 72
Figure 9 : Fabrication des crèmes glacées 73
Figure 10 : Fabrication des fromages 74

INTRODUCTION

1. Avant-propos

La production mondiale de lait a peu augmenté durant ces dix dernières années et les formes d'utilisation ont également changé avec un accroissement constant de la production des laits fermentés et des fromages. Actuellement, les produits laitiers transformés représentent dans le monde environ 70% de la production estimée de lait (CIDIL, 1999).

Ces transformations utilisent des technologies destinées à stabiliser les produits (buts hygiéniques de conservation : laits pasteurisés, stérilisés, en poudre) ou à fabriquer des produits dérivés appréciés pour leurs propriétés sensorielles et techno-fonctionnelles (laits fermentés, fromages, ingrédients protéiques, beurres). En effet, contrairement à beaucoup de matières premières, le lait ne contient pas de substances antinutritionnelles et le but des technologies n'est pas de modifier la matière première mais de conserver ses propriétés d'origine (Debry, 2001).

Les constituants majeurs (protéines, lactose, lipides) ou mineurs du lait (vitamines, enzymes, minéraux) peuvent, à la suite de ces technologies, subir des modifications de structure susceptibles, selon les conditions d'application des traitements, d'altérer ou d'améliorer les propriétés nutritionnelles.
Le but du technologue sera dans ce cas de trouver, dans la définition des paramètres de procédés technologiques, un compromis permettant d'obtenir le but recherché tout en limitant les risques d'altération de la valeur nutritive.

La plupart des méthodes de traitements destinées à assurer la conservation du lait tout en respectant au maximum ses composants et sa structure n'intéressent pas seulement l'industrie laitière mais toutes les industries de la conserve. Ce sont des méthodes générales, applicables dans leurs grandes lignes aux aliments liquides, mais selon des modalités différentes suivant la composition et la structure de chacun d'eux.
Ainsi, la conservation du lait est dominée par sa grande fragilité. Les conditions dans lesquelles les divers procédés de conservation sont utilisés doivent être définies en conséquence.

Le lait est un aliment complet et éminemment périssable. Il constitue un excellent milieu de culture pour la plupart des microorganismes. C'est la raison pour laquelle les altérations d'origine microbienne sont les plus fréquentes et surtout les plus rapides à apparaître. Les méthodes de conservation visent donc, avant tout, à stopper la prolifération des germes. Elles doivent également mettre le produit à l'abri des modifications d'origine chimique ou physico-chimique.

2. Objectifs du cours

Objectif général

Donner et expliquer l'influence de la composition et la structure physico-chimique du lait sur sa transformation et sa conservation, les principaux traitements et procédés utilisés en industrie laitière et les différentes technologies utilisées dans les fabrications laitières industrielles.

Objectifs spécifiques

A la fin de ce cours, tous les étudiants doivent être capables de :

- Manipuler le matériel de laboratoire utilisé dans les différents traitements et procédés du lait ;
- Fabriquer les différents produits laitiers comme le yaourt, le fromage, la crème glacée, … au niveau laboratoire ;
- Utiliser le matériel de fabrication des différents produits laitiers trouvé dans les unités de transformation visitées lors des excursions.

3. Contenu du cours

Chap. I. Composition et structure physico-chimique du lait
- I.1. Composition du lait
- I.2. Propriétés physico-chimiques du lait.

Chap. II. Traitements et procédés en industrie laitière
- II.1. Pasteurisation
- II.2. Stérilisation
- II.3. Homogénéisation
- II.4. Séchage
- II.5. Procédés de séparation.

Chap. III. Fabrications laitières industrielles
- III. 1. Laits de consommation et produits secondaires
- III. 2. Beurre
- III. 3. Fromages
- III. 4. Produits laitiers fermentés
- III. 5. Crèmes glacées
- III. 6. Produits dérivés du lait.

4. Modalités d'enseignement-apprentissage

- Cours magistral : 20 heures ;
- Excursion en entreprise (laiterie) et TP de laboratoire : 10 heures.

CHAPITRE I. COMPOSITION ET STRUCTURE PHYSICO-CHIMIQUE DU LAIT

Le lait est le liquide sécrété par les glandes mammaires des femelles des mammifères. Cette sécrétion est destinée à assurer l'alimentation des nouveau-nés et constitue pour ceux-ci le seul aliment qu'ils reçoivent pendant de longues périodes dont la durée varie selon l'espèce animale. Il s'agit donc d'un aliment complet qui doit subvenir à tous les besoins de croissance ou d'entretien du jeune en énergie, protéines, minéraux, oligoéléments, vitamines, etc. La composition du lait varie avec l'espèce animale.

Le mot "lait" en absence de tout qualificatif désigne dans le langage courant le lait de vache. Par contre, les laits des autres espèces animales domestiques doivent porter la mention de l'espèce dont ils proviennent : lait de chèvre, lait de brebis, lait de chamelle, lait de bufflesse, lait de jument, etc.
En 1909, le lait destiné à l'alimentation humaine a été défini par le Congrès International de la Répression des Fraudes comme étant "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".
D'après la Fédération Internationale de Laiterie qui a établi sa définition en 1983, le lait est "la sécrétion mammaire normale, obtenue par une ou plusieurs traites sans aucune addition ou soustraction".

La réglementation concernant le lait et ses dérivés est particulièrement précise et sévère. Ceci n'est guère étonnant car il s'agit d'un aliment de très large consommation surtout chez les enfants et particulièrement exposé par son origine, sa composition et ses techniques d'obtention ou de traitement à des dégradations et à des contaminations par des germes des maladies transmissibles à l'homme (tuberculose, brucellose et autres). La commercialisation, les conditions de traitements, les conditionnements sont réglementés également pour protéger le consommateur en empêchant toute falsification ou fraude.

Le lait est consommé tel quel venant directement de la ferme (lait cru, lait de ferme) ou après avoir subi en laiterie des traitements qui l'assainissent et prolongent sa conservation (la pasteurisation ou la stérilisation) ou qui améliorent sa présentation physique (l'homogénéisation). D'importantes quantités de lait sont dirigées vers les industries de transformation (laiterie, beurrerie, fromagerie, etc.) car les fermiers préfèrent confier ces genres d'activités aux entreprises industrielles spécialisées, gérées le plus souvent par des coopératives de ces mêmes fermiers producteurs. Il existe plusieurs classes des produits laitiers.

I.1. Composition du lait

Au point de vue physico-chimique, le lait est un produit très complexe. Une connaissance approfondie de sa structure est indispensable à la compréhension des transformations qui s'opèrent en lui et en ses produits au cours des divers traitements industriels. Le lait est un système colloïdal constitué d'une solution aqueuse de lactose (5%), de matières salines (0,7%) et de plusieurs autres éléments à l'état dissous, dans laquelle se trouvent des protéines (3,2%) à l'état de suspension et des matières grasses à l'état d'émulsion. L'extrait sec total du lait est en moyenne de 13,1% et l'extrait sec dégraissé est de 9,2%.

La composition générale du lait se présente comme suit :

1. Constituants majeurs :

- Eau (86,9%) ;
- Matières grasses (3,9%) ;
- Protéines et composés azotés non protéiques (3,2%) ;
- Glucides (5,1%) ;
- Matières salines (0,9%).

2. Constituants mineurs :

- Enzymes ;
- Vitamines ;
- Pigments (carotènes, xantophylles, riboflavine) ;
- Cellules diverses (cellules épithéliales, leucocytes, bactéries, levures, moisissures) ;
- Eléments divers (dioxyde de carbone, oxygène, azote et autres gaz) ;
- Matières étrangères.

Ces données sont des approximations quantitatives qui varient en fonction d'une multiplicité de facteurs. Il reste que la composition exacte d'un échantillon de lait ne peut s'obtenir que par l'analyse.

I.1.1. Matières grasses du lait

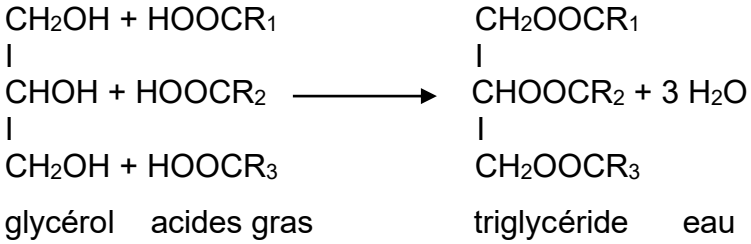
Les substances qui peuvent être extraites du lait à l'aide de solvants organiques non polaires comme l'éther, le benzène ou le chloroforme sont les matières grasses du lait. Celles-ci sont composées principalement de glycérides (99%), mais comprennent aussi des lipides complexes très importants en laiterie, tels que les phospholipides et les cérébrosides. On inclut aussi dans la fraction grasse du lait les stérols, dont le cholestérol et ses précurseurs, et les acides gras libres. L'extraction aux solvants apolaires entraîne des substances solubles à l'éther mais qui ne sont pas des lipides. C'est le cas des carotènes et des vitamines E et K.

La composition lipidique du lait se présente comme suit :

1. Glycérides (3,85%) ;
2. Phospholipides (0,035%):
    - Lécithines (0,021%),
    - Céphalines (0,011%),
    - Sphingomyélines (0,003%) ;
3. Cérébrosides (0,002%) ;
4. Cholestérols (0,015%) ;
5. Caroténoïdes.

I.1.1.1. Glycérides

Les glycérides constituent la presque totalité des matières grasses du lait. Ce sont des esters de glycérol et d'acides gras. Le glycérol est un alcool à triple fonction, donc un triol capable d'estérifier trois acides gras.



glycérol acides gras triglycéride eau

Selon que nous avons un, deux ou trois acides gras estérifiés sur une molécule de glycérol, nous sommes en présence d'un mono-, un di-, ou un triglycéride. De plus, les triglycérides peuvent être simples si les acides gras sont identiques, ou mixtes si l'un, deux ou les trois sont différents. Les facteurs qui régissent les propriétés des glycérides sont la nature et la quantité relative de chaque acide gras dans les glycérides.

Les acides gras sont généralement des chaînes plus ou moins longues d'hydrocarbures se terminant par une fonction carboxyle.
Une caractéristique importante des acides gras est la distinction entre les acides gras saturés et ceux qui sont insaturés. Le degré d'insaturation varie suivant le nombre de liaisons doubles dans la molécule.

Ex. 1) Acide oléique (monoinsaturé): $CH_3(CH_2)_7CH = CH(CH_2)_7COOH$

2) Acide linoléique (di-insaturé): $CH_3(CH_2)_7CH = CHCH_2CH = CH(CH_2)_4COOH$

La position des liaisons doubles dans la molécule est importante sur le plan des propriétés, mais celles-ci sont plus affectées par la forme isomérique, c'est-à-dire l'orientation moléculaire au site des liaisons doubles.

Le nombre d'acides gras qui ont été identifiés dans les corps gras naturels est de l'ordre de 150, mais ceux qui sont quantitativement significatifs se ramènent à une quinzaine. La matière grasse du lait est la plus complexe de toutes les graisses que l'on connaisse. On y trouve seize acides gras en quantités facilement mesurables, des acides gras ayant deux, trois, quatre et même cinq liaisons doubles, des acides gras à chaînes latérales, et des acides gras au nombre impair de carbones et enfin des acides gras isomériques en rapport avec la position des liaisons doubles sur la chaîne ou avec l'orientation spatiale cis et trans. Donnons les principaux acides gras des glycérides du lait.

Tableau 1 : Acides gras du lait

Acides gras	Nombre de C	Teneur moyenne (% poids)
Acides gras saturés		
Acide butyrique	4	3,4
Acide caproïque	6	1,3
Acide caprylique	8	1,2
Acide caprique	10	2,2
Acide laurique	12	3,9
Acide myristique	14	13,1
Acide palmitique	16	25,3
Acide stéarique	18	10,6
Acide arachidique	20	1,3
Acide béhénique	22	en traces
Acides gras mono-insaturés		
Acide caproléique	10	0,2
Acide lauroléique	12	0,3
Acide myristoléique	14	1,3
Acide palmitoléique	16	3,7
Acide oléique	18	30,8
Acide vaccénique (gadoléique)	18	0,7
Acides gras polyinsaturés		
Acide linoléique	18	3,2
Acide arachidonique	20	1,1
Acide en C_{22}	22	en traces

Source : Banks (1991).

Avec une telle variété, le nombre de combinaisons possibles de ces acides gras dans les molécules de triglycérides est forcément considérable, soit le nombre au cube. Les propriétés des triglycérides varient suivant leur composition en acides gras et la position de ces derniers sur la molécule. On peut trouver dans la matière grasse du lait des mono- et des di-glycérides et des acides gras libres. L'action hydrolytique des lipases du lait génère des acides gras libres en les séparant des glycérides. Les propriétés émulsionnantes de ces glycérides partiels sont très recherchées en industrie alimentaire pour la préparation d'émulsions stables.

I.1.1.2. Phospholipides

Les phospholipides sont un groupe de lipides complexes qui contiennent, en plus d'un alcool et des acides gras, de l'acide phosphorique et une base azotée. Dans le lait, on distingue les lécithines, les céphalines et les sphyngomyélines. Les lécithines et les céphalines sont composées de glycérol estérifié par deux acides gras et par une molécule d'acide phosphorique combinée à une base azotée. Chez les

lécithines, la base azotée est la choline ; chez les céphalines, c'est l'éthanolamine ou la sérine.
Les lécithines et les céphalines varient avec les acides gras présents (R_1 et R_2) et aussi avec leur position et celle de l'acide phosphorique sur la molécule de glycérol.
Les sphingomyélines sont composées d'acide phosphorique, d'un acide gras à longue chaîne (R) et de deux bases azotées : choline et sphingosine.
En plus des phospholipides, on trouve aussi dans le lait des traces de cérébrosides qui sont des lipides composés de sphingosine, d'un acide gras à longue chaîne (R) et de galactose.
Ces lipides complexes sont tous solubles dans l'alcool et dans l'éther de pétrole. La teneur du lait en phospholipides est de l'ordre de 0,03%, soit près de 1% des lipides du lait. La contribution des lécithines en phospholipides est de 60%, celle des céphalines de 30% et celle des sphingomyélines de 10%. La teneur du lait en cérébrosides ne dépasse pas 0,002%.
Les acides gras présents dans les phospholipides et les cérébrosides sont des acides à longue chaîne insaturée, ce qui leur donne, avec la présence du groupement phosphorique, une très forte susceptibilité à l'oxydation. Les phospholipides sont la source du goût d'oxydé qui se forme fréquemment dans le lait et les produits laitiers.
L'industrie alimentaire s'intéresse beaucoup aux phospholipides, à cause de leur double fonction hydrophile et lipophile qui en font des agents émulsionnants efficaces.

Les solvants organiques entraînent, en plus des lipides, des corps non saponifiables, représentant environ 0,4% du poids de la matière grasse. Ces corps sont des stérols, des caroténoïdes, des xantophylles, les vitamines liposolubles A, D, E et K, le squalène et aussi des substances aromatiques indigènes ou acquises.
Au point de vue quantitatif, les plus importants sont les stérols représentés surtout par le cholestérol ($C_{27}H_{46}O$) et ses précurseurs, l'ergostérol ($C_{28}H_{44}O$) et le 7-déhydrocholestérol ($C_{27}H_{44}O$). L'exposition du lait au rayonnement ultra-violet transforme ces derniers en vitamines du groupe D. On y trouve aussi du lanostérol ($C_{30}H_{50}O$) qui est un stéroïde biosynthétisé à partir de l'hydrocarbure squalène ($C_{30}H_{50}$) et qui fait partie du cycle de la biosynthèse du cholestérol.
En plus du cholestérol présent dans la phase lipidique, il existe aussi du cholestérol dans la phase aqueuse du lait sous forme de protéino-cholestérol et sous forme de complexe au niveau de la membrane des globules gras. Il joue un rôle d'émulsif et on lui reconnaît des propriétés antilipolytiques dans le lait.

Les tocophérols sont synonymes de vitamine E. On en distingue trois formes (alpha, beta, gamma) aux structures très similaires. L'α-tocophérol ($C_{29}H_{50}O_2$) est le plus représentatif et son pouvoir vitaminique est plus de deux fois supérieur à celui des deux autres formes. Sur le plan technologique, ce sont des antioxydants naturels très précieux surtout pour prévenir l'oxydation des phospholipides.

I.1.1.3. 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 goût 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 mener 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) 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'insaturation 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. La résistance du lait à l'oxydation varie avec la saison, le régime alimentaire, la race et l'individualité de l'animal.
On peut raisonnablement affirmer que l'oxydation des matières grasses commence avec la formation de peroxydes au niveau des doubles liaisons.
A mesure que l'oxydation progresse, on peut s'attendre à une complication des mécanismes, surtout en présence d'oxygène actif tel que généré par les ions métalliques, particulièrement le cuivre. L'oxydation ne se limite pas aux seuls points faibles des doubles liaisons mais affecte également les acides gras saturés et le glycérol. Les tests utilisés pour mesurer le degré d'oxydation comme l'indice de peroxyde, l'indice Kreiss, le test à l'acide thiobarbiturique mettent en évidence l'accumulation de ces substances. Les composés responsables des goûts d'oxydation identifiés sont principalement des aldéhydes et des cétones.

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 (N, CO_2). Enfin, la libération des 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. Il en est de même du traitement du lait aux enzymes protéolytiques qui libèrent des fonctions réductrices. Ces traitements ne sont pas autorisés au Canada pour le lait et les produits laitiers. Leur emploi dans les aliments doit donc se faire en conformité avec la loi du pays auquel les aliments sont destinés.

I.1.2. 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. La coagulation à l'acide trichloroacétique inclut toutes les protéines plus les protéoses et

les peptones. Les protéines du lactosérum comprennent les lactalbumines et les lactoglobulines.
Ces deux groupes peuvent être séparés à l'aide d'une solution saturée de sulfate de magnésium qui précipite les lactoglobulines et retient les lactalbumines en solution. Donnons en détail la composition du lait en protéines et en composés azotés non protéiques.

Tableau 2 : Composition azotée du lait

Protéines :	
1. Caséines	(2,56%)
- Caséine α_{s1}	(1,08%)
- Caséine α_{s2}	(0,25%)
- Caséine β	(0,79%)
- Caséine K	(0,31%)
- Caséine γ	(0,13%)
2. Lactalbumines	(0,52%)
- α-lactalbumine	(0,15%)
- β-lactoglobuline	(0,34%)
- Sérumalbumine	(0,03%)
3. Lactoglobulines	(0,12%)
- Euglobuline	(0,07%)
- Pseudoglobuline	(0,05%)
4. Protéines mineures	(0,03%)
Composés azotés non protéiques	
- Protéoses et peptones	(18 mg N/100 ml)
- Urée	(14 mg N/100 ml)
- Créatine	(3 mg N/100 ml)
- Créatinine	(1 mg N/100 ml)
- Acide urique	(1,5 mg N/100 ml)
- Ammoniaque	(0,7 mg N/100 ml)
- Acides aminés	(4,5 mg N/100 ml)
- Indican	(0,12 mg N/100 ml)
- Adénine	
- Guanine	
- Méthylguanidine	
- Xanthine	
- Hypoxanthine	
- Acide orotique	

Source: Modler (2000).

Les protéines sont les 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) et une fonction aminée (basique). Une caractéristique commune à tous les acides aminés est que le groupement aminé est toujours fixé sur le carbone commun au groupement carboxyle. Pour cette raison, on nomme les acides aminés alpha (α). Les acides aminés que l'on rencontre dans les protéines du

lait sont au nombre de 19. Certains d'entre eux sont des hydrocarbures aliphatiques et d'autres possèdent des groupements fonctionnels additionnels.
C'est ainsi que nous rencontrons chez certains acides aminés des fonctions alcool, sulfhydryle, basique, acide, amide, aromatique et autres. Ces fonctions multiples sont à l'origine des propriétés qui caractérisent et différencient les diverses protéines entre elles. Dans les protéines, les acides aminés sont liés entre la fonction aminée de l'un et la fonction carboxyle du voisin, liaison appelée peptidique. La séquence et la fréquence des acides aminés dans une chaîne polypeptidique, le nombre de chaînes par molécule ainsi que l'arrangement spatial des molécules sont des caractéristiques spécifiques aux protéines. A l'hydrolyse (acide, alcaline ou enzymatique), les liaisons peptidiques sont ouvertes et les acides aminés sont libérés.

Les protéines qui ne sont constituées que d'acides aminés sont appelées protéines simples. D'autres peuvent contenir des constituants autres que des acides aminés et appartiennent aux protéines conjuguées. C'est ainsi que les albumines et les globulines sont généralement considérées comme protéines simples, même si des groupements glucidiques ou lipidiques leur ont été attribués. Les caséines sont définitivement des phosphoprotéines.

Au point de vue pratique, il est utile de retenir que les caséines précipitent à l'acidification au pH 4,6, alors que les albumines et les globulines doivent être déstabilisées par la chaleur avant d'être coagulées à l'acide. Les albumines se distinguent des globulines en ce qu'elles sont solubles dans l'eau, dans une solution saturée de $MgSO_4$ ou une solution demi-saturée de $(NH_4)_2SO_4$. Donnons la composition en acides aminés des protéines du lait.

Tableau 3 : Composition en acides aminés des protéines du lait

Acides aminés	Protéines totales (%)	Caséine (%)	Lactalbumine (%)	Lactoglobuline (%)
Glycine	0,3	0,4	0	1,5
Alanine	2,3	2,3	2,6	7,1
Valine*	6,9	7,0	5,0	5,8
Leucine*	10,8	10,8	14,1	15,5
Isoleucine*	6,4	6,1	5,1	6,8
Sérine	4,8	5,4	4,0	4,4
Thréonine*	4,6	4,4	5,0	5,3
Acide aspartique	5,0	5,8	9,6	11,0
Acide glutamique	20,5	21,7	15,2	19,8
Arginine	3,8	3,8	3,4	2,9
Lysine*	8,1	6,8	7,3	11,3
Cystéine	-	-	-	1,1
Cystine	0,9	0,3	3,1	4,0
Méthionine*	2,6	2,9	2,4	3,2
Phénylalanine*	5,2	5,5	4,1	3,7
Tyrosine	5,7	6,0	4,0	3,7
Histidine	2,4	2,2	1,6	1,6
Proline	7,6	9,8	4,0	4,7
Tryptophane*	1,8	1,2	2,1	1,9

* : Acides aminés essentiels

Source : Cornelly (2000).
Il est à noter que les protéines du lactosérum sont plus riches que la caséine en trois acides aminés les plus limitants dans les aliments pour l'homme, soit la lysine, la méthionine et le tryptophane ; elles sont aussi plus riches en acides aminés soufrés, affectant leur stabilité à la chaleur.

I.1.2.1. Caséines

Les caséines sont des ampholytes en ce qu'elles présentent simultanément des fonctions acides et des fonctions basiques. Au pH normal du lait, elles sont du côté alcalin de leur point isoélectrique et, par conséquent, se comportent comme des acides. Les principales forces qui président à la stabilité des micelles de caséine sont les charges électriques et leur degré d'hydratation.
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. Cette caséine isoélectrique a un poids moléculaire de 24000, et elle est pure et déminéralisée.
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'ultracentrifugation 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 études basées sur la mobilité moléculaire (chromatographie, électrophorèse, filtration, ultracentrifugation) ont mis en évidence l'hétérogénéité de la caséine. On distingue cinq familles de caséines : la caséine α_{s1} (poids moléculaire 23600), la caséine α_{s2} (poids moléculaire 25150), la caséine β (poids moléculaire 24000), la caséine K (poids moléculaire 19000) et la caséine γ (poids moléculaire 30650). Ces fractions ne sont pas encore considérées homogènes, car elles peuvent varier en un ou plusieurs acides aminés, ce qui est à la base du polymorphisme génétique. Les méthodes électrophorétiques sur gel de polyacrylamide en présence de dodécylsulfate de sodium et de 2-mercaptoéthanol permettent de révéler une série de variants génétiques pour chacune de ces caséines.

I.1.2.2. Protéines du lactosérum

Les protéines du lactosérum (albumines et globulines) du lait diffèrent passablement des caséines. Ce sont des émulsoïdes vrais en ce sens qu'il existe entre elles et l'eau une très forte affinité. Pour les coaguler, il faut non seulement neutraliser les charges mais aussi affaiblir leur degré d'hydratation soit par la chaleur ou l'alcool. C'est pourquoi normalement ces protéines ne coagulent pas avec la caséine par simple acidification au pH 4,6. Les lactalbumines peuvent être séparées des lactoglobulines par la précipitation de ces dernières à l'aide d'une solution demi-saturée de sulfate d'ammonium ou d'une solution saturée de sulfate de magnésium. La fraction albumine peut être précipitée du surnageant à l'aide d'acide trichloroacétique à 12% ou d'une solution saturée de sulfate d'ammonium.

Ce sont des protéines thermosensibles. Elles sont dénaturées par la chaleur aux températures supérieures aux traitements de pasteurisation. La détermination des protéines insolubilisées permet de distinguer entre les poudres de lait haute température et basse température (high heat, low heat).
Au plan quantitatif, elles représentent 20% des protéines totales. Dans le lait normal, 80% d'entre elles sont des lactalbumines, mais dans le colostrum, la présence des lactoglobulines est dominante. Au plan nutritionnel, ces protéines sont plus riches que les caséines en acides aminés essentiels souvent déficitaires : lysine, méthionine et tryptophane.

L'α-lactalbumine représente 23% des protéines du sérum. Son poids moléculaire est 16000 et elle contient en positions terminales de l'acide glutaminique et de la leucine. Elle est très soluble dans l'eau et son point isoélectrique est 4,8. Comparativement à la β-lactoglobuline, elle est peu soluble dans une solution diluée de sels neutres.

La β-lactoglobuline est la plus importante des protéines du sérum. Son poids moléculaire est 18000 mais la littérature rapporte parfois 36000 à cause de sa forte tendance à former des polymères sous forme de deux chaînes polypeptiques identiques. On lui reconnaît quatre variants génétiques (A, B, C, D). Elle est caractérisée par sa solubilité dans une solution diluée de sels neutres, et par sa faible solubilité dans l'eau pure. On peut la cristalliser par dialyse d'une solution saline diluée au pH isoélectrique (5,2).

La sérumalbumine représente 5% des protéines du sérum. Elle est identique à la sérumalbumine du sang. C'est une protéine de poids moléculaire 65000 et dont le point isoélectrique est 4,7. Elle est particulièrement riche en lysine et en cystine et elle contient en positions terminales de l'acide aspartique et de l'alanine. Elle est très soluble dans l'eau et elle peut être cristallisée à partir d'une solution concentrée de sulfate d'ammonium.

Les lactoglobulines du lait représentent 20% des protéines du sérum. Ces globulines sont caractérisées par leur poids moléculaire élevé (180000) et par la présence d'un segment glucidique. Elles sont moins solubles dans l'eau que les lactalbumines et elles sont précipitées à l'aide d'une solution demi-saturée de sulfate d'ammonium. L'euglobuline de point isoélectrique 6,0 est une vraie globuline insoluble dans l'eau. La pseudoglobuline ou fausse globuline est ainsi appelée parce qu'elle n'est pas cristallisée par dialyse à son point isoélectrique 5,6.

On les appelle immunoglobulines (type IgG_1) à cause de leurs propriétés immunologiques de grand intérêt. Leur présence en plus forte proportion dans le colostrum est significative pour transmettre au jeune veau les anticorps essentiels à la lutte contre les infections. On croit aussi qu'elles contribuent au système antibiotique du lait cru.

I.1.2.3. Protéines mineures

D'autres protéines (protéines mineures) ont été repérées dans le lait en faibles quantités. Les protéines qui adhèrent à la surface des globules gras sont constituées d'euglobuline et aussi de phosphatase alcaline et de xanthine oxydase. On a de plus

isolé du lait une mucoprotéine, une lipoprotéine et des ferroprotéines (lactoferrine, transferrine).

La précipitation des protéines du lait par traitement thermique (95°C / 30 minutes) suivie d'acidification à pH 4,6 laisse dans le filtrat des matières azotées non protéiques diverses. Les plus importantes de ces matières azotées sont les protéoses et peptones.
Ce sont des chaînes peptidiques variées de poids moléculaire inférieur à 10000. Elles contiennent des glucides et de l'acide sialique en proportions variables. L'hydrolyse des protéines augmente la proportion de protéoses-peptones, d'où leur importance en industrie fromagère. Leur accumulation dans les fromages est associée à l'apparition de goûts amers.
Si l'on traite le filtrat non protéique à l'acide trichloroacétique (12%) pour précipiter les protéoses-peptones, la fraction azotée soluble est composée d'urée, d'acide urique, de créatine, de créatinine, d'ammoniaque, d'acides aminés libres, d'indican, d'adénine et de guanine.

I.1.2.4. Dénaturation des protéines

Par dénaturation (des protéines), il faut entendre ici tout changement irréversible de certaines propriétés des protéines. Sous ce rapport, les traitements thermiques peuvent dénaturer les protéines. La perte de solubilité est la caractéristique la plus facilement observable. A cet égard, les protéines non caséiques sont les plus fragiles. Les mécanismes de dénaturation se situent au niveau des liaisons secondaires et tertiaires (liens calcium, phosphore, hydrogène) qui contribuent à retenir les protéines dans une configuration globulaire ou repliée. Cela est vrai surtout pour les protéines de lactosérum. La destruction de ces liaisons ouvre les chaînes polypeptidiques, et il en résulte une perte de solubilité. Lorsque les chaînes sont ouvertes au point d'exposer des groupements réactifs, il y a possibilité de création de liaisons nouvelles entre les molécules voisines avec formation de protéines fibreuses.

L'hypothèse ci-dessus explique convenablement l'extrême sensibilité à la chaleur des poudres de lait lorsque leur teneur en humidité est au voisinage de 12%. Il a été observé qu'à cette concentration il ne faut que 0,4 seconde à 100°C pour dénaturer 50% des protéines. Pour atteindre ce même degré de dénaturation à 100°C, il faut deux minutes lorsque le lait est à 48% d'extraits secs, et 10 heures lorsqu'il est à 97%. La jonction de la mobilité et du rapprochement des molécules semble être en harmonie avec la courbe de dénaturation thermique des protéines.

I.1.3. Lactose

Les glucides du lait sont essentiellement constitués de lactose et de quelques autres sucres en faibles quantités, dont du glucose (0,1%) et du galactose. Le lactose est le constituant le plus important de l'extrait sec du lait sur le plan quantitatif. Le lait en contient environ 5%, mais la poudre de lait écrémé en contient 52%, et la poudre de lactosérum, 70%.
Le lactose est un di-oside forme de α-glucose, β-glucose et de β-galactose. Il peut exister sous l'une ou l'autre des formes isomériques α ou β. Cette notion d'isomérie est importante, car ces deux formes possèdent des propriétés très différentes de

solubilité, de cristallisation et de rotation. De plus, le lactose α peut exister sous forme anhydre ou sous forme mono-hydratée. Dans le lait normal, le lactose est en solution sous les deux formes α et β, mais dans un rapport précis qui varie avec la température.
Aux températures inférieures à 93,5°C, la forme β est plus soluble que la forme α et l'équilibre à 0°C est 1 α : 1,65 β, et à 25°C, il est 1 α : 1,58 β.
Dans la plupart des situations, soit aux températures inférieures à 93,5°C, le lactose cristallise, s'il est en solution sursaturée, sous la forme α-monohydratée.
Aux températures supérieures à 93,5°C, le lactose α est plus soluble que le lactose β et, par conséquent, c'est ce dernier qui cristallise sous la forme β-anhydre. Le lactose du commerce est le lactose α-monohydraté. Le lactose α-anhydre peut être obtenu en déshydratant la forme hydratée sous vide aux températures entre 65°C et 93,5°C.

Le lactose n'est pas un sucre très soluble par rapport au sucre de table. Sa solubilité qui augmente avec la température est de l'ordre de 22% à 25°C, de 44% à 50°C et de 90% à 75°C. Il est important de connaître la distinction entre solubilité initiale et solubilité finale du lactose. La solubilité initiale représente la quantité maximale de lactose α que l'on peut dissoudre dans 100 g d'eau avant qu'une partie du lactose α se convertisse en lactose β. La solubilité finale correspond au point d'équilibre entre le lactose α et le lactose β en solution saturée. La faible solubilité relative du lactose pose des problèmes de cristallisation en industrie laitière. Dans plusieurs produits laitiers, le lactose atteint des conditions de sursaturation et tend à cristalliser. C'est généralement le lactose α monohydraté qui cristallise et le phénomène de cristallisation se poursuit habituellement lentement à mesure que le lactose β se change en lactose α pour maintenir l'équilibre. Une quantité appréciable de lactose cristallise lorsque l'on sèche du lait par une méthode lente. En revanche, le séchage rapide du lait (pulvérisation, cylindre) laisse le lactose à l'état de "verre" qui est un état de sursaturation où la cristallisation est inhibée par une viscosité trop élevée.

La taille des cristaux de lactose dépend de la vitesse de cristallisation. Une cristallisation lente conduit à la formation de gros cristaux et cause ainsi une texture sableuse dans les produits. C'est à dessein, pour obtenir une texture douce, que l'on accélère parfois la cristallisation en choisissant une viscosité favorable, avec ensemencement et agitation. Dans la fabrication du lait condensé sucré, la cristallisation du lactose est inévitable et il est sage de la contrôler. Dans d'autres produits laitiers, comme la crème glacée, les laits concentrés congelés, les fromages fondus, si la teneur en lactose est trop élevée, il y a risque de développement d'une texture sableuse.

Le lactose du commerce (α) est un édulcorant quatre fois plus faible que le sucre de table (saccharose). En comparaison, le lactose β a un pouvoir sucrant plus élevé en plus d'être plus soluble que le lactose α. Le lactose β pourrait au besoin remplacer le saccharose comme sucre de table. Il est aussi possible d'augmenter le pouvoir sucrant du lactose par hydrolyse et inversion. Le sucre inverti (fructose et glucose) a un pouvoir sucrant qui se rapproche de celui du saccharose.

L'hydrolyse du lactose donne les sucres simples : glucose et galactose. Elle peut être effectuée à l'aide d'acides forts ou d'enzymes. L'hydrolyse acide du lactose est possible à pH inférieur à 2 et requiert des températures élevées (150°C sous pression), avec le risque de formation de produits secondaires qui peuvent affecter le

goût final. Il est plus indiqué d'avoir recours à l'hydrolyse enzymatique à l'aide de l'enzyme spécifique lactase (β-D-galoctosidase). Celle-ci est une endo-enzyme produite par certaines moisissures, levures et bactéries (*Streptococcus thermophilus, Saccharomyces fragilis, Candida utilis, Torulapsis sphaerica*, etc.).
On peut trouver de la lactase aussi dans les parois intestinales des mammifères et dans les amandes amères.
Le coût élevé des préparations commerciales de lactase a jusqu'à maintenant freiné la production de lactose hydrolysé. Toutefois, avec la technologie des enzymes immobilisées, on peut s'attendre à un développement rapide de cette production.

Le brunissement du lait au chauffage est dû à la réaction entre la fonction aldéhyde du lactose et la fonction aminée des protéines (réaction de Maillard), ou à la polymérisation (caramélisation) des molécules de lactose. Il se peut aussi que le lactose soit décomposé par oxydation en acides organiques, expliquant ainsi en partie l'augmentation de l'acidité du lait lors de la stérilisation du lait évaporé. En milieu alcalin, la thermodestruction du lactose peut donner lieu à une couleur grise plus ou moins foncée, souvent observée dans les procédés de cuisson.
La réaction de Maillard parfois désirée pour obtenir une couleur dorée (boulangerie, pâtisserie) diminue la valeur nutritive des protéines, car le groupement aminé libre de la lysine est directement mêlé à la réaction. La présence de bisulfite de sodium aide à prévenir ce type de brunissement en bloquant le groupement aldéhyde du lactose.

La transformation du lactose par fermentation est une des activités biotechnologiques les plus anciennes. Elle est à la base de la formation d'acide lactique qui est la réaction fondamentale dans les produits laitiers fermentés.

$C_{12}H_{22}O_{11}.H_2O \longrightarrow 4\ CH_3CHOHCOOH$

lactose monohydraté acide lactique

La formation d'acide lactique est généralement accompagnée de produits secondaires qui sont caractéristiques des microorganismes impliqués. On trouve des applications classiques de cet ordre dans le développement des arômes typiques du yaourt, des crèmes fermentées, du beurre de culture, de certains fromages, etc. la production de CO_2 par dégradation de l'acide lactique fait partie du mécanisme de formation des yeux dans les fromages de type Gruyère.

I.1.4. Enzymes du lait

Les enzymes ou diastases sont des biocatalyseurs sécrétés par les cellules vivantes. Au point de vue chimique, ce sont des protéines avec leur point isoélectrique respectif et leur vulnérabilité aux agents dénaturants : chaleur, sels, alcool, etc. Elles ont des propriétés spécifiques de catalyser certaines réactions de décomposition, de synthèse ou de transformation. A cette fin, elles ont chacune une température et un pH optimum où leur activité est au maximum. La plupart des enzymes du lait sont inactivées aux traitements de pasteurisation. Ceci permet de les utiliser comme indicatrices de traitements thermiques.
La plupart des enzymes du lait sont des hydrolysases, des déshydrogénases et des oxygénases.

Tableau 4 : Classification des enzymes du lait

Groupes	Sous-groupes	Enzymes
Hydrolysases		Lipases
		Phosphatase
	Estérases	Oléinase
		Butyrinase
		Salolase
	Protéases	Peptidase
		Galactase
	Glucidases	Lactase
		Amylase
		Aldolase
Déshydrogénase		Xanthine oxydase
Oxygénases		Peroxydase
		Catalase

Source : François (1990).

L'hydrolyse des corps gras au niveau des liaisons esters est effectuée par des lipases. Il y a libération d'acides gras et de glycérides partiels (mono- ou di-) ou, à la limite, de glycérol. Certaines lipases ont la propriété de pouvoir hydrolyser plusieurs esters différents tandis que d'autres sont très spécifiques. L'action hydrolytique des lipases est quelquefois recherchée pour des fabrications particulières (fromage bleu, chocolat, biscuits) où les acides gras à courte chaîne contribuent à l'équilibre des constituants du goût pour ces produits. En général, les lipases sont source de problèmes en technologie laitière. C'est pourquoi il est utile d'avoir quelques lignes directrices pour le contrôle de leurs activités. Les lipases sont facilement détruites aux traitements de pasteurisation. Elles sont aussi sensibles aux agents oxydants comme les rayons ultraviolets, le cuivre, le peroxyde d'hydrogène et elles sont attaquées par les enzymes protéolytiques comme la pepsine, la trypsine. L'action lipolytique des lipases est à son maximum à pH 8,5 et diminue avec le pH.

La salolase est une enzyme capable d'hydrolyser le phénylsalicylate. La signification de cette enzyme dans le lait n'est pas connue. Elle pourrait être utilisée comme indicatrice de traitement thermique du lait.

Les phosphatases sont ces enzymes qui catalysent l'hydrolyse des esters glycérophosphoriques. On distingue dans le lait une phosphatase alcaline (pH 9 -10) et une phosphatase acide (pH 4). La plus importante est de loin la phosphatase alcaline. La phosphatase alcaline est une glycoprotéine dont la présence dans le lait est faible au début de la lactation mais qui augmente en forte quantité en fin de lactation. Elle est inactivée aux températures de pasteurisation.

Les protéases (autrefois galactases) sont des enzymes qui hydrolysent les protéines en peptides plus simples ou, à la limite, en acides aminés. On peut les appeler aussi peptidases. Le lysozyme dont la présence dans le lait a été rapportée est une mucopeptidase et se classe avec les enzymes protéolytiques. Il est maintenant établi que le lait normal contient une faible quantité d'une protéase indigène. L'activité

protéolytique est au maximum au pH 8 et à 37°C. Cette enzyme est très thermostable et n'est pas détruite par le procédé UHT.
Son inactivation requiert 142°C pendant 16 secondes. Les caséines α et β sont hydrolysées par cette protéase de préférence aux autres protéines.

Même en faible quantité, l'activité de cette protéase contribue à la dissociation des micelles caséiques et peut ainsi expliquer en partie certaines difficultés en fabrication fromagère, notamment l'aptitude du lait à la coagulation par la présure.
Plus importantes que cette protéase indigène sont les protéases sécrétées par les microorganismes, notamment les psychrotrophes (Pseudomonas en particulier) qui ont augmenté depuis l'avènement de l'entreposage réfrigéré du lait à la ferme. Même si ces organismes sont détruits par les températures de thermisation, les protéines libérées sont résistantes et sont soupçonnées d'être la cause de plusieurs difficultés en technologie laitière.
Nous ne discuterons pas ici des protéases exogènes utilisés dans différents procédés laitiers.

La lactase est une enzyme qui hydrolyse le lactose en glucose et galactose. Elle est généralement présente dans l'appareil digestif des consommateurs de lait et serait déficitaire chez les personnes considérées allergiques au lactose. Certaines bactéries sont productrices de lactose dont la présence dans le lait n'a toutefois pas été établie définitivement.

Le lait contient des amylases capables d'hydrolyser l'amidon en dextrine. On distingue une α-amylase (liquéfiante) et une β-amylase (saccharifiante). Comme elles sont probablement d'origine sanguine, leur importance dans le lait est reliée à l'état pathologique de la vache (mammite, colostrum, etc.). Les amylases étant inactivées à 65°C pendant 30 minutes, il a déjà été proposé de les utiliser comme indicatrices de traitement thermique.

L'aldolase est une enzyme cellulaire jouant un rôle dans le métabolisme des glucides. Elle hydrolyse le fructose diphosphate en cétones et aldéhydes. Sa présence dans le lait ne semble pas poser de problème.

La xanthine oxydase (enzyme de Schardinger) est une déshydrogénase ou encore une réductase qui est mise en évidence par la décoloration du bleu de méthylène en présence de formol. Au cours de cette réaction, l'aldéhyde est oxydé en acide formique et le bleu de méthylène est réduit. C'est une métallo-protéine contenant du fer et du molybdène. Comme pour la phosphatase alcaline, elle est associée à la matière grasse du lait. Elle est plus résistante à la chaleur que la phosphatase alcaline. Son inactivation nécessite 75°C pendant 20 minutes et son pH optimum se situe entre 6 et 9. A part ses interventions dans les réactions d'oxydo-réduction, son rôle dans le lait est encore obscur.

La peroxydase est une ferro-enzyme qui catalyse l'oxydation d'une série de substances aromatiques (phénols, amines aromatiques, acides aromatiques) et autres (nitrites). Elle est présente dans le lait en quantité appréciable et son pH optimum est 6,8. Elle sert de base à l'épreuve Storch pour détecter les laits chauffés à plus de 80°C et elle peut servir également à la détection de peroxyde d'hydrogène dans le lait.

La catalase est une enzyme qui provoque la décomposition du peroxyde d'hydrogène en oxygène moléculaire et en eau. Le lait normal n'en contient qu'une faible quantité. Sa teneur étant reliée à la présence de leucocytes et de cellules épithéliales dans le lait, elle est proposée comme indicatrice de laits mammiteux ou de colostrum.
La catalase est sécrétée par certains microorganismes à des degrés divers. L'application du test de catalase pour mesurer la qualité microbiologique du lait est difficile car les bactéries lactiques n'en produisent pas. Le test de la catalase est plus utile dans des applications spécifiques que pour le dénombrement total de la flore bactérienne.

I.1.5. Matières salines du lait

Les matières salines sont généralement déterminées à partir des cendres. Les données ainsi obtenues posent des problèmes de précision à cause des pertes et des changements d'état de plusieurs éléments minéraux au cours de la calcination (incinération). Plusieurs constituants dont les chlorures alcalins sont partiellement volatilisés. Les citrates et les carbonates ne sont pas inclus. Le soufre et le phosphore organiques sont transformés en sulfates et en phosphates.

Tableau 5 : Composition saline du lait

1. Composés basiques :

- Oxyde de potassium (K_2O)
- Oxyde de sodium (Na_2O)
- Oxyde de calcium (CaO)
- Oxyde de magnésium (MgO)

2. Composés acides :

- Pentoxyde de phosphore (P_2O_5)
- Chlore (Cl)
- Acide citrique
- Bicarbonates, sulfates, lactates

3. Oligo-éléments :

Fer (Fe), Cuivre (Cu), zinc (Zn), manganèse (Mn), iode (I), bore (B), fluor (F), silicium (Si), brome (Br), nickel (Ni), molybdène (Mo), cobalt (Co), traces de baryum (Ba), aluminium (Al), titane (Ti), vanadium (V), rubidium (Rb), lithium (Li), strontium (Sr), ruthénium (Ru), chrome (Cr), plomb (Pb), argent (Ag), étain (Sn), et probablement d'autres.

4. De plus, nous trouvons du soufre faisant partie des protéines et du phosphore en combinaisons organiques dans les caséines et les phospholipides

Source : François (1990).

La composition des matières salines dans le lait est sujette à d'importantes variations qui contribuent à expliquer les différences saisonnières et régionales dans le comportement du lait. D'une façon générale, on peut affirmer que la composition du lait de vaches malades tend à se rapprocher de celle du sang.
C'est pourquoi les laits mammiteux sont plus salés (chlore, sodium) et mois riches en Ca, Mg, P et K que les laits normaux. Les laits de début et de fin de lactation contiennent moins d'acide citrique et de K mais plus de Cl, Na, Ca et Mg que les laits de pleine lactation. La composition des matières salines est affectée aussi par l'alimentation de la vache. Les constituants minéraux du lait existent surtout sous forme de sels solubles. Les éléments basiques majeurs, comme le Ca, le K, le Mg et le Na, forment des sels avec les éléments acides : protéines, acide citrique, phosphates et Cl.
Une partie des éléments minéraux existent sous forme colloïdale en association avec les caséines ; c'est le cas en particulier des phosphates et des citrates de Ca et de Mg. Le S en totalité, une partie du P et plusieurs oligo-éléments existent en combinaisons organiques. Le rôle technologique des oligo-éléments du lait n'a pas fait l'objet d'études approfondies. Le Cu et le Fe sont de puissants catalyseurs des réactions d'oxydation et leur présence dans le lait est indésirable. C'est ce qui a conduit l'industrie laitière, il y a fort longtemps, à adopter l'acier inoxydable pour les appareils venant en contact avec le lait. D'autres oligo-éléments peuvent jouer des rôles non encore définis dans les changements qui se produisent au sein de produits laitiers, particulièrement des produits fermentés.

I.1.6. Vitamines du lait

Les vitamines sont des corps organiques contenus dans le lait en faibles quantités et jouant un rôle essentiel en nutrition. Certaines d'entre elles contribuent à la couleur du lait et des produits laitiers.

Tableau 6 : Composition vitaminique du lait

1. Vitamines liposolubles :	
- Vitamine A (+ carotènes)	: 27-60 µg/100 ml
- Vitamine D	: 0,1-1,4 µg/100 ml
- Vitamine E	: 120 µg/100 ml
- Vitamine K	: 200 unités Dam-Glavind
2. Vitamines hydrosolubles :	
- Acide ascorbique (vitamine C)	: 1,7 µg/100 ml
- Thiamine (vitamine B_1)	: 40 µg/100 ml
- Riboflavine (vitamine B_2)	: 163 µg/100 ml
- Niacine et niacinamide (vitamine PP)	: 76 µg/100 ml
- Acide pantothénique	: 350 µg/100 ml
- Pyridoxine (vitamine B_6)	: 35 µg/100 ml
- Acide folique	: 0,7 µg/100 ml
- Biotine (vitamine H)	: 2,6 µg/100 ml
- Inositol	: 12 mg/100 ml
- Choline	: 12 mg/100 ml
- Acide para-aminobenzoïque	

- Vitamine B_{12}	: 0,42 µg/100 ml
- Vitamine P	

Source : Jensen (1995).

Sur le plan technologique, il est important de savoir que quatre vitamines sont liposolubles et, par conséquent, suivent la crème et le beurre, tandis que les autres sont hydrosolubles et sont localisées dans le sérum du lait.

En général, les vitamines sont résistantes aux traitements thermiques usuels. La plus instable est la vitamine C. Son instabilité nécessite la présence d'oxygène et d'agents oxydants. La thiamine est relativement thermostable et sa destruction aux températures de pasteurisation est de l'ordre de 2 - 10%. Les agents oxydants, comme le cuivre et le fer, accélèrent cette destruction. L'adoption de l'acier inoxydable par l'industrie laitière a largement contribué à la protection des nutriments laitiers.

Les vitamines qui sont affectées au cours de l'entreposage des produits laitiers sont la vitamine C, la vitamine A et la vitamine E. La vitamine C est particulièrement sensible à toute condition oxydante et il n'est pas surprenant que sa présence diminue graduellement dans les produits laitiers entreposés. La vitamine A est très stable à la chaleur mais elle est susceptible d'être oxydée, particulièrement dans les situations où il y a formation de peroxydes. La vitamine E (tocophérols) du lait est un antioxydant naturel des corps gras. Elle est, par conséquent, exposée aux réactions d'oxydation.

La vitamine la plus sensible à la lumière est la riboflavine (vitamine B_2). Sa destruction peut être sévère et rapide dans le lait exposé directement au soleil intense. Elle est associée avec les protéines à la création du goût de "soleil" dans les laits exposés aux rayons lumineux. La lumière affecte aussi les vitamines A, E, K, l'acide ascorbique et la pyridoxine. La protection du lait et des produits laitiers par le contrôle de l'éclairage et le choix des emballages a un double but: prévenir les goûts d'oxydation et les pertes de vitamines.

Les carotènes et la riboflavine influent sur la couleur du lait et des produits laitiers. Les carotènes (provitamines A) donnent aux corps gras leur couleur jaune. Toutefois, on ne peut pas juger de la richesse en vitamine A d'un lait par la couleur de sa matière grasse puisque la proportion de vitamine A (incolore) sous forme de carotène varie avec l'alimentation et la race. La matière grasse du lait est généralement plus jaune en été à cause de l'alimentation herbagère, qui a un effet différent des fourrages secs. La couleur jaune-verdâtre du lactosérum est due à la riboflavine dont la variation dans le lait est surtout fonction de la race.

I.2. Propriétés physico-chimiques du lait

Une série de propriétés physico-chimiques du lait s'utilisent à des fins techniques dans l'industrie laitière. Il s'agit notamment du goût, de la couleur, de l'acidité, du point de congélation, du point d'ébullition, de la densité, de la chaleur spécifique, de la tension superficielle, de la viscosité, de la conductivité électrique, de l'indice de réfraction, de la pression osmotique et du potentiel d'oxydo-réduction du lait.

I.2.1. Saveur et couleur

Le lait a normalement une saveur douce, agréable et légèrement sucrée. Les méthodes modernes de production et de refroidissement du lait à la ferme ont contribué à préserver ce goût. On se préoccupe maintenant du problème des psychrotrophes qui peuvent provoquer l'hydrolyse de certains constituants du lait.

La couleur du lait a une certaine importance en industrie laitière parce qu'elle est souvent considérée comme une indication de sa richesse en matière grasse. La réflexion de la lumière sur les particules opaques en suspension (micelle de caséine, globule gras, phosphate et citrate de calcium) donne au lait sa couleur blanche. Le degré de blancheur varie avec le nombre et la taille des particules en suspension. Lorsque les longueurs d'onde élevées sont moins interceptées par les particules à cause d'une plus grande rareté de grosses particules, la couleur du lait tend vers le bleu. La matière grasse du lait contient des pigments jaunes qui s'opposent à la teinte bleue dans le lait. La teneur du lait en ces pigments carotènes et xantophylles varie avec l'alimentation et la race. Les fourrages verts et les carottes sont des sources importantes de carotènes et influencent la couleur du lait chez les vaches qui en consomment.
Ajoutons que les laitières de races Jersey, Guernsey et Canadienne produisent une matière grasse plus jaune que les vaches Holstein et Ayrshire.

I.2.2. Acidité

Le dosage de l'acidité est sans doute la mesure analytique la plus courante en technologie laitière. L'acidité étant relativement constante dans le lait, son augmentation est un indice de lait suspect. Comme il est souvent nécessaire d'ajuster cette acidité dans un sens ou dans l'autre pour diverses fabrications laitières, il convient d'en connaître les constituants.
Le pH (acidité active) d'un lait normal varie de 6,2 à 6,8, mais la majorité des laits ont un pH entre 6,4 et 6,6. Le colostrum est plus acide que le lait normal tandis que le lait de fin de lactation et celui de vaches malades ont généralement un pH plus élevé, se rapprochant du pH du sang.
Tous les constituants capables de se combiner à des ions basiques contribuent à l'acidité du lait. C'est l'équilibre entre les constituants basiques (sodium, potassium, magnésium, calcium et hydrogène) et les constituants acides (phosphates, citrates, chlorures, carbonates, hydroxyles et protéines) du lait qui en détermine l'acidité. Ces deux groupes de constituants peuvent exister dans toutes les combinaisons.

L'acidité titrable du lait exprimée en pourcentage d'acide lactique peut varier de 0,10 à 0,30%. La majeure partie des laits ont une acidité de 0,14 à 0,17%. Les constituants naturels du lait qui contribuent à l'acidité sont les phosphates (0,09%), les caséines (0,05 - 0,08%), les autres protéines (0,01%), les citrates (0,01%) et le dioxyde de carbone (0,01%).
Le développement des bactéries lactiques dans le lait transforme le lactose surtout en acide lactique. C'est cette nouvelle acidité que l'on désigne par acidité développée et qui conduit à la déstabilisation des protéines. Selon l'utilisation du lait, on peut développer son acidité à volonté.

I.2.3. Point de congélation et densité

Le point de congélation est une des constantes les plus stables du lait. Cette constance résulte du fait que la pression osmotique du lait est maintenue en équilibre avec celle du sang. L'abaissement du point de congélation est en relation directe avec la concentration en solutés d'une solution. C'est donc une mesure du nombre de molécules ou d'ions en solution dans la phase aqueuse du lait.
Le point de congélation du lait peut varie de -0,52 à -0,56°C (moyenne de -0,54°C), toute variation supérieure à -0,52°C étant un indice de mouillage. Il permet la détection du mouillage du lait à partir de 3%. L'abaissement du point de congélation peut aussi être causé par la subdivision du lactose en plusieurs molécules plus petites. Il peut aussi servir à évaluer le degré d'hydratation des protéines.
A la pression atmosphérique normale, **le point d'ébullition** de l'eau est 100°C et celui du lait est 100,5°C. Comme pour le point de congélation, il est fonction du nombre de particules en solution et, par conséquent, il augmente avec la concentration du lait et diminue avec la pression. Ce phénomène est appliqué dans les procédés de concentration du lait.

La densité du lait à 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. On peut donc calculer la densité du lait en connaissant sa composition.

I.2.4. Chaleur spécifique et tension superficielle

La chaleur spécifique est le nombre de calories requises pour élever la température d'un gramme de cette substance d'un degré Celsius. Le lait a une chaleur spécifique qui varie avec sa teneur en matière grasse. Elle est en moyenne de 0,93 pour le lait entier, de 0,95 pour le lait écrémé et de 0,68 pour une crème à 40% de matière grasse. Ces données trouvent leur application dans le calcul des bilans d'énergie des procédés industriels.

La tension superficielle de l'eau à 20°C est de 73 dynes/cm et diminue avec une augmentation de la température. Pour le lait écrémé à 0°C, la tension superficielle est de 55 - 60 dynes/cm, et pour le lait entier, elle est d'environ 53 dynes/cm. Il s'ensuit que la matière grasse exerce un effet dépressif sur la tension superficielle et il est vérifiable que celle-ci diminue en proportion de la richesse de la crème. Etant donnée que les substances en solution augmentent la tension superficielle, on peut raisonnablement conclure que l'abaissement de cette dernière est causé par les particules en suspension.
On observe que la tension superficielle est augmentée par le chauffage, l'agitation et l'homogénéisation tandis que la libération des acides gras par hydrolyse des glycérides l'abaisse considérablement.

I.2.5. Viscosité et indice de réfraction

La viscosité d'un liquide est sa résistance à l'écoulement due à la friction entre les particules qui le composent. Dans le lait, elle est donc fonction du nombre et de la taille de ses particules et aussi de la température. Ce sont surtout les protéines et les matières grasses qui comptent ; l'effet du lactose et des matières salines est moins important. En considérant l'eau dont la viscosité à 20°C est de 1 centipoise, la viscosité du lait entier à la même température est de 2,1 et celle du lait écrémé de 1,8. Le degré d'hydratation des protéines semble jouer un rôle important dans la viscosité. Il a été démontré que la viscosité du lait écrémé diminue inversement avec les traitements thermiques jusqu'à 62°C, après quoi les traitements thermiques ont l'effet d'augmenter cette viscosité. Ce phénomène a été expliqué par l'hydratation des protéines qui suit une courbe semblable.
La taille et le nombre des globules gras ont aussi un rapport avec la viscosité. L'augmentation de la viscosité du lait par l'homogénéisation trouve son explication dans le phénomène d'adsorption à la surface des globules.

L'aptitude du lait à conduire l'électricité est essentiellement fonction du nombre d'ions ou de particules chargées qu'il contient. Ce sont surtout les ions les plus mobiles et les plus libres (Na^+, K^+, Cl^-) qui contribuent à la majeure partie de la conductivité. Comme pour les constantes de dissociation et la mobilité des ions, la conductivité augmente avec la température.
Dans le lait normal, la conductivité électrique est de 0,005 ohm^{-1} à 25°C. Le mouillage du lait a l'effet de diminuer la conductivité. Il est évident que celle-ci varie avec le degré de concentration du lait qui affecte nécessairement le degré d'ionisation. La conductivité électrique a été utilisée avec un certain succès pour dépister les cas d'infection du pis de la vache, ainsi que la forte teneur des laits mammiteux en ions sodium et chlore. Toutefois, cette constante est trop variable pour être utilisée seule au dépistage du mouillage de lait.

L'indice de réfraction mesure le rapport entre la vitesse de la lumière dans l'air et celle dans un corps transparent plus dense. Le changement de vitesse se manifeste par le changement de trajectoire d'un rayon lumineux dirigé obliquement vers la substance à l'étude.
L'indice de réfraction est une propriété caractéristique et précise des corps transparents. Celui du lait à 20°C est en moyenne 1,34209 par rapport à l'indice de l'eau qui est 1,33299. Cette propriété est très utilisée en technologie laitière pour déterminer le degré de concentration du lait dans les procédés d'évaporation, d'ultrafiltration ou d'osmose inverse. Elle sert à déterminer la concentration en sucre du lait condensé sucré et peut aussi aider à établir l'authenticité de la matière grasse du lait.

I.2.6. Pression osmotique et potentiel d'oxydo-réduction

La pression osmotique est une constante du lait qui est fonction du nombre de particules en solution ou en suspension. Les membranes semi-perméables comme celles utilisées en osmose inverse laissent passer l'eau mais retiennent les solutés (ions, molécules). La pression osmotique est la pression exercée par ces solutés lorsqu'une solution est séparée de son solvant par une membrane semi-perméable.

Comme pour le point de congélation, la pression osmotique diminue avec la dilution et augmente avec la concentration.
C'est le principe de la pression osmotique appliquée à l'inhibition bactérienne des solutions concentrées, comme dans le cas du lait condensé sucré.

Les substances dans le lait possèdent une plus ou moins grande capacité de libérer des électrons dans le cas d'un agent réducteur, ou d'absorber des électrons dans le cas d'un agent oxydant. La tendance d'un système à se comporter dans un sens ou dans l'autre prend la forme d'un potentiel mesurable au potentiomètre. C'est **le** potentiel d'oxydo-réduction (E_h). Le potentiel du lait normal est en moyenne + 0,25 volt. La consommation par les microorganismes de l'oxygène dissous ou la libération de groupements sulfhydryles par la chaleur diminue le potentiel d'oxydo-réduction. En revanche, la présence d'ions cuivriques ou ferriques a un effet contraire. Cette notion trouve des applications dans les problèmes de stabilisation du lait contre les réactions d'oxydation et dans les interprétations des méthodes de réductase pour évaluer la qualité bactériologique du lait.

CHAPITRE II. TRAITEMENTS ET PROCEDES EN INDUSTRIE LAITIERE

Ce chapitre groupe les procédés d'usage courant en industrie laitière. Il porte sur **les traitements thermiques** appliqués en vue de la conservation ou de la transformation du lait ; sur **l'homogénéisation** qui en modifie l'émulsion ; et sur les méthodes destinées à en séparer physiquement certains éléments.
La destruction des bactéries par la chaleur est une opération fondamentale en industrie laitière, car elle permet d'accroître de façon significative la conservation des produits laitiers.

II.1. Pasteurisation

Le lait constitue un excellent milieu de culture pour des microorganismes ; c'est donc un aliment éminemment altérable. Sa conservation peut être assurée par des techniques suivantes :
- traitements thermiques (pasteurisation et stérilisation),
- application du froid,
- dessication,
- augmentation de la pression osmotique (évaporation partielle et sucrage),
- usage de préservants chimiques,
- radiations ionisantes,
- ultrasons.

La pasteurisation et la stérilisation sont les principaux procédés thermiques appliqués surtout aux laits de consommation directe. D'énormes quantités de lait en poudre sont utilisées par des industries alimentaires (boulangerie, chocolaterie, pâtisserie, aliments pour bébés, aliments pour animaux, etc.).
Si le lait destiné à la consommation directe doit satisfaire aux prescriptions légales qui fixent le nombre maximum de germes, les laits livrés à la fromagerie ou utilisés pour la fabrication des laits fermentés (yaourts par exemple) doivent présenter une charge microbienne aussi faible que possible. En effet, une microflore sauvage pas trop abondante perturbe le déroulement des fermentations principales induites par l'ensemencement. Afin de satisfaire à ces exigences tous les laits subissent la pasteurisation. Tous les microorganismes sont sensibles à la chaleur. La thermorésistance varie avec l'espèce microbienne et les bactéries sporulées s'avèrent particulièrement résistantes.

La pasteurisation est un traitement thermique modéré, lequel tout en sauvegardant la qualité du lait, vise la destruction des bactéries sous leur forme végétative. Les spores qui sont thermorésistantes ne sont pas atteintes et c'est le cas notamment du *Bacillus subtilis* et autres. La pasteurisation détruit de 98 à 99,99% de germes présents, y compris les bactéries pathogènes dont les plus redoutées sont Bacillus de Koch (tuberculose), *Bacillus abortus* (brucellose), les Salmonelles, etc.
Contrairement à la stérilisation qui vise l'élimination totale des microorganismes, ce qui exige des conditions de traitement thermique (température x durée) bien plus sévères, la pasteurisation n'influence pratiquement pas la qualité du lait. Les laits pasteurisés dans les conditions normales (standard) gardent leur qualité gustative et l'aspect, leur valeur nutritive, la digestibilité et les propriétés technologiques qu'ils avaient au départ. En d'autres mots, la pasteurisation renonce à la destruction des

spores afin de préserver les qualités organoleptiques essentielles du lait cru, d'éviter le goût de "cuit" ainsi que la perte de l'aptitude à l'écrémage.
Les protéines de sérum du lait pasteurisé ne sont pas dénaturées.
La destruction pratiquement complète des sporulées, sans devoir recourir aux températures très élevées de stérilisation, peut être obtenue par la "**tyndallisation**". Ce procédé consiste à soumettre le lait à une double pasteurisation : après une première pasteurisation, le lait est laissé au repos pendant un certain temps à la température de 30 - 35°C propice à la germination des spores ; une deuxième pasteurisation pratiquée aussitôt viendrait à bout des sporulées passées sous leur forme végétative. La tyndallisation est rarement employée.

Les laits pasteurisés se conservent mieux que les laits crus ; on peut les garder pendant 2 à 3 jours suivant la température ambiante. La conservation des laits stérilisés dure plusieurs semaines surtout à la température basse (4 - 5°C). On peut constater que le même effet de pasteurisation peut être obtenu à des températures différentes : plus élevée est la température de traitement et plus courte doit être la durée de séjour (chambrage) à cette température. Ainsi, l'effet obtenu à 71°C et 0,25 minute (soit 15 secondes) est le même qu'à 62°C et 20 minutes.

II.1.1. Types de pasteurisation

La pasteurisation du lait recourt habituellement à un des trois procédés que voici :
- **pasteurisation basse** : le lait doit être maintenu à la température de 62 - 65°C pendant 30 minutes ;
- **pasteurisation haute** : le lait est chambré pendant 40 secondes au minimum à la température de 71 - 74°C ;
- **pasteurisation instantanée** (flash) qui requiert une température de 85°C pendant 10 secondes au minimum.

Quel que soit le procédé mis en œuvre, la préoccupation principale, après celle de prolonger la conservation et de l'assainir, est de ne pas modifier les caractéristiques gustatives ou technologiques du lait traité ; plus basse est la température de traitement et mieux celles-ci sont préservées.

Les règles de conduite de la pasteurisation sont les suivantes :
- le lait à traiter doit être obtenu dans les conditions de propreté suffisante.
- l'effet de la pasteurisation le meilleur sera obtenu à condition que le passage de la température de conservation à celle de la pasteurisation et le retour à la température de conservation ultérieure s'effectue très rapidement. Un passage lent favorise le développement de la microflore et peut donner lieu au réveil des spores. A cet effet, il est indispensable que les surfaces d'échange thermique soient maintenues en parfait état de propreté et les dépôts doivent être éliminés régulièrement.
- le lait doit être uniformément chauffé dans toute sa masse à la température requise et pendant le temps nécessaire (chambrage) et ceci en fonction de l'appareillage et du procédé choisis.
- l'addition accidentelle de lait cru au lait pasteurisé doit être évitée.
- le refroidissement superficiel, les condensations, les éclaboussements, la formation de la mousse ou des poches d'air doivent être rendus impossibles.
- le contrôle attentif et méticuleux permettant de s'assurer à chaque moment que le

fonctionnement des appareils est satisfaisant et la pasteurisation effective.

Le lait peut être porté à la température de pasteurisation par :
- **le chauffage indirect** : l'échange de calories entre les fluides s'effectue à travers une paroi métallique,
- **le chauffage direct** : par insufflation de la vapeur vive dans la masse de lait. La montée de la température est extrêmement rapide (chaleur sensible + chaleur latente de condensation), le lait est refroidi et l'excès d'humidité éliminé par la détente adiabatique.

La pasteurisation basse a été abandonnée au profit des pasteurisations haute et instantanée. Ce mode de traitement doit obéir en toutes circonstances aux règles suivantes :
- un rapide préchauffage du lait à 63°C à l'abri de l'air et sans agitation,
- un chambrage à 63°C pendant 30 minutes, allant du remplissage complet à l'ouverture des vannes de vidange,
- un refroidissement rapide du lait, immédiatement après la vidange.

La pasteurisation basse est la meilleure en ce qui concerne la préservation de la qualité originelle du lait. La phosphatase est détruite complètement, les microorganismes pathogènes sont tués, les protéines de sérum de lait ne sont pas dénaturées. Cette méthode est longue et coûteuse.

La pasteurisation haute met en œuvre des températures de 71 - 74°C. A des températures inférieures à 71°C et avec des durées inférieures à 40 secondes, la destruction des microorganismes indésirables n'est plus assurée. Par contre, le dépassement de la température limite de 74°C fait apparaître le goût de "cuit" spécifique pour la pasteurisation instantanée. Cette pasteurisation s'opère toujours en régime continu et elle fait appel à des appareils à plaques ou appareils tubulaires.

II.1.2. Méthodes de pasteurisation

Parmi les nombreuses autres méthodes de pasteurisation haute, on peut citer :
- **la pasteurisation sous vide** qui combine la désodorisation et l'évaporisation à la destruction des microorganismes,
- **la pasteurisation électrique** qui met au profit l'effet Joule et le lait passe dans une chambre munie d'électrodes,
- **la pasteurisation aux rayons infrarouges**,
- **la pasteurisation au moyen de hautes fréquences** par pertes diélectriques.

La pasteurisation instantanée fait appel à des températures qui varient entre 75 et 85°C et la durée minimum de traitement est de 8 secondes à 85°C.

Les principes de travail dans cette pasteurisation sont les suivants :
- travail en circuit fermé, à l'abri de l'air et sous pression pour éviter des oxydations et des pertes de gaz dissous,
- chauffage très rapide (la durée de séjour à la température choisie varie entre 1 et 20 secondes),
- surveillance très étroite des conditions température x temps car le moindre excès

détériore les qualités du lait et l'écart par défaut n'assure pas la destruction des microorganismes.

Les mêmes appareils que pour la pasteurisation haute peuvent être utilisés.

II.2. Stérilisation

La stérilisation a pour objectif d'assurer la conservation du lait quelles que soient les conditions de la température ou de la durée de la conservation. Il est donc indispensable de détruire tous les microorganismes vivants, non seulement sous leur forme végétative mais aussi à l'état de vie latente (spores). Toutefois, la conservation d'un lait correctement stérilisé est limitée par des modifications dégradantes de nature physique, physico-chimiques ou chimiques comme par exemple l'écrémage spontané, la formation de grumeaux, l'auto-oxydation de matières grasses, etc. On distingue deux types de stérilisation : la stérilisation en récipients et la stérilisation en flux (ou en vrac).

II.2.1. Conditions de stérilisation

L'exposition du lait à des températures élevées, pratiquées lors de la stérilisation, provoque la coagulation de protéines qui s'agglomèrent en grumeaux. Ce phénomène, qui s'accentue avec la durée d'entreposage, communique au lait un aspect crayeux, sableux. Une homogénéisation, ultérieure à la stérilisation, permet d'éviter l'apparition de ces grumeaux, ou du moins de la retarder. La stérilisation provoque également des modifications des qualités organoleptiques du lait ; ce sont :

- le brunissement,
- l'apparition du goût de cuit,
- le goût de suif se développe, par suite de l'oxydation des matières grasses,
- l'apparition d'odeur désagréable due à la présence d'hydrogène sulfuré lors du chauffage au-delà de 80°C.

Ces inconvénients peuvent être évités :

- par agitation constante lors de la stérilisation,
- en bouchant sous vide profond,
- en chassant le H_2S par chauffage du lait à la température de 80°C ou encore par une courte ébullition sous vide.

La réussite de la stérilisation dépend en premier lieu d'un choix correct de la température et de la durée du traitement. Ainsi, la stérilisation en bouteilles dont la température est limitée par la résistance du matériau (verre, plastique) à 107-115°C exige des durées relativement plus longues que la stérilisation en vrac qui s'effectue à des températures entre 135 et 150°C. On peut constater que toutes ces températures déterminent la dénaturation des protéines du sérum et que des traitements à des températures élevées et de courtes durées ne provoquent pas de brunissement du lait ou la dénaturation des protéines du lait écrémé (caséine).

II.2.2. Types de stérilisation

La stérilisation en récipients fermés (en bouteilles ou en boîtes en fer blanc étamé) peut s'effectuer en régime discontinu ou continu.
Pour éviter le goût de "brûle" caractéristique pour les procédés discontinus et qui se développe surtout dans les couches périphériques exposées le plus longtemps et aux températures les plus élevées, les récipients doivent être soumis continuellement à des mouvements d'agitation.
Cette stérilisation en récipients fermés s'avère, sur le plan pratique, relativement coûteuse en main d'œuvre et ne permet pas non plus l'homogénéisation de finition après la stérilisation. Pour ces raisons, la plupart des entreprises laitières industrielles l'ont abandonné pour adopter **la stérilisation en flux ou en vrac**.

Cette dernière possède également l'avantage de mieux préserver les qualités organoleptiques du lait, mais l'obligation de soutirer le lait dans des récipients absolument stériles et à l'abri de toute contamination (locaux, personnel) représente la difficulté majeure. En pasteurisation en flux, le lait est porté à la température de stérilisation requise par **le chauffage direct** ou **indirect**.

II.3. Homogénéisation

L'homogénéisation du lait consiste à lui faire des traitements par application des fortes pressions (jusqu'à 350 atm.) afin de réduire les dimensions des globules gras qu'il contient. La graisse butyrique, à l'état naturel, se trouve en émulsion sous forme de nombreux globules de diamètre allant de 1 à 18 microns. L'homogénéisation par un simple effet mécanique (écrasement, laminage) réduit le diamètre du plus grand nombre des globules gras à un diamètre moyen de 0,75 microns par exemple.
Dans un lait cru et non homogénéisé, les globules montent vers la surface à raison de 4/5 en 24 heures. La montée se produit sous l'effet de la différence des densités entre la matière grasse et la phase aqueuse qui l'entoure. Suite à l'homogénéisation, la force ascensionnelle des globules devient inférieure à la résistance opposée par le milieu et déterminée par la viscosité. Le lait homogénéisé ne s'écrème pas spontanément. Dans un lait non homogénéisé et conditionné en bouteille, la ligne de crème se forme après un repos d'une certaine durée et ce lait se couvre d'une "croûte" ou "peau" ou "frangipane" à la cuisson.

Un autre effet de l'homogénéisation est de produire, par exemple, à partir d'un globule de 7,5 microns de diamètre, 1000 globules de 0,75 microns ; ce qui entraîne une augmentation sensible de la surface spécifique de globules par rapport au lait non homogénéisé. La digestibilité d'un lait homogénéisé est meilleure que celle du lait cru.

Les avantages du lait homogénéisé sont :
- saveur améliorée,
- absence de ligne de crème,
- facilité d'emploi au niveau ménager,
- meilleure présentation, etc.

Si l'homogénéisation est pratiquement obligatoire de nos jours pour les laits stérilisés, elle est moins recommandée pour les laits pasteurisés car elle peut

entraîner l'apparition d'une saveur de rance au bout de quelques heures. Celle-ci est due à l'activité de la lipase qui est activée non seulement par la température mais aussi par l'état de division des globules.
Dans un lait non homogénéisé, les leucocytes et les cellules épithéliales remontent par entraînement avec la crème. Par contre, dans un lait homogénéisé ces éléments figurés se déposent au fond du récipient. Cet inconvénient peut être surmonté par une clarification soignée du lait avant tout traitement.

II.3.1. Types d'homogénéisation

On distingue trois sortes d'homogénéisation :
1. **Homogénéisation complète** : la totalité du lait subit le traitement.
2. **Homogénéisation de la crème** : la crème seule subit l'homogénéisation. Elle est introduite par la suite dans le lait écrémé afin de reconstituer le lait entier.
3. **Homogénéisation partielle** : la crème légèrement préchauffée (38°C) est homogénéisée dans des conditions très modérées (sous faible pression) et réintroduite dans le lait écrémé comme vu ci-dessus.

L'effet des procédés 1 et 2 est pratiquement le même. La différence réside essentiellement dans l'économie de l'énergie que permet le procédé 2. Le procédé 3 n'élimine pas entièrement la tendance à l'écrémage mais la couche de crème qui se forme est très épaisse de manière que le consommateur a l'impression d'être en possession d'un lait particulièrement riche en crème.

II.3.2. Matériel d'homogénéisation

Dans l'homogénéisation, le lait est forcé à passer dans les fentes très étroites ou dans des sections de conduite très étroites et sinueuses ou en lignes brisées ou parfois par laminage entre un clapet et son siège. Si l'homogénéisation s'opère essentiellement par l'écrasement c'est-à-dire par la projection sur une surface perpendiculaire au filet du lait et sous forte pression, on parle de la **porphyrisation**. En ce qui concerne l'appareillage utilisé, on distingue :

- des homogénéisateurs haute pression : le lait est comprimé dans une pompe à haute pression (de 100 à 300 atm) qui le chasse entre une soupape et son siège ayant la forme d'une fente sinueuse (pompes à piston).

- des homogénéisateurs basse pression : ces appareils travaillent à basse pression (entre 5 et 30 atm). Les soupapes comportent de nombreuses sinuosités.

- des homogénéisateurs centrifuges : ces appareils exercent leur action par les forces de cisaillement qui sont engendrées dans l'espace étroit entre la paroi du rotor et les éléments immobiles à l'intérieur ou à l'extérieur du dit rotor d'une centrifuge tournant à grandes vitesses. L'avantage principal de ces appareils réside dans la possibilité de régler les dimensions des globules à une valeur prédéterminée.

- des centrifuges ultrasons : une homogénéisation partielle peut être obtenue en soumettant le lait à l'action d'un champ d'ultrasons. Cette technique combine l'homogénéisation avec une certaine stérilisation.

II.4. Séchage

De nombreuses industries alimentaires (la fabrication de crèmes glacées, la chocolaterie, la confiserie, la pâtisserie, la boulangerie, etc.) et l'industrie d'aliments pour animaux emploient d'importantes quantités de lait comme ingrédient.

Afin de faciliter la conservation, de diminuer les frais de transport et de réduire les capacités de stockage, elles s'approvisionnent en lait sous forme de conserves.

Il s'agit des produits suivants :
- lait entier évaporé (7,8% de matières grasses au minimum et 25,8% de matières sèches au minimum),
- lait écrémé évaporé (28% de matières sèches au minimum),
- lait entier condensé sucré (8% de matières grasses au minimum et 28% de matières sèches au minimum),
- lait écrémé condensé sucré (26% de matières sèches au minimum),
- poudre de lait entier (26% de matières grasses au minimum et 5% d'eau au maximum),
- poudre de lait partiellement écrémé (1,5% de matières grasses au minimum et 25% de matières sèches au maximum),
- poudre de lait écrémé (1,5% de matières grasses au maximum et 5% d'eau au maximum).

Le terme "lait condensé" consacré par l'usage désigne le lait partiellement évaporé (concentré, condensé) auquel on a additionné du saccharose pour améliorer sa conservation. Après un traitement préparatoire particulièrement soigné (filtration, épuration centrifuge) le lait est porté à 63 - 110°C (pasteurisation, stérilisation) afin de :
- détruire les diastases,
- éliminer la microflore,
- faciliter la dissolution du saccharose et
- rendre l'évaporation plus régulière et plus rapide.

Il est à noter que les températures les plus élevées sont employées pour les laits non sucrés. La quantité du sucre ajouté varie entre 17 et 18% par rapport au lait chaud non évaporé. Après évaporation qui peut être obtenue par évaporation sous vide partiel dans des évaporateurs, le lait contient en moyenne 24,5% d'eau ; 10,0% de matières grasses ; 9,5% de matières protéiques ; 13,5% de lactose ; 40,5% de saccharose et 2,2% de minéraux.
Le refroidissement doit être très rapide car le lactose doit cristalliser sous forme de très petits cristaux. Dans le cas contraire, le lactose relativement peu soluble se retrouverait en dépôt au fond du récipient. Le lait évaporé sucré est d'habitude commercialisé en boîtes métalliques fermées par soudure ou sertissage et éventuellement, pour les usages industriels, en tonneaux enduits intérieurement d'un vernis protecteur.

L'évaporation doit éliminer environ 65% d'eau du lait. La préparation du lait est identique à celle des autres conserves. Le préchauffage est indispensable et il doit s'effectuer à des températures suffisamment élevées afin d'éviter la coagulation des protéines lors de la stérilisation ultérieure en boîtes.
En effet, si le préchauffage est poussé jusqu'à 95°C, cette coagulation ne se produit que vers 122 - 125°C. La plupart du temps l'évaporation sous vide est employée. La densité du lait doit atteindre 1,1 g/ml, ce qui représente une réduction du volume de 40% environ. Le lait concentré est ensuite homogénéisé avec l'objectif de réduire la tendance à la coagulation et aussi pour désintégrer les floculats qui auraient pu se former lors de l'évaporation. Le refroidissement doit être aussi rapide que possible et on emploie à cet effet le plus souvent les échangeurs à plaques.
Après le soutirage en boîtes métalliques, on procède à la stérilisation qui détruit les diastases et les sporulées.

La poudre de lait, autrement dit le lait déshydraté (5% d'eau au maximum), est obtenue par le séchage du lait, le plus souvent partiellement évaporé au préalable. Divers procédés sont utilisés.

II.4.1. Séchage sur darres (rouleaux)

Le lait est étalé en couche mince et régulière sur la surface d'un ou parfois deux tambours à surface lisse et chauffés intérieurement à la vapeur. La vitesse de rotation ainsi que l'épaisseur de la couche du lait sont réglées de manière à ce que toute eau du lait s'évapore lors d'une révolution sur environ 240 à 300°. Les vitesses de rotation relativement élevées allant de paire avec des températures de vapeur plus élevées et une faible épaisseur du film de lait influencent favorablement la qualité de la poudre du point de vue de la coloration, de la solubilité, du degré de la dénaturation des protéines, de l'assimilabilité des acides aminés, etc.

II.4.2. Séchage par atomisation (spray drying)

Le lait est "atomisé" ou plus exactement parlant, divisé en brouillard plus ou moins fin dans une enceinte fermée, **la tour d'atomisation**, dans laquelle on introduit de l'air chaud. Cette division en particules très fines est obtenue par :
- soit un pulvérisateur travaillant avec de l'air comprimé ou sous haute pression,
- soit un disque tournant à grande vitesse (5000 à 15000 tours/min) et le lait qui s'écoule sur le disque est projeté à grande vitesse par la force centrifuge.

La qualité du lait que l'on parvient à diviser en gouttelettes d'un diamètre moyen de 0,05 mm (50 microns) est d'autant mieux sauvegardée que :
- la vitesse relative gouttelettes-air est plus grande,
- le diamètre des gouttelettes est plus petit,
- la durée de séchage est plus courte (0,02 seconde en moyenne).

Malgré l'emploi des températures de l'air entre 150 et 200°C et même allant parfois jusqu'à 300°C, la température des gouttelettes-particules ne dépasse pas 100°C à cause de l'évaporation intense (chaleur latente).

II.4.3. Séchage en écume (foam-mate drying)

Le lait évaporé est converti en mousse-écume à l'aide de l'azote gazeux, soit par insufflation (barbotage), soit par incorporation sous pression dans des mélangeurs spéciaux. L'air peut être utilisé également, mais uniquement dans le cas des dérivés qui ne présentent aucune tendance au rancissement, comme par exemple le lait écrémé ou le sérum de lait.

Le lait doit être évaporé jusqu'à la concentration de 40 à 60% de matières sèches. L'écume, qui doit présenter une densité apparente entre 0,35 et 0,50 g/ml, est étalée en couche uniforme sur des treillis fins métalliques ou sur des tôles perforées au travers desquelles ainsi qu'au travers de la couche du lait on fait passer par le dessous de l'air chaud (100°C) pendant trois minutes environ et ensuite de l'air froid.
L'air froid non seulement abaisse la température du produit mais aussi emporte l'humidité restante. Le refroidissement prend environ quatre minutes. Le lait sec est moulu plus ou moins finement selon la destination. Les laits séchés par cette méthode présentent d'excellentes qualités, surtout en ce qui concerne la solubilité et la préservation des propriétés organoleptiques.

II.4.4. Séchage en pâte – sous-vide

Le lait est évaporé jusqu'à ce qu'il forme une masse pâteuse et cohérente. La pâte est mise en platines qui sont introduites dans une armoire où règne un sous-vide. Ce procédé forcément par charges, a été abandonné définitivement.

II.5. Procédés de séparation

Trois méthodes de séparation sont utilisées à l'heure actuelle dans l'industrie laitière : la centrifugation, l'ultrafiltration et l'osmose inverse. Cependant, le but de chacune de ces méthodes est différent.
La centrifugation a pour but de séparer les liquides entre eux ou des solides dans un liquide. On trouve son application dans l'écrémage, la standardisation, la clarification et la bactofugation du lait. L'ultrafiltration vise à séparer les protéines des liquides alors que l'osmose inverse est surtout utilisée pour concentrer un liquide en lui retirant de l'eau.

II.5.1. Centrifugation

La centrifugation consiste à séparer, grâce à l'action des différentes forces, des particules en suspension dans un liquide. Ces particules peuvent être des globules gras, des cellules de microorganismes ou des impuretés. Fondamentalement, les mêmes principes s'appliquent donc à l'écrémage, à la standardisation, à la clarification et à la bactofugation : la différence se trouve seulement dans le type de particules à séparer et dans les particularités de l'appareil.
La première utilisation du principe de la centrifugation en industrie laitière fut d'écrémer le lait, soit d'en séparer la crème.

L'écrémage se réalise grâce à l'action des forces en présence, soit la force centrifuge et la force de friction s'opposant au déplacement de la particule dans le liquide.

Dans les usines importantes, la production de lait avec une teneur en graisses définie, appelée généralement standardisation, se fait en continu au moyen d'un appareil automatisé, le standardisateur. L'opération s'y fait en deux étapes. Dans une première, il y a séparation de la crème et du lait écrémé par une centrifugeuse à disques. La force centrifuge permet, en même temps, l'épuration ou la clarification du lait. On a ainsi, après l'écrémage, un circuit crème et un circuit lait écrémé qui vont être remélangés ensemble dans des proportions calculées par microprocesseur en fonction du pourcentage de graisses désiré dans le lait standardisé. Au départ, on affiche la teneur en matière grasse du lait écrémé et la teneur en matière grasse souhaitée pour le lait standardisé sur le système de contrôle qui reçoit les informations des divers périphériques. Puisque le taux en matière grasse de la crème est inversement proportionnel au débit, la teneur en graisses de celle-ci est contrôlée par le débitmètre.
En faisant le rapport entre le débit du lait standardisé et le débit de la crème qui est incorporée, le microprocesseur du système de contrôle maintient ainsi constante la teneur en matière grasse du lait standardisé.

La clarification consiste essentiellement à extraire du lait les particules étrangères, les leucocytes et autres cellules, au moyen d'une centrifugeuse. L'appareil rappelle l'écrémeuse centrifuge, mais se différencie par ses assiettes moins nombreuses et plus écartées les unes des autres, par la vitesse de rotation du bol plus faible et par une sortie unique pour le lait.

La bactofugation du lait est un procédé destiné à éliminer par la force centrifuge les bactéries qu'il contient. Pour être plus efficace, le traitement se fait sur du lait chaud, lequel offre moins de résistance qu'à froid au passage des cellules bactériennes. C'est pourquoi, en pratique, le bactofuge est intégré au système de pasteurisation HTST. Ainsi, dès que le lait atteint la température voulue dans la section de pasteurisation, il est soumis à une double bactofugation, après quoi il revient à la section de régénération et à celle du refroidissement. Il convient de préciser que la bactofugation complète la pasteurisation, mais ne la remplace pas.
Son efficacité augmente avec la température du lait et varie en fonction de la taille et de la forme des bactéries, la sédimentation par force centrifuge étant plus élevée pour les cellules bactériennes plus grosses et plus denses.
Il est reconnu, comme moyenne générale, qu'un lait sortant d'un bactofuge contient 90% de moins de germes qu'à l'entrée. Grâce à l'élimination de la plupart des microorganismes qui ont survécu à la pasteurisation, particulièrement les sporulés, et des débris cellulaires des bactéries mortes porteuses d'enzymes intracellulaires, ce traitement améliore le pouvoir de conservation du lait et des produits pasteurisés. Il est donc particulièrement utile pour les produits de longue conservation, comme le lait en poudre destiné à la reconstitution et pour les fromages faiblement acides, telles les pâtes cuites où l'action des bactéries sporulées butyriques et autres constitue un risque de détérioration.

II.5.2. Ultrafiltration

L'ultrafiltration est un procédé de séparation macromoléculaire dont l'utilisation en industrie laitière a connu un développement accéléré depuis le début des années 1970. C'est à ce moment, en effet, que paraissaient les premiers rapports sur la possibilité de revaloriser le lactosérum de fromagerie ou de caséinerie en l'enrichissant en protéines, et même de fabriquer des fromages à pâte molle à partir de lait concentré sur membrane. Depuis, l'intérêt envers ce procédé n'a cessé de croître et l'on rapportait déjà en 1980 que les industries laitières utilisaient au-delà de 20.000 m^2 de surfaces ultrafiltrantes.
La révolution qu'entraînera l'ultrafiltration dans le domaine laitier peut être comparée à celle des écrémeuses centrifuges du début du siècle. On envisage déjà des applications au niveau de la ferme où les constituants protéiques du lait pourraient être concentrés sous forme de rétentat avant l'expédition à l'usine fromagère. Cette approche comporte de nombreux avantages.

Il faut souligner que seules les espèces dont le poids moléculaire est inférieur au seuil d'exclusion de la membrane peuvent traverser cette dernière. Puisque le seuil d'exclusion minimal des membranes ultrafiltrantes se situe aux environs de 500 daltons, on peut déjà établir que les glucides simples, les sels d'acides organiques et inorganiques de même que l'eau peuvent traverser pratiquement tous ces membranes. Pour des seuils d'exclusion supérieurs (de 10000 à 50000 daltons par exemple), certaines espèces de poids moléculaires plus élevés peuvent se retrouver dans le filtrat (communément appelé aussi perméat): les peptides naturellement présents dans le lait et le lactosérum ou encore issus d'une action enzymatique quelconque, et les vitamines hydrosolubles sont dans cette catégorie. Ne sont alors retenues par la membrane que les espèces de poids moléculaires supérieurs au seuil d'exclusion. Avec le lait et une membrane dont le seuil est de 10.000 daltons, ces molécules sont les caséines, les protéines du sérum, de même qu'une partie des protéoses peptones et du phosphate de calcium colloïdal. La matière grasse du lait qui se retrouve sous forme de globules de larges dimensions est complètement retenue.

Le rétentat ou concentré d'ultrafiltration regroupe donc la quasi-totalité des protéines et des graisses initialement présentes dans le lait, une bonne partie des protéoses peptones et du phosphate de calcium colloïdal à un niveau de concentration à peu près équivalent au rapport entre le volume du lait ou de lactosérum au départ et le volume de rétentat à la fin.

CHAPITRE III. FABRICATIONS LAITIERES INDUSTRIELLES

III.1. Lait de consommation et produits secondaires

III.1.1. Lait de consommation

L'industrie du lait de consommation a connu un grand essor depuis le début des années 1970, grâce à divers facteurs économiques et à une productivité accrue par les progrès scientifiques et technologiques. Comme dans plusieurs autres domaines industriels, la concentration des usines a donné naissance à de grandes entreprises où l'ordinateur et l'automatisation ont déjà pris une place importante. Pour devenir lait de consommation, le lait ne subit que des traitements comme la clarification, la standardisation, la pasteurisation et l'homogénéisation. Deux aspects sont particulièrement importants à surveiller dans le lait de consommation : **le goût** et **la durée de conservation**. En effet, consommé à l'état naturel, sans avoir subi de transformation et sans additif, le produit commercial frais, normalement, décèle sensiblement le goût du lait d'origine. D'où la nécessité, à sa réception, de vérifier avec soin la saveur de ce dernier, en le sentant dans le camion-citerne avant son transvasement.
D'autre part, on peut avoir une bonne idée du pouvoir de conservation du lait pasteurisé à l'aide d'analyses microbiologiques exécutées sur le lait d'approvisionnement : la numération des bactéries totales et de certaines spécifiques, telles que les psychotropes, est utile à cette fin. Au poste de réception, le pompage doit se faire sans bris des globules gras, ni incorporation d'air dans la conduite du lait.

La clarification est l'opération par laquelle le lait est soumis à une force centrifuge dans le but d'en extraire les particules plus denses, tels les débris cellulaires, les leucocytes et les matières étrangères. Sans ce traitement, ces particules sédimenteraient dans le lait homogénéisé, au point de devenir visibles dans les contenants transparents.
Le choix de la localisation du clarificateur peut dépendre de certains facteurs, dont la capacité de l'appareil et la méthode de standardisation. La clarification se fait à l'une ou l'autre des étapes suivantes :
- à la réception, avant le stockage du lait cru ;
- entre le stockage et la standardisation ;
- entre la standardisation et l'entrée du pasteurisateur ;
- entre la section de régénération et la section de chauffage du pasteurisateur à plaques ; dans ce cas, l'appareil est généralement une combinaison séparateur-clarificateur.

En offrant à sa clientèle un choix de laits à différentes teneurs en matière grasse, l'entreprise doit s'en tenir avec précision aux normes établies pour chacune de ces teneurs.

En pratique, cela signifie des mesures précises au cours de **la standardisation**, tant par respect de la réglementation que par souci de rendement et d'économie.
La standardisation peut se faire en cuvée ou en continu. Dans le premier cas, il s'agit de mélanger dans un réservoir du lait entier, du lait écrémé ou encore de la crème dans des proportions calculées pour en arriver au pourcentage de matière grasse désiré dans le mélange.

Quant au procédé en continu, il peut être plus ou moins automatique. Ainsi, on peut, de façon contrôlée, injecter du lait écrémé au lait entier en direction vers la pasteurisation.
Ce système peut être facilement contrôlé, puisque le mélange se fait avec deux produits dont le taux de matière grasse est connu. Mais de plus en plus on a recours à un type d'appareil complètement automatisé.
Le clarificateur-séparateur-normalisateur est, en effet, programmé pour remélanger le lait écrémé et la crème, séparés dans un premier temps au cours d'un écrémage partiel ou total du lait. Pour obtenir la teneur désirée en graisses, le mélange s'effectue dans des proportions commandées d'après les résultats d'un système d'analyses en continu. Une sortie spéciale sert à évacuer de l'appareil le surplus de crème. Dans le circuit de fabrication, ce mode de standardisation se situe à la sortie de la section de régénération du lait cru du pasteurisateur. Dans les installations où, par souci d'efficacité et d'économie d'énergie, seule la crème passe par l'homogénéisateur, son taux de matière grasse doit être réduit à 10 -12%, de façon à obtenir une homogénéisation satisfaisante. Cela se fait en injectant à la crème, à l'entrée de l'homogénéisateur, une partie du lait écrémé provenant du séparateur.

La pasteurisation est un traitement thermique à double objectif : avoir un lait sain et prolonger sa conservation. Elle est soumise à des normes minimales de température et de durée. Ainsi au Québec, ces normes sont de 62,8°C pendant 30 minutes, ou 72,8°C pendant 16 secondes, pour les produits laitiers à 3,25% ou moins de matière grasse sans agent édulcorant. Cependant, dans le but d'obtenir une conservation prolongée des laits pasteurisés, on applique généralement un traitement plus sévère en température et/ou en temps de retenue, en évitant toutefois d'excéder des zones limites au-delà desquelles le lait aurait le goût de cuit ou subirait une diminution de sa saveur nutritive.
La pasteurisation en cuvée, à basse température, est encore utilisée, notamment pour préparer différents types de produits en petites quantités. Mais c'est le procédé en continu, à haute température (HTST), au moyen de systèmes en plaques, qui est le plus en usage. C'est une méthode économique, précise et fiable. Pour améliorer la saveur du lait, on peut intégrer au pasteurisateur une chambre à vide qui permettrait d'extraire certains composés volatils.

Parce qu'elle présente l'avantage de stabiliser l'émulsion de la matière grasse uniformément dispersée dans tout le liquide, **l'homogénéisation** du lait de consommation s'est généralisée. D'autre part, ce traitement donne au lait une saveur et une texture plus douces, plus onctueuses pour la même teneur en matière grasse. Une conséquence physico-chimique de l'homogénéisation est qu'elle affecte quelque peu la stabilité des protéines, en ce sens que le lait homogénéisé se coagule plus facilement, sous l'influence de la chaleur par exemple, que le même lait non homogénéisé. Le lait homogénéisé donnera un caillé fin, mou, plus poreux et perméable.

L'efficacité de l'homogénéisation dépend principalement de trois facteurs : la température, la pression et le type de valve. Il va de soi que l'homogénéisation doit se faire à des températures maintenant toutes les graisses à l'état liquide, sans quoi il se produirait du barattage : pour assurer un traitement efficace, il faut des températures supérieures à 54°C. Le choix de la pression dépend du type et du nombre de valves homogénéisatrices.

Le plus souvent l'homogénéisation se fait en deux phases successives au moyen de deux valves où sont brisés, dans la seconde, les agrégats de globules gras formés après le passage à travers la première. Dans ce cas, une pression de 14000 à 17000 kPa au premier stade et 3000 kPa au deuxième donne généralement de bons résultats.
Cependant avec certains types de valve, comme celle à multiples stades, l'homogénéisateur peut donner un bon rendement tout en fonctionnant à des pressions considérablement moindres.
Une autre mesure fondamentale est de pasteuriser le lait en vue de détruire la lipase, soit avant l'homogénéisation, soit immédiatement après, ce qui prévient la lipolyse. Dans le même ordre d'idée, il importe d'éviter de mélanger du lait cru, même en quantité minime, au lait homogénéisé pasteurisé, car la lipase du lait cru causerait de la rancidité dans le lait homogénéisé.

Après la pasteurisation, **le refroidissement** du lait à une température voisine du point de congélation favorise une plus longue conservation. Au stade post-pasteurisation et lors du conditionnement, il importe également d'éviter toute contamination, spécialement par les bactéries psychrotrophes, qui sont les principales responsables de la détérioration subséquente des produits pasteurisés. Greene et Jezeski (1954) ont, en effet, démontré que du lait pasteurisé ensemencé de *Pseudomonas fluorescens* se détériorait après quatre jours à 10°C, 16 jours à 5°C et 36 jours à 0°C.

Destiné à véhiculer les produits laitiers fluides dans les réseaux de production et de distribution, le contenant doit avoir certaines qualités : être attrayant par sa forme et sa présentation ; offrir une protection efficace au produit contre les chocs physiques, la lumière et la chaleur ; être facile à ouvrir ; préserver le contenu des odeurs ou saveurs étrangères ; bien se manipuler ; être économique et adapté aux exigences modernes de production.
Le nettoyage et l'assainissement des appareils de **conditionnement** sont des opérations d'importance primordiale pour la qualité du produit fini.

La chambre froide est considérée comme l'endroit de transition où le produit fini séjourne le moins possible avant sa distribution, pour des raisons de fraîcheur et d'économie. Ce local doit être conçu de façon à préserver la qualité des produits et ne doit pas constituer un palliatif à un manque de refroidissement à d'autres étapes de la production. Ses divisions ou sa forme physique importent peu, mais elle doit être pourvue d'un éclairage adéquat qui, sans affecter la réfrigération et la qualité du produit, facilite le travail du personnel et permet de juger rapidement de la propreté des lieux.
La température **d'entreposage** des produits laitiers doit être maintenue le plus près possible de 1°C. Bien que la chambre froide soit conçue de façon à maintenir le produit entreposé à la température désirée, il importe d'assurer une bonne surveillance des ouvertures, de la circulation de l'air, de l'efficacité du système refroidisseur utilisé, de la température d'entrée des produits fabriqués ou achetés l'extérieur : ce sont là autant de facteurs capables de modifier sa performance et son efficacité, tout particulièrement en période estivale. L'installation de thermomètres enregistreurs à différents endroits stratégiques constitue une mesure opportune pour vérifier si la température est bien favorable à la conservation des produits.

La qualité et la conservation du lait pasteurisé varient selon la qualité du lait d'origine, sa flore microbienne, l'hygiène préventive à la ferme et à l'usine, les techniques de fabrication et la température de conservation.
Les modifications subies par le lait affectent, en définitive, sa saveur, élément primordial dans le lait de consommation.

Dans ces cas, il importe d'établir le défaut pour mieux en déterminer la cause, ce qui n'est pas toujours facile car les anormalités de saveur sont généralement légères et souvent non caractéristiques. De même, elles peuvent être stables ou progressives, selon l'agent responsable.
On peut, toutefois, les grouper d'après certains critères :
- Goût de chauffé, de cuit, de caramel ;
- Goût dû aux rayons lumineux ;
- Saveur d'oxydation ;
- Rancidité ;
- Saveurs dues aux fermentations ;
- Saveurs d'origines diverses.

Le principe du lait traité à ultra haute température ou **lait UHT** est connu depuis près d'un siècle : déjà en 1893, on avait construit des appareils pouvant traiter le lait à 125°C pendant 6 minutes. En 1909, il existait un système tubulaire à débit continu capable de chauffer le lait à 130 - 140°C, mais ce n'est qu'en 1951 qu'il fut possible de l'emballer aseptiquement par le procédé Martin Canning. Dix ans plus tard (1961), la Compagnie Tetra Pak, en Suède, offrait la première emballeuse aseptique commerciale satisfaisante. Un renouveau d'intérêt permit alors au lait UHT de prendre un essor considérable sur le continent européen avant de faire sa première apparition commerciale ailleurs dans le monde.
Le traitement UHT consiste à chauffer le lait en débit continu à une température d'au moins 132°C pendant quelques secondes, à le refroidir à la température ambiante et à l'emballer aseptiquement dans le but :
- d'assurer sa stabilité et sa valeur assez longtemps pour satisfaire les exigences Commerciales ;
- de le libérer de tous microorganismes pathogènes et toxines pouvant affecter la santé du consommateur ;
- d'en détruire tout microorganisme capable de proliférer lors de l'entreposage.

La préparation du lait UHT se fait alors en deux étapes : la stérilisation du lait même et son emballage aseptique.

III.1.2. Produits secondaires

Parmi les produits secondaires du lait, on peut signaler **les crèmes** et **les laits aromatisés**. La production des crèmes pose plus de problèmes que celle du lait. Pour diverses raisons, notamment le coût de la matière grasse et les habitudes alimentaires, la demande de crème est moins régulière et moins prévisible, si bien que sa qualité à la consommation risque d'en souffrir. C'est en recourant à des traitements thermiques plus sévères, et même aux procédés de stérilisation et de conditionnement aseptique, que l'on assurera aux crèmes la fraîcheur et une longue durée de conservation.

III.1.2.1. Crèmes

Les crèmes se groupent en trois catégories selon leur teneur en matière grasse : **crèmes légères, crème à fouetter** et **crème plastique**.
A l'écrémage on cherche à obtenir une teneur en matière grasse légèrement plus élevée ou égale à celle désirée dans le produit fini, car l'émulsion dans une crème riche en graisses (45% et plus) est moins stable. La crème contient plus de bactéries que le lait dont elle provient, ces dernières étant entraînées en grand nombre avec les globules gras lors de l'écrémage. D'autre part, l'efficacité de la pasteurisation diminue avec la richesse en matière grasse.
C'est pourquoi il convient de soumettre les crèmes à des traitements thermiques plus sévères que le lait : au minimum 65,6 - 68,3°C pendant 30 minutes ou 76,7 - 79,4°C pendant 16 secondes. Il importe d'homogénéiser **les crèmes légères**, soit la crème à café (10 - 12% de matière grasse) et la crème de table (15 - 20% de matière grasse), pour les raisons suivantes :
- prévenir la séparation du sérum et de la matière grasse,
- augmenter la viscosité,
- donner à la crème un meilleur pouvoir colorant au café,
- réduire la formation de bouchons de crème dans le contenant et de gouttes d'huile à la surface du café.

La crème à fouetter doit être très visqueuse et contenir entre 32 et 40% de matière grasse. La qualité du fouettage se juge par la rapidité de la crème à se fouetter et par la consistance et la permanence du foisonnement. On n'homogénéise pas la crème à fouetter. Elle doit être conservée au froid au moins 24 heures avant d'être fouettée. Cette maturation à basse température permettra aux globules gras, qui ont été liquéfiés lors de la pasteurisation, de se solidifier et de s'agglomérer. Il en résultera ainsi un fouettage plus rapide, de même qu'une consistance et une stabilité meilleures. On obtiendra également de meilleurs résultats en refroidissant le contenant et les batteurs au préalable.
La crème plastique contient 60 à 80% de matière grasse. On l'obtient par un écrémage simple effectué à l'aide d'un séparateur approprié, ou par deux écrémages successifs sur une centrifugeuse conventionnelle. Le plus souvent, la crème plastique est surgelée et conservée dans cet état jusqu'à son utilisation.

III.1.2.2. Laits aromatisés

Du **lait aromatisé** ou lait à différents arômes, de fruits (fraise, orange, banane, …), a déjà été produit et mis sur le marché. L'acidité de ces breuvages, nécessaire pour faire ressortir l'arôme, étant souvent cause d'instabilité des protéines du lait au cours du chauffage, leur apparence en est compromise. C'est le lait chocolaté qui a toujours été et demeure la plus populaire des boissons lactées aromatisées. C'est un produit qui reste variable dans l'intensité de l'arôme, la teneur en sucre et la viscosité, selon le goût de la clientèle. La méthode de base de la préparation se résume comme suit : généralement on part d'un lait partiellement écrémé auquel on ajoute du cacao, du sucre et un stabilisant ; le mélange est ensuite pasteurisé, homogénéisé et mis en contenants. La composition moyenne du lait chocolaté peut être de l'ordre de 1 à 1,5% de cacao, 5 à 8% de sucre, 2 à 2,5% de graisses, 0,025 à 0,25% de stabilisant.

Le cacao de base s'obtient sous différentes formes : en poudre, en sirop plus ou moins concentré, seul ou prémélangé au sucre et au stabilisant. C'est pourquoi les quantités recommandées pour être mélangées au lait sont variables.
Les stabilisants ont pour but d'augmenter la viscosité et d'empêcher ainsi la sédimentation du cacao. Les plus utilisés sont l'alginate de sodium et la carragénine.
En raison de la nature de ses ingrédients, le lait chocolaté doit subir une pasteurisation sévère : au minimum 74,4°C pendant 30 minutes ou 81,1°C pendant 25 secondes, ou même atteindre les conditions de stérilisation. On homogénéise généralement le lait chocolaté, mais avec certains produits de cacao et une pasteurisation sévère ce traitement n'est pas nécessaire.

III.2. Beurre

Au plan physico-chimique, le beurre est constitué principalement de la matière grasse du lait, à l'état d'émulsion du type eau dans l'huile. Son procédé de fabrication a justement pour effet d'inverser l'émulsion originale du lait ou de la crème où les globules gras sont dispersés dans le sérum. Une composition type d'un beurre salé est de 80% de matière grasse, 16,5% d'eau, 2,3% de sel et 1,2% de caillé qui comprend des protéines et des minéraux. Le beurre contient les vitamines liposolubles A, D, E et K ainsi que des caroténoïdes.

Le beurre se fabrique à partir de la crème. Jusqu'à l'avènement de l'écrémeuse centrifuge en 1879, on obtenait la crème par écrémage spontané ou naturel, c'est-à-dire par gravité, dans des récipients profonds. A la fin du siècle dernier et au cours des décennies suivantes, l'écrémeuse de ferme se répandit graduellement, si bien que vers 1930 la quasi-totalité du lait destiné à la fabrication du beurre était écrémé à la ferme : la crème étant livrée à la beurrerie et le lait écrémé utilisé sur place dans l'alimentation animale. La réception du lait entier à la beurrerie s'est généralisée au cours de la deuxième guerre mondiale.

III.2.1. Fabrication du beurre en discontinu

La figure ci-dessous rapporte les étapes de la fabrication du beurre. Bien que la plupart de ces opérations s'appliquent de façon fondamentale à certains procédés de fabrication en continu, elles sont toutefois étudiées ici plus spécialement en rapport avec le système discontinu ou conventionnel.

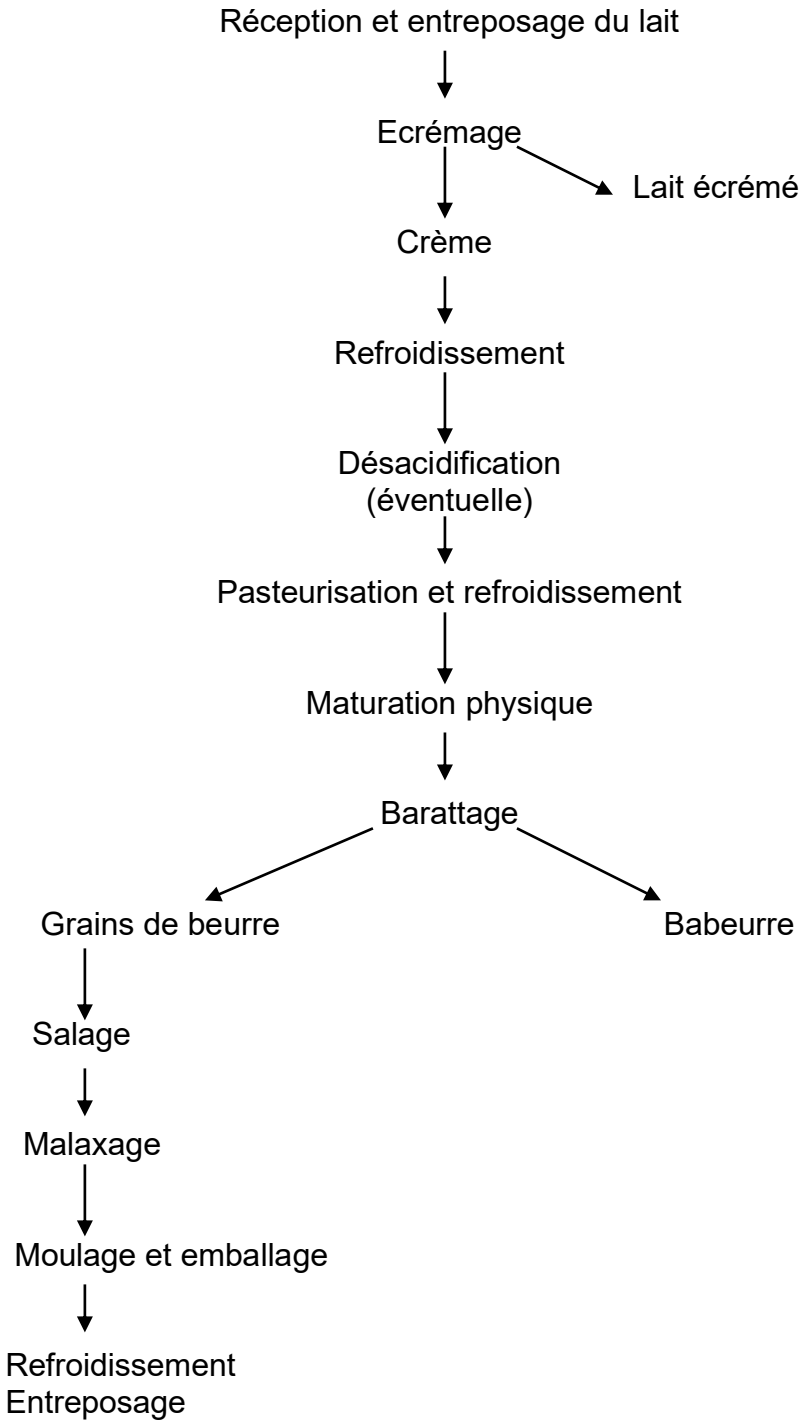


Figure 1 : Etapes de la fabrication du beurre de crème douce

Source : Veisseyre (1979).

Le mode généralisé de refroidissement rapide du lait et de sa conservation à la ferme permet de prévenir le développement de l'acidité. Aussi, dans les conditions normales, la crème obtenue par écrémage est de bonne qualité : son acidité variant généralement de 0,08 à 0,12%. Toutefois, si elle est soumise accidentellement à des

conditions adverses, elle peut acquérir une acidité plus élevée et nuire par là à la qualité du beurre.

III.2.1.1. Prétraitement du lait

Ainsi, une crème d'une acidité supérieure à 0,20% risque d'engendrer des saveurs anormales de poisson, d'oxydation et d'entrepôt dans le beurre de conservation prolongée, et de produire des pertes excessives de matière grasse dans le babeurre. Il importe donc, dans ces cas, de normaliser l'acidité de la crème.
Ce traitement, appelé aussi neutralisation en beurrerie, consiste à en réduire l'acidité par l'addition d'un alcalin qui produit des réactions du genre suivant :

$CH_3CHOHCOOH + NaHCO_3 \longrightarrow CH_3CHOHCOONa + H_2O + CO_2$

acide lactique	bicarbonate de Na	lactate de Na

$CH_3CHOHCOOH + Ca(OH)_2 \longrightarrow (CH_3CHOHCOO)_2Ca + 2\ H_2O$

acide lactique	hydroxyde de Ca	lactate de Ca

On ne doit pas pousser trop loin **la désacidification de la crème** : il en résulterait alors un milieu favorable au développement des bactéries protéolytiques. L'acidité optimale du sérum du beurre varie du pH 6,9 à 7,1. Il faut aussi éviter une neutralisation brutale, c'est-à-dire effectuée à température trop élevée ou encore à doses trop fortes de neutralisants sodiques, qui aurait pour effet de causer la saponification des graisses conférant un goût de savon au beurre, en plus de produire une racémisation des acides aminés.
Après la pasteurisation, il est recommandé de vérifier à nouveau l'acidité de la crème et d'y apporter des correctifs s'il y a lieu.

Sans un refroidissement contrôlé de la crème, la consistance et la fermeté du beurre dépendraient exclusivement de la composition et des propriétés de la matière grasse et varieraient conséquemment avec les saisons. Pour éviter cette situation, il s'agit d'adapter la fabrication aux changements qui surviennent dans la composition et les propriétés de la matière grasse. C'est dans ce but que l'on effectue, à froid, **la maturation physique** de la crème pasteurisée. Le principe est de la refroidir et de la maintenir à basse température suffisamment longtemps pour obtenir une proportion optimale de graisses solidifiées par rapport aux graisses liquides. Ce traitement devra donc être plus long pendant l'été que l'hiver, en raison de la proportion plus élevée d'acides gras insaturés à bas points de fusion.

III.2.1.2. Barattage

La fabrication du beurre nécessite deux opérations distinctes : l'inversion de l'émulsion de la crème puis l'expulsion du babeurre. Ce procédé se nomme **le barattage**. Plusieurs théories sont proposées pour expliquer le phénomène de butyrification lors du barattage. Les principales sont celles de l'agglomération, de la concentration et de la combinaison. La fabrication du beurre d'après le procédé

conventionnel, ou méthode discontinue, est une application du principe de l'agglomération et repose sur la théorie des mousses. La crème est agitée sous des conditions qui favorisent la formation du beurre par la coalescence des globules gras.
L'agitation de la crème entraîne la production d'écume abondante, les globules gras s'agglomèrent en granules de plus en plus gros, puis l'écume s'affaisse soudainement et les grains de beurre se séparent du sérum. L'incorporation d'air pendant l'agitation augmente la viscosité de la crème, oriente et rapproche étroitement les globules gras dans les parois des bulles dont l'interface est constituée d'agents tensio-actifs, d'eau et d'air.
Le refroidissement, l'écume et les chocs répétés favorisent l'effet abrasif des globules, disloquent leur membrane et entraînent la rupture de la couche interne, ce qui facilite la libération de la matière grasse liquide et la coalescence de plusieurs granules, avec dispersion de très fines gouttelettes de babeurre.
Le phénomène s'intensifie au cours du procédé, et au moment où la proportion de la matière grasse liquide est suffisamment disponible par rapport à la matière grasse solide, il y a formation de granules plus gros ou grains de beurre. L'émulsion est inversée subitement et le babeurre est expulsé. La masse de beurre est ensuite malaxée dans le but de souder les grains de beurre de façon homogène.
Peu importe la méthode de fabrication du beurre, la charge électrique sur les globules gras modifie leur degré d'attraction. L'acidité qui neutralise les charges électriques négatives des protéines de la membrane facilite le rapprochement des globules et active le procédé d'agglomération.

Les barattes conventionnelles sont en acier inoxydables et d'une surface intérieure rugueuse. Elles peuvent être de formes et de capacités variées, tournant autour d'un axe horizontal. Elles sont pourvues de moyens facilitant l'agitation de la crème, le malaxage du beurre et le contrôle de leur température. Ce sont en réalité des barattes-malaxeurs.
Dans la fabrication conventionnelle du beurre de crème douce, la température de barattage doit varier selon la fermeté de la matière grasse (fonction de son point de fusion), la dimension des globules gras, l'acidité, la richesse et la viscosité de la crème. En principe, pour obtenir un beurre de consistance et de texture satisfaisantes, prévenir des pertes excessives des graisses dans le babeurre et permettre une bonne conservation du produit fini, il faut choisir une température qui permette une durée de barattage de 40 à 60 minutes. Au printemps et en été, cette température est en moyenne de 7 à 10°C ; en automne et en hiver, les graisses étant généralement plus fermes, elle peut se situer entre 10 et 13°C. Etant donné que les propriétés de la crème d'une même beurrerie ne varient que graduellement au cours de l'année, les fluctuations de la température de barattage doivent être graduelles.

La législation autorise la coloration artificielle du beurre pour en uniformiser la couleur. L'intensité de la couleur naturelle du beurre varie, en effet, selon les races, la période de lactation, mais surtout l'alimentation de la vache. Il s'agit donc d'ajouter à la crème dans la baratte la quantité de colorant artificiel suffisante pour lui donner la couleur jaune cible. Les colorants à beurre sont de type alimentaire et doivent donc être conformes aux normes de la loi des aliments et drogues des pays. Les substances les plus employées sont les extraits de graine d'annatto (*Bixia orellana*) et la β-carotène ou provitamine A d'origine synthétique ou naturelle. Ce dernier produit, constituant le pigment naturel du beurre, est commercialisé en solution dans une huile neutre, ou encore à l'état de poudre soluble dans l'eau.

III.2.1.3. Salage et malaxage

Le sel contribue à rehausser la saveur et à prolonger la conservation du beurre. Ses propriétés antiseptiques contribuent à y restreindre la croissance microbienne et à prévenir certains défauts. Toutefois, il a également des effets qui en limitent l'usage. Les gouttelettes d'eau salée, étant en effet plus difficiles à se diviser, ont tendance à rester plus grosses, ce qui a pour effet d'affecter la texture cireuse du beurre en la rendant plus grossière. Un excès de sel a donc tendance à occasionner généralement plus d'eau libre dans le produit fini et aussi à favoriser certains défauts de saveur dans le beurre de conservation prolongée. Il existe un marché pour le beurre de crème douce sans sel ; toutefois, c'est le beurre salé qui prédomine largement au monde. **Le salage** se fait habituellement à raison de 1 à 3% selon les exigences du consommateur, le pourcentage autorisé étant toutefois limité à 2% pour le beurre d'entreposage.

Le malaxage est le traitement destiné à mélanger intimement les granules de beurre entre elles, pour obtenir un produit de consistance et de texture désirables. Il permet aussi de disperser finement l'eau et le sel dans la phase continue, soit la matière grasse. Il a aussi pour effet d'expulser les graisses liquides et les cristaux des globules gras. On doit procéder avec soin au malaxage ; car, mal effectuée, cette opération affectera la consistance du beurre et nuira à sa conservation. Ainsi dans le beurre sous-malaxé, l'eau insuffisamment incorporée et diffusée reste plutôt sous forme de gouttelettes relativement grosses et même d'eau libre : c'est une situation qui favorise l'action des microorganismes et conséquemment la détérioration du beurre exposé à des températures propices. D'autre part, le beurre surmalaxé est collant et, en refroidissant, acquiert une texture cassante ou une texture graisseuse selon que la matière grasse est ferme ou molle.
De façon générale, on recommande de poursuivre le malaxage jusqu'à l'absence de gouttelettes d'eau visibles à l'intérieur du beurre et l'obtention d'une consistance ferme, d'une texture cireuse et d'une apparence lustrée. Le choix du moment précis où le malaxage est à son optimum est grandement facilité par le jugement, le savoir-faire et l'expérience du beurrier.

III.2.2. Fabrication du beurre en continu

La fabrication du beurre en continu peut s'effectuer d'après trois principes différents : par **flottation** ou **agglomération**, par **concentration** et par **émulsion** ou **combinaison**.

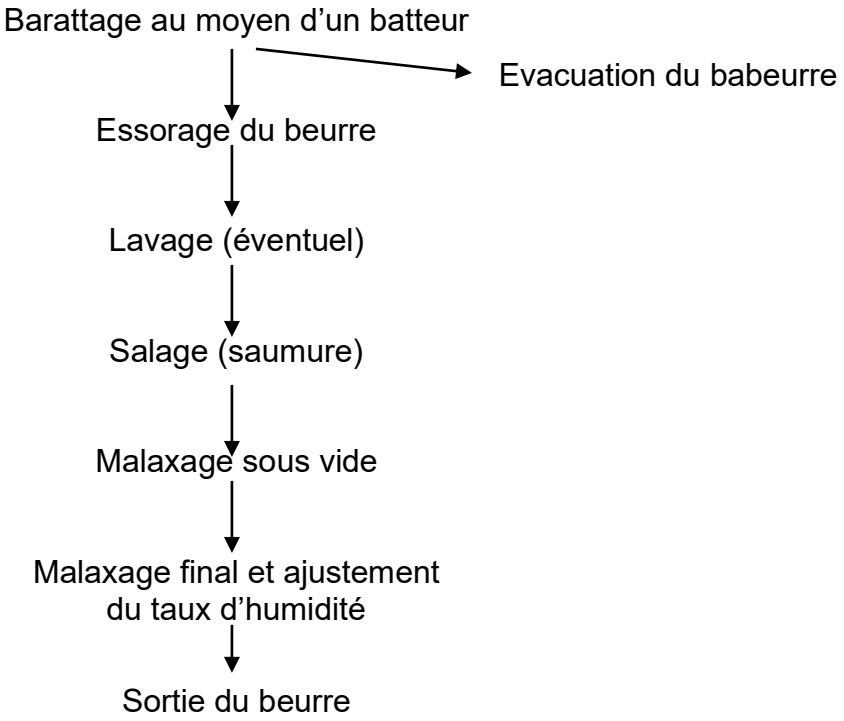


Figure 2 : Etapes essentielles de la fabrication du beurre en continu (d'après le procédé Simon)

Source : Veisseyre (1979).

III.2.2.1. Principe "par flottation ou agglomération"

Le principe "par flottation ou agglomération" est celui de la fabrication du beurre en discontinu, mais appliqué de façon accélérée. Sous l'effet de l'agitation de la crème et de la formation de mousse fine par des palettes tournant à grande vitesse (2000 tours / minutes), il se forme très rapidement, en deçà de trois secondes, une agglomération des globules gras en grains de beurre qui sont transportés vers une section de malaxage, le babeurre étant expulsé de façon continue. La crème traitée est de concentration normale de 40 à 50% de matière grasse. Ce principe s'applique au procédé Fritz d'origine allemande et au procédé Senn d'origine suisse.

III.2.2.2. Principe "par concentration"

Le principe "par concentration" fait appel à une concentration préalable de la crème, obtenue par écrémage centrifuge, à une teneur en matière grasse voisine de celle du beurre. La crème concentrée étant instable en raison du rapprochement des globules gras et de leur déformation, l'inversion de phase s'effectue par le refroidissement à l'entrée du butyrateur et par le frottement mécanique des vis à propulsion ou des agitateurs. La fabrication se complète par le barattage et le malaxage en continu.
Les procédés Alfa d'origine suédoise et le procédé New-Way d'origine australienne fonctionnent selon ce principe.

III.2.2.3. Méthode "par émulsion ou combinaison"

La méthode "par émulsion ou combinaison" comprend trois opérations principales: déstabilisation d'une crème très riche en graisses (85 à 99%), standardisation de la composition par l'incorporation d'eau ou d'une solution aqueuse de sel dans les graisses à l'état d'huile et refroidissement en vue de solidifier le beurre. C'est le principe à la base des procédés Cherry-Burrell, Creamery Package et Kraft.

III.2.3. Emballage et entreposage du beurre

III.2.3.1. Emballage

L'emballage du beurre se fait dans le but de le préserver de détériorations chimiques et microbiologiques et de le protéger des chocs mécaniques. Les modes de conditionnement et les unités de poids varient selon les exigences du commerce.
Les grands formats, en contenants cubiques, servent pour le commerce de gros et pour le stockage de longue durée. A cette fin, on utilise des boîtes de carton rigide enduites de cire à l'extérieur et munies à l'intérieur de doublure de papier sulfurisé ou autre matériau approuvé. Ces emballages sont soumis à des normes spécifiques. Les petits formats destinés au marché de détail se présentent généralement sous forme de pain. Les emballages sont sujets à des normes : ils doivent être de nature à protéger le beurre contre la lumière et l'oxydation, l'absorption d'odeurs étrangères, la perte par évaporation et le développement de couleurs anormales. A cet égard, la feuille d'aluminium laquée ou doublée de papier sulfurisé ou encore les contenants opaques donnent les meilleurs résultats.

Pour la consommation individuelle dans les restaurants, les salles à manger et les institutions, on sert le beurre en micropains. Cette pratique se justifie pour des raisons d'hygiène et de commodité. L'emballage est généralement de matière plastique rigide avec couvercle d'aluminium scellé ou d'aluminium laquée ou doublée. Le conditionnement du beurre se fait en continu au moyen de mouleuses-empaqueteuses automatiques. Ces machines, pour la plupart munies de vis sans fin ou encore de pistons, forcent le beurre à travers une ouverture, le coupent et l'enveloppent. Bien contrôlé, le fonctionnement s'effectue sans poche d'air dans le produit et avec précision du poids. Pour de meilleurs résultats, l'emballage doit se faire sans trop tarder après la fabrication ; autrement, il y aurait risque d'exsudation d'eau et de perte de poids au cours du moulage.

Evidemment cette opération doit se poursuivre de façon hygiénique, tant au plan de la propreté de l'appareil que des conditions du milieu.

III.2.3.2. Entreposage

Le beurre n'est pas considéré comme un produit fini s'il n'a pas subi de refroidissement : c'est un traitement qui affecte ses propriétés rhéologiques. Sous l'effet d'une baisse de température faible ou retardée, sa solidification ne sera pas suffisante, de sorte qu'il maintiendra sa consistance molle pendant plusieurs jours.

Tandis que soumis à une réfrigération immédiate et énergique, sa cristallisation sera rapide, ce qui permettra d'obtenir ultérieurement une texture et une consistance désirables, même avec une élévation subséquente de température au moment de son utilisation. Il importe donc de le refroidir rapidement, aussitôt son emballage terminé. Le beurre de consommation immédiate est généralement maintenu à 4°C pendant 48 heures pour obtenir une consistance désirée. Celui destiné à une longue conservation doit être congelé et conservé entre -18 et -25°C. Le transport et la distribution nécessitent évidemment une chaîne de froid.

III.3. Fromages

Le fromage résulte de la concentration sélective du lait. L'eau en est éliminée en proportions variables selon les variétés, entraînant avec elle une partie des éléments solubles et des protéines non coagulées.
L'eau retenue dans le fromage joue un rôle important. Essentielle aux microorganismes, elle influence selon son taux la vitesse de fermentation et de maturation, la durée de conservation, la texture, tout en contribuant au rendement. La matière grasse se répercute sur la texture, la saveur, le rendement et quelque peu la couleur. Le lactose agit comme substrat pour la formation d'acide avec ses conséquences sur la coagulation du lait, l'égouttage et la texture du caillé de même que sur la croissance des microorganismes. Quant à la caséine qui, en coagulant, constitue la base de la pâte fromagère, sa dégradation contribue à engendrer une gamme de saveurs. Pour leur part, les protéines du sérum conservées dans le caillé contribuent à sa valeur nutritive tout en jouant un rôle dans l'affinage. De leur côté les matières minérales interviennent dans la coagulation du lait et ont une influence sur l'égouttage et la texture du fromage.

Pour la fabrication du fromage, le lait utilisé doit être de haute qualité, aussi le lait destiné à cette fabrication subit-il un contrôle particulièrement sévère, notamment du point de vue fraîcheur. Suivant le type de fromage que l'on veut fabriquer (la richesse en graisse) le lait utilisé doit être plus ou moins riche en graisse butyrique. La correction de la teneur en graisse butyrique dans ces laits s'opère à la sortie de l'écrémeuse. Le lait obtenu, standardisé, est alors pasteurisé et ensuite dirigé vers les bacs d'emprésurage ou bacs à fromages.
Il existe d'innombrables sortes et variétés de fromages qui font parfois l'orgueil d'une région. Ils diffèrent entre eux suivant la manière de coagulation du lait ainsi que par l'écrémage plus ou moins poussé du lait, l'égouttage, les manipulations subies par le caillé, le développement des moisissures (espèces, souches) et le mode d'affinage.

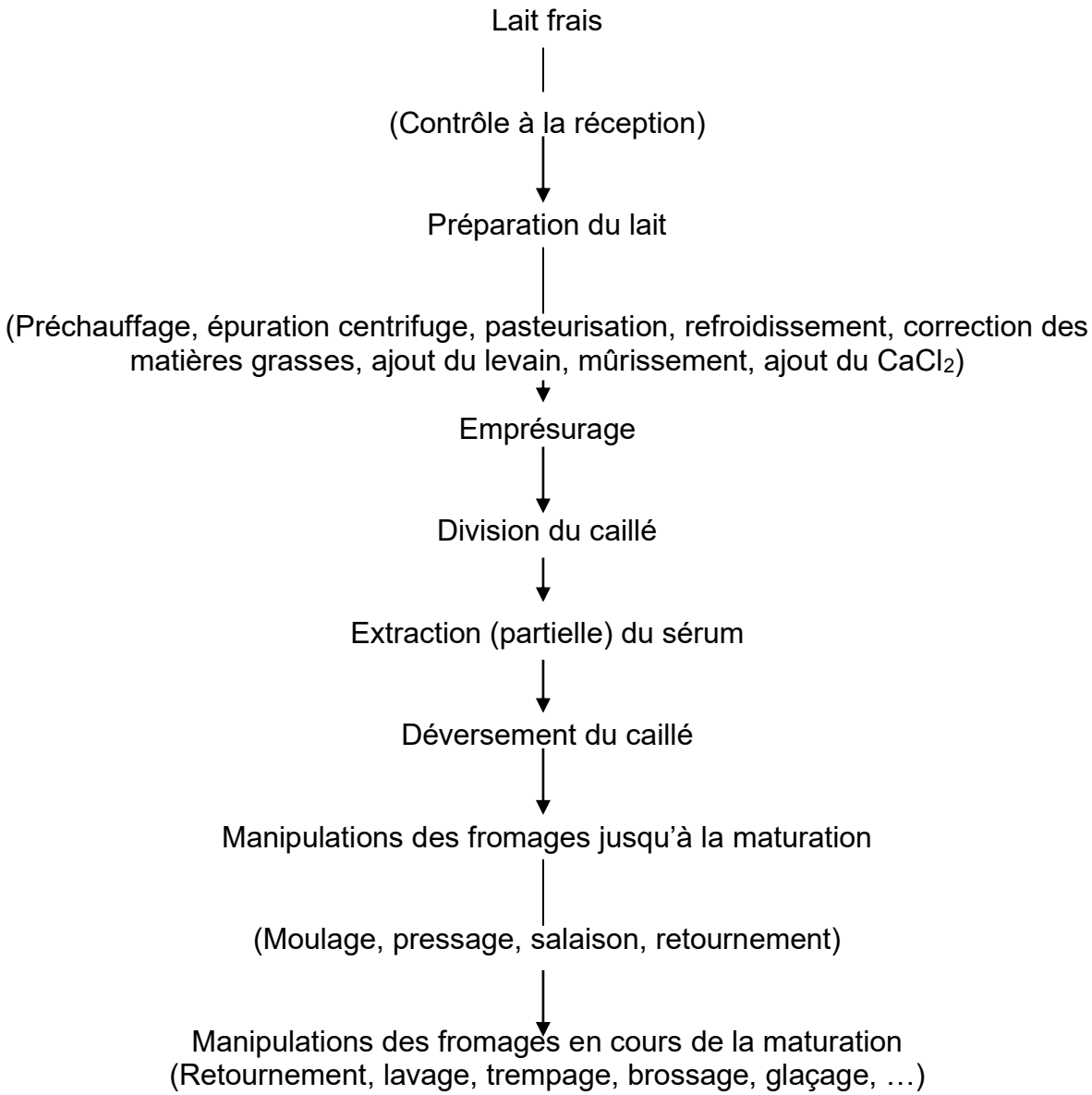


Figure 3 : Fabrication des fromages (en grandes lignes)

Source : Eck (1987).

La fabrication des fromages comporte les phases suivantes :
- la coagulation ou le caillage, le découpage du caillé, la cuisson
- l'égouttage, la prise en masse, le broyage, le salage, le pressage
- le séchage
- l'affinage.

D'un autre côté, la fabrication d'un fromage est un art et chaque type ou sorte de fromage se caractérise par un mode opératoire qui lui est propre, mais comporte néanmoins toutes les phases énumérées ci-dessus.

Les différentes variantes concernent :
- la matière première (qualité du lait, richesse en matières grasses),
- l'agent de caillage,
- la température ou la durée de chaque opération,
- les manipulations,
- la microflore spécifique, etc.

Le nombre important des paramètres intervenant dans la fabrication du fromage rend possible une grande diversité de produits. Leur classification et leur regroupement en catégories déterminées ne sont donc pas faciles. Comme critères de base, on pourrait se référer à leurs principales techniques de fabrication (type de coagulation, égouttage spontané ou forcé), à leur fermentation prédominante, à l'affinage en surface ou dans la masse, etc. Mais pour plus de simplicité, il est convenu en pratique, de les classifier de la façon suivante :
- fromages frais
- fromages affinés
  pâtes molles
  pâtes demi-fermes
  pâtes fermes
  pâtes persillées
- fromages fondus.

Le terme "**frais**" désigne ici un fromage qui ne doit pas subir d'affinage après sa fabrication, mais qui doit être consommé à l'état frais.
Quand on pense aux fromages non affinés, on se réfère généralement aux variétés à texture molle, telles que le cottage et les fromages à la crème. On peut également considérer dans cette catégorie des représentants à pâte mi-ferme, comme certains types de fromages italiens.
C'est la catégorie **des fromages affinés ou maturés** qui offre le plus de choix. Ceux-ci se distinguent des fromages frais par le fait qu'on leur laisse subir, de façon progressive et pendant une durée plus ou moins longue, des transformations biochimiques complexes. Au cours de cette période de maturation, les éléments du jeune caillé se transforment en divers produits plus solubles. C'est justement la nature de ces nouveaux produits, leur variété et leur proportion relative, qui donnent à chaque variété de fromage sa saveur typique et en même temps lui confèrent son aspect, sa texture et sa consistance. On peut donc dire que chaque variété de fromage est le résultat d'un mécanisme de maturation dirigée. C'est en modifiant et en combinant ces mécanismes que l'on peut obtenir des centaines de variétés distinctes de fromage.
Le Camembert, le Brie, … font partie de cette catégorie **des fromages à pâte molle**. Plusieurs variétés peuvent se classer comme **demi-fermes** et on retrouve dans cette catégorie le Gouda et l'Edam qui constituent les principaux fromages hollandais ainsi que l'Oka et le Saint-Paulin. Le principal représentant **du fromage à pâte persillée** est le Bleu qui se présente sous forme de meule cylindrique épaisse. Sa pâte est friable, égrenante, sans cohésion.

L'affinage **des fromages à pâte ferme** se fait lentement et dans la masse. Leur conservation est plus facile et de plus longue durée, ce qui pose moins de problèmes dans la commercialisation. Parmi eux, certains subissent un chauffage modéré ou demi-cuisson, comme le Cheddar, et d'autres une cuisson plus sévère comme ceux du type suisse comme le Gruyère et l'Emmental.

Transformé en **fromage fondu**, le fromage nature perd son identité, mais acquiert certains avantages, spécialement une conservation plus facile et plus longue. La fonte à la chaleur constitue, en effet, un procédé apparenté à la conserve. Comme il est possible de maîtriser les conditions de fabrication, il en résulte une régularité dans le goût, l'apparence, la qualité sanitaire de même qu'une facilité de commercialisation et d'usage. Cette catégorie de produits comprend le fromage fondu proprement dit, le fromage à tartiner et les crèmes de fromage fondu.

III.3.1. Etapes de base en fabrication fromagère

La fabrication conventionnelle du fromage nécessite, comme première étape, le caillage ou la coagulation du lait. On provoque ce phénomène en rendant instable la solution colloïdale de la caséine, entraînant par là l'agglomération des micelles libres et la formation d'un gel dans lequel se trouvent emprisonnés les autres éléments du lait.
La deuxième étape est de faire subir à ce coagulum une déshydratation plus ou moins poussée pour en obtenir, à volonté, une pâte de consistance variable : c'est l'égouttage, appelé aussi synérèse. Notons que ce n'est pas seulement l'eau qui se sépare et s'expulse du caillé, mais en même temps, une partie des éléments en solution et de ceux qui s'y trouvent encore en suspension : bref, les constituants du lactosérum. Pour sa part la matière grasse reste normalement adhérée et liée au caillé de caséine.
La plupart des fromages doivent subir une troisième étape, celle de l'affinage, au cours duquel l'action des microorganismes et des enzymes apporte des modifications voulues selon les variétés.

III.3.1.1. Coagulation du lait

Deux modalités sont en usage pour faire cailler le lait en fromagerie : l'acidification et l'addition de présure, donnant lieu à deux types de caillé, soit le caillé acide et le caillé présure. Les propriétés et le comportement de chacun d'eux diffèrent sensiblement, si bien que leurs différences sont à la base de la technologie et des caractères des divers types de fromage.

III.3.1.1.1. Coagulation par acidification

La coagulation de la caséine par acidification résulte de la perte de sa charge électrique jusqu'à son point isoélectrique (pH 4,6). L'abaissement du pH par l'acide (ion +) réduit en effet jusqu'à sa neutralisation l'ion négatif des micelles de caséine. Au pH 5,2 (à 20°C) elles deviennent suffisamment instables pour former un début d'agglomération, alors qu'au pH 4,6, leur charge électrique est devenue complètement nulle, entraînant ainsi leur coagulation complète.
En même temps, l'acidité du milieu a pour effet d'augmenter la solubilité des minéraux, de sorte que le calcium et le phosphore organiques de la micelle passent graduellement en solution dans la phase aqueuse. Il s'ensuit donc un caillé partiellement déminéralisé qui laisse facilement traverser le lactosérum. Le coagulum obtenu par acidification présente des propriétés chimiques et physiques dont il faut tenir compte dans la fabrication du fromage. Ainsi, bien que d'une certaine fermeté, il

est poreux, friable et inapte à se contracter : ce qui rend son raffermissement difficile, d'autant plus qu'il ne se prête pas à des traitements mécaniques.
La coagulation par acidification est la technique régulière dans le cas des fromages frais, tel le cottage. Le lait au repos devient un gel homogène sous l'effet de l'accroissement progressif de l'acidité par des cultures lactiques. On choisit le taux d'inoculation et la température de fermentation de façon à obtenir, à volonté, une coagulation soit hâtive, soit lente. Il importe que le lait soit apte à fermenter, exempt d'antibiotiques et de tout agent inhibiteur, et que la culture soit active.
Pour quelques variétés de fromage, on amorce une coagulation subite en additionnant un acide directement au lait que l'on réchauffe ensuite.
De cette façon, cependant, on n'obtient pas un coagulum homogène mais plutôt un précipité floconneux. Ce procédé permet de récupérer, en plus de la caséine, les protéines du sérum coagulables par la chaleur en milieu acide.

III.3.1.1.2. Coagulation présure

En fromagerie, on fait appel davantage à la coagulation présure. Il s'agit, dans ce cas, d'ajouter au lait une enzyme qui a la propriété de coaguler le complexe caséine. Exprimé de façon sommaire, c'est le phénomène où le phosphocaséinate de Ca à l'état soluble dans le lait est transformé, sous l'action d'une enzyme coagulante, en phosphoparacaséinante de Ca, insoluble.
Il importe de noter que le caillé présure n'est pas déminéralisé comme le caillé acide : c'est la différence fondamentale entre les deux. Le Ca en particulier, de même que le P, jouent un rôle important dans le mécanisme de coagulation et demeurent des éléments constitutifs du gel de caséine. Cette situation lui attribue des propriétés particulières : il est compact, souple, élastique, imperméable et contractile. Ces caractères se répercutent principalement au niveau de l'égouttage et du raffermissement du caillé et le rendent capable de supporter des interventions mécaniques au cours de la fabrication.
La présure originale, appelée rénine, est une enzyme protéolytique sécrétée par les muqueuses gastriques du quatrième estomac (caillette) du jeune veau (également du chevreau et de l'agneau) avant sevrage. Cette sécrétion se fait à l'état de précurseur inactif, la proprésure qui, en milieu neutre, n'exerce pas d'activité enzymatique, mais devient rapidement présure active en milieu acide. La présure contient, en fait, deux enzymes : la chymosine comme principal constituant, puis la pepsine. Au sevrage, la pepsine devient fortement dominante, alors que s'arrête la production de chymosine. On extrait la présure des caillettes en les faisant tremper dans la saumure. Pour l'usage commercial, on en prépare des solutions purifiées, puis on en standardise la force, ajuste le pH, la salinité, la couleur et lui ajoute des agents de conservation.
L'activité protéolytique de la présure s'exerce principalement sur la caséine et, à un degré moindre, sur les autres protéines. Elle joue donc deux rôles principaux. Le premier est de provoquer la déstabilisation des micelles de caséine en attaquant la caséine K à un endroit bien spécifique de sa molécule, soit le lien peptidique entre un acide aminé appelé phénylalanine et l'acide aminé voisin, une méthionine, que l'on nomme bien PHE-MET. On juge généralement la force d'une présure par son efficacité à couper ce lien peptidique, ce qui aura pour effet de provoquer la coagulation du lait. Il existerait plus de 164 autres liens peptidiques pouvant être coupés sur la caséine K, en plus de ceux existant sur les autres fractions de la micelle. Le deuxième rôle de la présure est de s'attaquer à ces liens selon un ordre

de spécificité caractéristique de l'enzyme utilisée. Cette action secondaire de la protéine commence lentement au cours de la fabrication, après la coagulation, et se continuera lors de la maturation du fromage.
La nature de cette évolution jointe à l'activité des protéases natives du lait, des protéines de la flore originale du lait et de celles du ferment, contribuera à donner au fromage certaines caractéristiques de sa texture et de sa saveur.
La demande de présure s'est accrue considérablement avec l'augmentation de la production mondiale de fromage depuis l'après-guerre. En même temps, le prix de la présure de veau s'est élevé sensiblement en raison, d'une part, du coût croissant de son extraction et, d'autre part, du nombre de plus en plus réduit de veaux d'allaitement.
Cette situation a eu pour conséquence de favoriser le développement et l'utilisation de substituts de la présure de veau.

Les premiers coagulants substituts étaient un mélange de rénine et de pepsine bovine, provenant de veaux abattus plus vieux ou ayant reçu une alimentation mixte. Par la suite, on a fait des préparations à la base de présure de veau et de pepsine porcine, puis d'autres de pepsine bovine seule ou en mélange avec la pepsine porcine. De son côté, la communauté juive utilise de la pancréatinine et de la pepsine de poulet. Toutes ces enzymes d'origine animale ont pour caractéristique d'être instables à pH neutre et alcalin, ainsi qu'à la lumière. Utilisés à bon escient, ces succédanés donnent généralement satisfaction.
On a également fait l'essai d'enzymes coagulantes extraites de nombreux végétaux, comme l'ananas, les figues, les artichauts, certains melons, etc. Les résultats furent plutôt décevants en raison de leur action protéolytique trop poussée.
Ce sont toutefois les présures d'origine microbienne qui remplacent de plus en plus la présure de veau. On les prépare en extrayant les enzymes coagulantes que sécrètent certains microorganismes, dont les plus satisfaisants sont des moisissures du genre Mucor particulièrement M. miehei. Certaines de ces enzymes présentent une stabilité à la chaleur plus grande que les coagulants d'origine animale.
Pour la majorité des fromages, on provoque le caillage du lait par l'action conjuguée de la présure et de l'acidification avec, généralement, prédominance de l'un ou de l'autre d'entre eux. Cette coagulation mixte fournit des caillés aux propriétés intermédiaires, moins caractéristiques que celles des caillés obtenus par un seul mode de coagulation. La participation respective de la présure et de l'acidification peut varier à volonté selon les types de fromage.

III.3.1.2. Egouttage du caillé

Les fromages sont des concentrés de lait. La concentration se réalise par l'expulsion plus ou moins poussée de l'eau et de ses éléments solubles. La pâte qui en résulte est formée essentiellement de caséine et de la matière grasse qui y adhère physiquement. Pour sa part, le lactosérum expulsé entraîne la majeure partie du lactose et des matières azotées non coagulées, ainsi qu'une proportion variable des minéraux.
Fondamentalement, c'est la quantité plus ou moins grande de sérum retenu dans le caillé qui va provoquer et déterminer plusieurs caractéristiques qui différencient les variétés de fromage : fermeté, texture, vitesse et intensité de maturation, etc. C'est pourquoi les techniques de fabrication faites en vue de l'égouttage sont d'une grande

importance, d'autant plus que c'est grâce à leur contrôle que les variétés de fromage répondront aux normes requises pour leur extrait sec total.

Le gel frais, d'origine acide ou présure, est instable. Plus ou moins rapidement, le lactosérum emprisonné a tendance à se retirer et à se séparer du caillé qui, lui, se trouve ainsi à diminuer de volume. C'est le phénomène de synérèse. Le terme général d'égouttage réfère plutôt à l'ensemble de la synérèse et des opérations d'évacuation du lactosérum, y compris l'égouttage complémentaire lors du moulage, du pressage et jusqu'au moment de l'affinage. L'égouttage se déroule différemment selon que l'on a affaire à un caillé acide ou à un caillé présure, et les pâtes qui en résultent ont des caractères différents.

III.3.1.3. Affinage du fromage

La plupart des fromages ne se consomment pas à l'état frais, mais après avoir subi une maturation ou un affinage. Cela consiste en une transformation biochimique, graduelle et plus ou moins poussée, des constituants du fromage en de nombreux produits plus solubles responsables de nouvelles saveurs et de modifications physiques de la pâte, comme la texture plus onctueuse, la présence d'ouvertures ou d'yeux ou encore la formation de croûte en surface.
Le processus d'affinage est complexe en raison de l'intervention de nombreux paramètres. Cette situation est d'abord liée à la nature déjà complexe du substrat, le caillé : composition et structure de ses constituants, comme la teneur en eau et son degré de dispersion, la structure de la caséine, etc. Elle est aussi due à la variété des agents responsables de l'affinage et à leurs modes de réaction selon les conditions du milieu. Enfin, le nombre et la diversité des produits formés ainsi que l'influence d'une transformation sur une autre subséquence contribuent à la complexité du phénomène.

La dégradation des éléments organiques du fromage se fait par l'action conjuguée et variable des enzymes et de la flore microbienne. Les enzymes naturelles du lait, dont les lipases et les protéases, participent à la maturation, mais de façon lente et peu marquée. C'est que les conditions de l'affinage ne leur sont pas propices : la température est plus basse et le pH généralement plus acide que leurs zones optimales. Détruites en partie par la pasteurisation, leur effet en est d'autant diminué. Toutefois, lors d'une maturation prolongée, on peut noter un degré d'affinage plus prononcé dans le fromage de lait cru et préchauffé que dans celui de lait pasteurisé.
Les lipases et les protéases sont les principales enzymes du lait associées à la maturation. La lipase, faiblement thermorésistante et libérant des acides gras courts, est capable d'intervenir en fin d'affinage de certains fromages de lait cru. Son action est limitée comparativement à la lipase microbienne. De leur côté, les protéases, en raison de leur faible teneur, peuvent avoir une action très restreinte dans certains fromages à pâte ferme.
Les enzymes de la présure ajoutée au lait en vue de sa coagulation exercent une action protéolytique en plus de leur action coagulante. Ces endopeptidases, en coupant les chaînes au milieu et non aux extrémités des micelles protéiques, libèrent des peptides et non des acides aminés. C'est pourquoi un excès de présure peut être cause de saveur amère. Les peptides ainsi engendrés sont ensuite dégradés en acides aminés par les enzymes microbiennes. Il convient de rappeler que les

présures d'origine microbienne ont généralement une activité protéolytique plus grande que la présure de veau.

Dans les pâtes molles, la participation de la présure est faible étant donné, d'une part, que la période d'affinage est courte et que, d'autre part, les protéases sécrétées par la flore du fromage y sont très actives. Son rôle semble plus important dans les pâtes pressées, non cuites, comme le Cheddar.

Ce sont les microorganismes qui jouent le rôle prépondérant dans la maturation du fromage. Pour plus de précision, rappelons qu'ils agissent, en fait, par l'intermédiaire des enzymes qu'ils sécrètent.
La diversité de la flore, son évolution au cours de l'affinage ainsi que les changements subis par le substrat, rendent difficile l'étude du rôle de tel ou tel microorganisme.

Ce sont les Streptocoques producteurs d'acide lactique, *Str. lactis* et *Str. cremoris* qui dominent durant la fabrication et au début de la maturation. C'est une situation normale, étant donné leur ensemencement au lait. Ce sont généralement des mésophiles, parfois des thermophiles. D'autre part, des Streptocoques hétérofermentaires et des Leuconostocs, en nombre moins considérable, participent au développement de la saveur, par leur production, entre autres, d'acides volatils et de diacétyle.
Des Lactobacilles se retrouvent dans tous les fromages, dont les mésophiles *Lactobacillus casei* et *L. plantarum*, ainsi que *L. thermophilus* employé comme ferment dans les pâtes cuites. En plus d'être acidifiants, les Lactobacilles sont protéolytiques, si bien qu'ils jouent un rôle souvent important dans l'affinage de plusieurs fromages.

La flore du fromage comprend aussi des bactéries entérocoques dont principalement *Str. durans* et *Str. faecalis*. Ce sont des bactéries relativement résistantes à la chaleur et tolérantes au sel. Leur activité protéolytique et acidifiante semble stimuler et hâter l'affinage de certains types de fromage.
Les fromages à pâte cuite, principalement du type Gruyère et Emmental, doivent leurs ouvertures ou leurs yeux au gaz produit par des bactéries propioniques, anaérobies. On active cette fermentation en ensemençant le lait d'une culture de *Propionibacterium shermanii*. D'autres espèces de bactéries participent directement ou indirectement à l'affinage des fromages, soit par leur activité hydrolytique, soit par les saveurs qu'elles engendrent, soit par leur association avec d'autres fermentations. C'est le cas des microcoques, avec leur activité protéolytique, leur tolérance au sel et leur symbiose avec d'autres microorganismes. Quant au *Brevibacterium linens*, ou bactéries du rouge, son rôle est spécialement important dans la maturation aérobie des protéines de plusieurs fromages : il a la propriété de pousser leur dégradation jusqu'à un stade avancé.
Il faut également mentionner le rôle néfaste de microorganismes indésirables qui, entre autres par leur forte activité lipolytique, sont causes de défauts de saveur et autres. Parmi eux se trouvent des représentants des genres Flavobacterium, Pseudomonas, Achromobacter et Clostridium.
Les enzymes qu'ils sécrètent sont thermorésistantes. Pour leur part, les Coliformes en nombre excessif peuvent être dommageables pour la saveur, mais n'étant pas acidorésistants, leur croissance est freinée et annulée à mesure que l'affinage progresse.

La flore des fromages comprend aussi des levures qui se développent en surface des pâtes molles. En utilisant l'acide lactique comme source de carbone, elles se trouvent à les désacidifier, rendant ainsi possible la croissance de microorganismes qui ne tolèrent pas l'acide.
Grâce à leurs estérases, plusieurs produisent des esters dont l'arôme rappelle l'odeur de pomme. Certaines variétés transforment le lactose en alcool.
Quant aux moisissures, il en existe quelques espèces utiles dans certains fromages. On a recours surtout au genre Penicillium : *P. caseicolum* responsable du mycélium blanc en surface des fromages apparentés au Camembert, et *P. roqueforti* et ses veines bleues à travers les fromages persillés.

III.4. Produits laitiers fermentés

L'utilisation des microorganismes comme agents de transformation des produits laitiers est une pratique plus que millénaire qui a contribué à élargir considérablement les qualités tant organoleptiques que nutritionnelles du lait et de ses dérivés. A part les fromages, il convient de signaler parmi cette grande famille de produits les coagulums, comme le yaourt et la crème sûre, les boissons de type lactique et / ou alcoolique et les beurres de culture. Il ne faut pas oublier non plus une gamme assez large de produits destinés à l'alimentation animale sous forme de compléments (colostrums fermentés) ou de suppléments nutritifs (lactosérums fermentés).

III.4.1. Types de fermentation

Les transformations que subissent le lait ou ses dérivés sous l'action des microorganismes sont multiples et complexes. On peut les classer en cinq grandes catégories.

1) Les fermentations de type lactique où le substrat principal, le lactose, est converti en acide lactique : en général il n'y a que 20% à peine du substrat qui subit cette conversion. On ajoute la flore lactique sous forme de cultures pures ou mixtes généralement préparées dans un milieu à base de lait écrémé.

2) Les fermentations de type alcoolique où le lactose et/ou un sucre ajouté sont transformés en éthanol sous l'action de levures. Le lactosérum de fromagerie est le substrat le plus universellement utilisé pour ce type de fermentation. *Kluyveromyces lactis*, *K. fragilis* et *Saccharomyces cerevisiae* sont les plus fréquemment retenues pour la conversion alcoolique : les 2 premières peuvent agir directement sur le lactose puisqu'elles possèdent toutes les enzymes requises pour son absorption et son hydrolyse en glucose et galactose. On utilise *S. cerevisiae* seulement lorsqu'on ajoute au moût du sucrose ou du glucose puisque cette levure ne peut hydrolyser le lactose.

3) Les fermentations mixtes où l'on rassemble au moins deux grandes familles de conversion : l'acidification et la production d'éthanol.

4) Les productions de biomasses où toute l'activité fermentaire est orientée vers la conversion du lactose et d'un substrat azoté peu coûteux comme l'urée, l'ammoniac,

les protéines végétales, en une masse cellulaire destinée à l'alimentation animale ou humaine.
Les levures Torula, Kluyveromyces, Saccharomyces, Trichosporon sont les organismes les plus utilisés pour ce type de fermentation de même que certaines bactéries, telles que les Lactobacilles et les Streptocoques.

5) Les productions de métabolites particuliers où divers microorganismes peuvent être utilisés pour générer des produits qu'il est trop difficile ou trop onéreux de synthétiser par voie chimique. La production d'acide lactique par *Lactobacillus bulgaricus* est un exemple de biotransformation en voie de surpasser les synthèses chimiques, à cause d'un contexte peu favorable à l'utilisation des dérivés pétroliers.

Avec le développement accéléré des biotechnologies, on voit apparaître une foule de nouveaux procédés orientés vers la production de métabolites qui trouveront des débouchés autant dans les domaines alimentaires, soit vitamines, acides aminés, colorants, agents de conservation, que bio-médical, comme antibiotiques, hormones, anticorps monoclonaux, interféron, ou autres comprenant huiles, gommes, solvants organiques, polymères organiques.

Tableau 7: Principales fermentations applicables aux produits laitiers

Type de fermentation	Organismes	Produits
(1) lactique	Lactobacilles Streptocoques	Lait acidophile, yaourt
(2) alcoolique	*Kluyveromyces lactis* *Kluyveromyces fragilis* *Saccharomyces cerevisiae*	Vins, bières, champagnes
(3)"mixte"	Lactobacilles Streptocoques *K. lactis, K. fragilis* *S. cerevisiae*, Acetobacter	Kéfir, koumiss, rivella, vinaigre
(4) biomasses	Torula, Kluyveromyces, Saccharomyces, Trichosporon, Lactobacilles, Streptocoques, Bifidobacterium, Rhizobium	Levures lactiques, wheast, ascogen, probios, LFP, Omniflora, FACW
(5) métabolites	Lactobacilles, Kluyveromyces, Acetobacter, Xanthomonas	Facteurs de croissance, éthanol, acide acétique, acide lactique, xanthane, vitamines

Source : Jensen (1995).

III.4.2. Propriétés particulières des produits laitiers fermentés

III.4.2.1. Influence sur la microflore intestinale

Il est remarquable que depuis plusieurs années on ait attribué aux produits laitiers fermentés, au yaourt plus spécialement, des propriétés nutritives, médicinales et thérapeutiques particulières.
Metchnikoff (1908) fut à l'origine de l'hypothèse encore soutenue aujourd'hui que les microorganismes utilisés dans la fermentation du yaourt ont une action bénéfique sur la flore intestinale. Si certaines preuves ont été avancées sur les propriétés thérapeutiques des Lactobacilles, il n'en subsiste pas moins des doutes sur leur survie et leur effet sur l'intestin. Quelques auteurs ont démontré que *L. bulgaricus* pouvait survivre à un passage à travers l'intestin d'adultes et d'enfants, mais rien n'indique qu'il soit à l'origine d'une activité importante ou significative à cet endroit. La plupart des preuves présentées pour démontrer l'action bénéfique des bactéries lactiques sur l'intestin sont indirectes et se rapportent à des essais sur animaux. Peu d'auteurs se sont intéressés à mesurer les interactions entre la flore lactique et l'épithélium intestinal. Tout au plus sait-on que ces bactéries peuvent s'associer aux divers épithéliums du système digestif et qu'elles peuvent jouer un rôle déterminant dans l'équilibre de la flore intestinale.

III.4.2.2. Influence sur le système immunitaire

Dès la fin des années 1950, quelques auteurs attribuaient des propriétés étonnantes à certaines souches lactiques. Bogdanov (1959) fut l'un des premiers à signaler la production par *L. bulgaricus* de certaines substances à activité antitumorale. Des observations analogues furent faites dans les années suivantes et beaucoup d'auteurs attribuaient des propriétés immunostimulantes à diverses souches lactiques dont celles présentes dans le yaourt. Beaucoup d'études ont démontré une telle activité immunostimulante chez des souris infectées au moyen de *Klebsiella pneumoniae*.

III.4.2.3. Valeur nutritive

Les produits laitiers fermentés, le yaourt en particulier, ont une meilleure digestibilité tant au plan des protéines que des lipides et des glucides. Les activités enzymatiques associées à la croissance des microorganismes contribuent à une pré-digestion du produit et en facilitent ainsi l'absorption par l'intestin. Plusieurs auteurs se sont intéressés à la composition vitaminique des produits laitiers fermentés. Il semble toutefois difficile d'en arriver à des conclusions précises puisque la microflore peut modifier la composition de ces produits en assimilant une partie des vitamines qu'ils contiennent et en excrétant d'autres. La souche microbienne utilisée, son stade de croissance, la nature du substrat et des prétraitements, les conditions d'incubation et de conservation après fermentation sont autant de facteurs qui peuvent influencer sensiblement la composition vitaminique des produits laitiers fermentés. Le tableau suivant illustre bien cette variabilité et porte à conclure que chaque produit et chaque vitamine représentent des cas particuliers.

Tableau 8 : Teneur en vitamines de quelques produits laitiers fermentés par rapport au lait frais entier

Vitamines	Lait entier	Cheddar	Cottage (crème)	Camembert	Yaourt
	Vitamines / 100 g				
A (UI)	150	1310	170	1010	140
B_1 (mg)	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03
B_2 (mg)	0,17	0,46	0,25	0,75	0,16
Niacine (mg)	0,1	0,1	0,1	0,8	0,1
C (mg)	1	0	0	0	1
Pantothémate (mg)	0,34	0,50	-	1,25	-
B_6 (mg)	0,04	0,08	-	0,22	-
B_{12} (µg)	0,4	1,0	-	1,3	-
Folate (µg)	0,3	16	-	-	-
Biotine (µg)	4,7	3,6	-	-	-

Source : Jensen (1995).

III.4.2.4. Propriétés organoleptiques

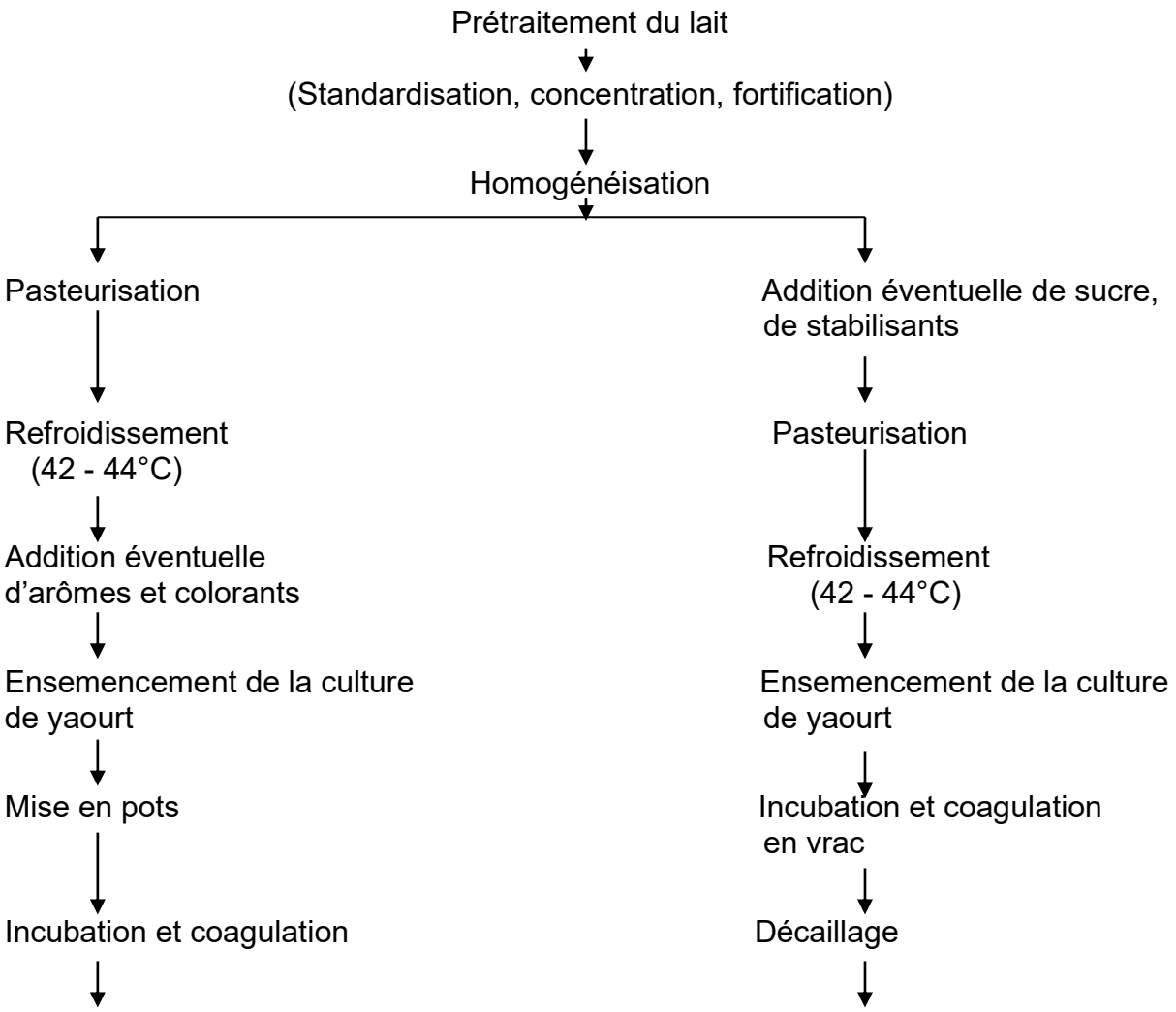
Les caractéristiques les plus apparentes et les plus importantes des produits laitiers fermentés sont sans contredit leur saveur et leur texture particulières, qui sont étroitement liées au prétraitement de la matière première et à la croissance de souches microbiennes sous des conditions étroitement surveillées et contrôlées.
La plupart des cultures utilisées comportent plusieurs souches de microorganismes qui agissent en symbiose. C'est le cas du yaourt en particulier où l'activité combinée de *Str. thermophilus* et *L. bulgaricus* permet une modification rapide du lait et donne une saveur bien typique : les principaux composés responsables de sa saveur sont l'acétaldéhyde, l'acétone et le diacétyle. La texture particulière de ce produit est la résultante de plusieurs facteurs : l'enrichissement en extrait sec du lait d'origine, l'intensité et la durée du préchauffage, l'addition d'épaississants, la vitesse et le degré d'acidification, ainsi que le taux de refroidissement sont autant de paramètres à contrôler de près. Quant à la saveur, elle est conditionnée non seulement par la qualité des matières premières et la proportion des ingrédients mais aussi par la nature de la flore ajoutée et les conditions d'incubation.

III.4.3. Quelques exemples de produits laitiers fermentés

III.4.3.1. Yaourt commercial

Bien qu'il existe plusieurs types de yaourt de fabrication industrielle (ferme, brassé, fruits mélangés, fruits non mélangés), le mélange de base de ces produits demeure essentiellement le même. Il consiste en un volume déterminé de lait frais, entier ou partiellement écrémé, de bonne qualité bactériologique, exempt d'antibiotiques ou autres agents antimicrobiens, qu'on enrichit légèrement en extrait sec par plusieurs techniques. La teneur en extrait sec total est ajustée entre 12 et 15% selon la texture visée. Au cours du préchauffage du produit, on ajoute généralement un agent stabilisant comme la gélatine et/ou la pectine. Le produit subit ensuite successivement une homogénéisation et une pasteurisation.

Après avoir refroidi le mélange à 44 - 46°C, l'inoculum de cultures de *Lactobacillus bulgaricus* et de *Streptococcus thermophilus* en proportions voisines de 1:1 est ajouté à un taux d'inoculation variant de 1,5 à 2,5% (V/V). D'autres souches peuvent être ajoutées dans des proportions variables, généralement inférieures aux deux précédentes, pour donner au yaourt certaines caractéristiques texturales et gustatives particulières. Il est préférable, en laboratoire, de cultiver et de conserver séparément les souches utilisées, en vue d'un meilleur équilibre dans le produit.
Après une période d'incubation plus ou moins poussée, soit de 2 à 6 heures selon le degré d'acidification visé et l'importance de l'inoculum utilisé, le produit, s'il n'est pas déjà dans le contenant, est homogénéisé au moyen d'une lisseuse avant de le mélanger à différents ingrédients (fruits, céréales, agents stabilisants) et de procéder à l'emballage. Il est ensuite placé au réfrigérateur à une température de 4°C pour ralentir l'action bactérienne et lui assurer une durée de conservation possible de l'ordre de 30 à 40 jours.
Plusieurs variantes peuvent aussi être introduites pour donner naissance à divers types de produits. En plus de ses formes classiques de préparation et de présentation, comme ferme ou brassé, nature ou aux fruits, le yaourt peut se retrouver congelé, à l'état liquide comme boisson, pasteurisé, stérilisé et à basse teneur en calories.
Même si la formulation de tels produits subit quelques modifications soit par l'addition d'extrait sec de lactosérum ou par écrémage, ces formes de yaourt demeurent toujours des produits laitiers fermentés essentiellement par deux bactéries thermophiles : *L. bulgaricus* et *Str. thermophilus*.



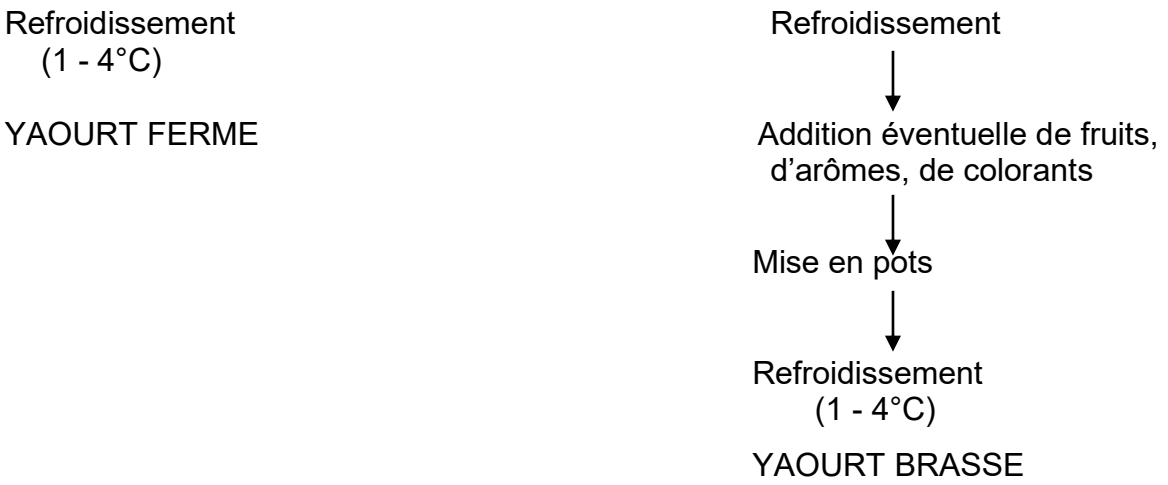


Figure 4 : Etapes de la fabrication conventionnelle du yaourt ferme et du yaourt brassé

Source : François (1990).

III.4.3.2. Yaourt domestique

Tous les manufacturiers de yaourtières et de cultures lactiques à yaourt proposent des recettes qui, à quelques variantes près, se résument à ce qui suit :

- Utiliser au départ du lait frais entier ou partiellement écrémé, après l'avoir enrichi de 3 à 5% de poudre de lait écrémé ; le lait UHT peut aussi être utilisé.
- Chauffer le mélange à 85°C pendant 30 minutes environ ou alternativement jusqu'au point d'ébullition. Ajouter de la gélatine ou de la pectine si on le désire.
- Refroidir jusqu'à 44 - 46°C.
- Inoculer directement avec un ferment en poudre (sachets), selon les directives du fabricant ou encore à partir d'un yaourt commercial de fabrication récente à un taux de 2 à 3% (V/V).
- Incuber sans agiter pendant 4 à 6 heures dans un contenant qui permettra de maintenir la température au-dessus de 42°C.
- La texture et le goût désirés étant obtenus, refroidir à 4°C dans le réfrigérateur.
- Fruits et autres ingrédients peuvent être ajoutés au moment de consommer le produit.

III.4.3.3. Crème sûre

La crème sûre se trouve dans le commerce sous forme d'un gel onctueux au goût finement acidulé. Elle se fabrique à partir d'une crème douce dosant de 15 à 20% de matière grasse. Après avoir été préchauffé à 72°C, le produit est homogénéisé puis pasteurisé et refroidi à 22°C. Il est ensuite inoculé à un taux de 1,0 à 1,5% (V/V) au moyen d'une culture lactique contenant généralement les espèces suivantes : *Str. lactis, Str. cremoris, Str. diacetilactis* et *Leuconostoc citrovorum*. On ajoute aussi un peu de présure (0,5 ml / 50 l) pour favoriser la prise en gel.
L'incubation sans agitation dure entre 14 et 16 heures pour obtenir une certaine acidité. Le tout est refroidi avant d'être placé dans des emballages individuels. L'incubation peut aussi se faire, comme le yaourt ferme, après la mise en contenants.

III.4.3.4. Kéfir

Le kéfir est un breuvage laitier fermenté qui se prête bien à une fabrication de type artisanal. Le lait entier ou partiellement écrémé est utilisé comme substrat. Après avoir subi une pasteurisation à 85°C pendant 30 minutes, le lait refroidi à 22°C est ensemencé avec des grains de kéfir et laissé fermenter pendant 12 à 24 heures. Le lait caillé est ensuite filtré à travers un tamis ou un coton à maille fine et mis à refroidir. Le filtrat possède une apparence laiteuse ; il pétille et mousse à la façon de la bière. Les grains recueillis lors de la filtration peuvent être conservés à 4°C pour une période de 10 jours environ. Lorsque séchés à la température ambiante pendant 36 à 48 heures ils peuvent se conserver pendant plus d'un an. Il existe des cultures commerciales de kéfir lyophilisées dont la période de conservation est quasi illimitée.

III.4.3.5. Yaourt parfumé et yaourt aux fruits

Depuis quelques années s'est développée la fabrication des yaourts parfumés à l'aide d'essences de divers fruits. La législation française précise que ces extraits doivent être naturels, les arômes synthétiques étant formellement interdits.
Les essences naturelles de fruits sont des distillats ; elles sont donc incolores. On les ajoute au lait au moment de l'ensemencement. Elles sont accompagnées d'un colorant naturel rappelant la couleur des fruits ayant fourni les essences.

On prépare également des yaourts aux fruits constitués par du yaourt, coagulé en cuve et battu à froid, auquel on a ajouté de la pulpe ou des morceaux de fruits divers (ananas, cassis, cerise, fraise, framboise, pêche, …) ainsi que du saccharose. Pour des impératifs d'ordre bactériologique, il est recommandé de pasteuriser soigneusement le mélange fruit-sucre avant son utilisation. En vue de conserver au yaourt une consistance semi-liquide convenable, les adjonctions de fruits et de saccharose ne doivent pas dépasser 15% (Siegenthaler et Ritter, 1964).

III.4.3.6. Koumis

C'est un lait de jument fermenté, consommé depuis des siècles par les populations des steppes de l'Asie centrale. Aujourd'hui, c'est une boisson assez répandue en ex-URSS, dans les régions centrales et méridionales où l'on élève des juments, en vue de sa préparation, dans certaines fermes collectives.

Le koumis est issu essentiellement d'une double fermentation, lactique et alcoolique, du lactose. Selon l'acidité et la teneur en alcool, on distingue divers types de koumis : doux, moyen, fort. La flore microbienne du koumis est constituée principalement par des bactéries lactiques (Streptocoques et Lactobacilles) et des levures (Torula et Mycoderma) (Makhanta, 1962).

On attribue à ce lait fermenté une action curative dans le traitement de certaines affections pulmonaires. Il existe en ex-URSS une cinquantaine d'établissement de santé, fabriquant eux-mêmes leur koumis, fréquentés par des malades atteints de tuberculose pulmonaire. La dose de koumis administrée journellement est de 1,5 litre environ. Le koumis est parfois préparé avec des laits d'ânesse et de chamelle.

III.4.3.7. Lait à l'acidophile

Il fut imaginé aux USA après qu'Orla-Jensen eut montré que les bactéries du yaourt étaient incapables de se développer dans l'intestin, contrairement aux affirmations de Metchnikoff. Orla-Jensen prouvait en même temps que certains ferments lactiques, *Lactobacillus acidophilus* par exemple, pouvaient proliférer dans les mêmes conditions et être isolés à partir des fèces de nourrissons encore au sein. Cette observation fut à l'origine de la préparation du lait nommé à l'acidophile par Rettger.

Pour préparer ce produit, on part de lait entier ou écrémé, d'excellente qualité. On le pasteurise à haute température (90°C pendant 30 secondes) afin d'éliminer la presque totalité des germes. On peut également le stériliser sous pression à 115°C ou lui faire subir un traitement UHT.

Après refroidissement à 37°C, on ensemence le milieu avec 2 à 5% d'une culture pure de *Lactobacillus acidophilus*. Le produit est alors réparti en bouteilles et maintenu pendant environ 24 heures à 35-37°C pour favoriser la coagulation. Il est ensuite refroidi à 5°C.

Le développement du lactobacille dans le lait est difficile et lent. D'autre part, l'acidité de la culture ne doit pas être trop élevée si l'on souhaite, comme cela doit être toujours le cas, conserver les cellules bactériennes vivantes (Pette, 1964). Le lait à l'acidophile exige d'être consommé rapidement alors que sa teneur en germes vivants est maximum. Additionné de lactose, son action thérapeutique est renforcée car le *Lactobacillus acidophilus* se développe d'autant mieux qu'il se trouve dans l'intestin en présence d'un excès de ce sucre.

III.4.3.8. Divers laits fermentés

Il existe de nombreux autres types de laits fermentés. Certains comme le Mazum arménien ont la consistance du yaourt, d'autres comme le Gioddu sarde rappellent le kéfir, d'autres enfin se présentent comme des boissons acidifiées. C'est le cas du Leben, fabriqué dans le bassin méditerranéen à partir de lait frais caillé spontanément puis baratté en présence d'eau. Le beurre est séparé et le liquide résiduel dilué forme le Leben. C'est aussi le cas du "babeurre de culture" ou "buttermilk" des Anglo-saxons. Il est pour eux une boisson appréciée, notamment aux USA. Il s'agit d'un lait écrémé ensemencé avec des bactéries lactiques acidifiantes et aromatisantes appartenant aux espèces *Streptococcus lactis*, *Streptococcus cremoris*, *Leuconostoc citrovorum*.

L'arôme recherché dans ce lait est celui du diacétyle. L'emploi de *Streptococcus diacetilactis* n'est pas recommandé car il peut produire de fortes quantités d'acétaldéhyde communiquant au produit un goût de yaourt (Pette, 1964).
Dans certaines fabrications, on cherche à conférer au produit un aspect et une viscosité rappelant ceux du véritable babeurre de baratte. On peut mettre alors en œuvre un lait fortement chauffé (85-90°C pendant 30-60 minutes) auquel on ajoute, après refroidissement à 22-23°C du citrate de sodium (0,15%) précurseur d'arôme et des stabilisants (0,2%) tels que la pectine, la gélatine ou l'alginate. Après ensemencement à l'aide de bactéries lactiques et incubation pendant une douzaine d'heures, le caillé est brassé, éventuellement salé légèrement (0,1 - 0,2%) en vue d'accentuer l'arôme final puis homogénéisé sous faible pression (5-10 bars) et refroidi à 5-6°C. Si l'on souhaite simuler parfaitement le babeurre de baratte, on pulvérise de l'huile de beurre sous pression dans le lait fermenté froid afin de provoquer la formation de petits grains de beurre.
La "babeurre de culture" est généralement acidifié à 85-90°D au moment de son conditionnement.

III.5. Crèmes glacées

III.5.1. Choix de la composition du mélange

La crème glacée n'est pas constituée que d'éléments laitiers : elle comprend, en outre, des proportions majeures de sucres et des taux mineurs d'agents stabilisants et émulsifiants. Tous ces ingrédients mélangés et traités comme il se doit constituent la préparation pour crème glacée, ou plus couramment appelée le mélange liquide. Ce n'est qu'une fois foisonné et congelé que ce dernier devient la crème glacée.
Bien que soumises à des normes, la nature et les proportions des ingrédients peuvent varier. Les premières décisions à prendre par le fabricant se rapportent donc au choix de la composition du mélange, en tenant compte des considérations suivantes :
- la loi et les règlements ;
- l'aspect économique ;
- le rôle des ingrédients ;
- les goûts des consommateurs ;
- le segment du marché cible visé.

La préparation pour crème glacée, ou le mélange liquide, doit renfermer au moins 36% de solides totaux (S.T.) et 10% de matière grasse (M.G.) du lait. Si du sirop de chocolat, des fruits et (ou) des noix sont ajoutés, le % de M.G. peut être de 8% avec une teneur de 40 g M.G. par litre dans la crème glacée. Quant au lait glacé, il doit renfermer de 3 à 5% de M.G. du lait et 33% d'extrait sec. Ces exigences minimales laissent toutefois le choix de fabriquer un produit à des teneurs supérieures. Il va de soi que le coût des ingrédients est un facteur dont il faut tenir compte, mais l'économie dans la production est basée à la fois sur la composition, le modèle de fabrication et le rendement.

III.5.2. Rôle des constituants

Pour bénéficier au maximum des effets des constituants de la crème glacée, il faut comprendre leur rôle, leur comportement, leur interaction, leurs limites et les proportions optimales de leur utilisation.
La matière grasse joue un rôle important dans la crème glacée. Dans son utilisation, les principaux facteurs à considérer sont les suivants : le coût, la qualité du produit et les préférences des consommateurs.
La matière grasse est certes l'un des ingrédients les plus coûteux de la crème glacée. La matière grasse donne au produit d'excellentes qualités de saveur et de texture. Le rôle des M.G. est aussi étroitement lié au diamètre des globules, à la dispersion de cette émulsion dans le mélange. La teneur en solides non gras (S.N.G.), l'équilibre minéral et l'homogénéisation affectent également ce rôle, de même que la présence d'émulsifs. Le réseau de cristaux de M.G. dans les lamelles entourant les cellules d'air influencera les propriétés rhéologiques du produit.
Il y a de plus en plus de consommateurs qui surveillent leur diète. Une crème glacée plus riche en matière grasse fournira plus de calories et satisfera plus rapidement les appétits. C'est pourquoi la plupart des fabricants offrent un produit dont la teneur en M.G. varie entre 10 et 12%.

La plupart des crèmes glacées commerciales contiennent entre 10 et 12% de solides non gras du lait. Ces éléments ont sur le corps et la texture du produit des effets surtout attribuables aux protéines et au lactose présents. En plus de contribuer à la valeur nutritive, les protéines, en particulier grâce à leur interaction avec l'eau, aident à obtenir une texture douce et des propriétés de corps souhaitables. Le lactose, par ailleurs, contribue à la saveur sucrée mais, à cause de sa solubilité relativement basse, peut détériorer la texture puisqu'il cristallise en plus ou moins grande quantité. Les sucres donnent à la crème glacée la saveur sucrée que recherchent les consommateurs. En concentration optimale, 14 -16% généralement, ils contribuent à cette saveur riche et délicate d'un bon produit.
Les stabilisants sont utilisés surtout pour leurs propriétés hydrophiles. En "liant" l'eau, ils affectent la viscosité du mélange et retardent la formation des cristaux de glace trop gros, favorisant ainsi une texture plus douce, une plus grande résistance à la fonte et de bonnes propriétés de corps. Les stabilisants améliorent aussi les conditions de fouettage et permettent la formation de cellules d'air plus petites qui contribuent à la rigidité des structures aux interfaces air-mélange. Les quantités à utiliser sont fonction, entre autres facteurs, du type de stabilisant, de la composition du mélange et du genre de procédé.

L'action des émulsifs ne se limite pas à la stabilisation de l'émulsion de gras ; elle contribue à la consistance, à la résistance à la fonte, à l'apparence sèche et au corps de la crème glacée, tout en aidant au fouettage et au rendement.

III.5.3. Préparation et propriétés du mélange

La première opération en vue d'effectuer une préparation pour crème glacée est de mélanger les ingrédients dans les proportions calculées selon la formule à utiliser. Pasteuriser le mélange est obligatoire pour des raisons de salubrité, comme pour tout autre produit laitier. Une homogénéisation efficace du mélange est essentielle à l'obtention d'un produit de qualité. Les principaux facteurs à considérer lors de l'homogénéisation sont les suivants : pression, température et type de valve. La maturation consiste à conserver le mélange de 4 à 24 heures de -2 à - 4°C avant la congélation. Cette période permet aux phénomènes d'hydratation et à la cristallisation du gras de se poursuivre, et il en résulte de meilleures propriétés physiques du mélange.
La congélation est l'opération par laquelle une partie de l'eau du mélange est convertie en glace, l'air étant incorporé pour obtenir le rendement désiré. La température du mélange est abaissée à environ -5 à -6°C lors de la congélation. Dans ces conditions et dans le cas d'un mélange de composition moyenne, environ 50% de l'eau est transformée en glace et au-delà de 70% l'est à -10°C.
A la sortie du congélateur, la crème glacée est mise en contenant et sa congélation doit être poursuivie. Le pourcentage d'eau convertie en glace passera de 50% en moyenne aux environs de 80 - 85%. Cette glace se formera sans agitation et plutôt lentement. Les noyaux de cristallisation formés dans le congélateur prennent ici une grande importance. L'idéal est un durcissement le plus rapide possible. Dans une chambre froide de -20 à -30°C, sans circulation forcée d'air froid entre les contenants, le durcissement prendra plusieurs heures, alors que dans un tunnel spécialement conçu pour une bonne circulation d'air à des températures de l'ordre de -35 à - 40°C, il peut être achevé en moins de 2 heures dans des contenants d'un litre.

Les défauts présentés par la crème glacée se rapportent surtout à la saveur, à la texture et au corps. Les défauts d'apparence ou de couleur sont relativement rares. Il est bon de souligner qu'une couleur appropriée est un facteur important et très apprécié par les consommateurs.

III.6. Produits dérivés du lait

La fabrication de certains produits laitiers laisse d'importantes quantités de sous-produits, comme le lait écrémé et le babeurre dans le cas du beurre, le lactosérum dans le cas du fromage. Autrefois, utilisés à l'état naturel pour l'alimentation des animaux de la ferme, ces produits sont maintenant l'objet de traitements et de transformations qui constituent un domaine important des activités industrielles. En raison de leur importance nutritionnelle, il y a intérêt à récupérer tous les éléments de ces dérivés et à les rendre aptes à l'alimentation humaine.
Du lait écrémé, on tire les caséines et les caséinates, laissant comme sous-produit le sérum de caséine. Du lactosérum de fromage, on extrait le lactose et les protéines lactosériques ; on peut également le déminéraliser, en obtenir le lactose hydrolysé et divers produits de fermentation tels que l'alcool, le vinaigre, les levures lactiques et

autres. Les dérivés du lactosérum sont de plus en plus utilisés dans la fabrication de plusieurs aliments et dans la préparation de produits laitiers spéciaux, comme les laits maternisés, les laits de diète, les crèmes-desserts, etc.

Pour les nourrissons qui ne bénéficient pas de l'allaitement naturel, on recherche un lait le plus semblable possible au lait maternel. Ce lait est offert par quelques fabricants très importants qui se partagent un marché énorme.

Les laits maternisés sont faits à base de lait de vache auquel on ajoute du lactose, des protéines de lactosérum bien souvent, des matières grasses végétales polyinsaturées, des vitamines. A l'analyse, ce lait est une imitation du lait humain pour ce qui est de la teneur en lactose et en protéines, mais les autres nutriments sont des additions qui en font un aliment plus complet. On tente parfois d'équilibrer la partie protéine selon la proportion 60/40 pour les protéines de sérum et la caséine. Cette proportion est de l'ordre de 20/80 pour le lait de vache.
Le lait maternisé est offert liquide, en boîte stérile, en simple ou double concentration. Il est aussi offert en poudre ou même dans sa concentration finale, prêt à consommer.

Les laits de diète sont des laits spéciaux pour des consommateurs bien spécifiques. Le lait avec lactose hydrolysé est faisable pour ceux qui ne tolèrent pas le lactose. On peut aussi imaginer un lait sans sodium ou sans calcium pour les gens que ces minéraux incommodent. Pour faire de tels laits, il faut en retirer tous les minéraux par échange ionique ou par électrodialyse. On peut y ajouter, par la suite, des minéraux correspondant aux exigences du consommateur.
Les crèmes-desserts sont de loin les plus importants dans la catégorie **des desserts au lait**. A la base, un pouding est un lait auquel on ajoute du sucre et de l'amidon. Au chauffage, l'amidon se gélatinise et donne un dessert nutritif et agréable au goût. Les poudings se préparent dans une grande variété de saveurs.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Amiot, J., Bergeron, J.M., Bergeron, L., Blais, A. et Bonin, G. 1984. Science et technologie du lait. Les Presses de l'Université Laval, Québec, Canada.
2. Banks, W. 1991. Milk lipids. International Dairy Federation (260): 3-6.
3. CIDIL 1999. Les protéines du lait dans tous leurs états. Centre d'Information et de Documentation des Industries Laitières, Paris.
4. Cornelly, V.D.V. 2000. Biochemical and functional characterisation of casein and whey hydrolysates: A study on the correlations between biochemical and functional properties using multivariate data analysis. PhD Thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands.
5. Debry, G. 2001. Lait, nutrition et santé. Technique et Documentation, Paris.
6. Eck, A. 1987. Le fromage. Cedex, Paris.
7. François, M.L. 1990. Lait et produits laitiers. Cedex, Paris.
8. Jensen, R.G. 1995. Handbook of milk composition. Academic press, San Diego.
9. Makhanta, K.G. 1962. Microflora of koumiss: Microbiological and biochemical study of koumiss and interrelation of microorganisms of koumiss. Dairy Sci. Abstr. (24): 257-258.
10. Modler, H.W. 2000. Milk processing. **In**: Food proteins: processing application, pp.1-88. Nakai, S., Modler, H.W., Eds., Wiley, New York.
11. Pette, J.W. 1964. Caractéristiques des souches communément utilisées pour la préparation des laits fermentés les plus importants. Bull. ann. F.I.L., 78-79.
12. Seigenthaler, E. et Ritter, P. 1964. Normalisation du lait en vue de sa transformation en lait fermenté. Bull. ann. F.I.L., 54-59.
13. Veisseyre, R. 1979. Technologie du lait. La Maison Rustique, Paris.

ANNEXE 1 :

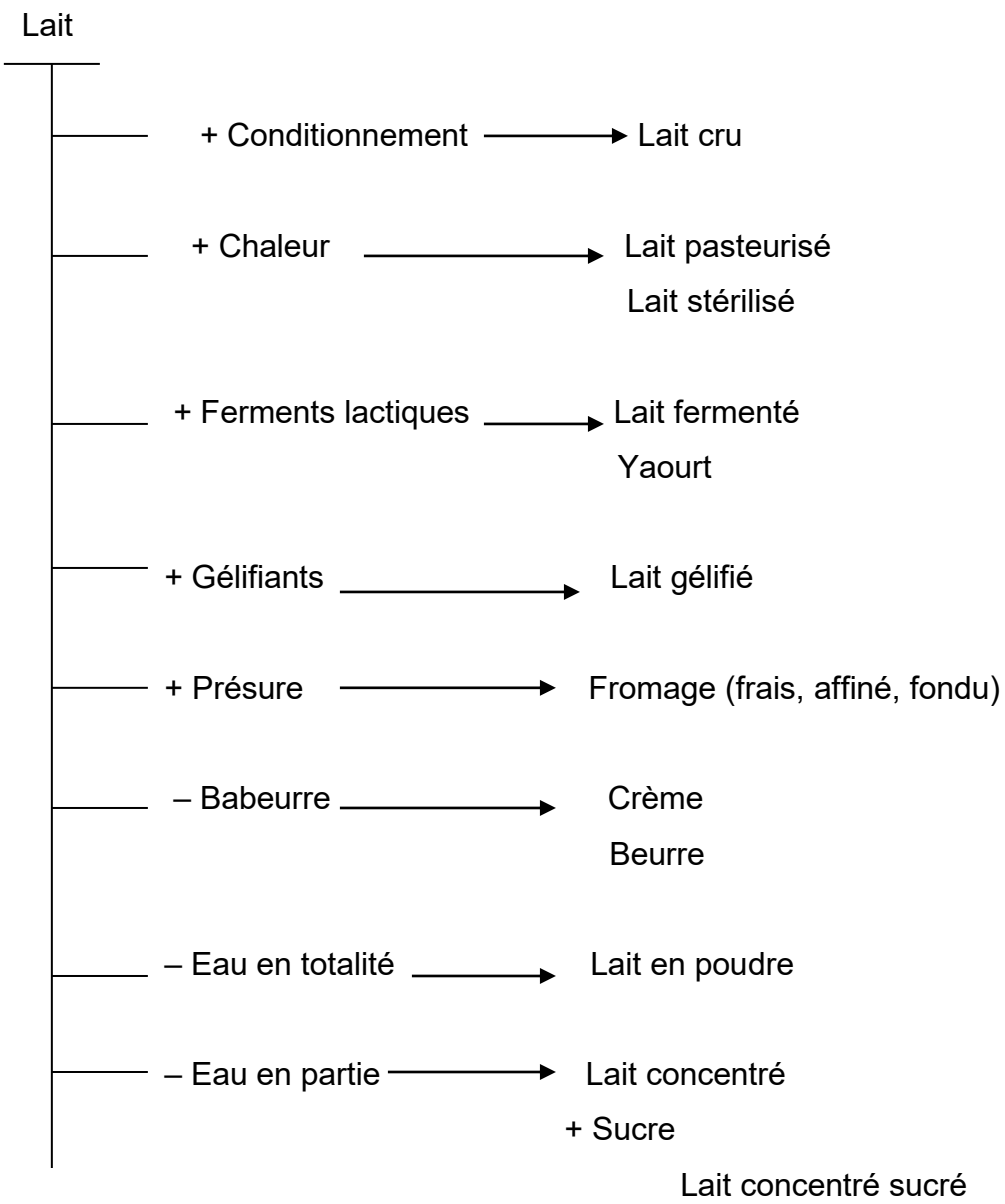


Figure 5 : Synthèse des diverses possibilités de produits laitiers

Source : Amiot et al. (1984).

ANNEXE 2 :

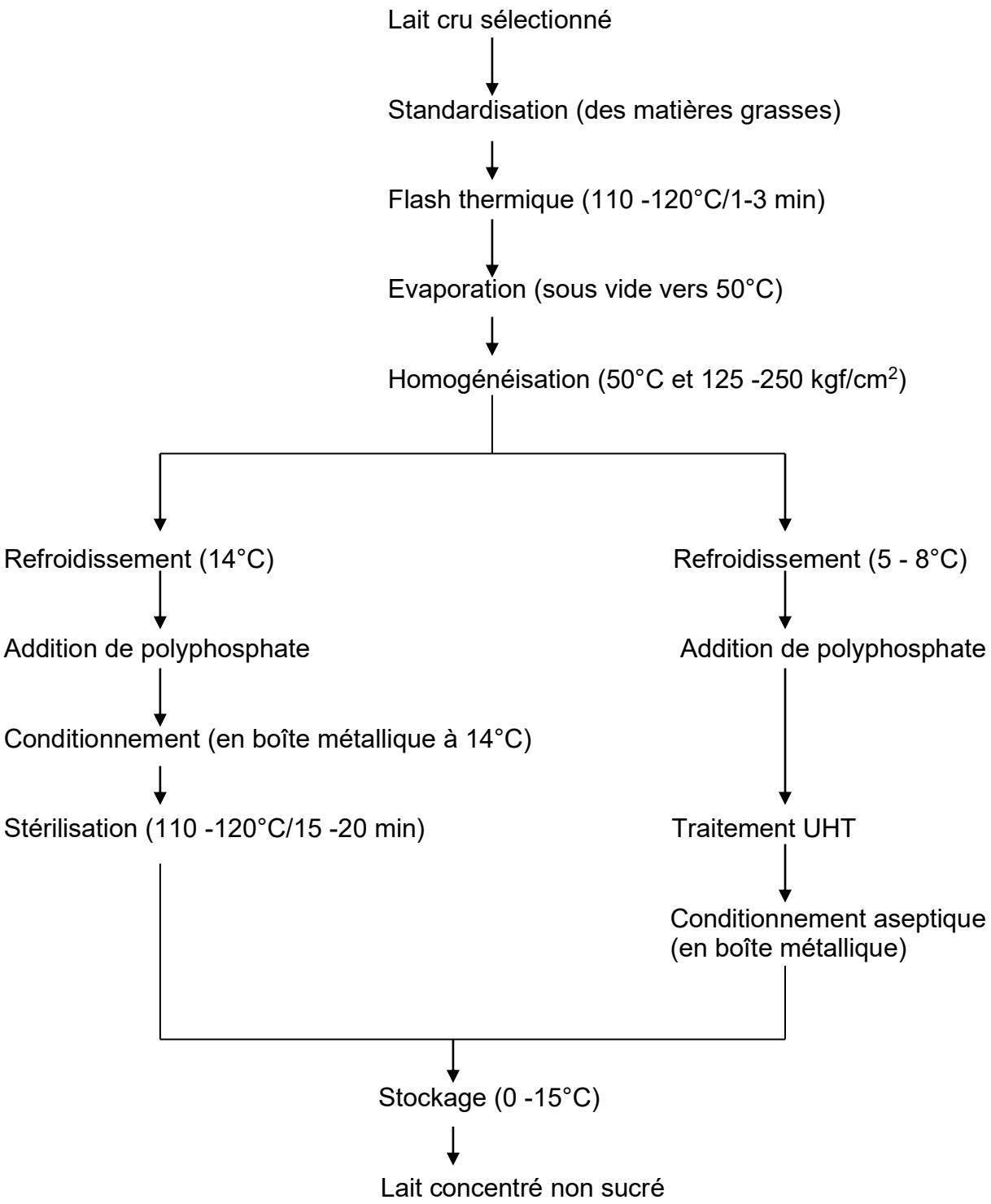


Figure 6 : Fabrication du lait concentré non sucré

Source : Veisseyre (1979).

ANNEXE 3 :

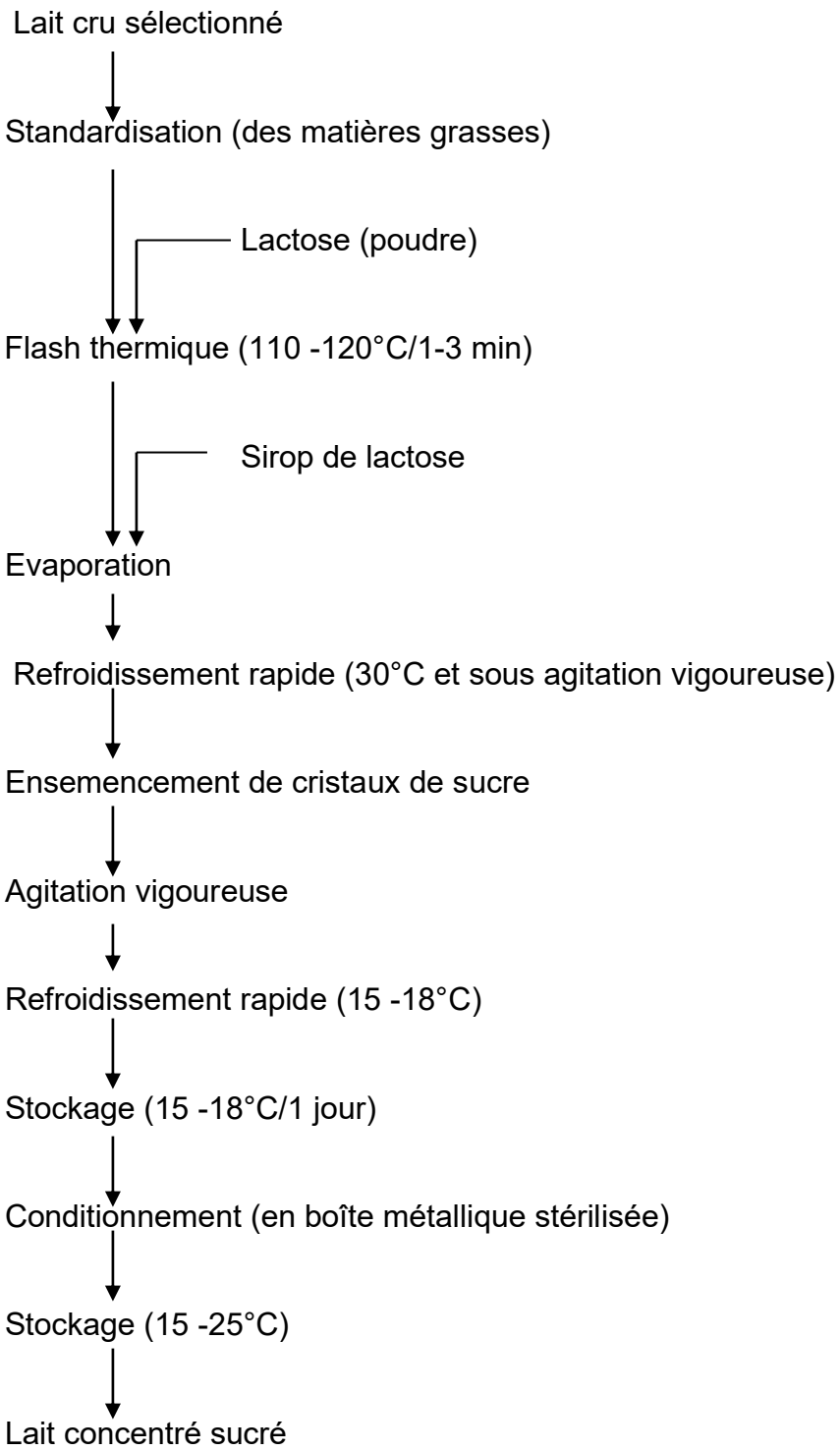


Figure 7 : Fabrication du lait concentré sucré

Source : Veisseyre (1979).

ANNEXE 4 :

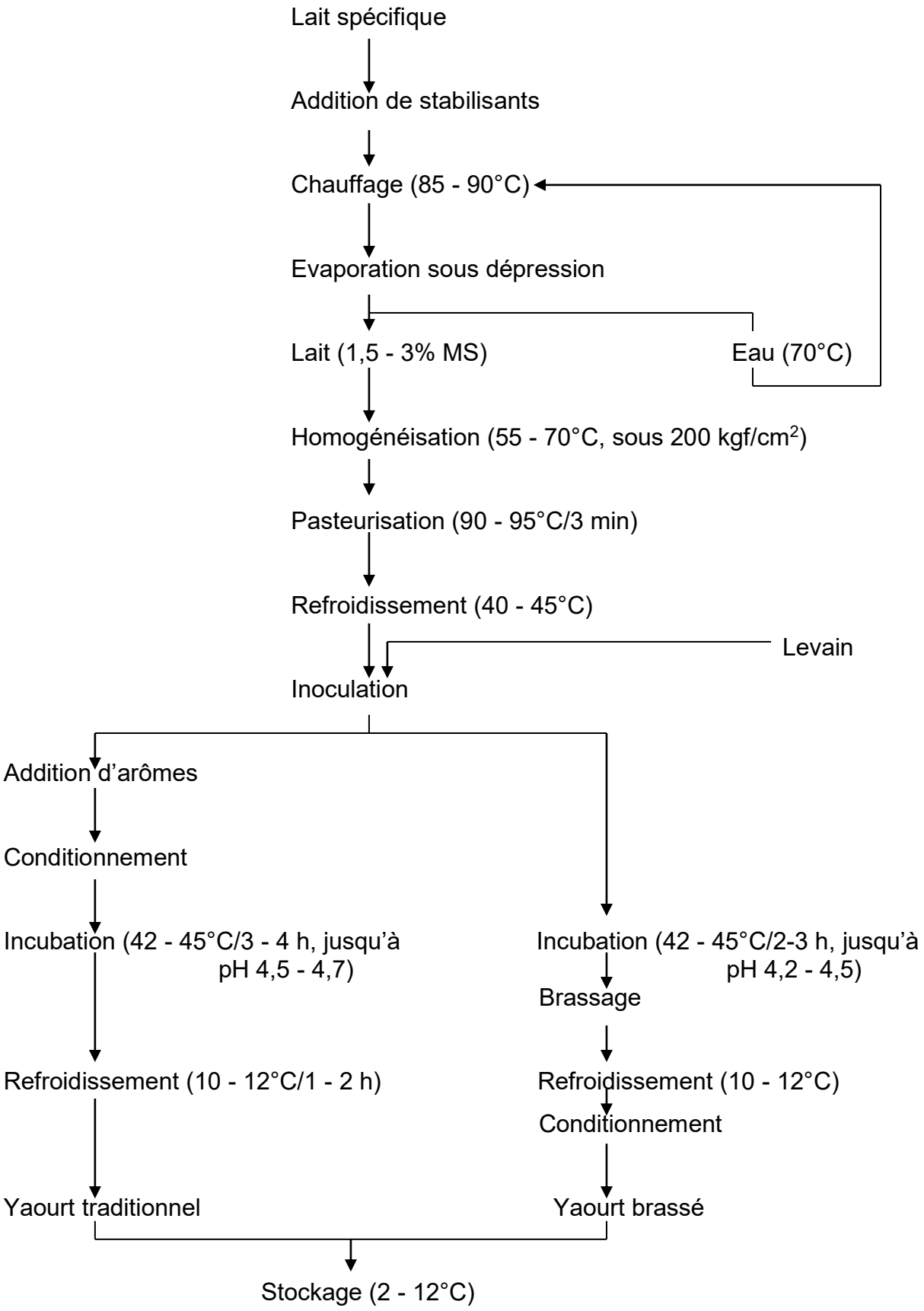


Figure 8 : Fabrication des yaourts

Source : François (1990).

ANNEXE 5 :

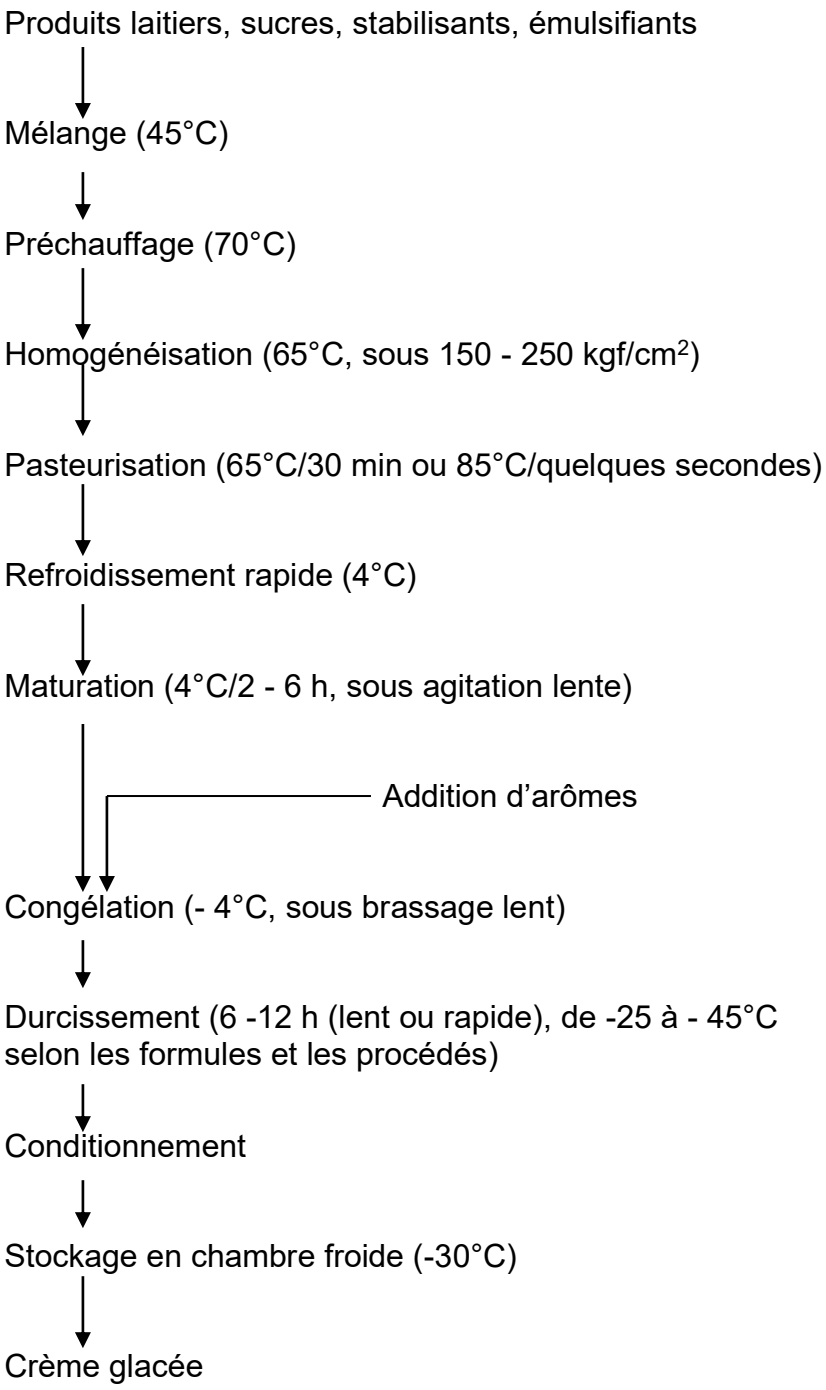


Figure 9 : Fabrication des crèmes glacées
Source : Veisseyre (1979).

ANNEXE 6 :

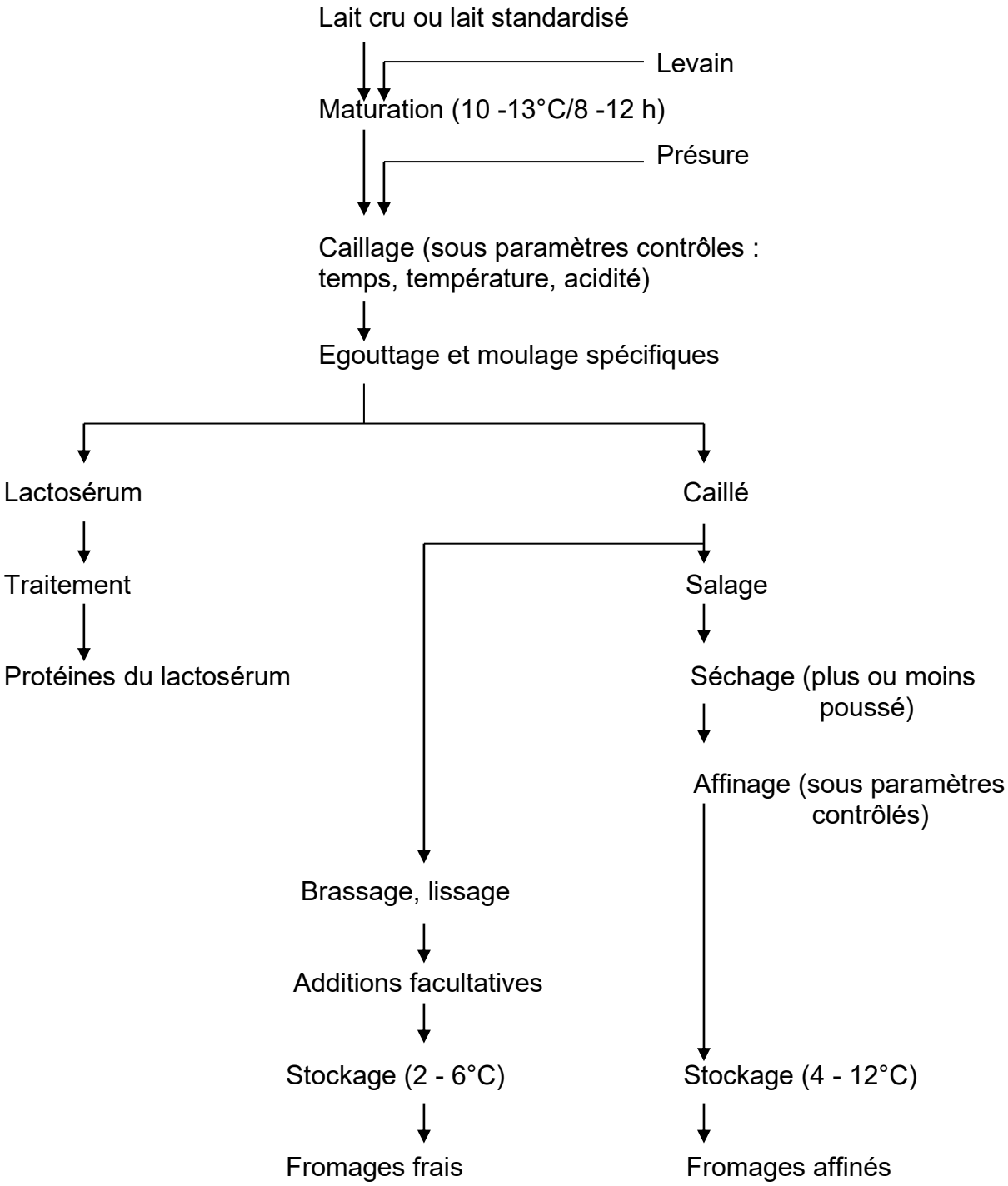


Figure 10 : Fabrication des fromages
Source : Eck (1987).