

Séparation et standardisation de la matière grasse du lait

Introduction

Lorsque nous lâchons une pierre dans l'eau, nous serions surpris qu'elle n'y coule pas. De même, nous nous attendons à ce qu'un bouchon y flotte. Nous savons par expérience qu'une pierre est "plus lourde" et un bouchon "plus léger" que l'eau. Mais que se passe-t-il si nous lâchons une pierre dans du mercure, métal liquide de densité très élevée? Ou si nous lâchons un morceau de fer dans du mercure?

Nous n'avons aucune expérience nous permettant de prévoir le résultat. Nous pourrions nous attendre à ce que le morceau de fer coule. En réalité, la pierre et le morceau de fer flottent.

Vitesse de sédimentation et de flottation

Une particule solide ou une gouttelette de liquide se déplaçant dans un fluide visqueux sous l'effet de la gravité atteindra finalement une vitesse constante, appelée vitesse de sédimentation. Si le poids spécifique de la particule est inférieur à celui du fluide, la particule flottera à une vitesse de flottation. Ces vitesses sont exprimées par V_g (g = pesanteur). L'ampleur de la vitesse de sédimentation/flottation dépend des grandeurs physiques suivantes :

- Diamètre des particules d (m)
- Poids spécifique des particules ρ_p (kg/m^3)
- Poids spécifique de la phase continue ρ_l (kg/m^3)
- Viscosité de la phase continue η (kg/m/s)
- Force d'attraction de la pesanteur $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Si les valeurs de ces grandeurs sont connues, la vitesse de sédimentation/flottation de la particule ou gouttelette peut se calculer à l'aide de la formule suivante, dérivée de la Loi de Stokes :

$$V_g = \frac{d^2 (\rho_p - \rho_l)}{18 \eta} g \quad (\text{Equation 1})$$

$$d = 3 \mu\text{m} = 3 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$(\rho_p - \rho_l) = (980 - 1028) = -48 \text{ kg/m}^3$$

$$\eta = 1,42 \text{ cP (centipoise)} = 1,42 \times 10^{-3} \text{ kg/m/s}$$

$$V_g = \frac{48 (3 \times 10^{-6})^2}{18 \times 1,42 \times 10^{-3}} \times 9,81$$

$$V_g = \frac{48 \times 9 \times 10^{-12}}{18 \times 1,42 \times 10^{-3}} \times 9,81$$

$$V_g = 165,80 \times 10^{-9} \text{ m/s} = 0,1658 \times 10^{-6} \text{ m/s} = 0,1658 \times 10^{-3} \text{ mm/s}$$

La figure 1 montre de façon schématique comment des globules gras de différents diamètres se déplacent dans le lactosérum sous l'effet de la gravité. Au temps zéro, les globules gras sont au fond du vase. Au bout de t minutes, la

sédimentation a atteint une certaine ampleur et au bout de 3 t minutes, le plus gros des globules gras a atteint la surface. Le globule de taille moyenne est alors remonté à mi-chemin de la surface, mais le plus petit globule n'a encore couvert qu'un quart de la distance. Le globule de taille moyenne atteindra la surface en 6 t minutes, mais il faudra au plus petit globule 12 t minutes pour y parvenir.

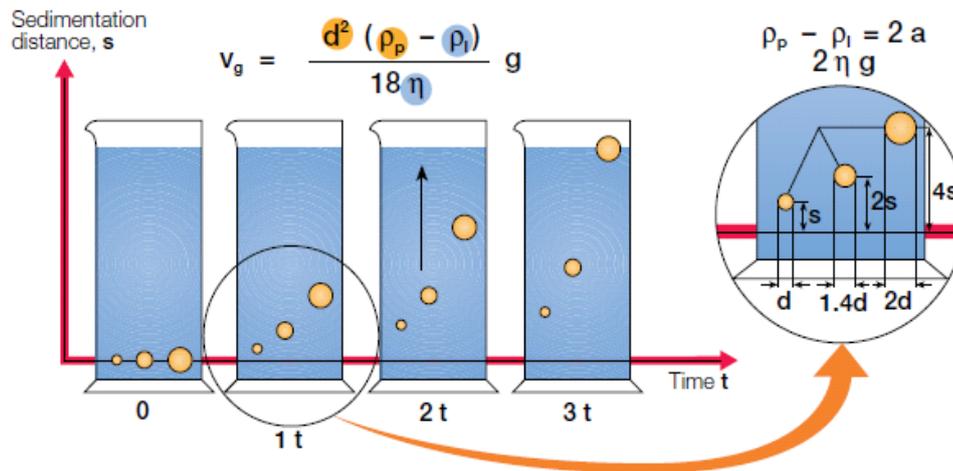


Figure 1 : Vitesses de flottation de globules gras de différents diamètres.

L'accélération peut se calculer à l'aide de la formule

$$a = r \omega^2 \quad (\text{Equation 2})$$

On obtient la formule ci-après en substituant l'accélération centrifuge, a , exprimée sous la forme $r \omega^2$, à l'accélération de la pesanteur, g , dans l'équation 1 de la Loi de Stokes susmentionnée.

On peut utiliser l'équation suivante pour calculer la vitesse de sédimentation, v , des différentes particules dans le séparateur centrifuge.

$$v_c = \frac{d^2 (\rho_p - \rho_l)}{18 \eta} r \omega^2 \quad (\text{Equation 3})$$

Vitesse de flottation d'un globule gras

L'équation 1) utilisée auparavant montrait que la vitesse de flottation d'un globule gras isolé de 3 microns de diamètre était de $0,166 \times 10^{-6}$ m/s ou 0,6 mm/h, sous l'effet de la gravité.

L'équation 3) permet désormais de calculer la vitesse de flottation d'un globule gras de même diamètre en un point radial de 0,2 m, dans un séparateur centrifuge tournant à une vitesse $n = 5\,400$ tr/mn.

La vitesse angulaire peut se calculer à l'aide de la formule :

$$W = \frac{2 \pi \times n}{60} \text{ rad/s radians par seconde} \quad (\text{Equation 4})$$

Séparation centrifuge continue du lait

Le lait est introduit par les orifices de distribution des disques, alignés verticalement, à une certaine distance du bord de la pile de disques. Sous l'effet de la force centrifuge, les sédiments et les globules gras du lait commencent par se déposer dans le sens radial, vers l'extérieur ou l'intérieur, dans les canaux de séparation, en fonction de leur poids spécifique par rapport à celui du fluide continu (lait écrémé).

Comme dans le clarificateur, les impuretés solides de densité élevée du lait se déposent rapidement vers l'extérieur, vers la périphérie du séparateur, et sont recueillies dans la chambre à boues. La sédimentation des solides est facilitée par le fait que le lait écrémé circule, en l'occurrence, vers l'extérieur, vers la périphérie de la pile de disques.

La crème, c'est à dire les globules gras, a un poids spécifique inférieur à celui du lait écrémé et se déplace donc dans les canaux vers l'intérieur, en direction de l'axe de rotation. La crème continue jusqu'à l'orifice de sortie.

Le lait écrémé se déplace vers l'extérieur, jusqu'à la chambre extérieure de la pile de disques et gagne de là son orifice de sortie concentrique, par un conduit ménagé entre le sommet de la pile de disques et le couvercle conique du séparateur.

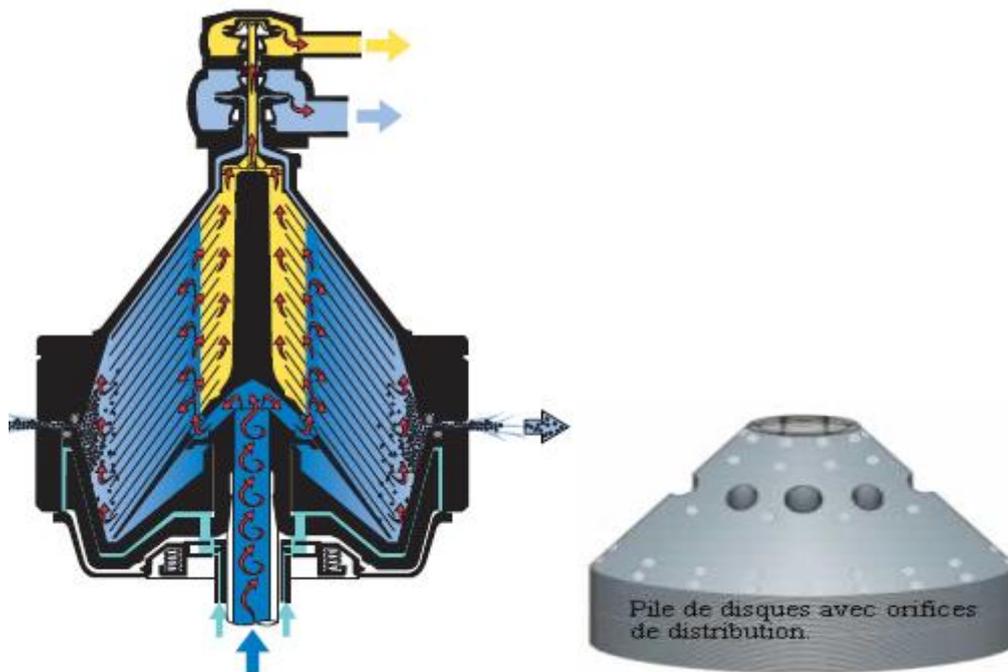


Figure 2 : Ecrémeuse + Pile de disque

Efficacité de l'écémage

La quantité de matière grasse que l'on peut séparer du lait dépend de la conception du séparateur, de la vitesse d'écoulement du lait à travers celui-ci et de la distribution des tailles des globules gras.

Les globules gras les plus petits, habituellement < 1 micron, n'ont pas le temps de monter au débit spécifié, mais sont entraînés hors du séparateur avec le lait écrémé. La teneur résiduelle en matière grasse du lait écrémé se situe habituellement entre 0,04 et 0,07% et l'on dit alors que la capacité d'écémage de la machine est de 0,04 à 0,07.

La vitesse d'écoulement dans les canaux du séparateur sera réduite si l'on réduit le débit à travers la machine. Ceci donne aux globules gras davantage de temps pour monter et être chassé par l'orifice de sortie de la crème. L'efficacité de l'écémage d'un séparateur augmente donc lorsque l'on réduit le débit, et vice versa.

Teneur en matière grasse de la crème

Le lait entier fourni au séparateur est évacué sous forme de deux écoulements, lait écrémé et crème, la crème représentant environ 10% du débit total. Du pourcentage évacué sous forme de crème dépend la teneur en matière grasse de la crème. Si le lait entier contient 4% de matière grasse et si le débit est de 20 000 l/h, la quantité totale de matière grasse passant par le séparateur sera de :

$$\frac{4 \times 20\,000}{100} = 800 \text{ l/h}$$

Supposons que l'on veuille obtenir de la crème à 40% de teneur en matière grasse. Cette quantité de matière grasse doit être diluée avec une certaine quantité de lait écrémé. La quantité totale de liquide évacuée sous forme de crème à 40% sera donc de :

$$\frac{800 \times 100}{40} = 2000 \text{ l/h}$$

800 l/h de matière grasse pure et les 1200 l/h restants de "lait écrémé".

Le montage de vannes modulantes aux orifices de sortie de la crème et du lait écrémé permet d'ajuster les volumes respectifs des deux écoulements, de manière à obtenir la teneur en matière grasse désirée dans la crème.

Ejection des solides

Les solides recueillis dans la chambre à sédiments du bol du séparateur sont constitués de paille et de poils, de cellules mammaires, de cellules somatiques telles leucocytes, de bactéries etc. La quantité totale de sédiments présente dans le lait varie mais peut être d'environ 1 kg/10 000 litres. Le volume de la chambre à sédiments varie en fonction de la taille du séparateur - habituellement de 10 à 20 l.

Dans les séparateurs de lait du type à rétention des solides, il faut démonter le bol à la main et nettoyer la chambre à sédiments à des intervalles relativement fréquents. Ceci implique une main-d'oeuvre importante.

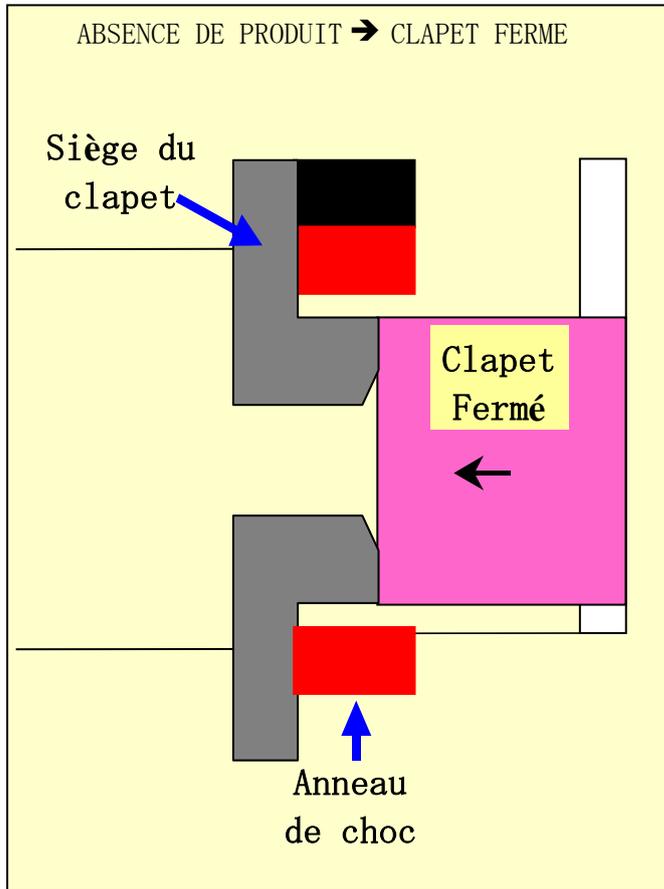
Les bols de séparateurs modernes à éjection des solides ou auto-nettoyants sont équipés de systèmes d'éjection automatique des sédiments accumulés, à des intervalles pré réglés. Ceci supprime tout besoin de nettoyage manuel.

L'éjection des solides s'effectue habituellement toutes les 30 ou 60 minutes, lors de la séparation du lait.

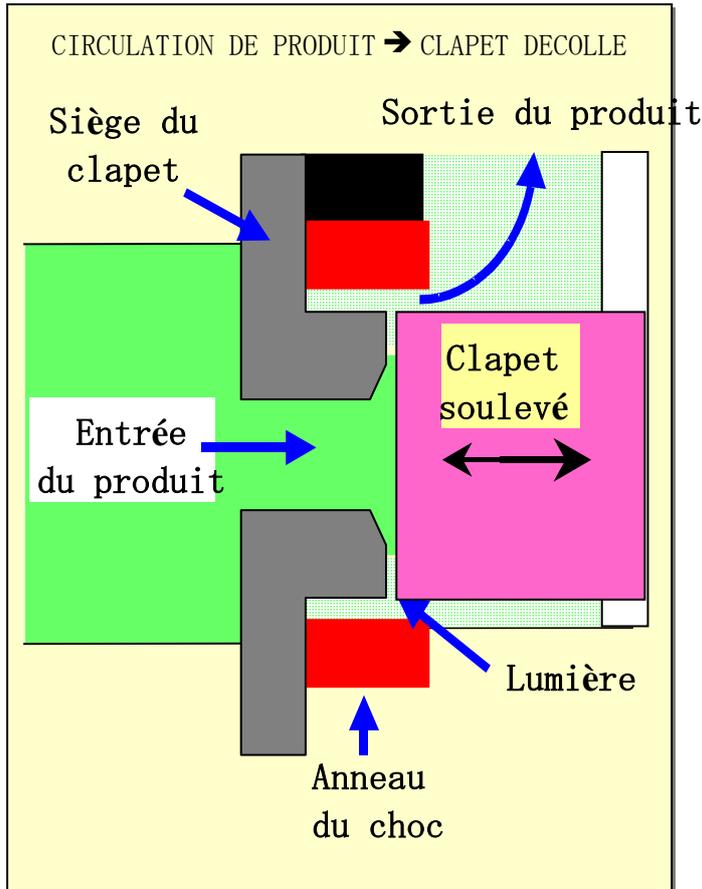
Homogénéisation

L'homogénéisation à haute pression repose sur la détente d'un débit continu de produit liquide ou pâteux, mis sous pression élevée au moyen d'une pompe à pistons (de 30 à 700 bars), à travers une tête d'homogénéisation.

Cet organe comporte trois parties : le siège, le clapet et l'anneau de choc.



Décollement du clapet de son siège en raison de la pression du liquide et apparition d' un espace disponible pour le passage du produit : la lumière.

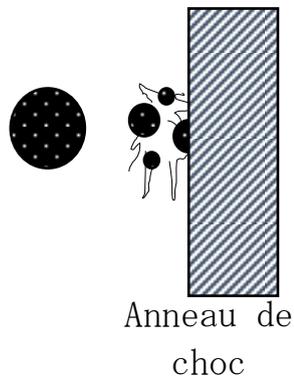


1- Principes

1 - Principe de la percussion des particules solides dans un liquide (suspensions, émulsions)

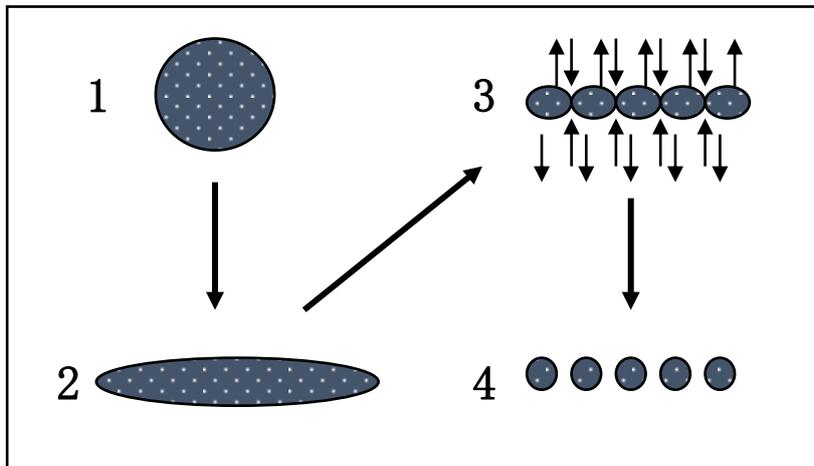
Projection du produit liquide :

- sur le clapet à une pression de 100 à 300 bars (jusqu' à 1000 bars).
- sur l' anneau de choc à une vitesse de 100 à 150 m/sec.



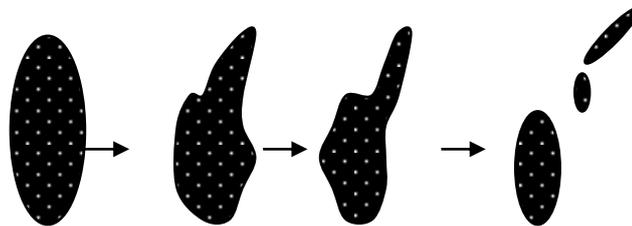
2 - Principe du laminage/cisaillement des gouttelettes liquides (émulsions)

laminage déformation, étirement d'où fragilisation des gouttelettes de phase dispersée conduit à la réduction de l'énergie nécessaire à leur division.



3 - Principe des turbulences, actives sur les gouttelettes dans un liquide (émulsions)

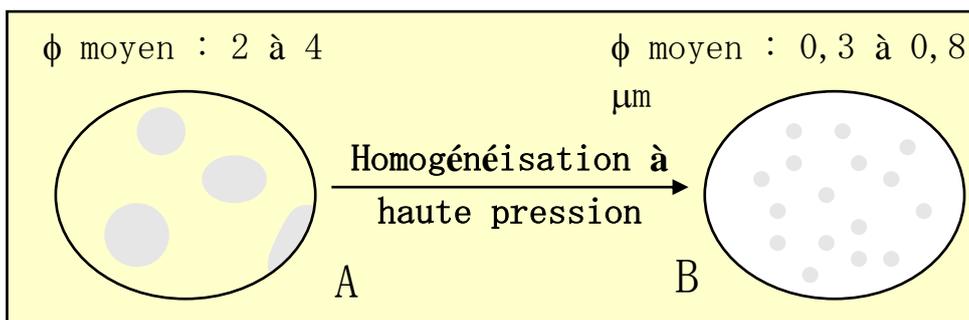
Compte tenu de la densité énergétique, les plus petits tourbillons ne doivent pas être plus gros que les gouttelettes à diviser.



Conséquences de l'homogénéisation sur le produit

Variation de A en B

- Nombre de globules gras augmente
- Taille unitaire des G. gras baisse
- Surface unitaire des G. gras baisse
- Volume unitaire des G. gras baisse
- Volume total des G. gras reste constante
- Surface totale des G. gras augmente (x 5 à 10)



- Augmentation de l'interface eau/matière grasse.
 - Réduction des distances interglobulaires, donc rapprochement des globules gras
- ⇒ Accroissement de la viscosité

Position de l'homogénéisation dans le processus

- **Si homogénéisation après chauffage ($>70^{\circ}\text{C}$),** homogénéisation en phase descendante, fixation de protéines sériques en surface des globules gras avec formation de copolymères (composés formés de plusieurs molécules différentes) avec les submicelles de caséine déjà adsorbées, d'où une viscosité du mix élevée.

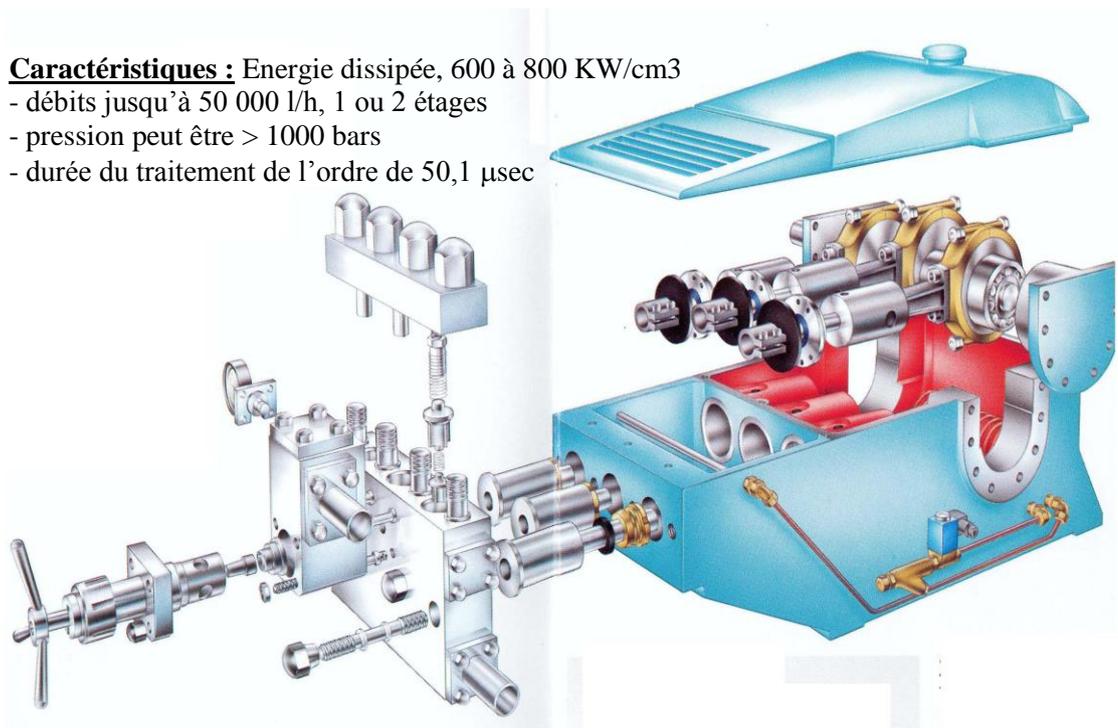
- **Si homogénéisation avant chauffage ($<70^{\circ}\text{C}$),** homogénéisation en phase montante, la quantité de protéines sériques fixées aux globules gras est plus faible que dans le cas précédent, d'où une moindre viscosité du mix.

- **Homogénéisateur le plus fréquemment en phase montante :** c'est à dire avant le pasteurisateur car on privilégie des mixes de viscosité pas trop élevée afin d'assurer une bonne pompabilité. Il est généralement couplé avec la section échange récupération de ce même pasteurisateur pour atteindre la température requise pour l'homogénéisation.

Matériels - (APV / Gaulin)

Caractéristiques : Energie dissipée, 600 à 800 KW/cm³

- débits jusqu'à 50 000 l/h, 1 ou 2 étages
- pression peut être > 1000 bars
- durée du traitement de l'ordre de 50,1 μsec



Homogénéisateur à tête / clapet

Standardisation de la teneur en matière grasse du lait et de la crème

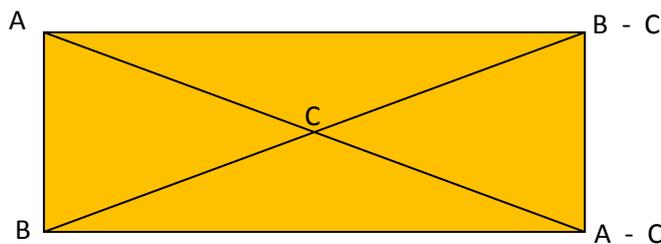
Méthodes de calcul du mélange des produits

La standardisation de la teneur en matière grasse consiste à ajuster la teneur en matière grasse du lait ou d'un produit laitier par adjonction de crème ou de lait écrémé, suivant le cas, de manière à obtenir une teneur en matière grasse donnée.

Il existe diverses méthodes de calcul des quantités de produits à teneurs en matière grasse différentes qu'il faut mélanger pour obtenir une teneur en matière grasse finale donnée. Elles permettent le mélange de lait entier et de lait écrémé, de crème et de lait entier, de crème et de lait écrémé et de lait écrémé et de matière grasse anhydre (AMF).

Une de ces méthodes, fréquemment utilisée, tirée du Dictionnaire de la laiterie de J.G. Davis, est illustrée par l'exemple ci-après :

Combien de kilos de crème à A% de matière grasse doivent être mélangés à du lait écrémé à B% de matière grasse pour obtenir un mélange contenant C% de matière grasse? La réponse s'obtient sur un rectangle, illustré sur la figure 3, où sont disposés les chiffres spécifiés pour les teneurs en matière grasse.



A	Teneur en matière grasse de la crème	40%
B	Teneur en matière grasse du lait écrémé	0,05%
C	Teneur en matière grasse du produit fini	3%

Soustrayez les teneurs en matière grasse des diagonales, de manière à obtenir C - B = 2,95 et A - C = 37.

Le mélange est donc 2,95 kg de crème à 40% et 37 kg de lait écrémé à 0,05%, permettant d'obtenir 39,95 kg d'un produit standardisé contenant 3% de matière grasse.

A partir des équations ci-dessous, on peut alors calculer les quantités de A et de B nécessaires à l'obtention de la quantité (X) de C désirée.

$$1) \frac{X \times (C - B)}{(C - B) + (A - C)} \quad \text{Kg de A}$$

$$2) \frac{X \times (A - C)}{(C - B) + (A - C)} \quad \text{Kg de B} \quad \text{également (X - équation 1)}$$

Principe de standardisation

La crème et le lait écrémé sortant d'un séparateur ont des teneurs en matière grasse constantes si les autres paramètres concernés sont également constants. Le

principe de standardisation - identique, que la commande soit manuelle ou automatisée - est illustré sur la figure 4.

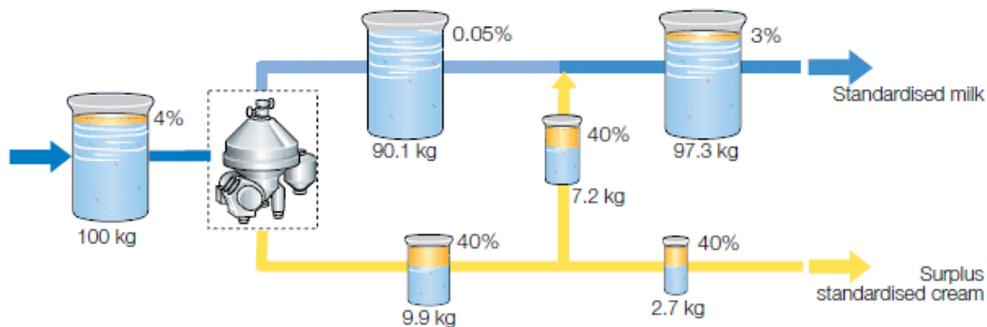


Figure 4 : Principe de standardisation de la matière grasse

Les chiffres de l'illustration sont basés sur le traitement de 100 kg de lait entier à 4% de matière grasse. L'objectif est la production d'une quantité optimale de lait standardisé à 3% et de crème contenant 40% de matière grasse.

La séparation de 100 kg de lait entier produit 90,1 kg de lait écrémé à 0,05% de matière grasse et 9,9 kg de crème à 40% de matière grasse.

La quantité de crème à 40% qu'il faut ajouter au lait écrémé est de 7,2 kg. Ceci donne au total 97,3 kg de lait du commerce à 3%, laissant $9,9 - 7,2 = 2,7$ kg de crème excédentaire à 40% (Figure 4).

Standardisation directe en ligne

Dans les unités de traitement du lait modernes à gamme de produits diversifiée, la standardisation directe en ligne est habituellement combinée à la séparation. La standardisation s'effectuait autrefois manuellement mais, conjointement aux volumes de plus en plus importants à traiter, le besoin de méthodes de standardisation rapides, constantes et correctes, indépendantes des fluctuations saisonnières, s'est accru. On utilise des vannes de régulation, des débitmètres et des densimètres et une boucle de régulation automatisée pour ajuster la teneur en matière grasse du lait et de la crème aux valeurs désirées. Ce matériel est généralement assemblé en unités - Figure 5-.

La pression de la sortie de lait écrémé doit être maintenue constante pour permettre une standardisation précise. Cette pression doit être constante, quelles que soient les variations de débit ou de perte de charge dues au matériel après séparation, et ceci est assuré par une vanne à pression constante, montée près de la sortie de lait écrémé.

Pour assurer la précision du procédé, il faut mesurer des paramètres variables comme :

- les fluctuations de la teneur en matière grasse de l'alimentation en lait
- les fluctuations du débit
- les fluctuations de la température de préchauffage.

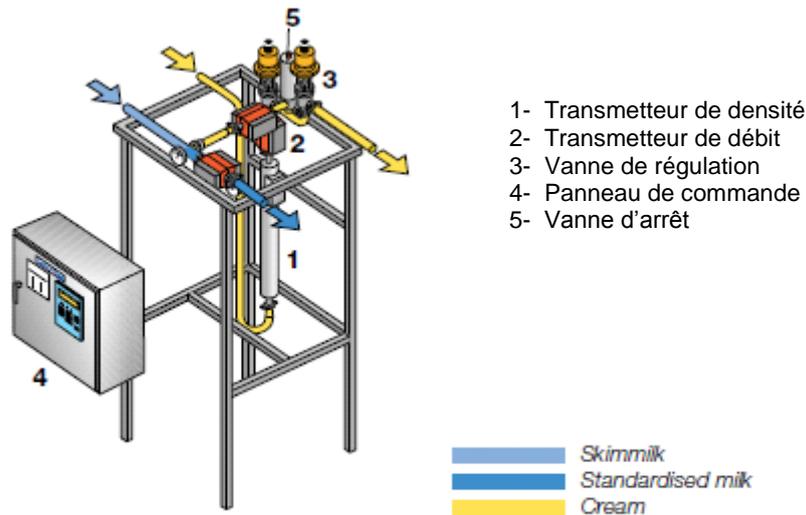


Figure 5 : Les systèmes de standardisation directe en ligne sont préassemblés.

Système de régulation de la matière grasse de la crème

La teneur en matière grasse de la crème en sortie du séparateur dépend du débit de crème. Elle est inversement proportionnelle au débit. Certains systèmes de standardisation utilisent donc des débitmètres pour réguler la teneur en matière grasse. Cette méthode est la plus rapide et, tant que la température et la teneur en matière grasse du lait entier avant séparation restent constantes, elle est également précise. La teneur en matière grasse sera faussée si ces paramètres varient.

Différents types d'appareils peuvent être utilisés pour la mesure continue de la teneur en matière grasse de la crème. Le signal issu de l'appareil règle le débit de crème de manière à obtenir la teneur en matière grasse correcte. Cette méthode est précise et tient compte des variations de la température et de la teneur en matière grasse du lait -Figure 6-.

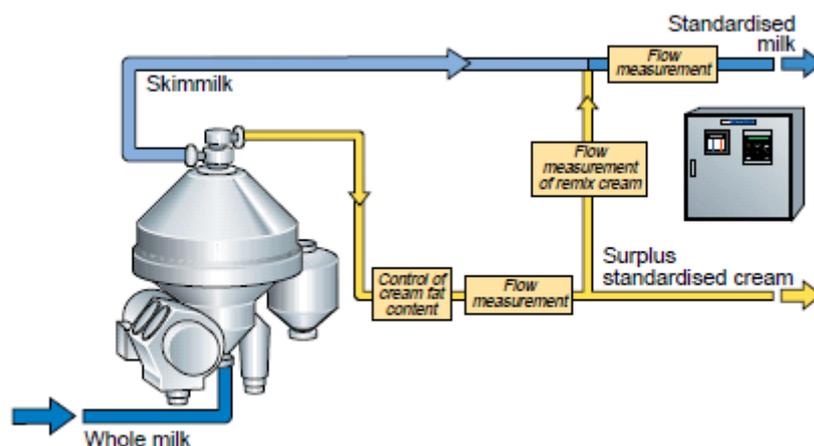


Figure 6 : Principe de standardisation directe en ligne de la crème et du lait.

Traitement thermique

Les objectifs du traitement thermique

Avant l'apparition du traitement thermique, le lait était une source d'infection, car il constitue un milieu de croissance parfait pour les micro-organismes. Le lait répandait parfois des maladies comme la tuberculose et le typhus.

Le terme "pasteurisation" commémore Louis Pasteur qui, au milieu du 19^e siècle, réalisa ses travaux fondamentaux sur l'effet létal de la chaleur sur les microorganismes et l'utilisation du traitement thermique comme technique de conservation. La pasteurisation du lait est un type de traitement thermique spécial, que l'on peut définir comme : "tout traitement du lait assurant la destruction certaine du bacille tuberculeux (B.T.), sans influencer nettement sur les propriétés physiques et chimiques."

Si l'on étudie l'histoire de la pasteurisation, il est bon de préciser que, bien que les savants du monde entier aient été à peu près d'accord sur le niveau de traitement thermique nécessaire, l'utilisation commerciale du procédé n'a pas été, pendant longtemps, contrôlée avec rigueur. Le lait était souvent chauffé à l'excès ou insuffisamment, ce qui lui conférait un coût de cuisson ou y laissait des B.T. parfaitement viables.

Outre les micro-organismes pathogènes, le lait contient également d'autres substances et micro-organismes susceptibles de gâter le goût et de raccourcir la durée de conservation de différents produits laitiers. Le traitement thermique a donc pour objectif secondaire de détruire, dans toute la mesure du possible, ces autres organismes et systèmes enzymatiques. Ceci exige un traitement thermique plus intense que celui nécessaire à la destruction des pathogènes.

Cet objectif secondaire du traitement thermique a acquis de plus en plus d'importance à mesure qu'augmentaient le nombre et la taille des laiteries. Du fait des intervalles plus longs entre livraisons, les micro-organismes disposent de davantage de temps pour se multiplier et pour engendrer des systèmes enzymatiques, malgré les techniques de réfrigération modernes. De plus, les constituants du lait se dégradent, le pH chute etc. Pour remédier à ces problèmes, le traitement thermique doit être appliqué aussi vite que possible après l'arrivée du lait à la laiterie.

Facteurs restrictifs du traitement thermique

Un traitement thermique intense du lait est souhaitable du point de vue microbiologique. Mais ce traitement entraîne aussi un risque d'effets nocifs sur l'aspect, le goût et la valeur nutritive du lait. Les protéines du lait sont dénaturées aux températures élevées. Un traitement thermique intense détériore donc considérablement les propriétés du lait propres à la fabrication du fromage. Un chauffage intense entraîne une modification du goût : tout d'abord un goût de cuit, puis un goût de brûlé. La combinaison de température et de durée choisie est donc une question d'optimisation, pour laquelle on devra tenir compte à la fois des effets microbiologiques et des problèmes de qualité.

Le traitement thermique étant devenu la partie la plus importante du traitement du lait et ses effets sur le lait étant désormais mieux compris, on a pu adopter différentes catégories de traitement thermique, comme le montre le **tableau 1**.

Combinaison de température et de durée

La combinaison de température et de temps de chambrage est très importante, car elle détermine l'intensité du traitement thermique. La Figure 1 illustre les courbes d'effet létal pour les bactéries coliformes et typhoïdes et les bacilles tuberculeux. Selon ces courbes, les coliformes sont tués si le lait est chauffé à 70°C et maintenu à cette température pendant environ une seconde. A une température de 65°C, il faut un temps de chambrage de 10 secondes pour tuer les coliformes. Ces deux combinaisons - 70°C/1 s et 65°C/10 s - ont donc le même effet létal. Les bacilles tuberculeux sont plus résistants au traitement thermique que les coliformes. Un temps de chambrage de 20 secondes à 70°C ou d'environ 2 minutes à 65°C s'impose pour assurer leur destruction intégrale. Le lait peut également contenir des microcoques résistants à la chaleur. En règle générale, ils sont totalement inoffensifs.

Tableau 1 : Principales catégories de traitement thermique dans l'industrie laitière

Procédé	Température	Durée
Thermisation	63 – 65°C	15 s
Pasteurisation LTLT du lait	63 °C	30 min
Pasteurisation HTST du lait	72 – 75 °C	15 à 20 s
Pasteurisation HTST de la crème etc.	>80°C	1 à 5 s
Ultra-pasteurisation	125 – 138°C	2 à 4 s
UHT (Stérilisation en continu), habituellement	135 – 140°C	Quelques secondes
Stérilisation en récipients	115 – 120°C	20 à 30 min

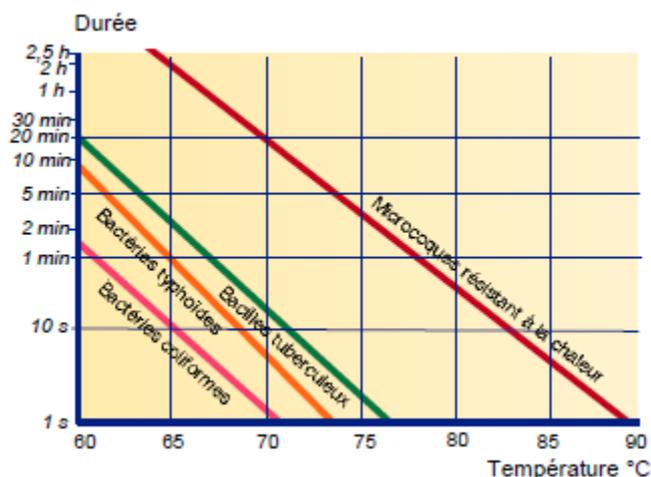


Figure 1 : Effet létal sur les bactéries.

Différents types d'échangeurs de chaleur

Echangeurs de chaleur à plaques

La plus grande partie du traitement thermique des produits laitiers s'effectue dans des échangeurs de chaleur à plaques. L'échangeur de chaleur à plaques (souvent

appelé PHE en abrégé) est constitué d'un ensemble de plaques en acier inoxydable, fixé sur un bâti.

Le bâti peut contenir plusieurs ensembles de plaques distincts - ou sections - dans lesquels s'effectuent les différentes phases du traitement : préchauffage, chauffage final et refroidissement. Le fluide de chauffage est de l'eau chaude et le fluide de refroidissement de l'eau froide, de l'eau glacée ou du glycol propylique, suivant la température du produit en sortie requise.

Les plaques sont cannelées selon un dessin destiné à assurer une transmission de chaleur optimale. L'ensemble de plaques est comprimé dans le bâti. Des points d'appui sur les cannelures écartent les plaques les unes des autres, formant de minces canaux entre elles.

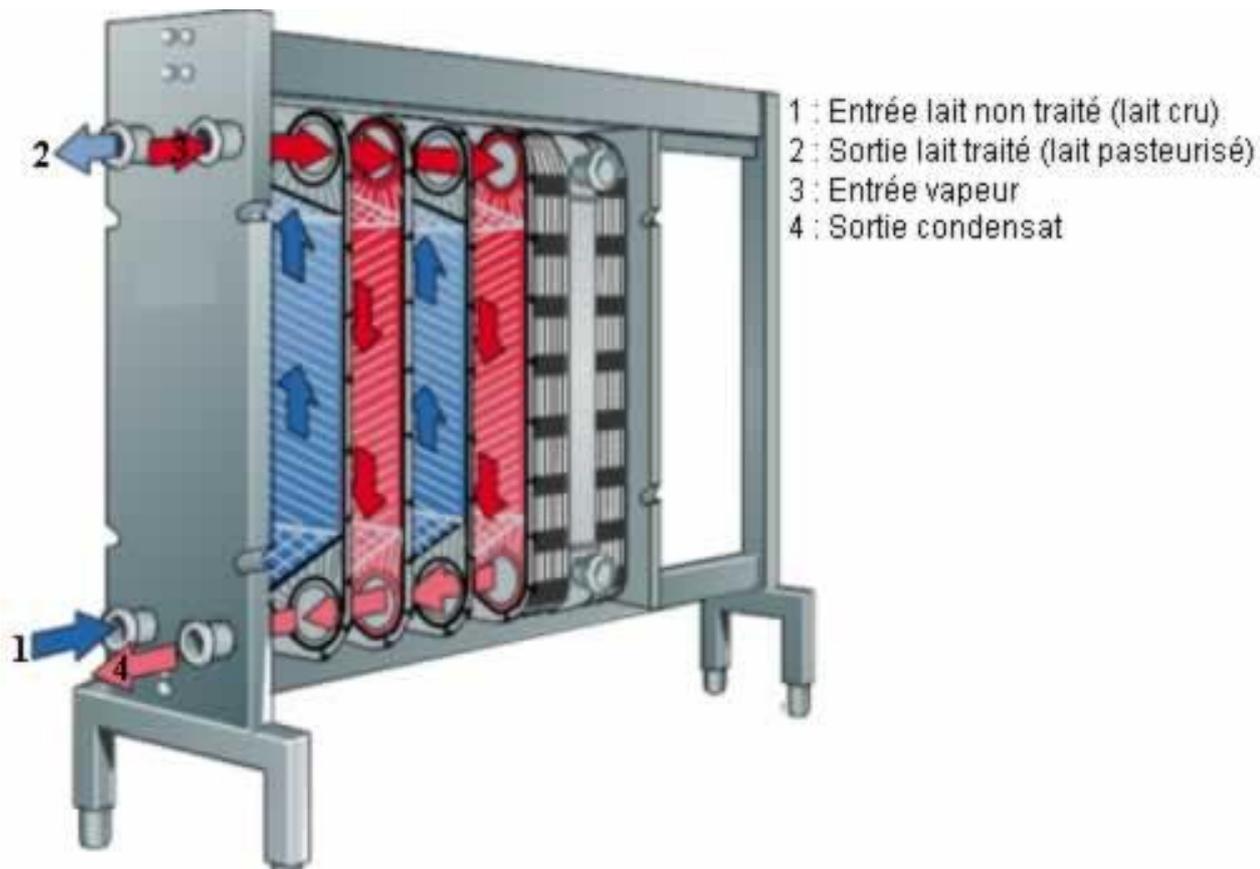


Figure 2 : Principe d'écoulement et d'échange thermique dans un échangeur de chaleur à plaque

Echangeurs de chaleur tubulaires

Les échangeurs de chaleur tubulaires (THE) s'utilisent dans certains cas pour la pasteurisation ou le traitement UHT des produits laitiers. A la différence des échangeurs de chaleur à plaques, l'échangeur de chaleur tubulaire, illustré sur la figure 3, ne présente aucun point de contact dans les conduits de produit et peut donc traiter des produits contenant des particules, jusqu'à une certaine taille. La taille maximale des particules dépend du diamètre du tube. L'échangeur de chaleur tubulaire peut également fonctionner plus longtemps entre deux nettoyages que l'échangeur de chaleur à plaques, lors du traitement UHT.

Du point de vue du transfert thermique, l'échangeur de chaleur tubulaire est moins efficace qu'un échangeur de chaleur à plaques.

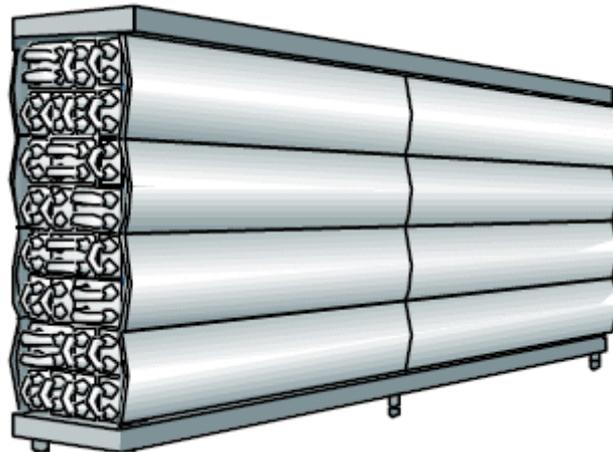


Figure 3 : Principe d'écoulement et d'échange thermique dans un échangeur de chaleur tubulaire

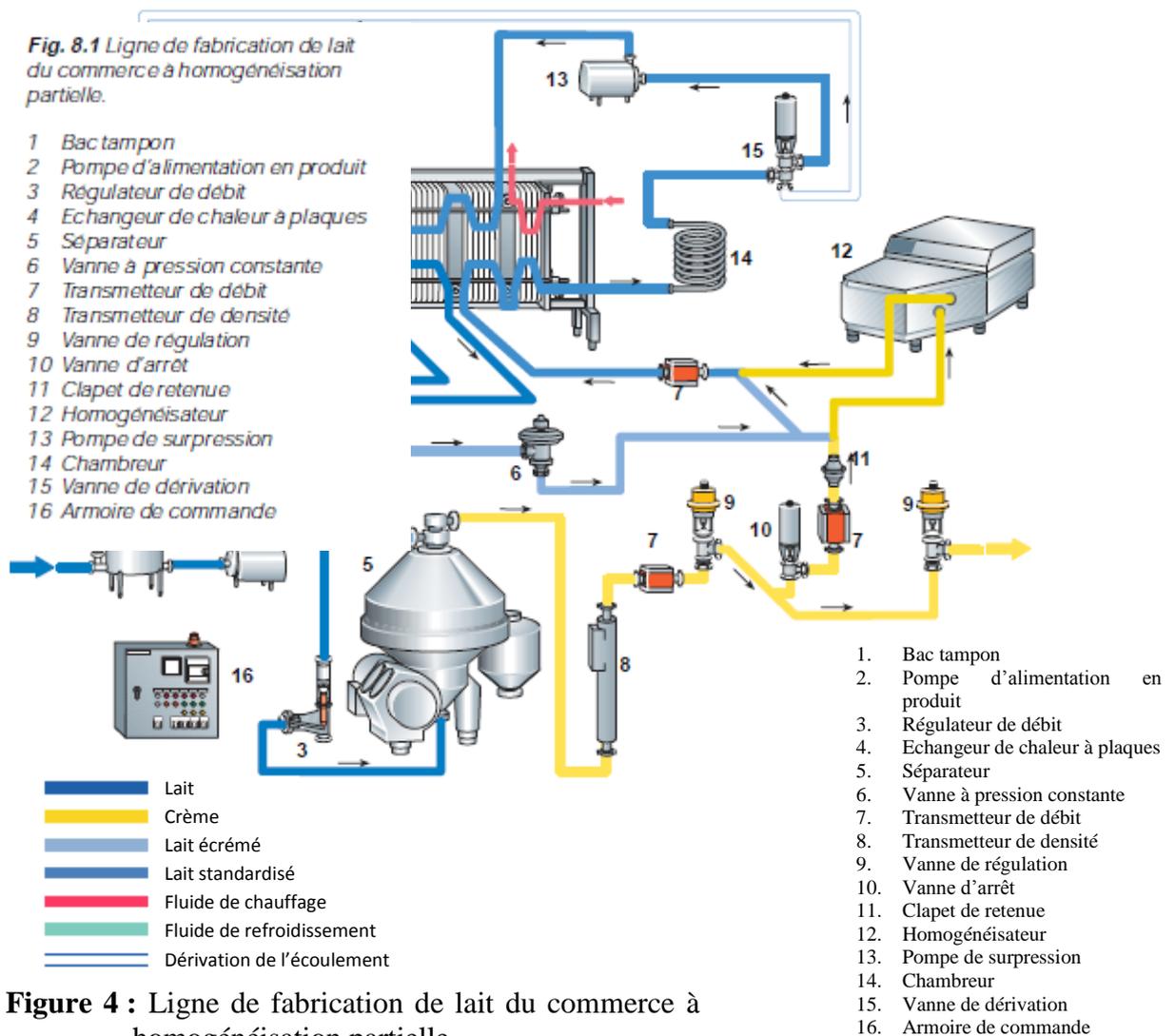


Figure 4 : Ligne de fabrication de lait du commerce à homogénéisation partielle.

Modifications chimiques et bactériologiques lors du traitement à température élevée

Lorsque du lait est maintenu à haute température pendant une période prolongée, il se forme certains produits de réaction chimique entraînant une décoloration (brunissement). Le lait prend en outre un goût de cuit et de caramel, avec parfois une sédimentation importante. On évite ces défauts, dans une large mesure, par un traitement thermique à température plus élevée, pendant une durée plus courte. Il est impératif de choisir une combinaison de température et de durée assurant une destruction satisfaisante des spores, tout en réduisant simultanément au niveau le plus faible possible la détérioration du lait par la chaleur.

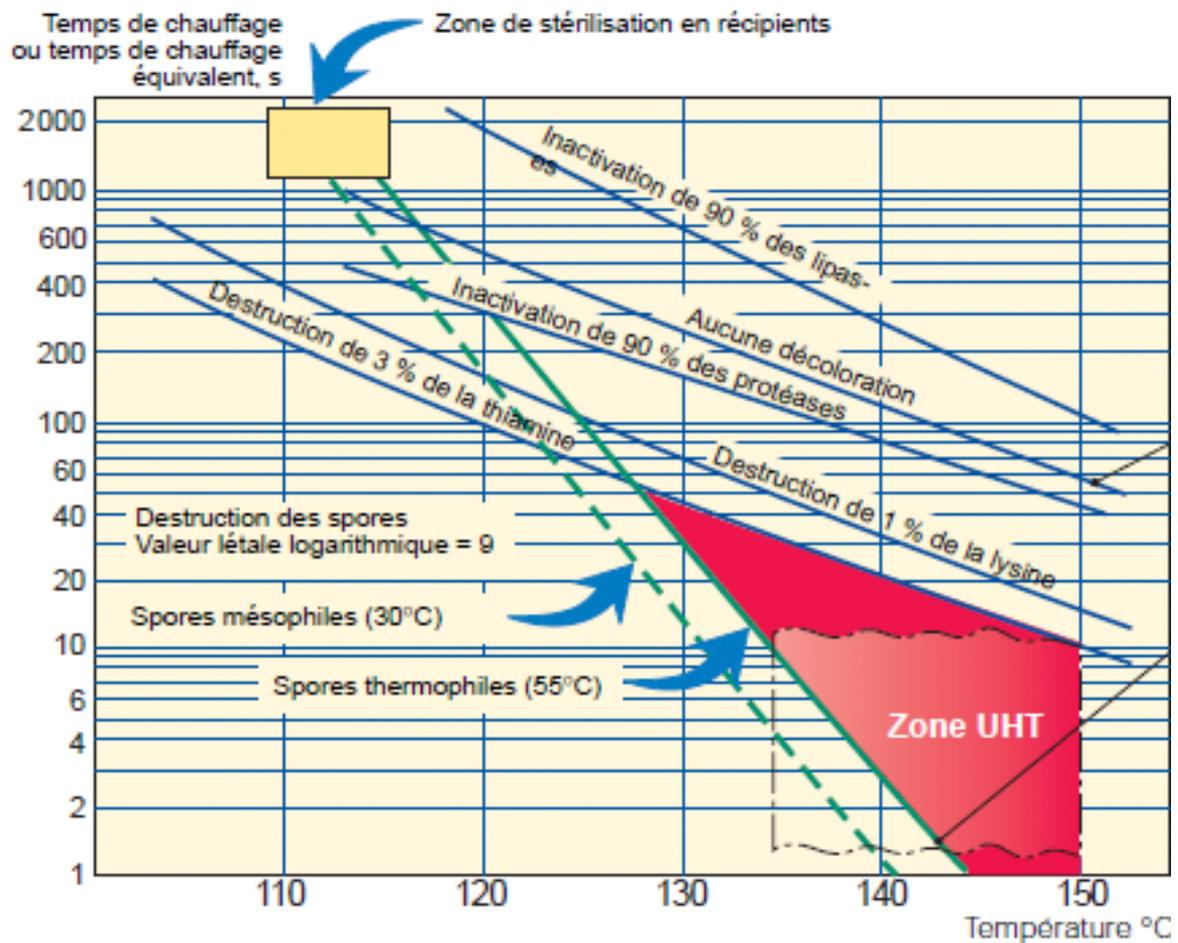


Figure 5 : Limites de destruction des spores et effets sur le lait. Les chiffres entre parenthèses (30 et 55°C) expriment les températures de croissance optimale des micro-organismes sporulés correspondants

Fabrication du yaourt

Définitions

Un **lait fermenté** est un produit laitier composé exclusivement de matières premières d'origine laitière (lait et constituants du lait), ayant subi une pasteurisation et une fermentation par des micro-organismes spécifiques et caractérisé par une teneur en acide lactique minimale (0,6 %). Il peut être additionné de certains ingrédients lui conférant une saveur spécifique (sucre, arômes, préparations de fruits), à condition que cette addition n'excède pas 30 % du poids du produit fini.

L'appellation **yaourt** est réservée aux produits fermentés avec les deux seules bactéries lactiques thermophiles *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* et *Streptococcus thermophilus*, présentant une teneur en acide lactique minimale de 0,7 % et contenant au moins 10 millions de bactéries vivantes par gramme de produit au moment de la vente au consommateur.

pour des **laits fermentés dits « probiotiques »**, c'est-à-dire contenant des bactéries d'origine intestinale comme *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus johnsonii*, *Bifidobacterium bifidum* et *Lactobacillus casei*, que la teneur en cette flore spécifique doit être supérieure ou égale à 1 million de bactéries vivantes par gramme de produit.

Les laits fermentés peuvent être classés en plusieurs catégories, selon les micro-organismes impliqués dans leur fermentation, leur teneur en matière grasse, le lait utilisé pour leur fabrication, leur texture, ou leur arôme (figure 1). Dans tous les cas, ils sont considérés comme des produits laitiers frais et doivent, à ce titre, présenter une durée de vie limitée et être maintenus au froid.

Tableau 2 : Caractères généraux des principales bactéries lactiques utilisées en fabrication de laits fermentés

Bactérie	Température optimale de croissance (°C)
<i>Leuconostoc</i> ssp.	18 à 30
<i>Lactococcus lactis</i>	27 à 32
<i>Streptococcus thermophilus</i>	39 à 44
<i>Lactobacillus bulgaricus</i>	40 à 46
<i>Lactobacillus acidophilus</i>	35 à 40
<i>Lactobacillus casei</i>	35 à 40

Pour bénéficier de l'appellation yaourt, la réglementation en France impose la seule présence des deux bactéries lactiques thermophiles *Streptococcus thermophilus* et *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*. À l'étranger et pour les autres laits fermentés, d'autres bactéries lactiques, notamment *Lactococcus lactis* subsp. *lactis*, ou même des levures (*Geotrichum candidum*) peuvent être utilisées.

Les ferments sont toujours utilisés en cultures mixtes, associant au moins deux espèces, et souvent plusieurs souches d'une même espèce bactérienne. Les critères de choix des souches reposent principalement sur des considérations technologiques (vitesse d'acidification, résistance aux bactériophages) et organoleptiques (production d'exopolysaccharides et de composés d'arômes, postacidification). Ainsi, selon le cas, il peut être recommandé de sélectionner et d'associer des souches présentant une

activité acidifiante élevée, une production de polysaccharides ou de composés d'arômes importante, ou une faible post-acidification. Dans le cas des laits fermentés probiotiques, le critère « santé » est également à considérer.

Croissance associative dans le yaourt

Lors de la production de yaourt, l'utilisation combinée de *S. thermophilus* et *L. bulgaricus* permet de valoriser l'interaction indirecte positive existant entre ces deux espèces. Cette interaction, appelée protocoopération, se traduit d'abord par une augmentation des vitesses d'acidification par rapport aux vitesses observées en cultures pures. Un accroissement des concentrations bactériennes est observé en parallèle. Elle induit également une amélioration de la production des composés d'arômes (acétaldéhyde notamment) et de la stabilité physique du produit (réduction des problèmes de synérèse).

La stimulation de *S. thermophilus* par *L. bulgaricus* est réalisée grâce à l'activité protéolytique du lactobacille, qui libère des petits peptides et des acides aminés au profit du streptocoque. En retour, *S. thermophilus* fournit de l'acide formique et du CO₂ qui, tous deux, vont stimuler la croissance de *L. bulgaricus*.

Lorsque d'autres bactéries, notamment probiotiques, sont associées aux bactéries du yaourt, d'autres interactions prennent place. Par exemple, les bifidobactéries sont stimulées par l'activité protéolytique des lactobacilles alors que *L. bulgaricus* limite le développement de *L. acidophilus* (phénomènes de compétition et d'inhibition). En outre, des phénomènes de croissance associative ont été démontrés entre *S. thermophilus* et *L. helveticus* ou *L. acidophilus*. Enfin, des mécanismes d'inhibition spécifique entre les souches, liés à la production de bactériocines, existent chez les bactéries probiotiques comme chez les bactéries du yaourt. Ces caractères sont, toutefois, très souches-dépendants. Il est donc nécessaire de vérifier la compatibilité des souches avant de les associer.

Principaux produits formés lors de la fermentation

Les conséquences des réactions du métabolisme carboné, qui se déroulent à l'intérieur de la cellule, sont nombreuses sur le produit final. Ainsi, l'acide lactique excrété va provoquer une diminution du pH du lait et donc son acidification. Cette acidification va permettre la gélification des caséines du lait (voir paragraphe 2.3) et modifier la texture du produit. Elle va également influencer sur la saveur des laits fermentés, dont la principale caractéristique est l'acidité. En outre, le caractère acide du produit va autoriser un allongement significatif de sa durée de conservation au froid, qui passe de quelques jours pour un lait pasteurisé à 24 jours pour un yaourt.

Les bactéries lactiques sont également responsables de la production de composés aromatiques qui contribuent à l'arôme des produits. Ces molécules sont des acides non volatils (acides lactique, pyruvique) et volatils (acides formique, acétique, butyrique) ou des composés carbonylés (acétaldéhyde, acétoïne, diacétyl). Si la plupart des travaux s'accordent sur l'importance de l'acétaldéhyde dans l'arôme du yaourt, il semble toutefois que de nombreux autres composés interviennent dans l'arôme global du produit.

Certaines souches de bactéries sont capables d'utiliser les substrats carbonés pour produire des polysaccharides exocellulaires (localisés à l'extérieur de la cellule). Ces polysaccharides sont généralement composés d'unités répétitives, linéaires ou branchées, de sucres de taille variable (di- à hepta-saccharides). Ils vont modifier la

viscosité du lait fermenté et présentent donc un grand intérêt pour les qualités texturales du produit.

Enfin, les bactéries lactiques peuvent produire des bactériocines, qui sont des agents antimicrobiens de nature protéique. Leur action est généralement de type bactéricide. Dans l'environnement acide créé par un lait fermenté, cette fonctionnalité est toutefois peu active.

Valeur nutritionnelle

Les yaourts et les laits fermentés, au même titre que le lait, sont des aliments intéressants d'un point de vue nutritionnel (richesse en calcium et en vitamines, équilibre entre les fractions glucidiques, protéiques et lipidiques). En outre, ils présentent un certain nombre d'avantages par rapport au lait non transformé.

Amélioration de la digestibilité du lactose

La présence de bactéries lactiques vivantes permet une meilleure assimilation du lactose chez les sujets déficients en lactase. La lactase bactérienne est en effet toujours active lors du passage des bactéries dans le tractus intestinal. Elle hydrolyse le lactose résiduel contenu dans le yaourt (30 g/L). Il a été établi que les bactéries doivent être vivantes dans le yaourt au moment de sa consommation pour que cette fonctionnalité soit active.

Amélioration de la digestibilité des protéines

L'assimilation des protéines du lait est meilleure s'il est consommé sous forme de yaourt ou de lait fermenté. En effet, du fait de l'activité protéolytique des bactéries lactiques, les produits fermentés contiennent plus d'acides aminés libres que le lait avant la fermentation. De plus, les protéines contenues dans ces produits sont plus digestes que celles du lait. Leur structure, plus ouverte après le traitement thermique et la coagulation, facilite l'action des enzymes protéolytiques pendant le transit intestinal.

Teneur en vitamines et sels minéraux

Le calcium contenu dans les yaourts et les laits fermentés présente une meilleure biodisponibilité que celui du lait. Différents travaux ont montré qu'il est mieux absorbé et utilisé dans le yaourt que dans le lait. Enfin la composition vitaminique du lait est modifiée pendant la fermentation, en particulier les concentrations en vitamines du groupe B (tableau 2). Il faut cependant souligner qu'il existe une forte variabilité inter-souches.

Laits fermentés

Laits fermentés glacés

Les laits fermentés glacés constituent, à la fois, une troisième alternative à l'augmentation de leur durée de vie, et des produits destinés au « plaisir » du consommateur. Ils se définissent comme des « glaces » caractérisées par un goût frais et acide. La fabrication de ces produits est simple : le yaourt refroidi est mélangé avec les ingrédients (fruits, sucres, émulsifiants, stabilisants), puis surgelé. D'un point de vue réglementaire, il n'y a pas de règles strictes de composition, sauf aux Pays-Bas, où le produit doit contenir au minimum 70 % de yaourt. Au niveau commercial, ces

produits sont bien développés et sont proposés sous des formes très diversifiées, en fonction de l'origine du lait, des microorganismes utilisés et des arômes apportés.

Yaourts à boire

Un yaourt à boire est un lait fermenté brassé, de faible viscosité. Il est normalement aromatisé à l'aide de jus ou de purées de fruits. Il est plutôt consommé comme une boisson rafraîchissante que comme un aliment.

Son élaboration fait intervenir une étape de brassage du coagulum, soit par passage dans des pompes centrifuges, soit par agitation mécanique dans le tank de fabrication. Une homogénéisation à faible pression peut également être effectuée. Certains produits peuvent être traités thermiquement (pasteurisation ou traitement UHT) pour augmenter leur durée de vie. Pour améliorer la stabilité physique du produit, et notamment réduire les phénomènes de synérèse, des stabilisants doivent être apportés dans le lait. Il s'agit généralement de gélatine, de carboxy-méthyl-cellulose ou de pectine. Enfin, toutes les espèces bactériennes, classiquement utilisées en production de laits fermentés (voir paragraphe 2.1.1), peuvent être employées pour leur fabrication.

Laits fermentés pétillants

Ces produits, appelés également laits carbonatés, se caractérisent par leur capacité à développer un pétilllement lors de leur consommation. Ils sont commercialisés sous forme liquide (yaourt à boire pétillant), séchée (développement du pétilllement lors de la réhydratation du produit), ou mixte (addition d'une poudre qui génère un pétilllement, au yaourt au moment de sa consommation). La fabrication des laits fermentés pétillants liquides est généralement réalisée par carbonatation du mix par du CO₂ ou par homogénéisation (4,8 Pa à 4 °C). Les produits secs sont additionnés de carbonates, de préférence de calcium, ce qui réduit leur caractère acide. Ces carbonates libèrent du CO₂ lorsque le produit est réhydraté. Il est aussi possible de reconstituer les produits secs dans de l'eau pétillante. Enfin, pour les yaourts commercialisés sous formemixte, la poudre carbonatée et additionnée de sucres, colorants et arômes, est hydratée au moment de la dégustation par le consommateur ce qui provoque un pétilllement immédiat du produit.

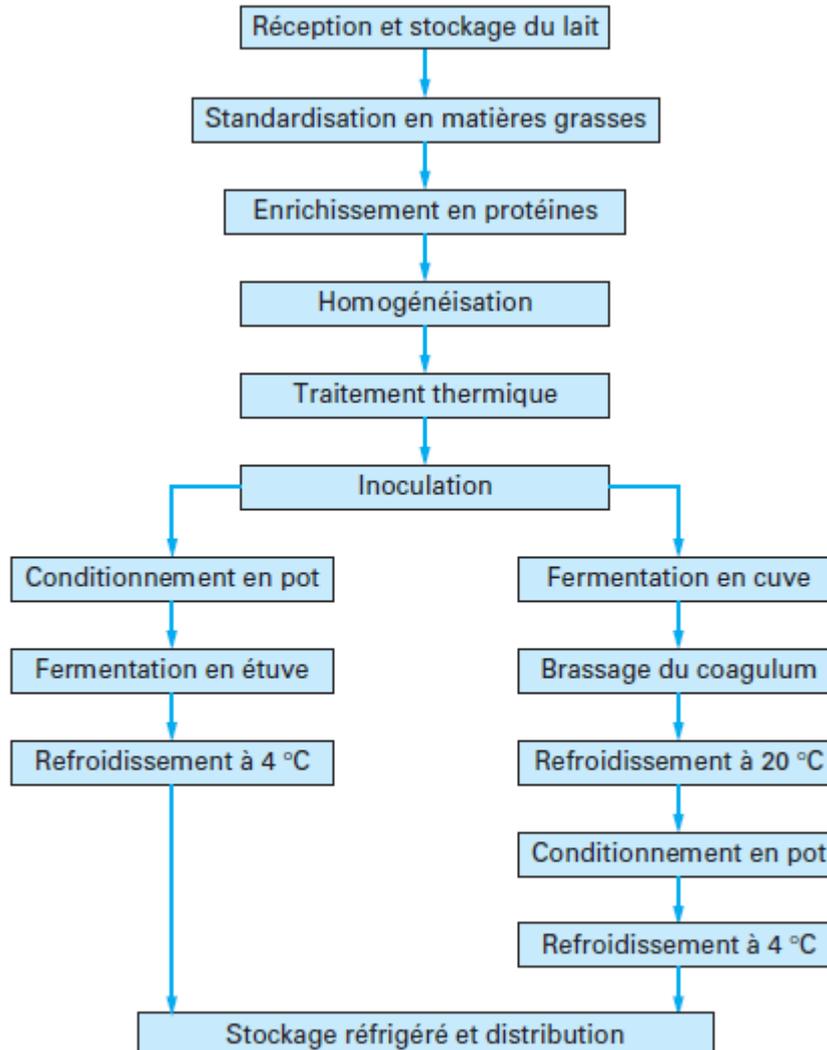


Figure 6 : Diagramme général de fabrication des yaourts et des laits fermentés

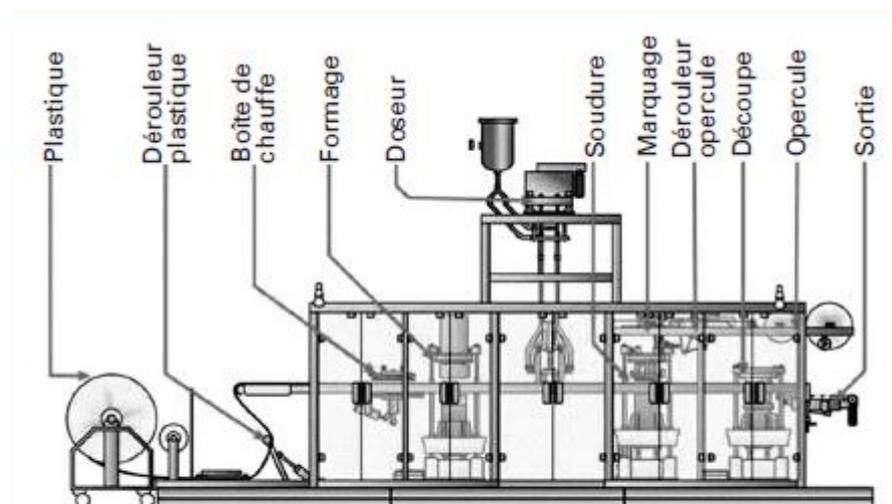


Figure 7 : Schéma de principe d'une thermofromeuse-remplisseuse en ligne

Préparation du Fromage

Les grandes étapes de la transformation

Préparation des laits

Aujourd'hui très peu de laits sont utilisés sous leur forme originelle. Seules certaines fabrications fromagères présentent cette caractéristique. Les fabrications industrielles exigent une collecte, un stockage et un ajustement en divers composants. Ces différentes manipulations vont modifier l'aptitude du lait à la transformation fromagère. La première modification apportée a été probablement la diminution du taux de matière grasse. En effet, dans le lait laissé au repos les globules gras remontent à la surface et cette couche peut être prélevée et utilisée sous forme de crème pour la fabrication de beurre, diminuant ainsi la quantité de matière grasse du lait destiné à la fabrication des fromages.

Différentes techniques récentes, bien maîtrisées, mais encore perfectibles rendent maintenant possible l'ajustement de la composition bactériologique et physico-chimique du lait. Cela est devenu une nécessité, d'une part, pour l'obtention d'une qualité définie saine et régulière et, d'autre part, pour assurer une productivité optimale des outils de transformation.

Modification de la flore du lait

➤ Le refroidissement du lait est réalisé dès la traite dans des cuves réfrigérées. Généralement, les traites de 2 à 3 jours y sont accumulées et conservées à 3-4 °C. Le lait de la traite est ajouté au lait stocké ce qui a pour effet de refroidir rapidement le lait chaud mais également de remonter légèrement pendant quelques heures la température du lait froid. Cette opération a pour but de conserver la qualité du lait et de ralentir la prolifération des espèces bactériennes présentes, essentiellement la flore mésophile lactique, responsable de l'acidification du lait, et la flore pathogène ou nuisible. Le lait collecté contient en général entre $3 \cdot 10^3$ et 10^5 germes par millilitre. Cependant, et surtout si la température n'est pas respectée, la flore psychrotrophe (capable de donner des colonies visibles sur milieu de culture en 10 jours à 7 °C) se développe et peut devenir dominante à la collecte. Ces bactéries comprennent différents genres et espèces qui produisent des enzymes lipolytiques et/ou protéolytiques souvent stables aux températures de traitement thermique des laits de fromagerie (63 °C pendant 30 s, 75 °C pendant 20 s). Les dégradations provoquées par ces enzymes induisent généralement des défauts de goût dans le fromage ainsi que des pertes de rendement si la population est importante. On estime le risque non négligeable si elle atteint ou dépasse 10^6 bactéries par millilitre.

➤ Pour assainir les laits, il est souvent pratiqué un traitement thermique plus ou moins intense selon le type de fromage : 63 à 66 °C pendant 30 s pour des fromages de type pâte pressée cuite, à 95 °C pendant 4 à 5 min pour des fromages de type pâte fraîche. Cette technique est réalisée à l'aide de pasteurisateurs à plaques ou tubulaires. Il est observé une réduction du nombre total de microorganismes variable selon le traitement et, lorsque l'intensité du chauffage atteint 72 °C pendant 15 s, la destruction des bactéries pathogènes. À 95 °C, on ne retrouve plus que les bactéries sporulées dont *Clostridium tyrobutyricum* responsable de gonflements indésirables sur les pâtes pressées cuites. Toutefois, une partie des enzymes provenant des cellules détruites par la chaleur reste active et peut intervenir au cours de l'affinage des fromages.

Les micro-organismes ayant une densité légèrement supérieure à celle du lait sont susceptibles d'être séparés par **centrifugation**. Le procédé de **bactofugation**, basé sur ce principe (force centrifuge 7 000 à 9 000 g), permet d'éliminer les spores butyriques contenues dans le lait : les pourcentages atteignent 90 à 95 % selon la température utilisée. Cette technique est en général doublée et associée à un traitement thermique.

L'utilisation de la **microfiltration sur membrane** s'est développée de façon considérable, apportant une alternative au traitement thermique. Un écrémage est tout d'abord réalisé puis le lait écrémé est microfiltré. La crème est traitée thermiquement puis recombinaison dans les proportions recherchées au lait écrémé microfiltré. Plusieurs types de membranes conviennent (tableau 1). Elles ont un diamètre moyen de pores de 0,8 à 1,4 µm. Le facteur de réduction volumique généralement pratiqué est de 20. Il peut être porté jusqu'à 200 si l'on fait subir au rétentat une seconde microfiltration ; ainsi le volume de rétentat final ne représente plus que 0,5 % du lait traité au lieu de 5 % dans le cas d'une simple microfiltration. Si la diminution du nombre de germes (tableau 1) peut se comparer à celle obtenue par traitement thermique des laits de fromagerie, la sélection ne se fait plus selon la résistance thermique de chaque espèce mais en relation avec la taille et le nombre des micro-organismes présents. Ils sont séparés du lait et ainsi leur équipement enzymatique n'est plus présent dans le lait microfiltré comme cela est partiellement le cas dans le lait chauffé. La rétention des microorganismes sporulés est très élevée (réduction décimale supérieure à 4) du fait de leur taille.

Tableau 1 : Membrane de microfiltration pour l'épuration du lait

Caractéristiques	Membrane		
	SCT Membralox	SCT Stérilox	SCT GP
Diamètre moyen des pores (µm)	1.4	1.4	1.4
Vitesse d'écoulement tangentielle (m/s)	7	7	7
Densité de flux de perméation à 50°C (L.h ⁻¹ .m ²)	680	500	500
Facteur de réduction volumique	20	20	20
Réduction décimale de la flore bactérienne(*)	2.5	3.5	3.5

$$(*) \text{ Réduction décimale} = \frac{\text{Lg nombre de germes du lait non traité}}{\text{Lg nombre de germes du lait traité}}$$

Après recombinaison avec la crème chauffée séparément, le lait de fromagerie, destiné par exemple à la fabrication d'un fromage dont le taux de matière grasse sur sec est de 45 %, contient environ 94 % des protéines sous leur forme native.

➤ Après avoir subi ces divers traitements, le lait contient peu de micro-organismes et certainement pas dans des proportions capables de conduire à la fabrication d'un fromage de qualité. Il est donc impératif de recréer un écosystème particulier et de maîtriser son développement pour chaque type de fromage.

Ajustement de la matière grasse

L'ajustement de la teneur en matière grasse du lait de fabrication est réalisé par mélange de lait écrémé et de lait entier ou de lait écrémé et de crème. La crème est séparée par centrifugation en continu dans des écrémeuses (vitesse de rotation : 4 000 à 5 000 tr/min) dans un bol constitué d'un empilement d'assiettes à une température supérieure à 30 °C, en général 50 à 65 °C.

Il est désormais possible de fractionner les globules gras du lait selon leur taille par microfiltration du lait ou de la crème sur membrane dont les pores ont un diamètre moyen compris entre 2 et 5 µm. Les fractions de globules ainsi calibrées, ajoutées à du lait écrémé constituent un lait de fabrication qui donne des textures particulières aux fromages.

Modification de la matière protéique

L'enrichissement en protéine des laits de fabrication fromagère répond à un triple objectif d'augmentation de rendement, de régularité de la qualité fromagère et d'amélioration de la productivité des outils de transformation. Il est réalisé soit par **addition de caséinate** (réglementée au niveau européen) **ou de protéines** de lactosérum dénaturées ou natives, soit par traitement sur membranes d'**ultra- ou de microfiltration** de la totalité ou d'une partie du lait. Par ultrafiltration, la totalité des protéines du lait participe à l'enrichissement alors que, par microfiltration, seules les caséines le font (tableau 2). Les teneurs en protéines finalement atteintes varient selon les critères de qualité recherchés et les équipements de fabrication : capacité des équipements membranaires, résistance mécanique des outils de découpe, performances des chaînes de moulage et d'égouttage. Elles se situent dans la plupart des cas entre 37 et 45 g · kg⁻¹.

Tableau 2 : Comparaison de l'ultra et de la microfiltration

Technique	Pourcentage des fractions azotées retenues (%)		
	Caséine	Protéines sériques	Azote non protéique
Ultrafiltration 10 à 150g.mol ⁻¹	100	90 à 100	0
Microfiltration 0.1 à 0.2 µm	100	10 à 15	0

L'élévation de la teneur en protéines par les techniques à membranes ou par addition de caséinate réduit de 20 à 40 % la consommation d'enzyme coagulante et accélère le raffermissement du coagulum ainsi que la fermeté maximale du gel. Il en résulte une diminution des pertes en fines lors des opérations de découpage et de travail du caillé ce qui contribue à accroître l'augmentation de rendement due à l'enrichissement en protéines solubles de la phase aqueuse du fromage.

La caséine additionnelle, apportée sous forme de rétentat d'ultra ou de microfiltration ou de caséinate, est retenue en totalité dans le fromage, excepté le caséinomaclopeptide (CMP) solubilisé par l'action de l'enzyme coagulante. La rétention des protéines solubles est fonction de leur degré de dénaturation. Ces protéines conduisent à des coagulums plus mous et plus humides et, ajoutées en grande quantité, présentent un risque de détérioration de la qualité des fromages : il est recommandé de se limiter à un enrichissement de 5 à 6 g · kg⁻¹. Lorsque le lait est chauffé, on observe une dénaturation des protéines sériques fonction de l'intensité du traitement. Les effets en technologie sont décelables à partir d'environ 62 °C. On

estime le taux de dénaturation des protéines sériques lors d'un traitement à 72 °C pendant 20 s à 3 à 8 % et à 40 à 60 % lors d'un traitement à 90 °C pendant 20 s selon le type de matériel et le mode de chauffage.

Réduction de la teneur en lactose

Pour limiter la production d'acide lactique dans certains fromages, on réalise la dilution de la phase soluble du caillé. En utilisant les techniques à membrane, l'ultrafiltration essentiellement, cet ajustement peut être pratiqué, soit sur le lait avant sa mise en fabrication, soit en réalisant une opération de diafiltration soit en concentrant le lait puis en ramenant sa teneur en caséine au taux recherché pour la coagulation (tableau 3) par dilution avec de l'eau et de la crème.

Tableau 3 : Exemple d'ajustement de la teneur en lactose

	Quantité (Kg)	Composition (g.Kg ⁻¹)			
		EST	MAT	MG	Lactose
Lait écrémé	0.99	92.4	35.2	0.5	51.0
Rétentat d'ultrafiltration	0.35	158	95.0	1	41.5
Crème	0.20	351	25.0	285	36.5
Eau	0.45	0	0	0	0
Lait recombéné	1.00	125.5	38.2	57.3	21.8
EST : Extrait Sec Total					
MAT : Matière Azotée Totale					
MG : Matière Grasse					

Modifications de la minéralisation des laits

La composition minérale des laits et surtout l'équilibre entre leur répartition dans la phase soluble et dans la phase colloïdale jouent un rôle prédominant dans la transformation du lait en fromage. L'**abaissement du pH** a pour effet d'augmenter la solubilisation du calcium et du phosphate micellaire. Selon le stade de minéralisation atteint au moment de la coagulation, l'organisation du réseau protéique se réalise de manière spécifique.

La diminution du pH est obtenue lors d'une étape appelée maturation microbienne : les bactéries lactiques transforment le lactose en acide lactique. Cependant pour atteindre une valeur précise du pH à l'emprésurage, il est parfois procédé à un ajustement par ajout d'anhydride carbonique, de glucono-delta-lactone ou de poudre de lait acidifié.

Lors de la pasteurisation du lait, une partie du calcium soluble précipite. L'équilibre, nécessaire pour obtenir une bonne coagulation, peut être rétabli par ajout de chlorure de calcium en solution. Un excès de calcium entraîne cependant des défauts de goût : il est souhaitable de ne pas dépasser une concentration totale de CaCl₂ de 0,10 g/L.

1.1.2 La coagulation

La coagulation est l'étape durant laquelle le lait passe de la forme liquide à l'état solide en formant un gel. C'est à ce moment que débute la formation d'un réseau protéique tridimensionnel. La coagulation, provoquée par une enzyme, la **présure**, résulte d'un processus en trois phases.

Une **phase primaire** ou enzymatique au cours de laquelle la caséine k est hydrolysée spécifiquement (liaison phénylalaninéméthionine PHE105-MET106) pour former la paracaséine k et le caséinomacropéptide (CMP) constitué de 65 acides aminés. La réaction d'hydrolyse obéit à la cinétique de Michaelis-Menten et, de ce fait, dépend de la concentration en enzyme. La réaction peut se produire à basse température. Le Q10 de la réaction (augmentation de la vitesse de la réaction enzymatique pour une élévation de 10 °C) est de 1,8 à 2,0 pour une température comprise entre 0 et 37 °C.

Une **phase secondaire** pendant laquelle les micelles de caséine, dont la charge est modifiée après hydrolyse de la caséine k, s'agrègent pour former le gel appelé caillé. Cette phase exige la présence d'ions calcium et est très dépendante de la température. La phase débute lorsque le taux d'hydrolyse moyen est de l'ordre de 85 %.

Une fois le gel obtenu, la coagulation se poursuit en une **phase tertiaire** d'organisation et de réticulation du gel mettant en jeu les liaisons intermoléculaires, dénommée phase de durcissement en fromagerie.

Ces différentes étapes peuvent être suivies par des méthodes rhéologiques permettant de mesurer le temps de coagulation, la vitesse d'organisation du gel ainsi que sa fermeté.

À l'origine, l'enzyme utilisée en fromagerie était une préparation de présure contenant des enzymes présentes dans l'estomac du veau (chymosine et pepsine essentiellement). Aujourd'hui, sous la dénomination présure on rencontre différents produits coagulants d'origine animale (contenant chymosine et pepsine dans des proportions allant de 75 à 25 %), d'origine fongique (protéases acides extraites de moisissures) ou d'origine fermentaire obtenus par voie génétique (chymosine). Les présures du commerce sont généralement titrées soit en quantité d'enzyme, soit en force de la présure (équivalente à un rapport enzyme/substrat) : la présure utilisée le plus couramment possède une force de 1/10 000 c'est-à-dire qu'un litre de cette présure coagule 10 000 litres de lait à 35 °C en 40 min. L'acidité du lait favorise l'action de la présure tout d'abord en accélérant la phase de formation du gel (temps de coagulation 4 fois plus court à pH 6,0 qu'à pH 6,7), ensuite en déterminant les liaisons intermoléculaires qui donneront au caillé ses caractéristiques propres : composition, rhéologie, porosité. Ainsi, selon l'acidité du lait au moment de la coagulation, on distingue, en pratique fromagère, trois types de coagulation :

— la **coagulation-présure** qui s'applique lorsque l'acidité est restée pratiquement au niveau de celle du lait.

Lorsque la dose de présure est forte : 30 à 40 mL (force 1/10 000) pour 100 litres de lait et la température voisine de 33 °C ou même supérieure. Le coagulum obtenu est élastique, souple et fortement minéralisé. Des moyens mécaniques sont nécessaires pour éliminer le sérum ; développée de façon intense (pH compris entre 5,5 et 4,6).

Lorsque la dose de présure est faible : 1 à 3 mL pour 100 litres de lait, et la température relativement basse : 18 à 28 °C. Le coagulum est friable, déminéralisé, poreux et les protéines fortement hydratées ;

— la **coagulation mixte** obtenue lorsque le lait présente au moment de la coagulation une acidité moyenne (pH 6,5 à 5,5) et qu'une dose de présure intermédiaire est utilisée (10 à 25 mL pour 100 litres de lait en général). Cet éventail de solutions est une des origines de la diversité fromagère.

Dans la transformation laitière ces trois types de coagulation sont mis en oeuvre dans des conditions précises (tableau 4) pour fabriquer des laits fermentés ou emprésurés et les fromages.

Les traitements thermiques subis par les laits ont une influence sur la coagulation. Le chauffage induit la formation de complexes entre la caséine k et la b-lactoglobuline et/ou l'a-lactalbumine. Ces complexes, s'ils n'empêchent pas l'accès de la chymosine aux liaisons PHE105-MET106 de la caséine k et par conséquent son hydrolyse, perturbent fortement les phases d'agrégation et de réticulation. Les temps de coagulation sont ainsi allongés et le caillé est plus mou. Des correctifs peuvent être apportés en augmentant la teneur en caséine par ultra- ou microfiltration. Ainsi, il est possible de coaguler le lait ayant subi un traitement UHT à 140 °C pendant 4 s, à condition de doubler sa teneur en protéine par ultrafiltration.

Tableau 4 : Différents gels rencontrés en technologie laitière et leurs modes d'obtention

		Lactique		Mixte	Présure	
		Pur	Dominant		Dominant	Pur
Mode opératoire	Apport de ferment lactique	Oui	Oui	Oui	Oui	Facultatif
	Apport de coagulant (en mL/100L)	Non	1 à 8	16 à 30	20 à 40	40 à 50
	pH emprésurage	-	6.0 à 6.7	6.15 à 6.45	6.55 à 6.75	6.7 à 6.8
	Température de coagulation	20 à 43°C	18 à 28°C	28 à 38°C	30 à 40°C	40 à 45°C
	Temps de coagulation totale	3 à 18 h suivant ferment et température	14 à 36 h	20 à 2.5 h	25 à 45 min	10 à 15 min
pH du gel à l'égouttage		Absence d'égouttage	pH < 4.6	5.8 < pH < 6.45	pH > 6.50	Absence d'égouttage
Exemple de produits		Laits fermentés (yoghourt)	Pâtes fraîche Quark, cottage, chaource	Pâte molles traditionnelles (camembert, brie) Pâtes persillées..	Pâtes molles stabilisées Pâtes pressées non cuites et cuites	Lait emprésurés aromatisés
			Fromages			

1.1.3 L'égouttage et le salage

✚ L'égouttage est l'étape de concentration différentielle des éléments du lait. Les caséines forment une trame protéique à mailles fines retenant les particules telles que les globules gras et les microorganismes. Les liaisons moléculaires qui se créent entre les caséines et les minéraux provoquent une contraction du réseau qui expulse l'eau et les solutés (protéines sériques, minéraux solubles, lactose, composés azotés non protéiques). Le coagulum peut ainsi être assimilé à une « éponge dynamique » dont la trame subirait des modifications continues de structure dues à l'accroissement progressif de forces internes de contraction et de forces externes d'expulsion provoquées par des traitements mécaniques. La modulation contrôlée de ces deux types de force permet au fromager de parfaire la diversité fromagère.

Sous l'effet conjugué de la présure, de l'acidité et de la température, il se produit une contraction spontanée du coagulum expulsant le lactosérum : on l'appelle la **synérèse**. L'égouttage s'effectue alors par gravité. Cependant, il est relativement lent et limité et, pour l'accélérer, le fromager dispose de différents moyens d'intervention :

— la **centrifugation** : l'utilisation de la force centrifuge, dans des séparateurs, accélère le processus d'écoulement par gravité ;

— le **découpage** : l'exsudation a lieu au niveau des interfaces caillé/sérum ; en créant plus d'échange par la découpe du caillé, l'égouttage est favorisé. Le découpage peut être grossier (à la louche), régulier (en cube de 1 à 2 cm d'arête) ou fin (grains de même taille). Dans certains cas, le brassage du mélange sérum-morceaux de caillé est pratiqué pour empêcher l'agglomération de ces derniers et accentuer l'égouttage.

— le **pressage** : lorsque l'on recherche une teneur en eau faible dans le fromage, le caillé est pressé en moule après le retrait de la plus grande partie du lactosérum ; l'égouttage sous presse ne représente généralement que 2 à 5 % du lactosérum total ;

— le **retournement** : il permet d'évacuer le lactosérum accumulé dans des cavités, de rendre plus homogène la teneur en eau aux différents endroits et d'accélérer l'égouttage ;

— le **traitement thermique** : la chaleur favorise les réactions dans le coagulum ce qui accentue la capacité de la trame protéique à se contracter, diminue la viscosité du sérum et a pour effet de favoriser l'expulsion du sérum. Le chauffage est généralement pratiqué (jusqu'à un maximum de 55 °C) lorsque l'on recherche une teneur en matière sèche élevée dans le fromage.

L'art du fromager consiste à utiliser l'une ou l'autre ou une combinaison de ces techniques en fonction du caractère présure ou lactique du coagulum. Dans le cas d'un caractère présure, il est recherché un égouttage précoce avec acidification limitée et une mise en oeuvre du découpage, du pressage et parfois du chauffage.

Dans le cas d'un caractère acide, l'acidification étant terminée, l'écoulement se fera essentiellement par gravité avec retournement ou par centrifugation lorsque la texture recherchée le permet. Les fromages à caillé mixte sont obtenus à partir d'un coagulum à tendance plutôt présure au sein duquel se développe une acidification notable au cours de l'égouttage. Le mode de découpage et les cinétiques d'acidification et d'égouttage jouent dans ce cas un rôle capital pour le réglage de la minéralisation du fromage. En effet, dans le coagulum en cours d'acidification, le calcium se solubilise progressivement et est évacué dans les mêmes proportions que le lactosérum. L'exemple de la figure 2 illustre bien le rôle que peut jouer le mode de

découpage du caillé sur la cinétique d'égouttage, la cinétique d'acidification et les conséquences sur la minéralisation du lactosérum et du fromage en fin d'égouttage.

✚ La composition du fromage jeune est finalement ajustée au cours de l'opération de salage. Les fromages sont généralement salés soit par saupoudrage de sel sec à la surface, en deux étapes dans les technologies anciennes ou en une seule dans les technologies industrielles, soit par trempage dans une saumure souvent saturée pendant un temps variant de 10 min à 48 h selon la taille du fromage et le taux de sel recherché. Dans certains cas, le sel est introduit directement dans la masse du fromage. Les teneurs en sel sont de l'ordre de 1 à 2 % pour la plupart des fromages, cependant certains fromages orientaux conservés en saumure ont des teneurs beaucoup plus élevées (8 à 15 %). Après le salage, le sel est concentré dans des couches superficielles et ce n'est que progressivement qu'il va migrer vers l'intérieur.

Plusieurs rôles sont attribués au chlorure de sodium ainsi incorporé au fromage. Il apporte le goût salé et possède la propriété d'exalter ou de masquer le goût de certaines substances formées au cours de la maturation. Il modifie l'hydratation des protéines ce qui a pour effet de favoriser le drainage du lactosérum et se traduit ainsi par un égouttage supplémentaire et la formation d'une croûte à la surface du fromage. L'égouttage ainsi réalisé, associé à la présence accrue de chlorure de sodium, a une incidence sur l'activité de l'eau du fromage qui va conditionner l'évolution microbiologique à l'intérieur de la pâte comme en surface ainsi que les réactions chimiques et biochimiques. De ce fait, c'est l'affinage du fromage qui est préparé.

1.1.4 L'affinage

L'affinage est un ensemble de réactions enzymatiques qui va progressivement transformer les constituants du fromage jeune obtenu en fin d'égouttage en une multitude de composés rendant la pâte plus ou moins onctueuse et fondante et lui conférant son arôme et son goût. Il débute avant même la fin de l'égouttage puisque le lactosérum de fin d'égouttage contient des produits de dégradation des caséines (CMP, fraction peptidique, NPN) pour se terminer sur la table du consommateur.

Les **enzymes** responsables de la transformation ont trois origines : celles présentes naturellement dans le lait, les agents coagulants ajoutés et celles des différents micro-organismes bactériens, levures et moisissures. En agissant sur les principaux constituants du lait, le **lactose**, les **triglycérides** et les **protéines**, elles modifient profondément la texture du fromage jeune et contribuent à former tout un ensemble de composés qui donnent au fromage affiné sa saveur et son arôme. La figure 3 schématise l'ensemble des réactions intervenant lors de la transformation.

Le **lactose** est hydrolysé sous l'action de nombreux micro-organismes. La molécule, après pénétration dans la cellule du microorganisme est transformée en glucose et galactose puis dégradée par de nombreuses voies métaboliques. Le métabolite majeur obtenu est l'acide lactique sous la forme lactate jusqu'à 15 g par kg de fromage. Son rôle est déterminant puisqu'il règle le pH de la pâte, conditionne l'activité microbienne et enzymatique ainsi que les réactions chimiques et biochimiques. Parmi les conséquences d'un excès d'acide lactique nous pouvons citer:

- la limitation du développement des bactéries nuisibles (exemple : coliformes) ainsi que l'inhibition du développement des microcoques et des corynébactéries lorsque le pH est inférieur à 4,8 ;
- le développement des bactéries propioniques et la formation de l'ouverture (trou) dans une pâte de type gruyère, impossible à pH inférieur à 5,0 et en revanche très rapide à pH supérieur à 5,35 ;

- l'apparition de défaut d'amertume dans le cheddar à pH inférieur à 4,95 ;
- une sensation d'acidité prononcée dans des fromages frais lorsque le pH descend en dessous de 4,5.

D'autres voies de transformation du lactose conduisent à la formation de composés divers tels que : CO₂, eau, éthanol, acides acétique, formique et succinique, alcools, galactose. Le lactate est également transformé en acides acétique et propionique et en CO₂ par la fermentation propionique dans certains fromages à pâte cuite. La fermentation butyrique par *Clostridium tyrobutyricum* conduit à la formation d'acides butyrique et acétique, de CO₂ et H₂ et, lorsqu'elle est importante, elle nuit à la qualité de la texture et au goût des fromages.

La **matière grasse** subit également des transformations. Dans le lait, la matière grasse, essentiellement composée de triglycérides, se trouve sous forme globulaire protégée par une membrane naturelle complexe, peu sensible aux actions des enzymes. Cependant, les globules sont relativement fragiles et les plus volumineux peuvent être scindés, lors de la transformation fromagère, en globules de plus petite taille et, dans ce cas, leur membrane est en partie composée de caséine qui peut être hydrolysée lors du processus d'affinage. La réduction de taille se réalise par des cisaillements ; elle peut être recherchée, comme au cours de l'homogénéisation, ou inhérente à la technique, comme lors de pompages et du passage dans les tuyauteries. L'action des **lipases** est alors plus aisée. Elles sont :

- d'origine naturelle : la lipoprotéine lipase présente dans le lait cru est thermolabile ; d'où une réduction importante de son activité après un chauffage de 70 °C pendant 16 s, et destruction à 80 °C pendant 10 s ;

- d'origine microbienne : les bactéries lactiques sont peu lipolytiques mais suffisamment pour participer à la caractérisation des fromages. Les levures et *Geotrichum candidum* ont des activités modérées et variées selon les espèces dans des zones de pH pouvant aller de 4,5 à la neutralité. Les moisissures sont les micro-organismes les plus lipolytiques dans les fromages. Les *Penicillium camemberti* dans le cas des pâtes à croûte fleurie et roqueforti dans le cas des bleus ont des activités lipasiques plus marquées puisque l'on peut trouver jusqu'à 22 et 27 mEq acide pour 100 g de matière grasse respectivement dans le camembert et le roquefort ;

- ajoutées au lait de fabrication lorsqu'une action lipasique intense est recherchée dans un petit nombre de fromages.

Les acides gras formés peuvent ensuite être modifiés par les micro-organismes, des enzymes ou la combinaison d'enzymes. Les composés les plus souvent identifiés dans les fromages sont des esters, des méthylcétones, des thioesters, des alcools secondaires, des lactones.

Les **protéines** subissent une série de transformations qui font apparaître des fractions peptidiques de masse moléculaire de moins en moins élevée, des acides aminés libres et des composés résultant du catabolisme de ces derniers. Ces transformations participent à la formation de la texture et de l'arôme du fromage. Trois catégories d'enzymes : les protéases coagulantes, la plasmine et les protéases et peptidases des micro-organismes, participent à la protéolyse.

Différentes méthodes analytiques permettent de caractériser la dégradation des protéines :

- les précipitations fractionnées : pour identifier les caséines intactes ou peu dégradées (insolubles à pH 4,6), les petits peptides et acides aminés (solubles dans l'acide trichloracétique à 12 %), l'azote ammoniacal ;

- les techniques électrophorétiques et chromatographiques ;

- les résines échangeuses d'ions pour séparer les acides aminés avant dosage.

Les faibles quantités d'enzymes coagulantes retenues dans le fromage sont suffisantes pour jouer un rôle. Elles sont responsables de l'apparition de peptides à haut et bas poids moléculaire. La plasmine produit des peptides essentiellement dans les fromages à pâte pressée cuite.

Les bactéries lactiques, du fait de leur lyse, ont une activité endopeptidasique plus forte que celle exercée par les enzymes coagulantes, elles augmentent donc la quantité d'azote soluble : petits peptides et acides aminés. Elles ont par conséquent un rôle complémentaire à celui des enzymes coagulantes et de la plasmine. Les systèmes enzymatiques des micro-organismes peuvent transformer les acides aminés par des réactions en chaîne en une multitude de composés qui participent au goût et à l'arôme du fromage. Pour diriger et accélérer l'affinage, il a été envisagé d'ajouter des enzymes exogènes (protéases ou lipases) ou des levains atténués (bactéries ayant subi un léger traitement thermique). L'accélération de la protéolyse est observée mais il est plus difficile de parvenir à une augmentation de la teneur en petits peptides et en acides aminés ainsi qu'à l'intensification de la flaveur. Ces méthodes trouvent ainsi leur limite pour le moment.

Le fromager dispose de plusieurs moyens pour tenter d'**orienter l'intensité de toutes ces réactions enzymatiques** : humidité du fromage, température d'affinage, pH, composition de l'atmosphère.

➤ **L'activité de l'eau (a_w)**, influencée par la teneur en eau et en sel essentiellement, est un facteur important du développement bactérien et de l'action des enzymes. En général, la diminution de l' a_w a une action sélective sur certains micro-organismes, essentiellement ceux présents en surface : à faible a_w (0,8), il est constaté une inhibition de *Geotrichum candidum*, des levures et des bactéries corynéformes.

➤ La **température** a également une très forte influence sur la croissance bactérienne et l'activité des enzymes. Les températures d'affinage courantes, 4 à 24 °C, sont inférieures aux températures optimales de développement des bactéries lactiques (25 à 45 °C) et de l'activité des enzymes (30 à 45 °C). Cependant, il ne suffit pas d'augmenter la température pour accélérer uniformément toutes les réactions. Il convient de mettre en place un cycle de température permettant le développement optimal de la dégradation des protéines et de la matière grasse et des qualités gustatives propres à chaque fromage.

➤ du fromage est un élément régulateur de la croissance des micro-organismes. Le **pH** En dessous de pH 5,0 seules les bactéries lactiques, les levures, les moisissures se multiplient. Ces deux derniers micro-organismes sont souvent utilisés pour leur activité désacidifiante pour remonter le pH de surface et ainsi permettre la croissance d'autres espèces : *Brevibacterium linens* par exemple.

➤ Des **échanges** ont lieu **entre l'atmosphère et la surface du fromage**. Le développement des micro-organismes tels que levures, moisissures, micrococcacées, bactéries corynéformes exige la présence d'oxygène. Cependant, le *Penicillium roqueforti* est capable de se développer dans une atmosphère pauvre en oxygène (5 %). La présence d'ammoniac et/ou de gaz carbonique dans les hâloirs participe à l'orientation de l'affinage. De même, la composition de l'atmosphère confinée comprise entre le fromage et son emballage joue un rôle essentiel, ce qui explique le développement de matériaux complexes permettant des échanges limités et orientés entre l'atmosphère à la surface des fromages et l'ambiance.