



**TECHNIQUES  
DE L'INGÉNIEUR**

Réf. : **F6305 V1**

Date de publication :  
**10 septembre 2001**

# Procédés de transformation fromagère (partie 1)

Cet article est issu de : **Procédés chimie - bio - agro | Agroalimentaire**

par **Henri GOUDÉDRANCHE,**  
**Bénédicte CAMIER-CAUDRON, Jean-Yves GASSI,**  
**Pierre SCHUCK**

**Pour toute question :**  
Service Relation clientèle  
Techniques de l'Ingénieur  
Immeuble Pleyad 1  
39, boulevard Ornano  
93288 Saint-Denis Cedex

**Par mail :**  
infos.clients@teching.com  
**Par téléphone :**  
00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **09/09/2022**

Pour le compte : **7200050014 - enilbio // beatrice AUBERT // 37.71.146.142**

© Techniques de l'Ingénieur | tous droits réservés

# Procédés de transformation fromagère (partie 1)

par **Henri GOUDÉDRANCHE**  
**Bénédicte CAMIER-CAUDRON**  
**Jean-Yves GASSI**  
**Pierre SCHUCK**

*Ingénieurs au Laboratoire de recherches et de technologie laitière (LRTL, INRA)*

<b>1. Principes de transformation fromagère</b> .....	F 6 305 - 2
1.1 Les grandes étapes de la transformation .....	— 2
1.2 Les rendements fromagers.....	— 10
<b>2. Procédés de fabrication des fromages frais</b> .....	— 11
2.1 Réglementation et hygiène.....	— 11
2.2 Préparation du coagulum .....	— 12
2.3 L'égouttage .....	— 13
2.4 Cas particulier des laits de chèvre et de brebis : le report du caillé .....	— 14
2.5 Nouveaux procédés : ultrafiltration de lait coagulé.....	— 14
<b>3. Procédés de fabrication des fromages à pâte molle</b> .....	F 6 306
<b>4. Procédés de fabrication de fromage à pâte pressée</b> .....	F 6 306
<b>5. Procédés de fabrication de lactosérum (wey cheese)</b> .....	F 6 306
<b>Pour en savoir plus</b> .....	Doc. F 6 307

**L**e lait est l'aliment du nouveau-né. Sa composition est propre à chaque mammifère et satisfait aux premiers besoins alimentaires. Cependant, des substitutions sont possibles et en particulier des laits d'espèces animales ont été adaptés aux besoins de l'enfant. Très vite, l'homme a compris que le lait produit par les animaux pouvait constituer une partie de son alimentation. Lorsqu'il a voulu le conserver il s'est heurté à sa fragilité. En effet, de par sa composition favorable au développement de nombreux micro-organismes qui peuvent l'altérer et le déstabiliser, il change d'aspect. Il se transforme en gel qui laisse s'échapper un liquide clair de couleur jaunâtre. En ce faisant, les éléments les plus nutritifs se retrouvent sous certaines conditions en une masse acide de plus longue conservation que le lait. Celle-ci peut évoluer vers des produits possédant des goûts différents et variés. La maîtrise de ces transformations va conduire à ce que nous appelons aujourd'hui le fromage.

Progressivement, des techniques de transformation se sont développées, souvent autour de pratiques régionales guidées par la nature du lait disponible, les habitudes alimentaires et le contexte socioculturel. L'accumulation des connaissances en science du lait et la maîtrise des procédés de transformation font qu'aujourd'hui on dénombre de très nombreuses variétés de fromages possédant chacune sa propre originalité. Il est d'usage, pour les comparer ou pour en faciliter le commerce, de les classer en grandes catégories selon différents

critères tels que l'espèce animale, la teneur en eau, le degré d'affinage, le type de croûtage, les moisissures apparentes, la texture, les techniques de fabrication. Différentes classifications existent selon l'ordre et l'importance accordée aux critères de sélection.

De nos jours, la transformation du lait en fromage est devenue une activité économique importante. Le fromage est le principal mode de consommation du lait en France. Ainsi, en 1999, la valorisation du fromage (valeur départ usine) représentait 43 % de la valorisation totale des laits produits, tandis que 34 % des laits collectés étaient transformés en fromages [1]. Cette même année, il était produit 1 685 425 tonnes de fromage, 94,3 % étaient au lait de vache, 3,3 % au lait de chèvre, 2,9 % au lait de brebis [1]. Cette production fromagère équivaut à 25 % de la production européenne (Union européenne à 15).

Les quantités de fromages produites varient beaucoup d'un type de fromage à l'autre. Les écarts se mesurent parfois par des facteurs supérieurs à 1 000. Cependant, trois grandes classes de même grandeur se partagent la production : 34 % de la production totale de fromage pour les **fromages frais**, 30 % pour les **pâtes molles** et 32 % pour l'ensemble des **pâtes pressées et pressées cuites**.

Pour parvenir à la qualité organoleptique et à la régularité de composition et de présentation aujourd'hui atteintes, il est nécessaire de bien connaître les mécanismes des différentes étapes de la transformation du lait en fromage. Elles forment un ensemble et chacune d'entre elles est conditionnée par la précédente et prépare la suivante. La science laitière d'aujourd'hui permet de bien comprendre et maîtriser la majorité des transformations qui s'opèrent lors de la fabrication du fromage. Elle a également favorisé l'évolution des techniques de transformation du lait. En moins d'un demi-siècle, les ateliers artisanaux ont été remplacés par des outils industriels très performants, mécanisés et de haute technicité. Ils produisent des fromages de même typicité de manière bien plus régulière même si quelques amateurs regrettent l'atténuation de certaines saveurs.

Cet article ne traite pas des fromages fondus, qui sont des produits de seconde transformation. Ceux-ci font l'objet de l'article [F 6 310].

Les procédés de fabrication des fromages à pâte molle, à pâte pressée, et du lactosérum sont traités dans la seconde partie de cet article [F 6 306].

Les références bibliographiques sont données en [Doc. F 6 307].

## 1. Principes de transformation fromagère

### 1.1 Les grandes étapes de la transformation

#### 1.1.1 Préparation des laits

Aujourd'hui très peu de laits sont utilisés sous leur forme originale. 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<sup>6</sup> 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 micro-organismes 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 *Clostridia 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 [2] 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 recombinaée 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 micro-organismes sporulés est très élevée (réduction décimale supérieure à 4) du fait de leur taille.

Une photo de pilote industriel de microfiltration est présentée figure 1.

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.



Figure 1 – Pilote industriel de microfiltration (source INRA)

Tableau 1 – Membranes 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 <sup>-1</sup> )	7	7	7
Densité de flux de perméation à 50 °C (L · h <sup>-1</sup> · m <sup>2</sup> )	680	500	500
Facteur de réduction volumique	20	20	20
Réduction décimale de la flore bactérienne (1)	2,5	3,5	3,5

$$(1) \text{ Réduction décimale} = \frac{\lg \text{ nombre de germes du lait non traité}}{\lg \text{ nombre de germes du lait traité}}$$

**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 [3]. 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 **ajout 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<sup>-1</sup>.

**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 150 g · mol <sup>-1</sup>	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 caséinomacropéptide (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<sup>-1</sup>. 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 <sup>-1</sup> )			
		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 recombinaé	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 CaCl<sub>2</sub> de 0,10 g · L<sup>-1</sup>.

**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 κ est hydrolysée spécifiquement (liaison phénylalanine-méthionine PHE<sub>105</sub>-MET<sub>106</sub>) pour former la paracaséine κ 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 Q<sub>10</sub> 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  $\kappa$ , s'agrègent pour former le gel appelé caillé. Cette phase exige la présence d'ions calcium et est très dépendante de la température. Des ions calcium sont apportés (5 à 20 mL d'une solution de chlorure de calcium à 510 g · L<sup>-1</sup> pour 100 litres de lait) pour compenser ceux précipités lors des traitements thermiques. 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. 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 ;

- la **coagulation lactique** qui se produit lorsque l'acidité s'est développée de façon intense (pH compris entre 5,5 et 4,6). 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 œuvre 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  $\kappa$  et la  $\beta$ -lactoglobuline et/ou l' $\alpha$ -lactalbumine. Ces complexes, s'ils n'empêchent pas l'accès de la chymosine aux liaisons PHE<sub>105</sub>-MET<sub>106</sub> de la caséine  $\kappa$  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.

### 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 micro-organismes. 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.

Tableau 4 – Différents gels rencontrés en technologie laitière et leurs modes d'obtention [5]

Dénomination des coagulums (gel)		Lactique		Mixte	Présure	
		« Pur »	Dominant		Dominant	« Pur »
Mode opératoire	Apport de ferment lactique	oui	oui	oui	oui	facultatif
	Apport de coagulant (en mL/100 L)	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 h à 18 h suivant ferment et température	14 à 36 h	20 min 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
Exemples de produits		Laits fermentés (yoghourt)	Pâtes fraîches Quark, cottage, chaource, crottins	Pâtes molles traditionnelles (camembert, brie) Pâtes persillées...	Pâtes molles stabilisées Pâtes pressées, non cuites et cuites...	Laits emprésurés aromatisés
			Fromages			

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 œuvre 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'inté-

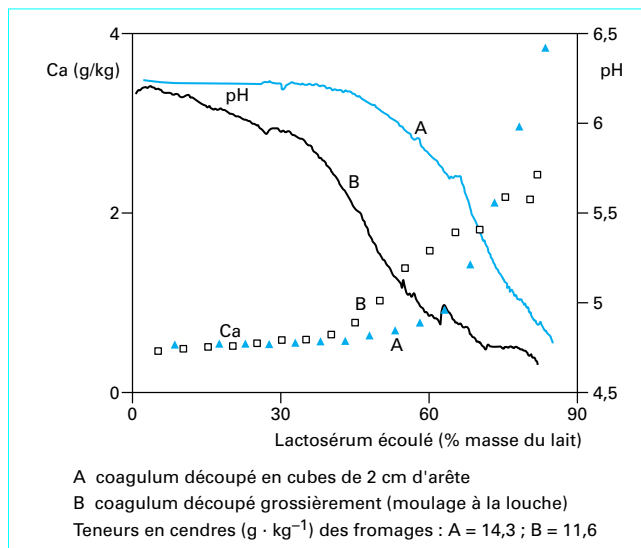


Figure 2 – Évolution du pH et de la teneur en calcium de lactosérums au cours de l'égouttage

rieur 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 micro-organisme 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 ;

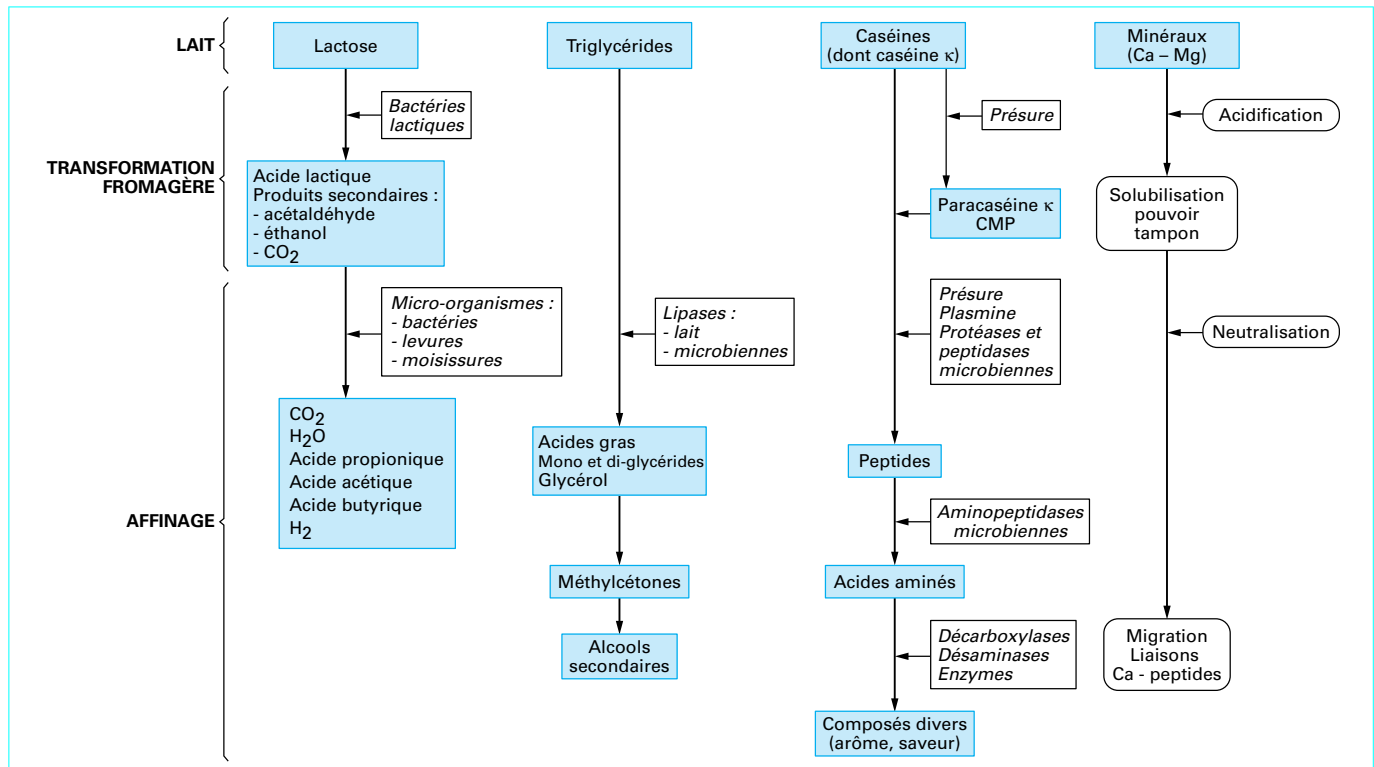


Figure 3 – Principales transformations des composants du lait lors de la préparation du fromage

- 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 : CO<sub>2</sub>, eau, éthanol, acides acétique, formique et succinique, alcools, galactose. Le lactate est également transformé en acides acétique et propionique et en CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub> 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 saveur. 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  $a_w$  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.

- Le **pH** du fromage est un élément régulateur de la croissance des micro-organismes. 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, micrococccacées, 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'ammoniaque 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.

### 1.1.5 Originalité de l'ultrafiltration

Si les techniques à membranes sont largement utilisées pour l'ajustement de la composition des laits de fromagerie, l'une d'entre elles, l'ultrafiltration a permis le développement d'une nouvelle technologie fromagère connue sous le nom de **procédé MMV** (Mauvois, Mocquot, Vassal) [4]. Elle réalise « l'égouttage » avant coagulation et non après comme dans une technologie classique. Le

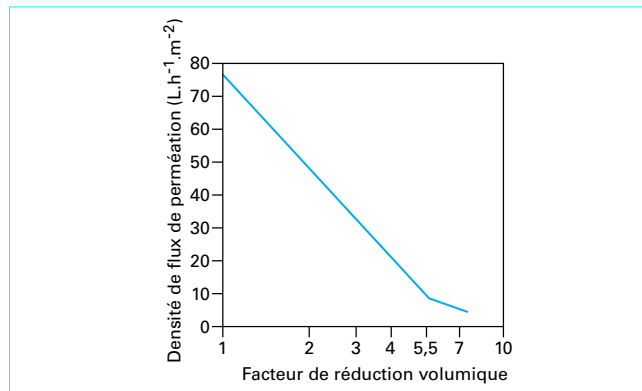


Figure 4 - Évolution de la densité de flux de perméation d'une membrane Carbosep M1 en fonction du facteur de réduction volumique

nouveau lactosérum appelé ultrafiltrat contient de l'eau, du lactose, des sels minéraux solubles et de l'azote non protéique. La séparation de cette phase aqueuse, plus facilement maîtrisée, permet d'obtenir un produit liquide plus ou moins visqueux ayant une composition très proche de celle du fromage, il est dénommé : **préfromage**. Les méthodes de fermentation lactique et de coagulation finissent de transformer le préfromage en fromages à textures et saveurs variées.

L'opération d'ultrafiltration est généralement réalisée à partir de lait pasteurisé et écrémé ou gras à la température de 50 à 52 °C. Cette température est un compromis autorisant de bonnes performances de filtration et un développement minimal des micro-organismes, à une pression transmembranaire de 0,2 à 0,5 MPa. La densité de flux de perméation, qui exprime la quantité de filtrat extraite par unité de temps et de surface membranaire, caractérise les performances de la membrane. Elle diminue linéairement avec le logarithme du facteur de réduction volumique (figure 4). Les pores des membranes sont choisis pour retenir dans le préfromage toutes les protéines du lait : seuil de coupure compris entre 20 et 150 g · mol<sup>-1</sup>. Ceci est un avantage essentiel de la technique puisque dans les procédés conventionnels les protéines sériques natives se retrouvent dans le lactosérum et non dans le fromage. L'incidence sur la texture et le rendement fromager est notable.

Ainsi, lorsqu'on utilise l'ultrafiltration, les protéines solubles qui représentent 20 % des protéines totales du lait se retrouvent dans le fromage et se substituent aux caséines. Elles possèdent des propriétés différentes : capacité d'hydratation supérieure, résistance à la protéolyse, sans pouvoir d'agrégation et de structuration lors de la coagulation, minéralisation plus faible. Le fromage possède alors une composition différente. Il est possible, par des adaptations technologiques, de conserver les caractéristiques organoleptiques des fromages ou de créer de nouvelles textures en utilisant ces propriétés propres aux protéines solubles. Cependant ultrafiltrer le lait avant de le transformer en fromage engendre des conséquences que tout fromager se doit de prendre en compte pour garantir la qualité organoleptique de ses fromages.

L'ultrafiltration réalisée au pH du lait (6,7) concentre la totalité des sels minéraux liés aux micelles de caséines ce qui n'est pas le cas en fromagerie conventionnelle puisque l'égouttage est réalisé à des pH variables allant de 6,6 à 4,5, stades où les sels minéraux sont partiellement à totalement solubles [6] et donc éliminés, dans des proportions variables, dans le lactosérum. Il en résulte un accroissement du pouvoir tampon des préfromages puis des fromages. Les bactéries lactiques produisent alors une quantité d'acide d'autant plus importante que le facteur de concentration est élevé avant d'atteindre un même pH. Elles se retrouvent en plus grand nombre et ainsi un rétentat d'ultrafiltration acidifié (rétentat contenant 12 % de pro-

téines à pH 5,2 par exemple) peut être utilisé en tant que levain de fromagerie [7] contenant des bactéries à plus forte activité.

La présence d'une plus grande quantité d'acide lactique dans les fromages ultrafiltrés peut être à l'origine d'une perception d'acidité trop forte et de goûts métalliques. Plusieurs voies ont été proposées pour réduire le pouvoir tampon des préfromages :

- l'acidification modérée (pH 6,6 à 5,6) du lait avant ultrafiltration pour solubiliser une partie des minéraux qui ainsi est entraînée dans le perméat ;
- l'acidification et la coagulation du lait (pH 4,6) avant ultrafiltration qui est une méthode de préparation de fromages frais [8]. Cette technique s'est développée avec l'apparition des membranes minérales d'ultrafiltration [9] ;
- la dilution de la phase soluble du lait réalisée sur le lait ou le rétentat au cours de la diafiltration ;
- l'ajout de chlorure de sodium : affinité plus grande du sodium pour les groupements phosphosérines de la caséine et déplacement du calcium vers la phase soluble.

Lors de l'affinage de fromages à croûte moisie, il se crée un gradient de pH (plus basique à la surface) qui provoque la migration des sels minéraux vers l'extérieur [10] et la précipitation de phosphate de calcium qui altère la qualité de la croûte. Ce risque est accru dans les fromages ultrafiltrés puisqu'ils contiennent plus de minéraux. Un soin attentif doit être porté au choix des moisissures de surface et à la conduite de l'affinage pour éviter le caractère sableux de la croûte du fromage.

Les préfromages ont un comportement rhéologique pseudoplastique d'autant plus marqué que leur concentration (teneur en matière azotée totale essentiellement) est élevée et la température basse [11].

Leur viscosité croît d'une manière exponentielle avec l'augmentation de la teneur en protéines [12]. Il est nécessaire de prendre en compte ces paramètres lors de la définition des équipements de transformation du préfromage en fromage : transfert, échanges thermiques, mélange... Le mélange de la présure lorsque la teneur en matière azotée dépasse 15 % ne peut être réalisé de façon bien uniforme qu'en utilisant des systèmes appropriés statiques ou dynamiques.

De même, à cause de la viscosité élevée, il est nécessaire de procéder à un dégazage sous vide de l'air et de gaz dissous des préfromages ayant une teneur en matière azotée égale ou supérieure à 18 % pour éviter une texture alvéolée voire spongieuse après coagulation.

L'ultrafiltration est également utilisée pour la préparation des préfromages à concentration intermédiaire : les éléments « fromageables » se trouvent en concentration bien supérieure à celle du lait et inférieure à celle du préfromage à concentration totale (concentration de ces mêmes composés très proche de celles du fromage). Les préfromages partiellement concentrés sont transformés en fromages selon des technologies conventionnelles adaptées. Ainsi par exemple, le procédé « *APV Siro Curd Process* » a été développé pour la production en continu du cheddar à partir d'un préfromage contenant 40 à 45 % de matière sèche. La mise en œuvre de préfromages à concentration totale nécessite le développement de technologies nouvelles de transformation du préfromage et connaît plusieurs applications dans le domaine des pâtes molles, des pâtes fraîches, des fromages saumurés.

### 1.1.6 Laits recombines

L'utilisation de lait recombinaé à partir de poudres se justifie pour diverses raisons économiques, alimentaires, diététiques, géographiques et accessoirement organoleptiques et techniques. Par exemple, elle permet de répondre aux besoins des pays où la production laitière est insuffisante ou de faire du report de lait pour des pays dont la variation saisonnière de la production laitière est importante (cas du lait de chèvre ou de brebis).

Les poudres de lait utilisées pour la technologie fromagère doivent présenter d'une part une qualité microbiologique conforme à la législation et d'autre part une aptitude fromagère identique à un lait non déshydraté. Ces deux points vont dépendre de la qualité du lait utilisé et de l'intensité des traitements thermiques que va subir ce lait lors de sa transformation en poudre. Pour satisfaire ces impératifs microbiologiques et technologiques, Gilles et Lawrence [13] et Shaker et al. [14] préconisent un **traitement de pasteurisation HTST** (*high temperature, short time*) de 72 °C pendant 15 s sur le lait avant séchage, de façon à garantir l'absence de flore pathogène tout en préservant une bonne aptitude à la coagulation. Toutefois, ces conditions s'appliquent seulement si le lait de départ est de bonne qualité microbiologique. Dans le cas contraire, le traitement thermique appliqué au lait doit être plus drastique, ce qui compromet ainsi l'aptitude à la coagulation du lait reconstitué [15] [16] [17]. En effet, la majeure partie des problèmes technologiques rencontrés au cours de la transformation fromagère des laits reconstitués à partir de poudre résultent d'une perte de l'aptitude à la coagulation consécutive à la formation d'un complexe entre la caséine  $\kappa$  et la  $\beta$ -lactoglobuline induit sous l'effet des traitements thermiques nécessaires lors de la fabrication des poudres (pasteurisation, concentration par évaporation sous vide, séchage). La formation du complexe caséine  $\kappa$  et  $\beta$ -lactoglobuline via les résidus cystéyles 11 et 88 de la caséine entraîne une modification de la conformation tridimensionnelle autour de la liaison PHE<sub>105</sub>-MET<sub>106</sub>. Cette modification a deux types de conséquences : d'une part, le degré d'affinité entre le site actif de la chymosine et la liaison 105-106 est abaissé (vitesse initiale d'hydrolyse en décroissance), probablement en raison de l'élévation de l'électronégativité de la molécule de caséine  $\kappa$ , due à la fixation de la  $\beta$ -lactoglobuline ; d'autre part, l'accessibilité stérique des liaisons PHE-MET diminue avec l'intensité du chauffage entraînant une baisse de la teneur finale en caséinomacropéptide total [18][19]. En se fixant sur la caséine  $\kappa$  sous l'effet du traitement thermique, la  $\beta$ -lactoglobuline diminuerait la capacité d'agrégation des particules micellaires. Par augmentation de l'électronégativité et par diminution de l'hydrophobicité, il y aurait augmentation des forces de répulsion électrostatique, à l'origine de l'accroissement des temps de prise et de la réduction des vitesses de raffermissement dans les laits chauffés [18].

De nombreuses études ont été réalisées sur l'aptitude fromagère des poudres de lait et les conditions d'utilisation de laits [20] [21] [22] [23]. Il apparaît clairement que pour appliquer aux laits recombines les procédés traditionnels de fabrication des fromages, il est indispensable de recouvrer sur les laits préparés de bonnes aptitudes à la coagulation [21] qui vont dépendre essentiellement de l'intensité des traitements thermiques mis en œuvre lors de l'élaboration de ces poudres de lait. Toutefois, lorsque la qualité microbiologique des laits mis en œuvre est médiocre, le traitement thermique HTST ne convient pas pour la préparation d'une poudre de lait « *low heat* » destinée à la technologie fromagère. Par contre, la **microfiltration tangentielle** (diamètre de pore : 1,4  $\mu\text{m}$  ; procédé Bactocatch<sup>®</sup>, [24] [25] [26]) suivie d'une concentration par évaporation sous vide à basse température et d'un séchage par atomisation s'avère une technologie tout à fait adaptée pour la réalisation d'une poudre « *low heat* » (indice de dénaturation des protéines solubles = 9,2 mg d'azote par gramme de poudre) ; le lait reconstitué à partir de cette poudre présente une coagulation à la présure identique à celle du lait cru initial et également une qualité microbiologique conforme à la législation et à la technologie fromagère [27] (figure 5).

La qualité technologique d'une poudre destinée à la fromagerie peut être améliorée en réduisant la teneur en protéines solubles. La mise en œuvre de la microfiltration tangentielle 0,1  $\mu\text{m}$  permet de fabriquer une poudre de phosphocaseinate natif de Ca (PPCN) selon les travaux de [27] [28] [29] [30]. Comparés à un lait cru, le temps de prise du PPCN reconstitué à 3 % à partir de la poudre est réduit de 53 % et la fermeté à 30 min est améliorée de 50 %. L'enrichissement du lait en caséine par microfiltration 0,1  $\mu\text{m}$  permet d'améliorer significativement la productivité surtout pour les fromages à pâte dure [31]. En outre, l'élimination partielle des protéines solubles qui

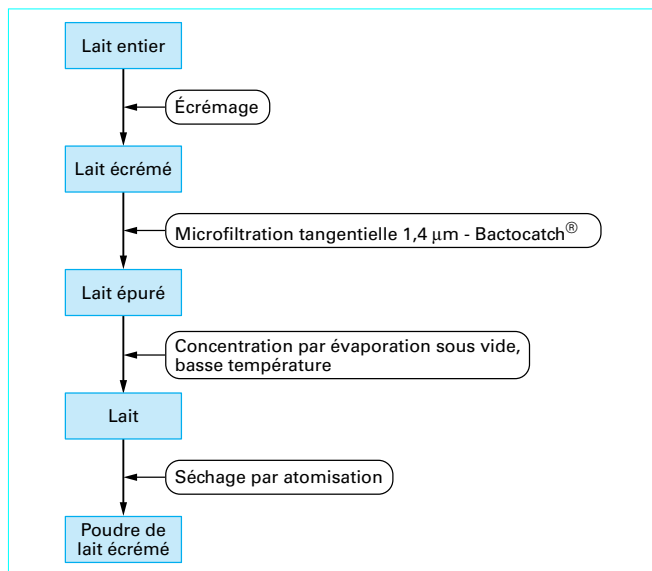


Figure 5 - Schéma technologique de la poudre de lait écrémé « low heat »

en résultat, limite les effets négatifs des traitements thermiques sur la coagulation-présure dus à la formation du complexe caséine κ-β-lactoglobuline [32]. Ces résultats ont été utilisés par Quiblier et al. [33] pour développer une nouvelle poudre « médium » ou « high heat » dont l'aptitude à la transformation fromagère est identique voir supérieure à celle du lait cru [34] [35] (figure 6).

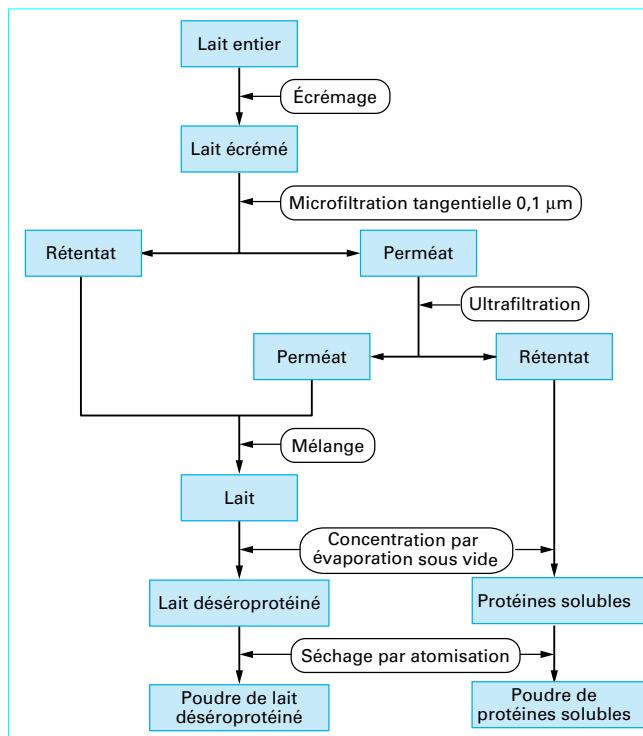


Figure 6 - Schéma technologique de la poudre de lait écrémé issue de la combinaison de la microfiltration et de l'ultrafiltration, selon [33]

## 1.2 Les rendements fromagers

### 1.2.1 Dans les procédés fromagers conventionnels

Il existe différentes façons d'exprimer le rendement fromager. Généralement, il exprime la **quantité de fromage obtenue à partir d'une quantité donnée de lait**, souvent 100 L ou 100 kg. Quelle que soit l'expression utilisée, il faut être prudent lorsque l'on fait des comparaisons de rendements. Les méthodes permettent de comparer des rendements pour des fromages ayant des compositions identiques obtenus à partir de laits d'une même composition et de mettre en évidence l'incidence de la variabilité des composants du lait, seuls ou dans leur ensemble, sur le rendement. Il faut s'assurer d'un bilan pondéral correct de la transformation du lait en fromage pour valider le rendement.

L'élément ayant la variabilité la plus importante dans la composition des fromages est la teneur en eau ; elle peut engendrer des écarts de rendement, ne permettant pas la comparaison de fabrications successives ou réalisées à partir de procédés différents.

■ La formule proposée par Maubois et Mocquot [36] permet d'apporter la correction nécessaire :

$$R_2 = R_1 \times F_2 \frac{F_2 - S}{F_1 - S} \quad (1)$$

avec  $R_1$  rendement observé pour le fromage à teneur en matière sèche  $F_1$ ,

$R_2$  rendement corrigé pour un fromage à teneur en matière sèche  $F_2$ ,

S teneur en matière sèche du lactosérum d'égouttage.

Les teneurs en matière sèche sont exprimées en une même unité.

■ La méthode proposée par Guéroult [37] consiste à déterminer la quantité de matière sèche dégraissée retrouvée dans le fromage, le coefficient G, selon la formule suivante :

$$G(\text{en g}) = \frac{10 \text{ ESD} \times P}{V} \quad (2)$$

avec P masse de fromage (en kg),  
V quantité de lait écrémé mise en œuvre (en L),  
ESD extrait sec dégraissé de fromage (en g pour 100 g).

Ce calcul permet au fromager de faire une relation entre l'extrait sec dégraissé du lait et celui du fromage mais ne peut expliquer à lui seul les variations de rendement puisqu'il ne tient compte que partiellement de la teneur en matière azotée et pas de la teneur en matière grasse.

■ En établissant un bilan matière pour chaque composant (ES : extrait sec, MAT : matière azotée totale, MG : matière grasse), il est possible également d'établir un rendement par la formule :

$$100 \text{ kg de lait} \times \text{ES lait} = X \text{ kg de fromage} \times \text{ES fromage} + (100 - X) \text{ ES sérum}$$

qui devient :

$$\text{Rendement } X = 100 \frac{\text{ES lait} - \text{ES sérum}}{\text{ES fromage} - \text{ES sérum}} \quad (3)$$

ES pouvant être remplacé par MAT ou MG selon les besoins.

Pour le fromager il est intéressant de pouvoir prévoir la quantité de fromage qu'il peut obtenir à partir d'un lait dont il ne connaît pas la composition. Plusieurs analyses statistiques d'un grand nombre de fabrications ont été réalisées. Cette méthode, si elle permet de calculer les variations de rendement, a l'inconvénient de nécessiter une expérimentation lourde et n'est applicable qu'à une fabrication donnée obtenue selon une technologie précise.

■ En s'appuyant sur la théorie de l'éponge où le fromage constituerait la trame et le lactosérum le liquide d'inhibition, Maubois et Mocquot [38] ont établi une formule de prévision qui s'adapterait à tous les types de fromage :

$$RM = \frac{(MAC \times 10)(200 - 3s)}{200(F - g) - 2s(100 - g)} \quad (4)$$

- avec RM masse maximale de fromage (en kg) pour 100 kg de lait,
- MAC teneur en matière azotée coagulable du lait (en g par kg de lait),
- F quantité de substance sèche contenue dans 100 g de fromage,
- g quantité de matière grasse contenue dans 100 g de fromage,
- s teneur en substance sèche contenue dans 100 g de lactosérum.

### 1.2.2 Dans les procédés fromagers impliquant des technologies de séparation sur membrane

#### ■ Cas de la concentration totale

C'est le cas où le préfromage au cours de sa transformation en fromage ne subit aucun égouttage. Le rendement en masse est alors celui de l'opération d'ultrafiltration ou de microfiltration (membrane à diamètre de pore voisin de 0,1 µm).

Il se confond avec le facteur de concentration et peut se formuler :

$$\text{Rendement (en \% massique)} = 100 \frac{\text{masse de lait} - \text{masse de perméat}}{\text{masse de lait}}$$

Les rendements matières peuvent être obtenus selon l'équation précédente (3) en remplaçant sérum par perméat.

#### ■ Cas de la concentration partielle

Lorsque les techniques à membrane sont utilisées pour ajuster la teneur en protéine des laits (taux de 35 à 45 g/kg) et que la transformation en fromage est réalisée selon des procédés conventionnels, les formules (1) à (4) s'appliquent.

Par contre, lorsque l'on pratique des concentrations intermédiaires, les composants des laits sont présents en des proportions différentes puisque la concentration s'est effectuée de manière sélective au niveau des sels minéraux, et des protéines sériques (elles représentent moins de 5 % des protéines totales d'un fromage conventionnel et jusqu'à 25 % dans un fromage fabriqué avec du lait ultrafiltré). La quantité d'eau liée à ces protéines étant bien supérieure à celle des caséines, les conséquences sur le rendement sont importantes.

## 2. Procédés de fabrication des fromages frais

La production des fromages frais est en constante augmentation (tableau 5). Il existe deux technologies différentes pour fabriquer les pâtes fraîches. En effet, il convient de distinguer les fromages dits « de campagne » (fromages moulés, faisselles), issus d'un égouttage lent, et les fromages lissés (fromage blanc, suisse, demi-sel),

issus d'un égouttage rapide (par centrifugation ou par ultrafiltration). Les seconds subissent des cisaillements mécaniques qui homogénéisent la pâte ce qui a pour effet de rendre la texture plus lisse. Ce caractère, s'il n'est pas suffisant, peut être accentué par homogénéisation dans des homogénéisateurs ou des lisseuses.

Tableau 5 – Production des fromages frais [1]

Fromages (lait de vache)	Production 1997 (tonnes)	Production 1998 (tonnes)	Variation 1998/1997 (%)
Pâte lissée	250 890	266 279	+ 6,1
Petits-suisse et assimilés	201 931	189 371	- 6,2
Fromages de campagne (louche ou faisselle)	35 736	35 273	- 1,3
Autres fromages frais	40 285	39 319	- 2,4
Total fromages frais	528 842	530 242	+ 0,3

## 2.1 Réglementation et hygiène

### 2.1.1 Réglementation

Le décret n° 88-1206 du 30 décembre 1988 [39] accorde la dénomination « fromage » au produit fermenté ou non, affiné ou non, obtenu à partir des matières d'origine exclusivement laitières suivantes : lait, lait partiellement ou totalement écrémé, crème, matière grasse, babeurre, utilisées seules ou en mélange et coagulées en tout ou en partie avant égouttage ou après élimination partielle de la partie aqueuse. La teneur minimale en matière sèche du produit ainsi défini doit être de 23 g pour 100 g de fromage.

Le décret n° 88-1206 réserve la dénomination « fromage blanc » à un fromage non affiné qui, lorsqu'il est fermenté, n'a pas subi d'autres fermentations que la fermentation lactique.

D'après ce décret, les fromages blancs fermentés et commercialisés avec le qualificatif « frais » ou sous la dénomination « fromage frais » doivent renfermer une flore vivante au moment de la vente au consommateur. Par dérogation aux dispositions fixées pour les fromages, leur teneur en matière sèche peut être abaissée, à l'exception du « demi-sel » ou du « petit-suisse » (réglementation particulière, cf. tableau 6), jusqu'à 15 g ou 10 g pour 100 g de fromage, selon que leur teneur en matière grasse est supérieure à 20 g ou au plus égale à 20 g pour 100 g de fromage, après complète dessiccation. Cette liste n'étant pas exhaustive, il convient de se renseigner sur les réglementations concernant les additifs autorisés.

Tableau 6 – Dénominations particulières [39]

Dénominations	Description	G/S minimum (%)	Matière sèche minimale (%)
Demi-sel	Pâte homogène salée à 2 %	40	30
Petit-suisse	Pâte homogène :		
	- cylindrique 30 g	40	23
	- cylindrique 60 g	60	30
G/S gras sur sec			

### 2.1.2 Hygiène

Le décret n° 88-1206 du 30 décembre 1988 [39] exige que les matières premières employées pour la fabrication des fromages blancs et des fromages frais, sauf exception prévue, doivent avoir subi un traitement thermique équivalent à la pasteurisation. Les normes microbiologiques sont présentées dans le tableau 7.

L'obligation de la pasteurisation n'est pas exigible dans le cas des fromages fermiers au lait cru (arrêté 13 janvier 1970, article 1<sup>er</sup>, alinéas 2 et 3).

	<i>Listeria monocytogenes</i>	<i>Salmonella spp</i>	<i>Staphylococcus aureus</i>	<i>Escherichia coli</i>
Fromages non affinés au lait traité thermiquement	Absence dans 25 g <i>n</i> = 5 <i>c</i> = 0	Absence dans 1 g <i>n</i> = 5 <i>c</i> = 0	<i>m</i> = 10 <i>M</i> = 100 <i>n</i> = 5 <i>c</i> = 2	
Fromages non affinés au lait cru et au lait thermisé		Absence dans 1 g <i>n</i> = 5 <i>c</i> = 0	<i>m</i> = 1 000 <i>M</i> = 10 000 <i>n</i> = 5 <i>c</i> = 2	<i>m</i> = 10 000 <i>M</i> = 100 000 <i>n</i> = 5 <i>c</i> = 2

*n* : nombre d'unités dont se compose l'échantillon.  
*c* : nombre maximal d'unités de l'échantillon (composé de *n* unités), dans lesquelles la présence d'un germe peut être mise en évidence et cependant conduire à la conclusion « lot ou produit considéré comme satisfaisant » ou « lot acceptable ».  
*m* : valeur seuil pour le nombre de bactéries ; le lot est considéré comme satisfaisant si le nombre de bactéries dans toutes les unités de l'échantillon ne dépasse pas *m*.  
*M* : valeur maximale pour le nombre de bactéries ; le lot est considéré comme insatisfaisant si le nombre de bactéries est égal ou supérieur à *M* dans une ou plusieurs unités de l'échantillon.  
*c* : nombre d'unités de l'échantillon dont la teneur en bactéries peut être comprise entre *m* et *M*, le lot étant considéré comme acceptable si la teneur en bactéries des autres unités de l'échantillon est égale ou inférieure à *m*.

## 2.2 Préparation du coagulum

### 2.2.1 Traitements thermiques

D'après la réglementation, tous les laits doivent être au moins pasteurisés. Les barèmes de traitement thermique du lait destiné à la fabrication des pâtes fraîches lissées sont généralement plus élevés que ceux de la pasteurisation (85 °C pendant 2 min au lieu de 72 °C pendant 20 s) [40], dans le but de dénaturer une partie des protéines solubles et ainsi de les récupérer dans la pâte afin d'augmenter les rendements.

Ces barèmes ne sont pas employés lorsque le caillé est destiné à être moulé (faisselle, fromage frais moulé). En effet, un traitement thermique élevé crée le complexe β-lactoglobuline-caséine κ qui diminue l'aptitude du lait à la coagulation : la fermeté du coagulum est insuffisante pour supporter un moulage, même manuel, et l'égouttage s'opère avec difficultés.

Un deuxième traitement thermique peut être appliqué après coagulation et acidification, avant l'égouttage centrifuge. Ce second traitement permet de précipiter, en milieu acide (pH de 4,4 à 4,6), une autre partie des protéines solubles (toujours pour augmenter les rendements car les protéines sériques sont plus sensibles à un pH inférieur à 4,6, précipitent à la chaleur et sont ainsi retenues dans la pâte). Cependant, le chauffage entraîne une destruction partielle

des levains lactiques. Il est possible de limiter cette perte en utilisant des levains thermophiles ou de la compenser par addition de ferments après séparation du caillé.

### 2.2.2 Coagulation du lait

Quel que soit le type d'égouttage choisi, la préparation du caillé repose sur un schéma classique d'**ensemencement du lait par des bactéries lactiques mésophiles**. Il s'agit essentiellement de **lactococques** et de **leuconostocs**. Le choix des souches est particulièrement important car celles-ci doivent présenter certaines caractéristiques (tableau 8) et remplir plusieurs fonctions :

- acidifier le lait selon une cinétique reproductible ;
- atteindre le pH final désiré ;
- résister aux phages ;
- produire des composés aromatiques (diacétyle) ;
- posséder une aptitude texturante dans certains cas (production d'exopolysaccharides par exemple) ;
- être compatibles entre elles.

Bactérie	Propriété			
	Acidifiante	Aromatique	Texturante	Gazogène
<i>Lc lactis lactis</i>	oui	non	non	non
<i>Lc lactis cremoris</i>	oui	non	non	non
<i>Lc lactis diacetylactis</i>	oui	oui	non	oui
<i>Ln mesenteroides</i>	non	oui	oui	oui
<i>Lb rhamnosus</i>	non	non	oui	non

Les fournisseurs de ferments possèdent des souches bien caractérisées. Selon les qualités recherchées, il est alors possible d'effectuer une première sélection. Il convient, dans tous les cas, d'effectuer des tests préliminaires sur le lait de fabrication afin d'adapter les paramètres à une fabrication optimale. L'utilisation d'un appareil de mesure et d'enregistrement du pH en continu peut être une méthode intéressante pour suivre la cinétique d'acidification.

L'ensemencement est généralement pratiqué sous une forme directe (levains lyophilisés ou congelés prêts à l'emploi) ou semi-directe (préparation de levains). Cette dernière méthode est la plus utilisée parce que moins onéreuse. Un soin particulier doit être apporté à cette étape afin d'éviter les contaminations (coliformes, levures, phages). La température varie de 20 à 28 °C pendant 16 à 24 h selon les souches et les activités recherchées.

L'ensemencement s'accompagne d'un **emprésurage** variable (1 à 20 mL/100 L) selon le type de fromage désiré. Le lait destiné au fromage moulu reçoit une dose plus élevée de présure. Cette phase d'emprésurage s'effectue en cuve (fromage lissé) ou en bassines (fromages moulés).

Pour éviter la remontée de crème dans les cuves de maturation, on procède souvent à une homogénéisation préalable du lait. Cette opération modifie la nature de la membrane des globules gras et ainsi pour effet de changer la texture, mais peut aussi favoriser, dans certains cas, la lipolyse de la matière grasse et provoquer un goût rance.

## 2.3 L'égouttage

### 2.3.1 L'égouttage centrifuge

L'égouttage est la séparation du caillé et du lactosérum. Le principe de l'égouttage centrifuge repose sur la différence de densité entre le lactosérum et le caillé (maigre ou gras). L'égouttage est effectué à l'aide de séparateurs centrifuges.

Pour des ateliers traitant plus de 50 000 L par jour [40], l'égouttage centrifuge est le plus rentable. Le coagulum égoutté est ensuite lissé, refroidi puis conditionné en pots. Le lissage s'effectue à l'aide d'une lisseuse (moins de 5 MPa de pression) ou avec un homogénéisateur (de 5 à 13 MPa de pression). La fabrication est alors continue.

**Séparation caillé maigre-lactosérum (figure 7) :** dans ce cas, le lait est écrémé puis acidifié et coagulé. Ensuite, le coagulum est brassé dans la cuve puis égoutté. Le caillé constitue la phase lourde et le lactosérum la phase légère. Le caillé égoutté peut être réengraissé par addition de crème pasteurisée [41].

**Séparation caillé gras-lactosérum (figure 8) :** le lait de départ utilisé est un lait gras (contenant au minimum 7 % de matière grasse, en dessous de cette valeur la différence de densité n'est pas assez importante). Dans ce cas, c'est le lactosérum qui constitue la phase lourde et le caillé la phase légère. Cette technique ne permet de fabriquer que des fromages gras (gras sur sec : G/S = 70 %) à extrait sec élevé (extrait sec total : EST = 40 à 45 %). En ajustant le débit d'alimentation, l'opérateur peut parfaitement régler la teneur en extrait sec du produit final.

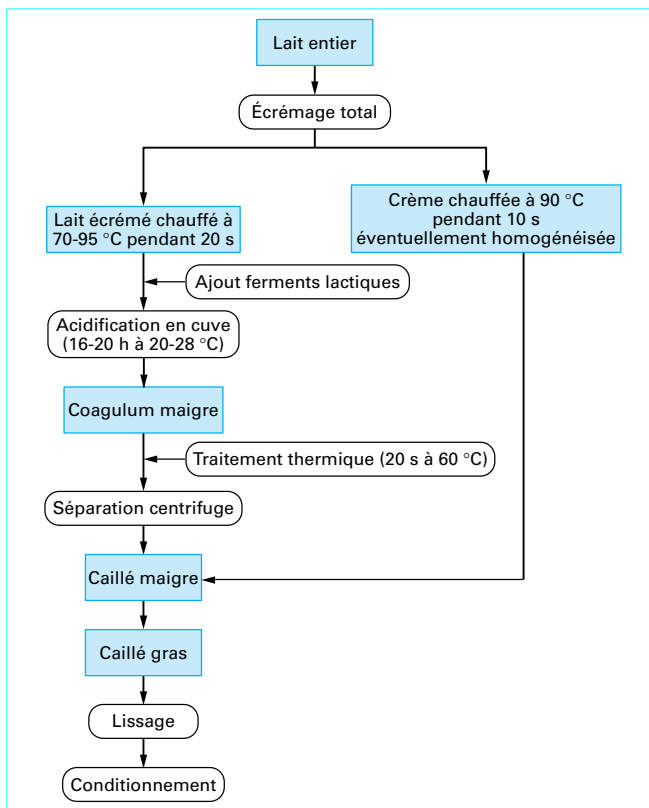


Figure 7 – Fabrication de pâte fraîche à partir de coagulum maigre

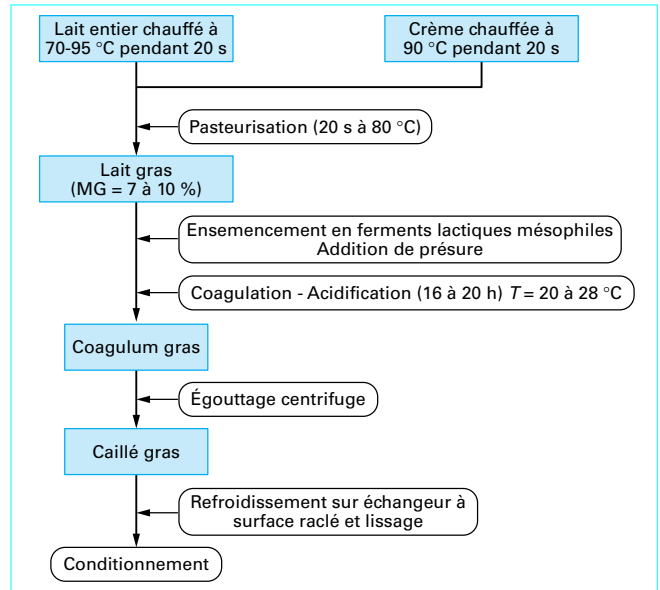


Figure 8 – Fabrication de pâte fraîche à partir de coagulum gras

### 2.3.2 L'égouttage traditionnel

L'égouttage lent est la technologie employée pour obtenir les fromages dits de « campagne ».

Il se fait en sacs, en filtre Berge, en cuve Schulenburg, ou en faiselles [42].

Cette technique, difficile à mécaniser, comporte des inconvénients :

- un mauvais contrôle de la teneur en extrait sec du produit qui entraîne des variabilités de rendements ;
- une durée d'égouttage longue ;
- nécessité d'une main-d'œuvre importante ;
- des pertes de matières relativement importantes qui entraînent un mauvais rendement.

La durée de l'égouttage permet l'obtention d'un arôme plus prononcé. Les textures sont variables selon les procédés. Malgré les difficultés de la technologie, on assiste, ces dernières années, à une stabilisation voire à une augmentation de la production des produits dits de « campagne ». Les fromages frais fabriqués à partir d'autres laits que celui issu de la vache (chèvre, brebis) sont aussi en augmentation.

#### ■ Égouttage en sacs

C'est un procédé non mécanisé qui consiste à remplir des sacs-filtres avec du coagulum et à les empiler sur un sol carrelé les uns sur les autres, ce qui occasionne un pressage. Ce procédé nécessite de la place mais pas d'investissement en matériels coûteux. Ce type d'égouttage peut être utilisé dans les fermes ou dans les petites exploitations. Le conditionnement se fait en vrac dans des seaux ou est réparti dans des petits pots.

#### ■ Égouttage en filtre Berge

Il nécessite moins de main-d'œuvre que l'égouttage en sacs, mais ce procédé requiert un investissement en matériel et un temps d'égouttage long. Des toiles suspendues à un rail sont remplies de coagulum. Elles sont pressées les unes contre les autres et subissent un mouvement oscillatoire. Le caillé obtenu est refroidi puis conditionné (il est éventuellement lissé avant conditionnement).

■ **Égouttage en cuve Schulenburg**

Ce procédé nécessite peu de main-d'œuvre mais un important investissement en cuverie et en surface des locaux. Le lait est envoyé dans une cuve ouverte de forme semi-cylindrique. Après coagulation, un tamis de forme semi-cylindrique effectue la séparation caillé-sérum. Le tamis descend progressivement sous l'effet de la gravité dans le caillé. Une fois la quantité de sérum à retirer atteinte, le caillé obtenu est recueilli et refroidi (éventuellement lissé) avant d'être conditionné.

■ **Égouttage en faisselles (moulage à la louche)**

L'emploi de lait ultrafiltré ayant permis de réduire le coût de la main-d'œuvre, cette technique est toujours utilisée. Le fromage obtenu est dit en faisselle. La structure du gel est moins détruite par ce type de moulage et de ce fait l'expulsion du sérum est moins entravée. La teneur en matière sèche obtenue varie de 150 g · kg<sup>-1</sup> à 300 g · kg<sup>-1</sup> pour le fromage demi-sel.

Le laitensemencé coagule en bassines pendant 15 à 18 h. Le coagulum obtenu est soit moulé unitairement à la petite « louche », soit à la « pelle » sur un répartiteur. Ce procédé est difficilement mécanisable car le caillé lactique est fragile. Pour pallier ce manque de fermeté, on augmente le taux protéique du lait par ultrafiltration.

Le fromage dit « de campagne » reste dans son moule jusqu'à utilisation par le consommateur.

Le fromage demi-sel est retourné dans son moule puis démoulé sur des claies. Il est ensuite salé à sec par pulvérisation en surface (manuellement ou mécaniquement avec une saleuse) et conditionné sans affinage. Il est éventuellement enrobé de cendre, poivre, herbes ou épices.

**2.4 Cas particulier des laits de chèvre et de brebis : le report du caillé**

La production de fromage de chèvre n'est plus une production marginale et se développe depuis ces dernières années (+ 35 % de 1995 à 1999) [43]. Selon l'Onilait, 55 000 tonnes ont été produites en 1999. Les fromages frais (en faisselle ou à tartiner) représentent 18 % de la production. La technologie fromagère employée diffère peu de celle utilisée pour le lait de vache (figure 9).

Par contre, le lait de chèvre présentant une plus grande variabilité physico-chimique que le lait de vache, la standardisation des composants « fromageables » par ultrafiltration est une pratique intéressante parce qu'elle est source de régularité, de qualité, de gain de rendement et de productivité. De plus, la production de lait étant très variable tout au long de l'année, l'industrie fromagère caprine et ovine doit utiliser une technique de report pour répondre à la demande toute l'année. Le lait est stocké en congélateur soit sous forme de caillé déjà égoutté et conditionné en sacs ou en seaux soit sous forme de rétentat d'ultrafiltration conditionné en plaques. Le lait ainsi stocké est utilisé en complément du lait frais (le pourcentage d'incorporation variant selon le volume de lait récolté et la production envisagée). Ce système permet de transformer du lait de chèvre ou de brebis toute l'année en travaillant quotidiennement un lait à taux protéique constant.

Par ailleurs, le lait de chèvre présente la particularité suivante : il ne contient pas d'agglutinines et il est par conséquent inutile d'homogénéiser le lait pour éviter la remontée de crème.

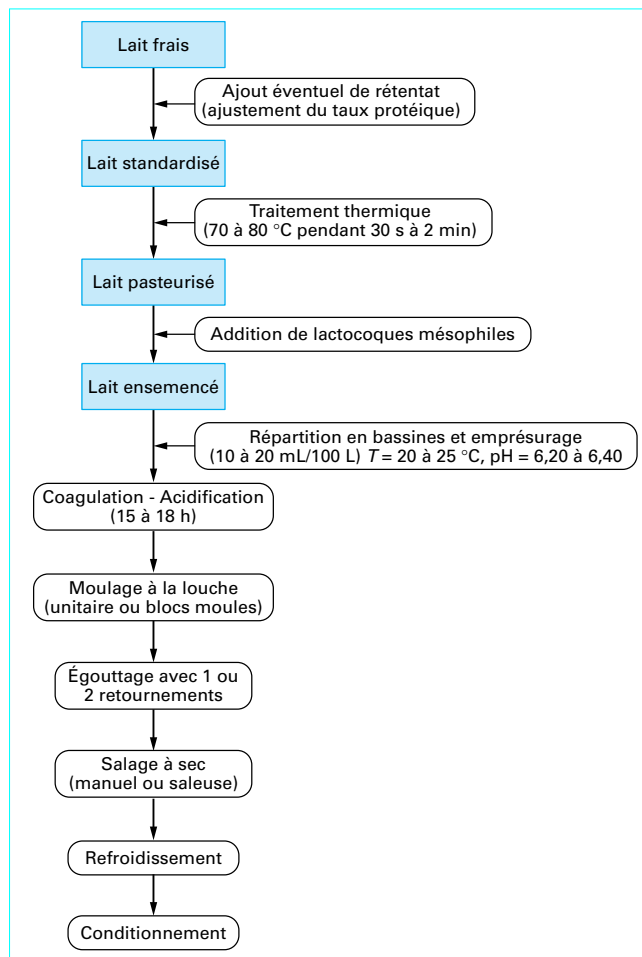


Figure 9 – Schéma de fabrication du fromage frais de chèvre

**2.5 Nouveaux procédés : ultrafiltration de lait coagulé**

L'ultrafiltration du lait acidifié et coagulé peut être utilisée pour la fabrication de fromages frais lissés, de petits-suisseurs, de quarg (fromage frais allemand) de *cream cheese*, de fromages tartinables ou de produits similaires. La viscosité des rétentats s'élève au cours de la concentration et entraîne une augmentation de la pression dans l'ultrafiltre. Il s'avère nécessaire de modifier le dernier étage, qualifié de finisseur, lorsque l'on prépare les produits à forte viscosité [44].

Les techniques de préparation du coagulum décrites dans le paragraphe 2.2 s'appliquent pour le procédé de fabrication de fromage frais lissé par ultrafiltration sur membrane de coagulum de lait. L'ultrafiltration est utilisée en lieu et place du séparateur à caillé ou de toiles.

Le lait mis en œuvre peut être maigre ou gras ; dans ce dernier cas il a subi éventuellement une homogénéisation.

Le coagulum acide (pH 4,4 à 4,6) est brassé puis réchauffé sur échangeur thermique pour être porté à 40 °C. L'opération d'ultrafiltration est alors menée dans les conditions opératoires suivantes :

- température 40 à 42 °C ;

- membranes à seuil de coupure 20 à 150 g · mol<sup>-1</sup> ;
- vitesse d'écoulement tangentiel modéré : 2 m · s<sup>-1</sup> ;
- pression d'alimentation : 0,2 à 0,4 MPa. Différence de pression dans la boucle de filtration : 0,2 à 0,8 MPa selon le facteur de concentration ;
- système discontinu à recirculation de rétentat ou préférentiellement continu à plusieurs étages ;
- utilisation d'une pompe centrifuge ou volumétrique lorsque le facteur de concentration est inférieur à 1,8 et d'une pompe volumétrique au-delà pour assurer la circulation du rétentat dans les boucles d'ultrafiltration.

À la sortie de l'ultrafiltre, le rétentat peut subir les mêmes opérations que les caillés égouttés sur séparateur ou sur toile : mélange avec de la crème, lissage, traitement thermique, refroidissement, conditionnement.

La méthode de refroidissement influe sur les caractéristiques rhéologiques du fromage. Un rétentat conditionné dès la sortie de l'ultrafiltre puis refroidi de manière statique présente la plus grande fermeté. Par contre, un rétentat maintenu au repos puis refroidi de manière dynamique possède moins de tenue et peut exuder faiblement. Le mode de refroidissement permet ainsi d'obtenir des textures différentes.

Les produits obtenus selon ce procédé ont des compositions physico-chimiques (matière sèche, matière grasse, cendres, calcium, acidité) comparables aux produits obtenus par égouttage [9].

Le rendement est amélioré par rapport aux procédés utilisant l'égouttage puisque les protéines sériques sont retenues. Cependant, le gain en rendement est d'autant plus faible que le traitement thermique du lait a été intense puisque les protéines sériques dénaturées sont également retenues par tous les procédés.

La figure **10** présente un équipement pilote.



Figure 10 – Équipement pilote d'ultrafiltration de lait coagulé (source INRA)



# Procédés de transformation fromagère

par **Henri GOUDÉDRANCHE**  
**Bénédicte CAMIER-CAUDRON**  
**Jean-Yves GASSI**  
**Pierre SCHUCK**

*Ingénieurs au Laboratoire de recherches et de technologie laitière (LRTL, INRA)*

## Données économiques

Les tableaux **A, B, C, D** présentent les quantités produites en France pour les trois grandes familles de fromages.

**Tableau A – Production des fromages frais en France [1]**

Fromages (lait de vache)	Production 1997 (tonnes)	Production 1998 (tonnes)	Variation 1998/1997 (%)
Pâte lissée	250 890	266 279	+ 6,1
Petits-suisse et assimilés	201 931	189 371	- 6,2
Fromages de campagne (louche ou faisselle)	35 736	35 273	- 1,3
Autres fromages frais	40 285	39 319	- 2,4
<b>Total fromages frais</b>	<b>528 842</b>	<b>530 242</b>	<b>+ 0,3</b>

**Tableau B – Production des fromages à pâte molle français [1]**

Fromages	Production 1997 (tonnes)	Production 1998 (tonnes)	Variation 1998/1997 (%)	Productions comparées (1998) (% du total pâte molle)
Camemberts et formes camembert	145 768	141 929	- 2,6	30,2
Brie et coulommiers :				
– brie de Meaux, brie de Melun	8 245	8 947	+ 8,5	1,9
– brie d'autres origines	94 123	93 192	- 1,0	19,8
– coulommiers	56 068	58 072	+ 3,6	12,3
Carré de l'Est	3 988	4 410	+ 10,6	0,9
Autres fromages à pâte molle :				
– chaource	1 823	1 847	+ 1,3	0,4
– livarot	1 283	1 499	+ 16,8	0,3
– maroilles	2 331	2 218	- 4,8	0,5
– mont-d'or	2 877	3 237	+ 12,5	0,7
– munster	9 599	9 497	- 1,1	2,0
– pont-l'évêque	3 602	4 432	+ 23,0	0,9
– époisses	1 196	1 327	+ 11,0	0,3
– saint-marcellin	5 057	4 739	- 6,3	1,0
Divers MG < 40 %	8 177			
Divers 40 < MG < 50 %	16 991	18 960	+ 11,6	4,0
Divers MG ≥ 50 %	96 689	97 115	+ 0,4	20,6
<b>Total fromages à pâte molle</b>	<b>464 131</b>	<b>470 412</b>	<b>+ 1,4</b>	<b>100,0</b>
Total fromages tout lait	1 619 040	1 654 640	+ 2,2	(1)

(1) Le rapport  $\frac{\text{total fromages pâte molle}}{\text{total fromage tout lait}} \times 100$  est égal à 28,4 (en 1998).

**Tableau C – Production des fromages à pâte pressée non cuite en France**

Fromages	Production 1997 (tonnes)	Production 1998 (tonnes)	Variation 1998/1997 (%)
St-paulin et assimilés	40 765	28 507	- 30,1
Edam, gouda, mimolette	10 075	23 707	+ 135,3
Cantal et assimilés	17 647	17 147	- 2,8
Morbier	5 688	6 336	+ 11,4
Reblochon et assimilés	13 534	15 379	+ 13,6
Raclette	34 138	38 442	+ 12,6
Divers < 40 % MG	13 097	13 089	- 0,1
Divers > 40 % MG	42 862	45 586	+ 6,4
Autres	30 847	29 503	- 4,5
<b>Total</b>	<b>208 653</b>	<b>217 696</b>	<b>+ 4,3</b>

**Tableau D – Production des fromages à pâte pressée cuite en France [1]**

Fromages	Production 1997 (tonnes)	Production 1998 (tonnes)	Variation 1998/1997 (%)
Emmental	227 248	242 203	+ 6,6
Comté	42 653	45 753	+ 7,3
Beaufort	3 688	3 989	+ 8,2
Autres (y compris petites meules à trous)	13 134	8 367	- 36,3
<b>Total</b>	<b>286 723</b>	<b>300 312</b>	<b>+ 4,7</b>

### Références bibliographiques

- [1] *L'économie laitière en chiffres*. C.N.I.E.L. – édition 2000.
- [2] SABOYA (L.) et MAUBOIS (J.-L.). – *Current developments of microfiltration technology in the dairy industry*. Lait 80 (2000) p. 541-553.
- [3] GOUDÉDRANCHE (H.), FAUQUANT (J.) et MAUBOIS (J.L.). – *Produits, en particulier laitiers, comprenant des fractions sélectionnées de globules gras, obtention et applications*. Brevet français n° 98-034-78.
- [4] MAUBOIS (J.L.), MOCQUOT (G.) et VASSAL (L.). – *Procédé de traitement du lait et de sous-produits laitiers*. Brevet français n° 2 052 121, 1969.
- [5] MIETTON (B.), DESMAZEAUD (M.) et WEBERT (F.). – *Bactéries lactiques. Aspects fondamentaux et technologiques. Volume 2*, p. 55-133, Loriga Uriage, 1994.
- [6] BRULE (G.), MAUBOIS (J.L.) et FAUQUANT (J.). – *Étude de la teneur en éléments minéraux des produits obtenus lors de l'ultrafiltration du lait sur membrane*. Le Lait, 539, 1974, p. 600-615, EDP Sciences SA.
- [7] MISTRY (V.U.) et KOSIKOWSKI (F.V.). – *A natural buffered bulk retentate starter from ultra-filtrated milk* (Un levain préparé sur un rétentat d'ultrafiltration de lait, naturellement tamponné). Journal Dairy Science, volume 69, 1985, p. 945-950. American Dairy science Association – 1111 N. Dunlop Avenue – Savoy, IL 61874.
- [8] STENNE (P.). – *Procédé de fabrication et aliments protéiques, notamment de fromages*. Brevet français n° 2232-999, 1973.
- [9] MAHAUT (M.), MAUBOIS (J.L.), ZINK (A.), PANNETIER (R.) et VEYRE (R.). – *Éléments de fabrication de fromages frais par ultrafiltration sur membrane de coagulum de lait*. La technique laitière, 961, 1982, p. 9-13.
- [10] LEGRAET (Y.), LEPIENNE (A.), BRULE (G.) et DUCRUET (P.). – *Migration du calcium et des phosphates inorganiques dans les fromages à pâte molle de type camembert au cours de l'affinage*. Le Lait, 63, 1983, p. 317-332, EDP Sciences SA.
- [11] CULIOLI (J.), BON (J.P.) et MAUBOIS (J.L.). – *Étude de la viscosité des rétentats et des pré-fromages obtenus après traitement du lait par ultrafiltration sur membrane*. Le Lait, 538, 1974, p. 481-500, EDP Sciences SA.
- [12] GOUDÉDRANCHE (H.), MAUBOIS (J.L.), DUCRUET (P.) et MAHAUT (M.). – *Utilization of the new mineral UF membranes for making semi-hard cheeses* (Utilisation de nouvelles membranes minérales d'ultrafiltration pour la fabrication de fromages de type St-paulin). Desalination, 35, 1980, p. 243-256.
- [13] GILLES (J.) et LAWRENCE (R.C.). – *The manufacture of cheese and other fermented products from recombined milk* (La fabrication de fromage et d'autres produits fermentés à partir de lait recombinaison). N.Z. J. Dairy Sci. Technol., n° 16, 1981, p. 1-12.
- [14] SHAKER (R.R.), LELIEVRE (J.), DUNLOP (F.P.) et GILLES (J.). – *A review of the manufacture of cheese from recombined milk* (Une revue sur la fabrication de fromage à partir de lait recombinaison). *Recombination of milk and milk products* (Lait recombinaison et produits laitiers). International seminar, Special issue 9001, Alexandria, Egypte, International Dairy Federation Brussels, 1988.
- [15] VAN HOOYDONK (A.C.), DE KOSTER (P.G.) et BOERRIGTER (I.J.). – *The renneting properties of heated milk* (Les propriétés de coagulation à la présure des laits chauffés). Neth. Milk Dairy J., 1987, n° 41, p. 3-18.
- [16] SINGH (H.), SHALABI (S.I.), FOX (P.F.), FLYNN (A.) et BARRY (A.). – *Rennet coagulation of heated milk : influence of pH, adjustment before or after heating* (Coagulation présure des laits chauffés : influence du pH, ajustement avant et après chauffage). J. Dairy Res., 1988, n° 55, p. 205-15.
- [17] FERRON-BAUMY (C.). – *Contribution à l'étude des mécanismes de la coagulation-présure des laits chauffés*. Thèse ENSA Rennes, 1992.
- [18] DALGLEISH (D.G.). – *The effect of denaturation of  $\beta$ -lactoglobulin on renneting. A quantitative study* (L'effet de la dénaturation de la  $\beta$ -lactoglobuline sur la coagulation présure). Milchwissenschaft, 1990, n° 45, p. 491-4.
- [19] REDDY (I.M.) et KINSELLA (J.E.). – *Interaction of  $\beta$ -lactoglobulin with  $\kappa$ -casein in micelles as assessed by chymosin hydrolysis. Effect of temperature, heating time,  $\beta$ -lactoglobulin concentration and pH* (Interaction de la  $\beta$ -lactoglobuline avec la caséine  $\kappa$  dans la micelle évaluée par hydrolyse à la chymosine. Effet de la température, du temps de chauffage, de la concentration en  $\beta$ -lactoglobuline et du pH). J. Agric. Food Chem., 1990, n° 38, p. 50-8.
- [20] LABLÉE (J.). – *Fabrication de fromages à partir de lait recombinaison. Mise à jour des techno-*

- logies utilisées. Revue Le Lait. Fr., 1979, n° 373, p. 17-20, EDP Sciences SA.
- [21] MIETTON (B.). – Application aux laits recombinaés des procédés traditionnels de fabrication des fromages. Rev. ENIL, 1989, n° 130, p. 28-32.
- [22] LENOIR (J.), SCHNEID (N.) et REMEUF (F.). – Le lait de fromagerie. La mise en œuvre de lait en poudre. Le fromage (Eck A, Gillis JC, eds.), 1997, p. 301-323, Tec et Doc, Lavoisier, Paris.
- [23] SCHNEID (N.), REMEUF (F.) et LENOIR (J.). – Contribution à la caractérisation des aptitudes fromagères des poudres de lait. Ind. Alim. Agric., 1998, n° 116, p. 21-32.
- [24] PIOT (M.), VACHOT (J.C.), VEAUX (M.), MAUBOIS (J.L.) et BRINKMAN (G.E.). – Écrémage et épuration bactérienne du lait cru par microfiltration sur membrane en flux tangentiel. Tech. Lait. Mark., 1987, n° 1016, p. 42-6.
- [25] VINCENS (D.) et TABARD (J.). – L'élimination des germes microbiens sur membrane de microfiltration. Tech. Lait. Mark., 1988, n° 1033, p. 62-64.
- [26] TROUVE (E.), MAUBOIS (J.L.), PIOT (M.), MADEC (M.N.), FAUQUANT (J.), ROUAULT (A.), TABARD (J.) et BRINKMAN (G.E.). – Rétention de différentes espèces microbiennes lors de l'épuration du lait par microfiltration en flux tangentiel. Lait, 1991, n° 71, p. 1-13, EDP Sciences SA.
- [27] SCHUCK (P.), PIOT (M.), MEJEAN (S.), FAUQUANT (J.), BRULE (G.) et MAUBOIS (J.L.). – Déshydratation des laits enrichis en caséine micellaire par microfiltration ; comparaison des propriétés des poudres obtenues avec celles d'une poudre de lait ultra-propre. Lait, 1994, n° 74, p. 47-63, EDP Sciences SA.
- [28] FAUQUANT (J.), MAUBOIS (J.L.) et PIERRE (A.). – Microfiltration du lait sur membrane minérale. Tech. Lait., 1988, n° 1028, p. 21-23, EDP Sciences SA.
- [29] PIERRE (A.), FAUQUANT (J.), LE GRAËT (Y.), PIOT (M.) et MAUBOIS (J.L.). – Préparation de phosphocaseinate natif par microfiltration sur membrane. Lait, 1992, n° 72, p. 461-74, EDP Sciences SA.
- [30] SCHUCK (P.), PIOT (M.), MEJEAN (S.), LE GRAËT (Y.), FAUQUANT (J.), BRULE (G.) et MAUBOIS (J.L.). – Déshydratation par atomisation de phosphocaseinate natif obtenu par microfiltration sur membrane. Lait, 1994, n° 74, p. 375-88, EDP Sciences SA.
- [31] MAUBOIS (J.L.) et OLLIVIER (G.). – Extraction of milk proteins (Extraction des protéines laitières). Food proteins and their applications (Protéines alimentaires et leurs applications). (Damodaran S, Paraf A, eds). M Dekker, New York, USA, p. 579-95 (1997).
- [32] KANNAN (A.) et JENNESS (R.). – Relation of milk serum proteins and milk salts to the effect of heat treatment on rennet clotting (Relation entre les protéines de lactosérum, les minéraux du lait et le traitement thermique vis-à-vis de la coagulation présure). J. Dairy Sci., 1961, n° 44, p. 808-822.
- [33] QUIBLIER (J.P.), FERRON-BAUMY (C.), GARRIC (G.) et MAUBOIS (J.L.). – Procédé de traitement des laits permettant au moins de conserver leur aptitude fromagère. Brevet français n° 0542583 B1, 1992.
- [34] EL SHIEKH (M.), DUCRUET (P.) et MAUBOIS (J.L.). – Manufacture of Ras cheese from fresh and recombined milks (Fabrication du fromage Ras à partir de lait frais et de lait recombinaé). Lait, 1994, n° 74, p. 297-305, EDP Sciences SA.
- [35] GAREM (A.), SCHUCK (P.) et MAUBOIS (J.L.). – Cheesemaking properties of a new dairy-based powder made by a combinaison of microfiltration and ultrafiltration (Propriétés fromagères d'une nouvelle poudre de lait réalisée par combinaison de la microfiltration et de l'ultrafiltration). Lait, n° 80, 2000, p. 25-32, EDP Sciences SA.
- [36] MAUBOIS (J.L.) et MOCQUOT (G.). – Comment ramener à la même teneur en substance sèche des fabrications de fromage en vue de comparer les « rendements » respectifs. Revue Laitière Française, 1967, 239, p. 15-18.
- [37] GUÉRAULT (A.M.). – La fromagerie devant les techniques nouvelles. 1958, Edition SEPAIL, Paris.
- [38] MAUBOIS (J.L.) et MOCQUOT (G.). – L'appréciation des rendements en fromagerie. Le Lait, 1971, 507, p. 416-420, EDP Sciences SA.
- [39] SOROSTE (A.) et YEDIKARDACHIAN (C.). – Lamy Dehove, réglementation des produits. Qualité, répression des fraudes. Tome 2, 1999, Lamy SA.
- [40] MOREAU (M.). – Étude comparative, technique et économique, des différents procédés de fabrication, des fromages à pâte fraîche. Rapport ENITIAA, 1980.
- [41] MIETTON (B.). – Calcul du réengraissement des pâtes fraîches. Revue des ENIL n° 14.
- [42] LUQUET (F.M.). – Laites et produits laitiers. Volume 1 et 2, Technique et documentation, Lavoisier.
- [43] RENARD (A.C.), LEMOINE (R.) et LEPAPE (M.). – Dossier lait de chèvre. Revue laitière française, n° 602, juin 2000.
- [44] MAHAUT (M.), KOROLCZUK (J.), PANNETIER (R.) et MAUBOIS (J.L.). – Éléments de fabrication de fromage de type pâte molle de lait de chèvre à caractère lactique par ultrafiltration de lait acidifié et coagulé. Technique laitière et marketing, 1011, 1986, p. 24-28.
- [45] NEYERS (F.). – Utilisation de la notion d'HFD en fromagerie. Revue des ENIL, n° 222, mai 1999, p. 40-42.
- [46] MADEC (M.N.), MEJEAN (S.) et MAUBOIS (J.L.). – Retention of Listeria and Salmonella cells containing skim milk by tangential membrane microfiltration (Rétention de Listeria et Salmonella de lait écrémé par microfiltration tangentielle). Lait, n° 72, 1992, p. 327-332, EDP Sciences SA.
- [47] GUEGEN (M.), DESMASURES (N.) et CORROLLER (D.). – Contribution à l'étude de l'impact des flores sauvages dans la fabrication des camemberts AOC. CR Acad. Agric. Fr., n° 5, 1997, p. 41-58, Université de Caen, Basse Normandie, Institut de Recherche en Biologie Appliquée, Laboratoire de Microbiologie Alimentaire.
- [48] LENOIR (J.), LAMBERET (G.) et SCHIMDT (J.L.). – L'élaboration d'un fromage : l'exemple du camembert. Pour la science, n° 48, 1983, p. 30-43, <http://www.pourlascience.com>
- [49] MIETTON (B.). – La préparation des laits de fromagerie en technologie pâtes molles. Revue des ENIL, n° 113, février 1987, p. 22-33.
- [50] MIETTON (B.). – Ajustement des taux protéiques en technologie fromagère. Revue des ENIL, n° 174, novembre 1993, p. 15-31.
- [51] MIETTON (B.), BILLOD (P.) et QUIBLIER (J.P.). – L'enrichissement des laits de fromagerie en matières azotées protéiques en technologie pâte molle, 3<sup>ème</sup> partie : Concentration des laits par ultrafiltration. Revue des ENIL, n° 95, février 1985, p. 18-25.
- [52] MIETTON (B.) et JOURDAIN (C.). – L'enrichissement des laits de fromagerie en matières azotées protéiques en technologie pâte molle, 1<sup>ère</sup> partie : Emploi de protéines sériques dénaturées après concentration par ultrafiltration. Revue des ENIL, n° 81, juin 1983, p. 9-14.
- [53] MIETTON (B.). – La standardisation du pH emprésurage des laits de fromagerie : nécessité et moyens. Revue des ENIL, n° 133, avril 1989, p. 7-16.
- [54] SERPELLONI (M.), DUSAUTOIS (C.), BOUDIER (J.F.) et LABLÉE (J.). – Intérêt de la glucono-delta-lactone dans la standardisation des laits de fromagerie : optimisation du pH d'emprésurage. Revue des ENIL, n° 133, avril 1989, p. 26-33.
- [55] Anonyme. – Standardisation du pH du lait par addition de CO<sub>2</sub>. Process n° 1054, 1990, p. 90.
- [56] CIQUAL et REGAL. – Répertoire des aliments. Table de composition des produits laitiers. Tome 2, 1991, 281 p., 1991, Technique et documentation, Lavoisier.
- [57] ECK (A.) et GILLIS (J.C.). – Le fromage. 3<sup>ème</sup> édition, 891 p., 1997, Technique et documentation, Lavoisier.
- [58] COHEN-MAUREL (E.). – Le salage des fromages. Revue Laitière Française, n° 448, 1986, p. 45-49.
- [59] HARDY (J.). – Étude de la diffusion du sel dans les fromages à pâte molle de type camembert. Comparaison du salage à sec et du salage en saumure. 1976, Thèse docteur ingénieur Nancy I.
- [60] Documentation technique Rhodia.
- [61] LENOIR (J.). – Note sur la dégradation des protéines au cours de la maturation du camembert. Le Lait, n° 43, 1963, p. 154-165, EDP Sciences SA. <http://www.edpsciences.org>
- [62] LENOIR (J.). – Note sur la composition en matières azotées des fromages affinés de camembert, saint-paulin et gruyère de Comté. Annales de technologie agricole, INRA, n° 12, 1963, p. 51-57.
- [63] GUEGEN (M.). – Moisissures responsables de défauts d'affinage en fromagerie (à l'exclusion des Mucoraceae). Microbiologie, Aliments, Nutrition, Vol. 6, 1988, p. 31-35.
- [64] BERTHIER (J.), MICHEL (A.), VALLA (G.) et BARTSCHI (C.). – Étude expérimentale de la contamination de fromages à pâte molle par les Mucor. Revue des ENIL, n° 145, septembre 1990, p. 26-30.
- [65] BRENET (M.), CENTELEGHE (J.L.), MILLJERE (J.B.), RAMET (J.P.) et WEBER (F.). – Étude d'un accident en fromagerie de type « camembert » causé par des mucorales. Le Lait n° 52, 1972, p. 141-148, EDP Sciences SA.
- [66] HARDY (J.). – L'activité de l'eau, le sel et les moisissures des fromages. Revue laitière française n° 377, 1979, p. 19-25.
- [67] VASSAL (L.) et GRIPON (J.C.). – L'amertume des fromages à pâte molle de type camembert : rôle de la présure et de Penicillium caseicolaum, moyen de la contrôler. Le Lait, n° 64, 1984, p. 397-417, EDP Sciences SA.
- [68] MOLIMARD (P.), LESSCHAEVE (I.), BOUVIER (I.), VASSAL (L.), SCHLICH (P.), ISSANCHOU (S.) et SPINLER (H.E.). – Amertume et frac-

- tions azotées de fromages à pâte molle de type camembert : rôle de l'association de *Penicillium camemberti* avec *Geotrichum candidum*. Le Lait, n° 74, 1994, p. 361-374, EDP Sciences SA.
- [69] COGITOR (A.). – *Traité pratique de réglementation laitière*. 4<sup>e</sup> édition, Éditions du sapin d'Or.
- [70] GOBIN (F.). – *Évolution technologique des pâtes molles à croûte fleurie*. Revue des ENIL, n° 214, p. 30-32.
- [71] STADHOUDERS (J.) et LANGEVELD (L.P.M.). – *The microflora of the surface of cheese, factors affecting its composition* (La microflore de surface du fromage, Les facteurs modifiant sa composition). C.R. XVII<sup>e</sup> Cong. Int. Lait, 1966, vol. D, p. 577-584, EDP Sciences SA.
- [72] MILLET (J.). – *Le fromage « mont-d'or » ou « vacherin du Haut-Doubs » ou « vacherin »*. Revue des ENIL, n° 94, 1984, p. 12-29.
- [73] POIROT (L.). – *Le fromage de Munster*. Revue des ENIL, n° 90, 1984, p. 18-23.
- [74] LESEUR (J.L.). – *Époisses et langre*. Revue des ENIL, n° 157, décembre 1991 janvier 1992, p. 18-23.
- [75] LE JAUEN (J.C.). – *Lait et fromages de chèvre : Quelle évolution pour quel avenir ?*. Revue laitière française, n° 402, 1981, p. 15-31.
- [76] LE JAUEN (J.C.). – *La fabrication du fromage de chèvre fermier*. 209 p. 1982, Institut technique de l'élevage ovin et caprin, Société de presse et d'édition ovine et caprine.
- [77] *Le lait de chèvre, les fromages de chèvre*, par l'ENIL de Surgères. Revue des ENIL, n° 91, p. 18-34.
- [78] KINSELLA (J.E.) et HWANG (D.). – *Biosynthesis of flavor by Penicillium roqueforti* (Biosynthèse de saveur avec *Penicillium roqueforti*). Biotechnology and Bioengineering, vol. 18, 1976, p. 927-938, Department of Chemical Engineering, University of California.
- [79] FAO/WHO. – *Food Standards Programme*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Internet : <http://www.codexalimentarius.net/>
- [80] ROBINSON (R.K.) et TAMINE (A.Y.). – *Feta and related cheeses* (Feta et fromages types). 258 p. 1991, R.K. Robinson, Department of Food Science and Technology, University of Reading ; A.Y. Tamine, Food Science and Technology Department, The Scottish Agricultural College, Auchincruive, Ayr.
- [81] PERNODET (G.). – *Le fromage grec feta*. Revue des ENIL, n° 24, 1977, p. 13-19.
- [82] KERJEAN (J.R.) et RICHOUX (R.). – *Feta : Tradition et MMV*. Documentation fromagère résumée. n° 363/41, ITFF.
- [83] HANSEN (R.). – *Feta cheese production by ultrafiltration*. Nord Mejeri-Tidsskrift, 1977, 9.
- [84] RICHOUX (R.). – *Le cheddar : de Victoria au Big Mac*. Documentation fromagère résumée n° 354/41, ITFF.
- [85] RICHOUX (R.). – *Le gouda*. Documentation fromagère résumée n° 530/41, ITFF.
- [86] RICHOUX (R.). – *Comment mesurer l'aptitude à la fonte*. Documentation fromagère résumée n° 295/41, ITFF.
- [87] RICHOUX (R.). – *Une étude suisse sur le fromage à raclette*. Documentation fromagère résumée n° 36/42, ITFF.
- [88] RICHOUX (R.). – *Le manchego, le fromage de la Manche*. Documentation fromagère résumée n° 353/41, ITFF.
- [89] GOMEZ (M.J.) et al. – *Characteristics of manchego cheese manufactured from raw and pasteurized ovine milk and with defined strain or commercial mixed-strain starter culture* (Caractéristiques du fromage Manchego fabriqué à partir de lait cru et pasteurisé de brebis avec des levains constitués de souches identifiées ou de levains commerciaux). Journal Dairy Science n° 82, 1999, p. 2300-2307.
- [90] LESEUR (J.L.). – *Le fromage d'Abondance*. Revue des ENIL n° 142.
- [91] THIERRY (A.) et al. – *Affinage de l'emmental : dynamique des populations bactériennes et évolution de la composition de la phase aqueuse*. Le lait, n° 78, 1998, p. 521-542, EDP Sciences SA.
- [92] BERDAGUE (J.L.) et al. – *Caractérisation de l'emmental grand cru français*. 1. Composition physico-chimique, Le lait 70(1), 1990, EDP Sciences SA.
- [93] La coopérative laitière du Beaufortain, plaque commerciale, 73270 Beaufort sur Doron.
- [94] RICHOUX (R.). – *Parmesan et grana*. Documentation fromagère résumée n° 577/41, ITFF.
- [95] COHEN (E.) et MAUREL. – *Le marché de grana en Italie*. Techniques laitières n° 1034.
- [96] LESEUR (J.L.). – *Présentation de quelques fromages italiens*. Revue des ENIL n° 135.
- [97] SCOTT (R.). – *Cheese making practice* (Pratique fromagère). 2<sup>nd</sup> édition, 1986, Elsevier Applied Science Publishers.
- [98] KOSIKOWSKI (F.) et MISTRY (V.). – *Cheese and Fermented milk foods* (Fromage et laits fermentés). Vol. 2, 1997, 330 p. 3<sup>rd</sup> édition, FV Kosikowski, L.L.C., 1. e.mail : fvkllc@aol.com
- [99] PERNODET (G.). – *Les « fromages » de lactosérum et dérivés*. Revue des ENIL, n° 41, 1979, p. 7-12.

# GAGNEZ DU TEMPS ET SÉCURISEZ VOS PROJETS EN UTILISANT UNE SOURCE ACTUALISÉE ET FIABLE

Techniques de l'Ingénieur propose la plus importante collection documentaire technique et scientifique en français !

Grâce à vos droits d'accès, retrouvez l'ensemble des **articles et fiches pratiques de votre offre, leurs compléments et mises à jour,** et bénéficiez des **services inclus.**



RÉDIGÉE ET VALIDÉE  
PAR DES EXPERTS



MISE À JOUR  
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE  
SUR TOUS SUPPORTS  
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS  
DANS CHAQUE OFFRE

- > + de 350 000 utilisateurs
- > + de 10 000 articles de référence
- > + de 80 offres
- > 15 domaines d'expertise

- Automatique - Robotique
- Biomédical - Pharma
- Construction et travaux publics
- Électronique - Photonique
- Énergies
- Environnement - Sécurité
- Génie industriel
- Ingénierie des transports
- Innovation
- Matériaux
- Mécanique
- Mesures - Analyses
- Procédés chimie - Bio - Agro
- Sciences fondamentales
- Technologies de l'information

**Pour des offres toujours plus adaptées à votre métier,  
découvrez les offres dédiées à votre secteur d'activité**

Depuis plus de 70 ans, Techniques de l'Ingénieur est la source d'informations de référence des bureaux d'études, de la R&D et de l'innovation.

[www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr)

**CONTACT :** Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : [infos.clients@teching.com](mailto:infos.clients@teching.com)

# LES AVANTAGES ET SERVICES compris dans les offres Techniques de l'Ingénieur

ACCÈS



### Accès illimité aux articles en HTML

Enrichis et mis à jour pendant toute la durée de la souscription



### Téléchargement des articles au format PDF

Pour un usage en toute liberté



### Consultation sur tous les supports numériques

Des contenus optimisés pour ordinateurs, tablettes et mobiles

SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



### Questions aux experts\*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



### Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



### Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



### Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



### Impression à la demande

Commandez les éditions papier de vos ressources documentaires



### Alertes actualisations

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

\*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

## ILS NOUS FONT CONFIANCE



[www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr)

**CONTACT :** Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : [infos.clients@teching.com](mailto:infos.clients@teching.com)