

Fabrication des yaourts et des laits fermentés

par **Catherine BÉAL**

Professeur à l'Institut national agronomique Paris-Grignon

et **Isabelle SODINI**

Maître de conférences à l'Institut national agronomique Paris-Grignon

1. Définitions	F 6 315 - 2
2. La fermentation lactique	— 3
2.1 Microbiologie de la fermentation lactique	— 3
2.2 Biochimie de la fermentation lactique.....	— 4
2.3 Physico-chimie de la fermentation lactique	— 6
3. Les grandes étapes de la fabrication des yaourts et des laits fermentés	— 7
3.1 Diagramme général de production	— 7
3.2 Prétraitement du lait.....	— 7
3.3 Fermentation du lait	— 9
3.4 Traitements post-fermentaires	— 11
3.5 Conditionnement	— 12
4. Contrôles de la qualité en production	— 13
4.1 Objectifs.....	— 13
4.2 Contrôles des matières premières	— 13
4.3 Contrôles réalisés en cours de fabrication	— 14
4.4 Maintenance préventive.....	— 14
4.5 Contrôles des produits finis.....	— 14
5. Développements actuels en production de laits fermentés	— 14
5.1 Laits fermentés d'origine non occidentale	— 15
5.2 Laits fermentés à durée de vie élevée	— 15
5.3 Laits fermentés « plaisir »	— 15
5.4 Laits fermentés « santé »	— 16
6. Conclusion	— 16
Pour en savoir plus	Doc. F 6 315

Les laits fermentés sont des produits laitiers transformés par une fermentation essentiellement lactique qui aboutit à l'acidification et à la gélification du lait. Contrairement aux fromages, la coagulation est due uniquement à l'action des bactéries lactiques et ne fait pas intervenir de présure. Historiquement, il s'agissait de permettre une meilleure conservation du lait, matière première rapidement périssable. Depuis, ces produits ont rapidement gagné de l'intérêt du fait de leurs caractéristiques organoleptiques agréables (fraîcheur, acidité et onctuosité). Ils constituent ainsi une alternative intéressante à la consommation du lait et des fromages.

Leur origine historique et géographique n'est pas connue exactement. Néanmoins, il semble que les premiers laits fermentés soient apparus au Moyen-Orient, il y a 10 à 15 000 ans. Actuellement, ils sont commercialisés dans de très nombreux pays, même si certaines productions restent confidentielles.

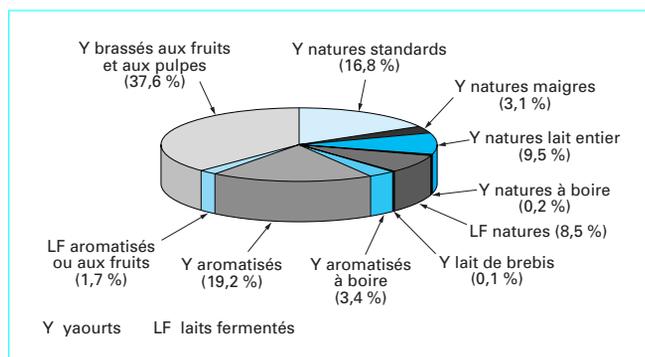


Figure A - Répartition des laits fermentés en France en 2000 (source CNIEL)

Le lait fermenté le plus consommé dans les pays occidentaux est le yaourt. Selon la réglementation française, il est issu de la seule action des deux bactéries lactiques thermophiles *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* et *Streptococcus thermophilus*. Toutefois, une grande variété de laits fermentés est produite dans le monde : les laits fermentés acides (yaourt, laban), éventuellement concentrés (labneh), les produits acides et légèrement alcoolisés (kéfir, koumiss) et les laits fermentés peu acides (buttermilk, lait ribot), éventuellement épaissis par l'utilisation de cultures spécifiques (villi). Les laits fermentés dits « probiotiques », contiennent des bactéries d'origine intestinale qui leur confèrent une valeur « santé ». Ils connaissent, en Occident, un développement commercial important. À ces produits frais, s'ajoutent des produits dérivés plus récents comme les laits fermentés pasteurisés, glacés ou en poudre.

En France, la consommation des laits fermentés est importante (plus de 20 kg par habitant et par an) et en progression constante (+ 3 à + 4 % par an). Leur répartition selon les catégories de produits, indiquée sur la figure A, fait apparaître une prédominance des yaourts (90 %) au détriment des autres types de laits fermentés. Par ailleurs, les produits aromatisés ou aux fruits (62 %) devancent largement les produits dits « nature » (38 %). Enfin, les yaourts brassés représentent plus de 40 % de la production totale.

1. Définitions

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

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

Cette définition est précisée par la norme Afnor NF V 04-600 (2001) [1] qui indique, pour des **laits fermentés dits « probiotiques »**, c'est-à-dire contenant des bactéries d'origine intestinale comme *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus johnsonii*, *Bifidobacterium bifidum* et *Lactobacillus casei*, que la teneur en cette flore spécifique doit être supérieure ou égale à 1 million de bactéries vivantes par gramme de produit.

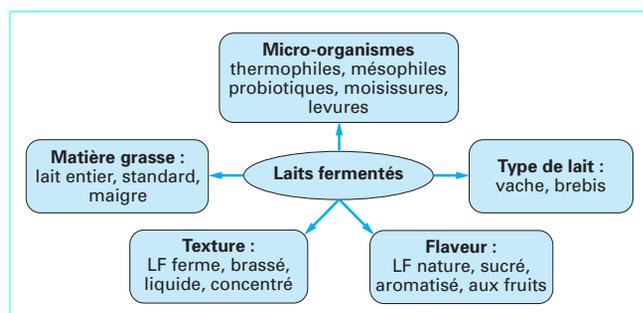


Figure 1 - Schéma général de classification des laits fermentés

Au niveau européen, la réglementation s'appuie sur la directive 79/112/CEE du 18 décembre 1978. Ainsi, la dénomination « yaourt » peut être refusée si « la présence de bactéries lactiques vivantes en quantité abondante » n'est pas vérifiée. En outre, les additifs autorisés (arômes et colorants) sont précisés par la FAO (1990).

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

2. La fermentation lactique

La fermentation lactique correspond à la transformation du lactose du lait en acide lactique, sous l'action de micro-organismes spécifiques appelés bactéries lactiques. Elle s'accompagne de modifications biochimiques, physico-chimiques et organoleptiques du produit.

L'objectif de la fermentation lactique est tout d'abord d'augmenter la stabilité du produit, par inhibition des altérations microbiennes et enzymatiques éventuelles et, par conséquent, d'allonger sa durée de conservation. Elle permet également d'obtenir des produits sains, c'est-à-dire exempts de micro-organismes pathogènes. Enfin, elle confère aux produits obtenus des propriétés nutritionnelles et organoleptiques particulières (texture, arômes, saveur).

2.1 Microbiologie de la fermentation lactique

2.1.1 Micro-organismes utilisés

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

À titre d'illustration, la figure 3c (paragraphe 2.3.3) permet de visualiser des cellules de *Streptococcus thermophilus* et de *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* incluses dans un gel lactique.

Dans les produits dits « probiotiques », les micro-organismes du yaourt sont généralement associés à certains lactobacilles (*Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus rhamnosus*, *Lactobacillus johnsonii*) et/ou à des bifidobactéries (*Bifidobacterium longum*, *Bifidobacterium bifidum*, *Bifidobacterium infantis*).

Les ferments sont toujours utilisés en cultures mixtes, associant au moins deux espèces, et souvent plusieurs souches d'une même espèce bactérienne. Les critères de choix des souches reposent principalement sur des considérations technologiques (vitesse d'acidification, résistance aux bactériophages) et organoleptiques (production d'exopolysaccharides et de composés d'arômes, post-acidification). Ainsi, selon le cas, il peut être recommandé de sélectionner et d'associer des souches présentant une activité acidifiante élevée, une production de polysaccharides ou de composés d'arômes importante, ou une faible post-acidification. Dans le cas des laits fermentés probiotiques, le critère « santé » est également à considérer.

2.1.2 Caractères généraux des bactéries lactiques du yaourt

Le groupe des bactéries lactiques se caractérise par la capacité de ces micro-organismes à produire de grandes quantités d'acide lactique à partir de sucres fermentescibles, essentiellement le lac-

tose dans le cas du lait. Ce sont des bactéries gram positives, qui se caractérisent par une composition en guanine + cytosine (G + C) comprise entre 33 % et 54 %, et se présentent sous forme de coques ou de bacilles. Elles peuvent se développer à 25-30 °C (bactéries mésophiles) ou 37-45 °C (bactéries thermophiles) mais pas à 15 °C. Lorsque l'acide lactique est le principal produit de la fermentation, le métabolisme est homofermentaire tandis que, si sa production est associée à du dioxyde de carbone, de l'acide acétique et de l'éthanol, le métabolisme est hétérofermentaire. Enfin, l'acide lactique est produit sous l'une des formes isomères L(+) ou D(-) ou bien en mélange racémique.

Le tableau 1 précise les caractéristiques des principales bactéries lactiques utilisées en fabrication de laits fermentés. Il est notamment important de considérer leur température optimale de croissance en vue d'associer différentes espèces dans un même produit.

Tableau 1 – Caractères généraux des principales bactéries lactiques utilisées en fabrication de laits fermentés

Bactérie	Type de métabolisme (1)	Forme isomère de l'acide lactique	Température optimale de croissance (°C)
<i>Leuconostoc</i> ssp.	Hét	D(-)	18 à 30
<i>Lactococcus lactis</i>	Hom	L(+)	27 à 32
<i>Streptococcus thermophilus</i>	Hom	L(+)	39 à 44
<i>Lactobacillus bulgaricus</i>	Hom	D(-)	40 à 46
<i>Lactobacillus acidophilus</i>	Hom	DL	35 à 40
<i>Lactobacillus casei</i>	Hom	L(+)	35 à 40

(1) Hét : hétérofermentaire ; Hom : homofermentaire.

2.1.3 Croissance associative dans le yaourt

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

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

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

2.2 Biochimie de la fermentation lactique

2.2.1 Métabolisme du lactose

Les bactéries lactiques utilisent les nutriments du lait pour se développer et produire des métabolites d'intérêt. Ces réactions relèvent principalement du catabolisme (dégradation du lactose). Elles sont essentielles au déroulement de la fermentation lactique et pour obtenir un produit de bonne qualité en termes de flaveur et de stabilité. Certaines réactions de l'anabolisme sont également importantes puisqu'elles participent à la production de polysaccharides, de composés aromatiques ou de molécules ayant un rôle de conservation.

La dégradation du lactose en acide lactique représente la fonctionnalité la plus importante des bactéries lactiques. Elle se déroule en quatre étapes, schématisées sur la figure 2 :

- l'entrée du lactose dans la cellule est réalisée grâce à l'activité d'une enzyme membranaire : lactose perméase-dépendante de la force proton-motrice ou phosphotransférase, dépendante du phosphoenolpyruvate ;
- le lactose est hydrolysé en glucose et galactose sous l'action d'une enzyme (bêta-galactosidase ou phosphobêta-galactosidase). Le glucose rejoint alors la voie glycolytique pour former du pyruvate. Chez *S. thermophilus* et *L. bulgaricus*, le galactose est excrété hors de la cellule alors que chez les bactéries lactiques mésophiles, il est métabolisé en pyruvate. Le bilan énergétique de ces réactions est égal à deux molécules d'ATP (adénosine triphosphate) par molécule de lactose, ou à quatre, si le galactose est métabolisé ;
- le pyruvate est réduit en lactate par une réaction catalysée par l'enzyme lactate déshydrogénase. Cette réaction permet en outre de réoxyder le cofacteur NAD⁺ précédemment réduit ;
- finalement, le lactate est expulsé hors de la cellule, en symport avec des protons. L'accumulation de ce lactate provoque une inhibition de la croissance bactérienne et de sa propre production, qui s'arrêtent de façon précoce, bien avant l'épuisement des substrats. Cette inhibition est liée, à la fois, à l'accumulation de l'acide lactique et à la diminution du pH du milieu intracellulaire qui en résulte.

La production d'acide lactique est généralement modélisée par l'équation de Luedeking et Piret (1959), qui traduit un phénomène de découplage partiel entre la croissance et la production. Cette relation exprime la vitesse de production d'acide lactique (dP/dt , en $g \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$) en fonction de la vitesse de croissance (dX/dt , en $g \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$) et de la concentration bactérienne (X , en $g \cdot L^{-1}$). Les valeurs des deux paramètres α et β dépendent de la souche considérée et des conditions environnementales dans lesquelles elle est cultivée :

$$\frac{dP}{dt} = \alpha \cdot \frac{dX}{dt} + \beta \cdot X$$

Au début d'une fermentation, la concentration bactérienne est faible et la vitesse de production d'acide lactique est principalement influencée par la vitesse de croissance. Ces deux phénomènes sont donc couplés. En fin de fermentation, la croissance s'arrête plus rapidement que la production de l'acide lactique, car elle est plus sensible aux phénomènes d'inhibition par l'acide lactique. Le premier terme de l'équation s'annule, et la production d'acide lactique devient dépendante de la concentration microbienne. Les deux phénomènes sont alors découplés. Enfin, la production d'acide lactique s'arrête, sous l'effet des phénomènes d'inhibition.

2.2.2 Autres réactions métaboliques

Parallèlement à ces réactions du métabolisme carboné, les bactéries lactiques vont également utiliser et transformer les sources azotées du lait. Elles sont exigeantes en composants azotés car incapables de synthétiser des acides aminés à partir d'une source d'azote minérale. Le lait contient environ 32 g/L de composants azotés, qui se répartissent en une fraction soluble (acides aminés libres et petits peptides, protéines sériques, bases azotées, urée,

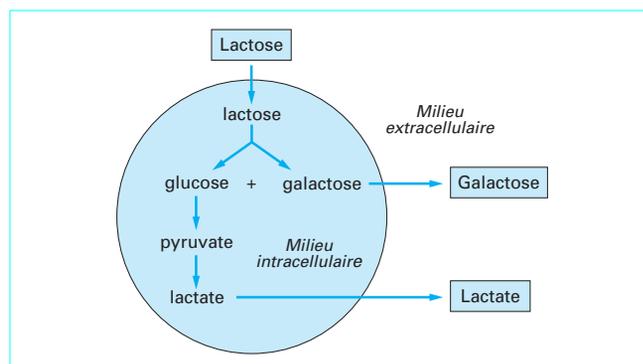


Figure 2 – Schéma simplifié des réactions du métabolisme fermentaire chez les bactéries lactiques homofermentaires du yaourt

vitamines du groupe B) et une fraction insoluble (caséines). Les bactéries lactiques sont capables d'utiliser les acides aminés, les petits peptides et les protéines du lait, mais avec une efficacité variable selon l'espèce considérée. Ces composants participent à de nombreuses fonctions cellulaires, notamment la synthèse des protéines (élaboration des constituants cellulaires et des enzymes) et la production de composés d'arômes (acétaldéhyde).

Les réactions du métabolisme bactérien font également intervenir des métabolites essentiels mais d'importance moindre comme les bases azotées, les vitamines ou les minéraux. Ainsi les bactéries lactiques sont particulièrement exigeantes en vitamines du groupe B (notamment acide panthothénique, niacine et riboflavine) même si certaines sont capables de synthétiser de l'acide folique. Les bases azotées, essentielles à la synthèse des acides nucléiques, doivent être apportées aux cellules, mais une variabilité importante est observée selon les espèces bactériennes. Enfin, certains cations interviennent dans les voies métaboliques des cellules, notamment le manganèse, le magnésium et le potassium.

2.2.3 Principaux produits formés lors de la fermentation

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

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

Certaines souches de bactéries sont capables d'utiliser les substrats carbonés pour produire des polysaccharides exocellulaires (localisés à l'extérieur de la cellule). Ces polysaccharides sont généralement composés d'unités répétitives, linéaires ou branchées, de sucres de taille variable (di- à hepta-saccharides). Ils vont modifier la viscosité du lait fermenté et présentent donc un grand intérêt pour les qualités texturales du produit.

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

2.2.4 Principaux facteurs influençant le métabolisme des bactéries lactiques

La croissance et l'acidification des bactéries lactiques sont fortement influencées par des facteurs physiques, chimiques et microbiologiques. En outre, les effets de ces facteurs peuvent interagir sur leur activité métabolique.

■ Facteurs physiques

- La **température** est le premier facteur environnemental à considérer pour le développement des bactéries lactiques. Elle agit sur les vitesses des réactions chimiques et biochimiques. Elle doit se trouver autour de 30 °C pour les bactéries mésophiles et autour de 42 °C pour les espèces thermophiles.

- L'**activité de l'eau** (aw) est liée à la présence de sels ou de sucres. Lorsqu'elle diminue, la quantité d'eau libre décroît et la disponibilité des nutriments est affectée. Concernant les laits fermentés, seule la présence de saccharose (cas des yaourts sucrés) peut diminuer cette activité de l'eau. Ainsi, lorsque l'aw devient inférieure à 0,99, ce qui correspond à une concentration en saccharose de 10 %, l'activité métabolique des bactéries est affectée.

■ Facteurs chimiques

- La **qualité du lait** est un facteur d'influence prépondérante pour le développement des bactéries lactiques. Si les teneurs initiales en lactose et en sels minéraux sont suffisantes dans le lait, ce n'est pas le cas de la fraction azotée libre (agglutinines, lactoperoxydases). La limitation en certaines molécules peut constituer un frein à la croissance.

- Le **traitement thermique** subi par le lait avant l'étape de fermentation (paragraphe 3.2.4) va agir favorablement sur le métabolisme des bactéries. En effet, outre son rôle principal de destruction des micro-organismes indésirables et pathogènes, il permet de détruire les principales substances antibactériennes naturellement présentes dans le lait (agglutinines, lactoperoxydases) ce qui favorisera les croissances bactériennes. De plus, il génère de faibles quantités d'acide formique à partir du lactose, ce qui stimulera la croissance des lactobacilles. Enfin, il contribue à l'augmentation de la teneur du lait en petits peptides et en acides aminés libres.

- Le **pH** est le troisième facteur chimique important pour la croissance des bactéries lactiques. Il intervient sur la disponibilité en nutriments du milieu, sur la perméabilité de la membrane cellulaire et sur les vitesses d'activité enzymatique. Lors de la production de yaourt, il n'est pas contrôlé et représente donc un facteur majeur de ralentissement du métabolisme bactérien.

■ Facteurs microbiologiques

- Le **taux d'ensemencement** du lait avec les bactéries lactiques influence fortement sa transformation. Plus il est élevé, plus rapide est la fermentation. Généralement, ce taux se situe autour de 10⁹ UFC/mL (UFC : unités formant colonie) pour, simultanément, obtenir des durées de fabrication courtes et limiter le coût d'achat des ferments. Pour un ensemencement direct, cela correspond à un taux d'inoculation compris entre 2,5 g et 70 g pour 100 L de lait selon l'espèce bactérienne considérée.

- Les **équilibres de population** agissent également sur les cinétiques microbiennes. Ainsi, dans le cas de la fabrication du yaourt, la durée de la fermentation varie selon la valeur initiale du rapport entre streptocoques et lactobacilles, même si, en fin de culture, les streptocoques sont toujours majoritaires. Pour le yaourt, la proportion entre streptocoques et lactobacilles habituellement préconisée est de 1:1 mais elle dépend fortement des souches en présence.

- Les bactéries lactiques sont sensibles aux **bactériophages** qui provoquent une lyse des cellules. Lors d'une infection phagique, la coagulation du lait est perturbée et c'est la production entière qu'il convient de détruire. Une décontamination des locaux et des matériels est également nécessaire. Les bactéries thermophiles sont moins lysogènes que les bactéries mésophiles. Toutefois, *Streptococcus thermophilus* est plus sensible que *Lactobacillus bulgaricus*.

2.2.5 Valeur nutritionnelle

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

■ Amélioration de la digestibilité du lactose

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

■ Amélioration de la digestibilité des protéines

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

■ Teneur en vitamines et sels minéraux

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

Tableau 2 – Composition comparée en vitamines du lait entier et d'un yaourt au lait entier (teneurs exprimées en µg pour 100 g de produit)
(D'après Tamime et Robinson, 2001)

Vitamines	Lait	Yaourt
Rétinol.....	52	28
Carotène	21	21
Thiamine (B1).....	30	60
Riboflavine (B2).....	170	270
Pyridoxine (B6).....	60	100
Cyanocobalamine (B12)	0,4	0,2
Vitamine C.....	1 000	1 000
Vitamine D.....	0,03	0,04
Vitamine E	90	50
Acide folique	6	18
Acide nicotinique	100	200
Acide pantothénique	350	500
Biotine.....	1,9	2,6
Choline.....	12 100	-

2.3 Physico-chimie de la fermentation lactique

2.3.1 Organisation micellaire des caséines

Les caséines, parmi lesquelles il faut distinguer les caséines α_{S1} , α_{S2} , β et κ (proportions relatives : 4/1/3,7/1,4) représentent 80 % de la matière azotée totale du lait. Elles se présentent sous la forme de particules sphériques ou micelles, d'un diamètre moyen de 180 nm, en suspension dans le lait frais. Les micelles de caséines sont constituées d'un noyau hydrophobe et d'une enveloppe périphérique hydrophile.

Le noyau, fortement hydrophobe, est composé exclusivement des caséines α_S et β , reliées entre elles par des ponts salins de phosphate de calcium, et par des liaisons hydrophobes et électrostatiques. L'enveloppe hydrophile, de 5 à 12 nm d'épaisseur, contient majoritairement des caséines κ et α_S , et quelques monomères de caséine β . Elle développe une charge négative, caractérisée par un potentiel zêta de -15 à -20 mV. Cette charge maintient les micelles en suspension, à l'écart les unes des autres.

2.3.2 Formation du gel lactique

Pendant la fermentation, le pH du lait diminue et les propriétés physico-chimiques des micelles de caséines sont profondément modifiées. Les fonctions acides de certains acides aminés, comme les acides glutamique et aspartique et la phosphosérine, fixent les protons formés, entraînant une annulation progressive de la charge négative des micelles. Celles-ci se rapprochent et établissent entre elles des liaisons hydrophobes et électrostatiques, ce qui conduit à la formation du gel lactique. La coagulation par acidification lactique du lait se décompose en quatre phases :

- **Entre pH 6,7 et 5,8** : une petite fraction du phosphate de calcium des micelles se solubilise sous l'effet de l'acidification. L'hydratation micellaire diminue. Certaines micelles s'associent dès le pH 5,8, mais ce début d'agrégation ne donne pas encore lieu à la formation d'un gel. Les micelles conservent leur forme et leur intégrité.

- **Entre pH 5,8 et 5,3** : la totalité du phosphate de calcium micellaire se solubilise, ce qui diminue les interactions entre protéines au sein des micelles. Cela provoque une augmentation de la taille et de l'hydratation des micelles, et une solubilisation partielle des caséines qui les constituent. Un début de gélification peut être

observé dès pH 5,5 car des liaisons hydrophobes s'établissent entre les protéines sériques dénaturées.

- **Entre pH 5,3 et 4,8** : les caséines dissociées sont réintégrées dans les particules micellaires. L'hydratation de ces nouvelles structures, appelées acido-micelles, est fortement réduite par rapport aux micelles natives.

- **En dessous de pH 4,8** : la répulsion électrostatique entre les acido-micelles s'annule (point iso-électrique des caséines : pH 4,6). Le phénomène d'agrégation initié à pH 5,5 s'amplifie. Les interactions hydrophobes et électrostatiques se renforcent et structurent le réseau protéique qui prend la forme d'un gel.

2.3.3 Rôle du chauffage du mix et des ferments sur la texture du yaourt

Le chauffage du mix (lait et constituants éventuellement ajoutés), ainsi que le choix des ferments jouent un rôle essentiel pour l'élaboration de la texture du yaourt. Un fort traitement thermique provoque la précipitation des protéines sériques à la surface des micelles de caséine, ce qui limite les possibilités de dissociation micellaire entre pH 5,3 et 4,8. Les particules micellaires restent donc de petite taille, bien individualisées. En outre, les protéines sériques dénaturées à la surface des micelles ont un pH isoélectrique plus élevé que celui des caséines (5,3 contre 4,6) et sont donc capables d'établir des liaisons entre elles à un pH plus élevé que les caséines. Le gel se forme plus rapidement, et le réseau est plus dense du fait d'un plus grand nombre de sites de liaisons possibles. Ce réseau plus dense donnera un gel plus ferme et moins poreux, donc moins apte à la synérèse que celui issu d'un mix ayant subi un traitement thermique modéré.

Certaines bactéries lactiques, qui sécrètent des polysaccharides dans le lait pendant l'acidification, contribuent à accroître la complexité et l'enchevêtrement du réseau gélifié ainsi que sa résistance au cisaillement. C'est pourquoi l'emploi de ces bactéries est particulièrement recommandé pour la production des yaourts brassés. Elles permettent de limiter la destruction du gel lors des traitements mécaniques et thermiques auxquels sont soumis les yaourts avant conditionnement.

La figure 3 compare la structure tridimensionnelle de yaourts obtenus à partir d'un lait faiblement chauffé (figure 3a : le gel est constitué de larges agrégats protéiques) ou fortement chauffé (figure 3b : le gel est plus dense), et d'une fermentation réalisée avec des bactéries productrices d'exopolysaccharides (figure 3c : présence de filaments de polysaccharides).

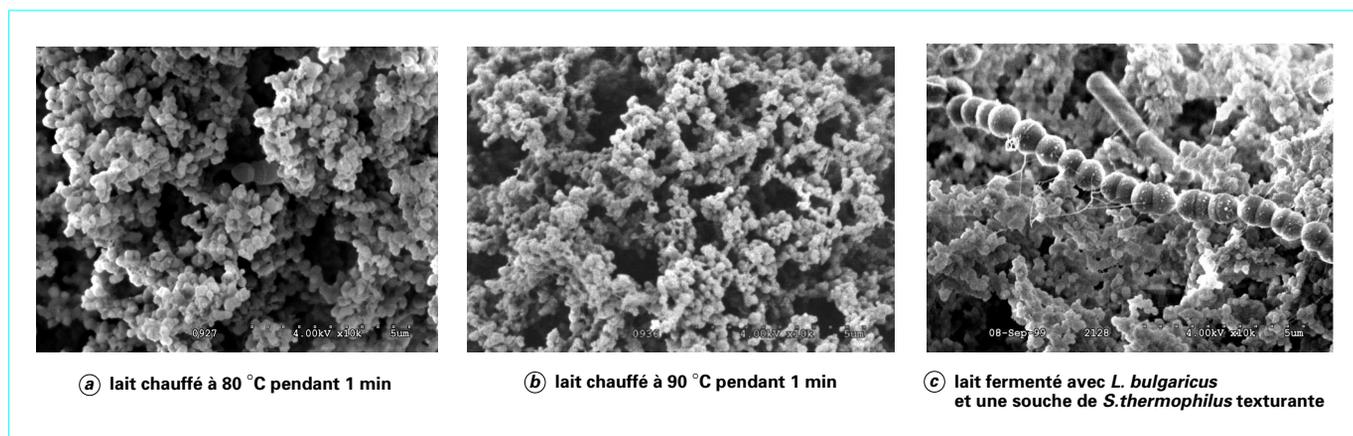


Figure 3 – Effet du chauffage du lait et des ferments utilisés sur l'organisation du réseau protéique des yaourts. Micrographies
(source J.P. Tissier - INRA)

3. Les grandes étapes de la fabrication des yaourts et des laits fermentés

3.1 Diagramme général de production

Les procédés de fabrication des yaourts et des laits fermentés se caractérisent par trois grandes étapes : la **préparation du lait**, la **fermentation** et les **traitements post-fermentaires** du produit. Le diagramme de production diffère selon le type de produit (yaourt ferme ou brassé) et présente des variantes selon sa teneur en matières grasses et son arôme. Le diagramme général de production est présenté figure 4 et les étapes de la fabrication sont détaillées aux paragraphes suivants.

3.2 Prétraitement du lait

3.2.1 Réception et stockage

Le lait frais, collecté au plus tard 72 h après la traite, arrive en camions-citernes réfrigérés à l'unité de production. Il est contrôlé lors de la réception (voir paragraphe 4.2), pompé et filtré pour éliminer les résidus solides (paille, feuilles, terre), puis stocké à froid (< 5 °C) dans des tanks stériles. Il s'agit de cuves en inox de grand volume (jusqu'à 100 000 L), avec une double enveloppe permettant de maintenir le lait au froid. La circulation d'eau froide dans la double enveloppe n'est cependant pas nécessaire pour maintenir une basse température sur des durées de stockage courtes (3 jours maximum). Une légère thermisation à 60-65 °C, au moyen d'un échangeur à plaques, peut être pratiquée si le lait est stocké plus d'une journée à l'usine.

3.2.2 Standardisation

Le lait de vache est constitué d'eau, de lactose, de matières grasses, de matières azotées protéiques (caséines et protéines sériques), non protéiques, et de minéraux. Sa composition moyenne (tableau 3) peut varier selon la race, l'alimentation, et le stade de lactation de l'animal. En fabrication de yaourt, le lait doit être standardisé en matières grasses, enrichi en protéines, et éventuellement sucré, pour répondre aux spécifications nutritionnelles et organoleptiques des produits.

Tableau 3 – Composition moyenne du lait de vache (teneurs exprimées en g pour 100 g)
(D'après Tamime et Robinson, 2001)

Composant	Teneur
Eau	87,8
Lactose	4,8
Matières grasses	3,9
Matières azotées	3,2
<i>dont caséines</i>	2,6
<i>protéines sériques</i>	0,5
<i>azote non protéique</i>	0,1
Minéraux	0,7
<i>dont calcium</i>	0,12
<i>phosphore</i>	0,09
<i>potassium</i>	0,14

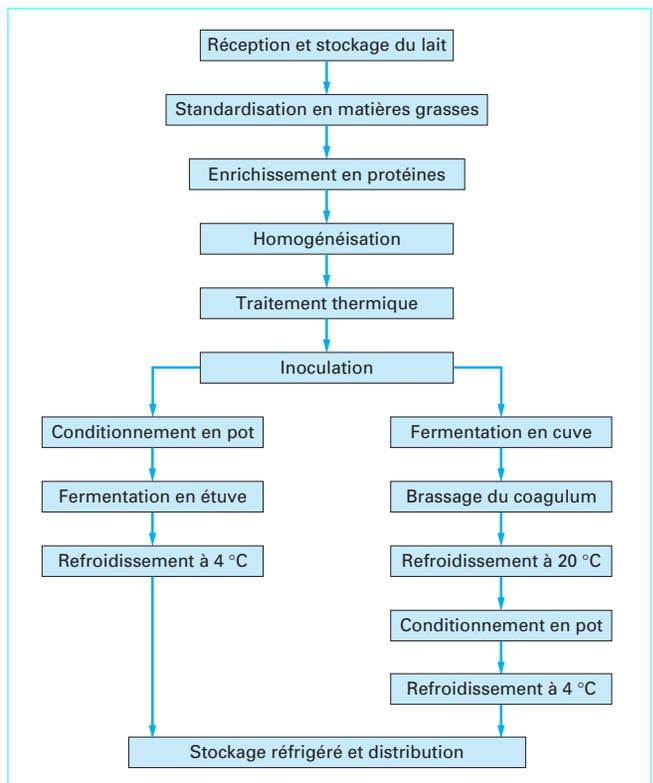


Figure 4 – Diagramme général de fabrication des yaourts et des laits fermentés

■ Standardisation en matières grasses

La teneur en matières grasses du lait cru varie entre 3,8 et 4,2 %. Les teneurs en matières grasses des yaourts du commerce sont comprises entre moins de 1 % pour les yaourts maigres, à 3,5 % pour les yaourts au lait entier, voire plus pour certaines références, comme le « yaourt à la grecque ». Il est donc nécessaire de standardiser le lait de fabrication à la teneur en matières grasses souhaitée pour le produit fini. Pour cela, le lait est tout d'abord écrémé, puis mélangé avec la crème dans les proportions souhaitées.

Exemple : calcul à effectuer pour la standardisation du lait en matières grasses.

Si l'on souhaite préparer un mix de 1 000 kg de lait à 1,5 % de matières grasses, il faut calculer les proportions de lait écrémé à 0,1 % de matières grasses et de crème à 50 % de matières grasses qu'il faudra mélanger.

Soit x la quantité de lait écrémé, et y la quantité de crème. Il s'agit de résoudre le système suivant de deux équations à deux inconnues :

$$x + y = 1\,000$$

$$0,1x + 50y = 1,5 \cdot 1\,000$$

Soit :

$$x = 972 \quad ; \quad y = 28$$

Il faut donc mélanger 28 kg de crème à 972 kg de lait écrémé, pour préparer 1 000 kg de lait à 1,5 % de matières grasses.

Les équipements requis pour la standardisation en matières grasses font intervenir une écrémeuse et des lignes de mélange. Le lait, chauffé à 70 °C, circule dans une écrémeuse (centrifugeuse à assiettes), afin de séparer la crème par centrifugation. Cette opération contribue, en outre, à éliminer les impuretés résiduelles

(bourbes). L'efficacité de l'écraimage peut permettre d'atteindre moins de 0,07 g de matières grasses pour 100 g de lait en sortie d'écraimeuse.

Le lait écrémé et la crème sont ensuite mélangés pour atteindre la teneur en matières grasses souhaitée dans le produit fini. Cette opération peut être réalisée en ligne par des systèmes d'ajustement automatique de la teneur en matières grasses. Différents capteurs (débitmètres, densimètres, sondes de température) permettent de calculer la teneur en matières grasses de la crème en ligne, afin d'ajuster de façon automatique son taux d'incorporation dans le lait écrémé. Ces systèmes peuvent fonctionner à des débits compris entre 7 000 et 45 000 L · h⁻¹. La précision du taux de matières grasses du mix de fabrication, calculée en se basant sur l'écart type de répétabilité, peut être meilleure que 0,03 %.

■ Enrichissement en protéines

La teneur en matières azotées totales du lait de vache, exprimée en équivalent protéines, fluctue pendant l'année entre 2,9 et 3,7 %. En conséquence, le lait standardisé en matières grasses doit être enrichi en protéines laitières pour former un yaourt consistant et exempt de synérèse. Les quantités de protéines ajoutées sont variables et dépendent de la texture recherchée (yaourt à boire, yaourt ferme, yaourt brassé, yaourt à sucer). Les taux protéiques finaux sont compris entre 3,2 et 5 %. En pratique, l'ajout de protéines laitières se fait de diverses manières. Historiquement, le lait était chauffé longuement avant la fermentation, afin de permettre une évaporation partielle, conduisant à une réduction au deux-tiers du volume initial, soit un taux protéique de 5 %. Cette pratique est maintenant marginale. Actuellement, il est plus courant de fortifier le lait par des ajouts de lait concentré, de poudre de lait écrémé, ou de lactoreplaceurs (rétentat de lait, lactosérum, concentrés de protéines sériques, caséinates).

La fortification du lait de fabrication par de la **poudre de lait écrémé** ou du **lait concentré** est la technique la plus largement répandue dans l'industrie. Elle présente l'avantage de donner des produits avec de bonnes qualités texturales et de faire figurer sur l'emballage, sous la rubrique « composition », la dénomination « lait » de façon exclusive. Il n'existe pas de différence de qualité entre ces deux méthodes de fortification ; le choix entre le lait en poudre ou concentré est dicté par la facilité d'approvisionnement de l'usine en ces deux ingrédients. L'incorporation de lait concentré, liquide, au lait de fabrication, est plus aisée que l'incorporation de lait en poudre. Cependant, elle nécessite un équipement plus conséquent (cuverie de stockage et de mélange).

La fortification par les **lactoreplaceurs** présente l'avantage d'être moins coûteuse, mais la mention « protéines laitières » doit figurer sur l'emballage. Si la fortification par de la poudre de rétentat donne de bons résultats en terme de texture du produit, il n'en est pas de même pour les fortifications avec, exclusivement, des concentrés de protéines sériques, des caséinates, ou du lactosérum. Ainsi, la fortification par du lactosérum ou des concentrés de protéines sériques, si elle est importante (supérieure à 2 %), peut occasionner des défauts de flaveur (odeur de sérum ou de fromage). Elle peut aussi générer la formation de grains dans le yaourt, ce qui implique de mettre en place des filtres au moment du refroidissement et du conditionnement. Par contre, ce type de fortification diminue la synérèse des yaourts grâce à la capacité de rétention d'eau élevée des protéines sériques dénaturées. Lorsque les caséinates sont utilisés pour enrichir le lait en protéines, ils augmentent de façon importante la viscosité par rapport aux autres modes de fortifications. Les produits résultants ont cependant une texture moins lisse que ceux enrichis par de la poudre de lait écrémé.

Finalement, le ratio entre les caséines et les protéines sériques apparaît décisif pour la définition de la texture des yaourts. C'est pourquoi il est recommandé d'utiliser les protéines sériques et les caséinates en mélange, plutôt que seuls, afin de ne pas déséquilibrer l'organisation du réseau protéique au moment de la gélification.

En effet, ces mélanges sont plus fonctionnels à équivalence protéique que la poudre de lait, et sont aussi plus économiques. Actuellement, sur le marché européen, ils sont majoritairement utilisés. Il s'agit de mélanges à 35 % de protéines (comme la poudre de lait), à 50 % de protéines (appellation protéines de lait), ou à 70 % de protéines (stabilisants protéiques). Le rapport entre les caséines et les protéines sériques de ces mélanges est de l'ordre de 1 à 1,2.

Le calcul des quantités de poudres ou de lait concentré à ajouter se fait d'après les teneurs en protéines respectives du lait et de la source d'enrichissement protéique.

Exemple : pour préparer 1 000 kg de mix à 4,5 % de taux protéique, à partir d'un lait à 3,3 % de matières protéiques totales, un enrichissement par ajout d'une poudre de lait écrémé à 34 % de taux protéique est réalisé. Le calcul des proportions du mélange fait intervenir, comme précédemment pour la standardisation en matières grasses, la résolution d'un système de deux équations à deux inconnues, x la quantité de lait, et z la quantité de poudre :

$$\begin{aligned}x + z &= 1\,000 \\3,3x + 34z &= 4,5 \cdot 1\,000\end{aligned}$$

Soit :

$$x = 961 \quad ; \quad z = 39$$

Finalement, il sera nécessaire d'incorporer 39 kg de poudre de lait écrémé à 961 kg de lait pour obtenir 1 000 kg de mix à un taux protéique de 4,5 %.

L'équipement requis pour l'incorporation des ingrédients secs (poudre de lait, lactoreplaceurs, sucre) dans la phase aqueuse (lait standardisé en matières grasses) doit permettre leur complète dispersion et hydratation, en évitant notamment la formation de grumeaux. Il doit aussi limiter l'incorporation d'air au moment du mélange pour réduire la formation de mousse et des défauts de texture ultérieurs du yaourt. Il doit enfin être facile à nettoyer. Différents systèmes existent, permettant l'addition d'ingrédients secs de façon continue ou discontinue. L'entonnoir de mélange est le système le plus simple. Ce système nécessite une cuve, une connexion tubulaire, une pompe centrifuge, et un entonnoir de mélange. La cuve est remplie de lait à 40-50 °C, qui est mis en circulation avec un débit de l'ordre de 25 m³ · h⁻¹. Le sac de poudre est déversé dans l'entonnoir. Le lait, mis en circulation sous l'entonnoir, crée une force d'aspiration, qui permet l'incorporation progressive de la poudre au lait. La vanne connectant l'entonnoir à la boucle de recirculation présente une géométrie particulière (élargissement suivi d'un rétrécissement de la tubulure) qui facilite l'incorporation de la poudre par effet venturi. Il existe également des unités de mélange en ligne, dont l'objectif est de dissoudre la poudre en continu dans le lait standardisé. Les vitesses d'incorporation de la poudre sont de l'ordre de 45 kg · min⁻¹. Enfin, il est aussi possible d'incorporer les ingrédients secs dans des cuves de mélange. Différentes géométries sont proposées pour le système d'agitation (turbines, hélices, surface raclée). La qualité du mélange est fonction de la vitesse d'agitation et de la géométrie du système.

■ Addition éventuelle de sucre

Le lait peut être additionné de sucre avant la fermentation, à hauteur de 5 à 10 %. Cette addition conditionne le choix des ferments, car certaines souches sont sensibles à la diminution de l'activité de l'eau qui résulte de cette opération. Parfois, le sucre est apporté en deux fois, une partie avant la fermentation, une partie après, pour ne pas ralentir l'acidification. Le sucre est généralement constitué de saccharose, cristallisé ou sous forme liquide (sirop). Il est aussi courant d'utiliser du sucre inverti (sirop de saccharose hydrolysé), qui contient, à parts égales, du glucose et du fructose. Son intérêt est qu'il reste liquide à des teneurs élevées en matières sèches (65 à 67 %). Il existe aussi des sirops de sucre inverti dont une partie du glucose a été isomérisé en fructose (sirops à haute teneur en fructose). Ils ont l'avantage de présenter

un pouvoir sucrant plus élevé que les précédents. Enfin, dans le cas des produits allégés, le sucrage est effectué par addition d'édulcorants (aspartam ou polyols). Comme ces produits sont sensibles au chauffage, ils sont toujours ajoutés après le traitement thermique.

3.2.3 Homogénéisation

Le lait standardisé en matières grasses et enrichi en protéines, éventuellement sucré, constitue le mix de fabrication. Il est homogénéisé afin de réduire la taille des globules gras. Cette opération est indispensable pour éviter la remontée des matières grasses pendant la fermentation. Elle permet aussi d'augmenter la viscosité du yaourt et de réduire le phénomène d'exsudation de sérum (ou synérèse) pendant le stockage du yaourt ferme. Enfin, elle confère un aspect plus blanc au lait et, par conséquent, au yaourt.

Pour des raisons hygiéniques et pour éviter une recontamination du lait, l'étape d'homogénéisation est généralement positionnée avant le traitement thermique du mix ou au cours de sa montée en température, vers 65-70 °C. Néanmoins, certains travaux ont montré que cette opération a un impact plus important sur la viscosité du yaourt si elle est réalisée après le traitement thermique. En effet, le traitement thermique provoque la dénaturation des protéines sériques et leur fixation sur la κ -caséine. Le complexe κ -caséine-protéines sériques dénaturées s'intègre pendant l'homogénéisation dans la membrane des globules gras, ce qui maximise leur contribution à l'élaboration du gel lactique.

Les homogénéisateurs rencontrés en fabrication de yaourts sont composés d'un ou de deux étages. Pour des produits riches en matières grasses, le dispositif à deux étages est nécessaire. Le principe de ces systèmes consiste à forcer la circulation du mix à travers un petit orifice de 0,1 mm de diamètre. La vitesse de circulation du liquide est généralement de 100 à 400 m · s⁻¹ dans l'entrefer, et l'homogénéisation a lieu en 10 à 15 μ s. Le débit d'homogénéisation se situe entre 4 000 et 20 000 L · h⁻¹. Il est égal au débit appliqué pour le traitement thermique, ces deux opérations étant réalisées en continu, à la suite l'une de l'autre. Les pressions appliquées sont comprises entre 170 et 180 bar en moyenne, et la température est de l'ordre de 65 à 70 °C. Le diamètre moyen des globules gras natifs, qui est initialement de 3,5 μ m avec une dispersion de 1 à 10 μ m, devient inférieur à 2 μ m.

3.2.4 Traitement thermique et refroidissement

Le traitement thermique appliqué au mix est toujours drastique. Il vise à réduire la charge microbienne et à améliorer les propriétés physiques du yaourt (viscosité, capacité de rétention d'eau). Son objectif est de dénaturer 80 % de la fraction protéique sérique, soit totalement l' α -lactalbumine et la β -lactoglobuline, pour assurer une bonne texture du produit fini. En effet, l'état physique des protéines sériques a des répercussions majeures sur la consistance des gels lactiques. Quand elles sont dénaturées, les deux principales protéines du sérum, l' α -lactalbumine et la β -lactoglobuline, se fixent à la surface des micelles de caséines par l'intermédiaire de ponts disulfure. Ce faisant, elles empêchent la fusion des micelles au moment de l'acidification, évitant la formation d'agrégats de grande taille et de larges pores dans le caillé lactique. Les risques de synérèse sont alors réduits. À l'état natif, l' α -lactalbumine et la β -lactoglobuline sont des protéines globulaires. Elles se déploient pendant leur dénaturation, démasquant ainsi certains sites hydrophobes. Lorsqu'elles se trouvent sous cette forme déployée, au moment de la gélification, elles peuvent établir entre elles des pontages par l'intermédiaire de liaisons hydrophobes. Elles contribuent ainsi, par la densification du maillage protéique qu'elles occasionnent, à l'amélioration de la viscosité et de la fermeté du yaourt.

Deux systèmes peuvent être utilisés pour traiter le mix : le traitement batch ou le traitement en continu. Le traitement batch est

réalisé dans des cuves à double enveloppe, par injection directe de vapeur dans la double enveloppe, ou par circulation d'une eau chauffée par injection de vapeur. Les barèmes appliqués sont généralement de 85 à 90 °C pendant 15 à 30 min. Le système en continu est plus rationnel pour des unités de fabrication industrielles. Il permet de réduire le volume de cuverie et les coûts énergétiques, et améliore la productivité et la souplesse des installations. Il implique la mise en œuvre d'échangeurs tubulaires ou, plus fréquemment, d'échangeurs à plaques. Les barèmes de traitement thermique sont variables selon les installations : 30 min à 85 °C, 5 min à 90-95 °C, ou 3 s à 115 °C. Le traitement le plus courant est un chauffage à 92 °C pendant 5 à 7 min, avec un débit de circulation compris entre 4 000 et 20 000 L · h⁻¹. Le maintien du lait à 92 °C pendant 5 à 7 min est réalisé dans une section de chambre située à l'extérieur de l'échangeur. Il s'agit de tubes en acier inoxydable, compactés à l'intérieur d'une cuve thermostatée. À l'issue du traitement thermique, le lait est refroidi à la température de fermentation.

Dans certains cas, en production de yaourt ferme, le lait est refroidi à 4 °C, soit avant, soit après inoculation. Il peut être alors conservé quelques heures dans des cuves en surpression et à basse température. Il est ensuite porté à la température de fermentation au moment du conditionnement, par des systèmes de chauffage spécifique, étalonnés par rapport à la conditionneuse. Cette méthode permet plus de souplesse et limite les pertes en cas de panne de la conditionneuse.

3.3 Fermentation du lait

À l'issue de son prétraitement, le lait, éventuellement additionné de sucre, estensemencé. La culture se déroule de façon discontinue, ce qui se traduit par une évolution des concentrations et des caractéristiques physico-chimiques (notamment du pH) au cours du temps. L'arrêt de la fermentation est provoqué par un refroidissement rapide du produit.

3.3.1 Modes d'ensemencement

Historiquement, l'ensemencement des cuves de fabrication en industrie était réalisé à partir de plusieurs précultures successives, effectuées dans des cuves « inoculum ». Ces précultures sont pratiquement abandonnées pour des raisons de répétabilité incertaine, de difficultés de maintien de l'hygiène et de lourdeur de mise en œuvre.

Actuellement, c'est l'ensemencement direct ou semi-direct qui est pratiqué, en associant des souches bien caractérisées et dont les propriétés sont au préalable connues. L'industriel producteur de yaourts ou de laits fermentés achète les bactéries à d'autres industriels dont le métier est spécifiquement la production de ferments lactiques. Ces ferments sont commercialisés sous forme congelée (stockage à < -40 °C) ou lyophilisée (stockage à < 4 °C). Ils sont ajoutés, en quantité suffisante (par exemple entre 5 × 10⁵ et 5 × 10⁶ UFC/mL), directement dans la cuve de fabrication (ensemencement direct) ou dans la cuve mère (ensemencement semi-direct).

Dans tous les cas, l'ensemencement est effectué dans un lait préalablement porté à la température de fermentation, laquelle dépend des bactéries lactiques utilisées. Elle est de 40 à 45 °C dans le cas du yaourt.

Le rapport entre les différentes espèces et souches bactériennes en présence influe fortement sur la cinétique de fabrication. Pour le yaourt, un rapport 1:1 en volume, entre *S. thermophilus* et *L. bulgaricus*, est généralement recommandé. En réalité, chaque fabricant travaille dans des conditions qui lui sont propres, en privilégiant plutôt l'impact de chaque association sur les caractéristiques finales du produit.

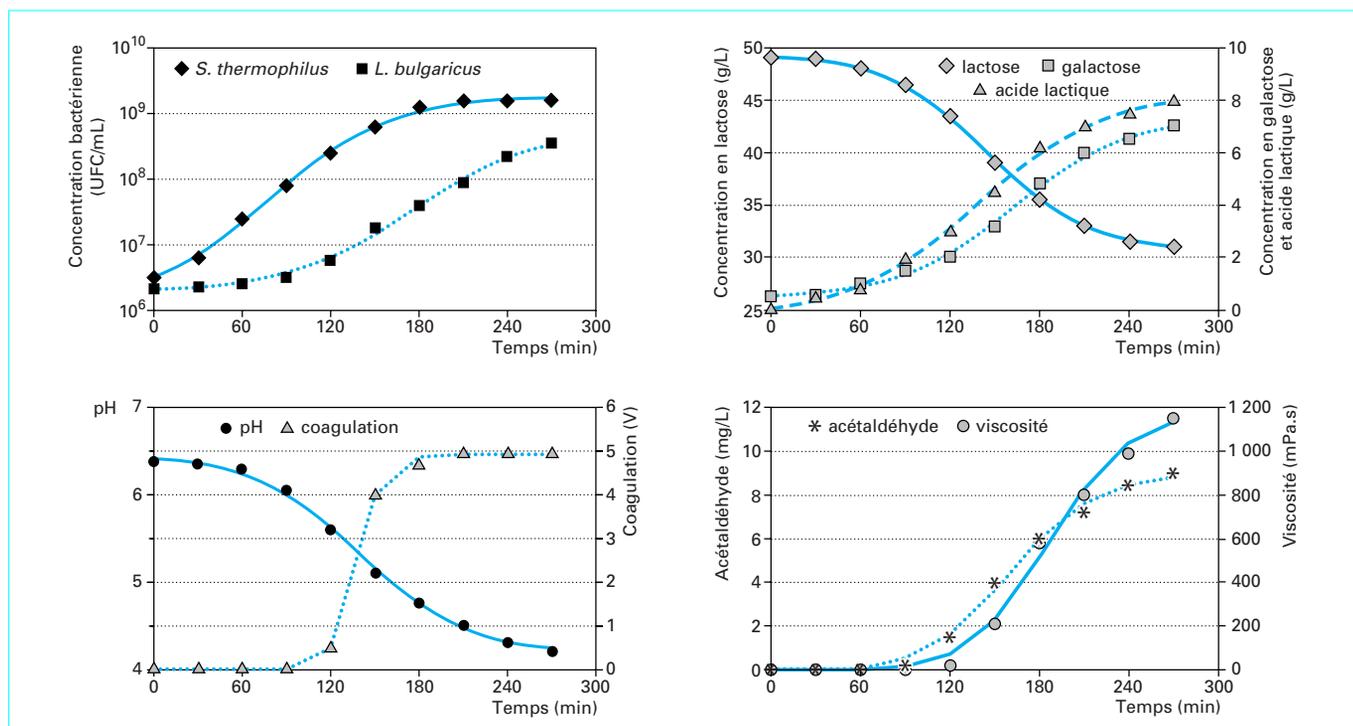


Figure 5 – Évolution des principales caractéristiques microbiologiques et physico-chimiques lors de l'étape d'incubation d'un yaourt brassé

3.3.2 Cinétiques de la production de yaourt

La figure 5 montre, à titre d'exemple, l'évolution des principales caractéristiques microbiologiques et physico-chimiques lors d'une production de yaourt par les bactéries thermophiles *Streptococcus thermophilus* et *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*.

La croissance de *S. thermophilus* débute rapidement, bien avant celle de *L. bulgaricus* qui nécessite les facteurs de croissance issus de l'activité métabolique des streptocoques, et se termine après 3 h 30. Le lactobacille croît à partir de 2 h de culture et sa croissance se poursuit pendant les 6 h de la fermentation car cette espèce bactérienne est moins sensible à l'acidité du milieu. Généralement, le rapport final entre les deux espèces est nettement en faveur du streptocoque.

La concentration en lactose, principal substrat de la croissance bactérienne, décroît de 49 g/L à 32 g/L. Il reste donc une quantité importante de lactose dans le produit. Parallèlement, les concentrations en galactose et en acide lactique augmentent pour atteindre respectivement 7 et 8 g/L. Le rendement molaire de production en acide lactique (quantité d'acide lactique formé rapportée à la quantité de lactose consommé) est de 90 %, ce qui traduit un métabolisme homofermentaire, caractéristique des espèces bactériennes impliquées.

Le pH diminue progressivement, pour passer d'environ 6,4 à 4,2 dans l'exemple présenté. Cette évolution est inversement proportionnelle à celle observée pour la concentration en acide lactique. La diminution du pH provoque la gélification du lait (voir paragraphe 2.2). Ainsi, le signal mesuré par une sonde de coagulation de type « fil chaud » évolue en fonction du pH : il est stable tant que le pH reste supérieur à 5,8, puis il augmente brusquement lorsque le pH décroît à 4,8 pour se stabiliser ensuite.

La dernière partie de la figure 5 montre que la viscosité du yaourt s'accroît avec le temps, suite à la gélification du lait et à la production de polysaccharides exocellulaires sécrétés par les bac-

téries. Enfin, la concentration en acétaldéhyde du yaourt augmente au cours de la culture. Cette donnée traduit, de façon partielle, la composition aromatique du produit, qui se développe grâce à l'activité bactérienne.

Finalement, le yaourt obtenu se caractérise par une concentration bactérienne supérieure à 1 milliard par millilitre, une acidité dont la valeur exacte dépend de l'instant d'arrêt de la culture, une concentration en lactose plus faible que dans le lait et la présence de composés qui vont influencer sur les qualités organoleptiques de texture et de flavour.

3.3.3 Mise en œuvre de la fermentation

Selon le type de yaourt produit, ferme ou brassé, la fermentation se déroule dans des pots ou dans des tanks de fermentation dont la forme, la taille et l'instrumentation varient.

Dans le cas du yaourt ferme, la coagulation se tient directement dans le pot, après conditionnement aseptique. L'inoculation et, éventuellement, l'ajout d'arômes ou de colorants sont réalisés dans le lait. Si nécessaire, des préparations de fruits sont apportées directement dans le pot. Puis, le laitensemencé est distribué dans les pots qui sont ensuite rapidement scellés (voir paragraphe 3.5), incubés et refroidis. L'incubation est conduite soit en chambres chaudes, avec une circulation forcée d'air chaud, puis d'air froid pour le refroidissement, soit en tunnels, dont la longueur et la vitesse de déplacement des palettes contenant les pots de yaourts dépendent de l'acidité du produit recherchée.

Dans le cas des yaourts brassés, la fermentation est effectuée dans la cuve de fabrication. En fin de fermentation, le gel est éventuellement brassé dans la cuve, puis pompé pour être refroidi et conditionné. La cuve peut être soit multifonctions (traitement thermique du lait, fermentation, refroidissement), soit uniquement dédiée à la fermentation, soit prévue pour la fermentation et le refroidissement. Le volume des cuves disponibles dans le

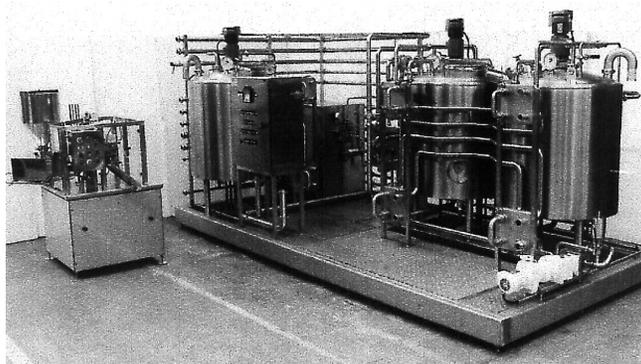


Figure 6 – Installation pilote de production de yaourts brassés
(documentation Pierre Guérin)

commerce varie de quelques dizaines de litres à plusieurs dizaines de milliers de litres. Elles sont généralement munies d'une double enveloppe afin d'assurer les transferts thermiques et d'un système d'agitation afin d'homogénéiser le lait et de réhydrater les ferments lors de l'ensemencement. Elles sont aussi équipées d'un système de nettoyage en place. À titre d'illustration, la figure 6 présente une petite unité de production industrielle.

3.3.4 Contrôle et arrêt de la fermentation

La première condition opératoire à contrôler pendant la fermentation est la température de culture. Au cours de la fermentation du yaourt, la température est maintenue entre 40 et 45 °C, ce qui correspond à l'optimum pour la culture mixte de *S. thermophilus* et *L. bulgaricus*. Pour la fabrication des autres laits fermentés, la température est déterminée par les micro-organismes impliqués (30 à 45 °C).

La durée de l'incubation est la deuxième condition essentielle à bien maîtriser. Cette durée est de 3 h pour un yaourt inoculé avec un rapport correct entre les coques et les bacilles, à plusieurs heures pour d'autres laits fermentés (12 à 16 h pour des fermentations mésophiles conduites à 30 °C). La maîtrise de la durée de fermentation assure un arrêt de la culture à un pH donné et évite une acidification trop poussée.

Le contrôle de la fermentation reste encore rudimentaire, contrairement aux autres étapes de la production. La complexité des réactions, microbiologiques et biochimiques, rend en effet son automatisation difficile. Pour la fabrication des yaourts fermes, seul le contrôle de la température de la chambre d'incubation est réalisé. Si un tunnel d'incubation est utilisé, la vitesse de déplacement est également contrôlée. Dans les deux cas, la durée d'incubation est préalablement fixée. Toutefois, l'obtention d'un pH final donné peut être contrôlée par titration ou pH-métrie sur des prélèvements.

Pour la production de yaourts brassés, un contrôle du niveau de remplissage de la cuve et de pompage du coagulum est effectué. Les cuves de fermentation sont en outre équipées d'une sonde de température et éventuellement d'une ou deux électrodes de pH. Leur emploi demeure toutefois exceptionnel à cause de leurs difficultés d'utilisation (fragilité, étalonnage, encrassement). Des sondes pH en céramique sont cependant utilisables pour effectuer des mesures en ligne. Il est également possible de réaliser des mesures indirectes en ligne de l'acidification. L'utilisation d'une sonde de conductivité électrique ou la mesure de l'élévation de la température du lait, due au métabolisme exothermique des bactéries lactiques, permettent ainsi de suivre en ligne l'évolution de la concentration en acide lactique.

3.4 Traitements post-fermentaires

3.4.1 Brassage du coagulum

Le brassage du coagulum, qui intervient uniquement en production de yaourts brassés, est réalisé avant le refroidissement. Il est effectué soit par brassage lent, à l'aide d'hélices marines, dans la cuve de fermentation, soit, le plus souvent, par pompage du gel, en amont de l'échangeur thermique. Afin de lisser le gel et d'éviter la présence de grains dans le produit, le coagulum peut passer au travers d'un filtre ou traverser une tête de lissage.

3.4.2 Refroidissement

Le refroidissement doit permettre de passer rapidement de 40-45 °C à 4 °C, afin de bloquer le plus rapidement possible les activités métaboliques et enzymatiques et de limiter les problèmes de post-acidification. Il débute dès que le produit a atteint l'acidité désirée et se déroule, selon les cas, en une ou deux phases. Sa durée est généralement comprise entre 30 min et 1 h. Pratiquement, dans le cas du yaourt, le refroidissement est initié lorsque la teneur en acide lactique atteint 0,8 à 1 %, de telle sorte que l'acidité finale du produit refroidi ne dépasse pas 1,2 à 1,4 %.

Concernant les **yaourts fermes**, le refroidissement est réalisé soit, dans des chambres froides, par circulation d'air refroidi soit, dans des tunnels de refroidissement. Les pots sont ensuite maintenus à basse température pendant leur stockage, leur transport et lors de leur distribution.

Dans le cas des **produits brassés**, le refroidissement est conduit en deux étapes. Une première phase de refroidissement amène le lait fermenté de 40-45 °C à environ 20 °C. Le produit est conditionné à cette température puis subit un second refroidissement en pot, qui abaisse sa température à 4 °C. Cette méthode présente l'intérêt de conditionner le produit à 20 °C plutôt qu'à 4 °C, et donc à une viscosité moindre, ce qui permet de le conditionner plus rapidement et de limiter les dommages structuraux sur le gel.

La première phase du refroidissement est réalisée :

- par refroidissement direct dans la cuve de fermentation, à une vitesse qui dépend de la surface et de la géométrie de l'échangeur de chaleur, du débit du liquide de refroidissement, de la différence de température entre le produit et le liquide de refroidissement et de la vitesse d'agitation du produit ;

- par passage dans un échangeur de chaleur, soit tubulaire soit à plaques, généralement alimenté par de l'eau refroidie. Cette solution nécessite le pompage du gel et sa circulation à l'intérieur de l'échangeur de chaleur, ce qui provoque sa déstructuration. Le débit du produit et du liquide de refroidissement dans l'échangeur ainsi que la surface de l'échangeur sont les principaux critères à maîtriser. Dans le cas des échangeurs à plaques, pour limiter la perte de texture du gel, la distance entre les plaques de l'échangeur est plus importante (6 mm) que celle des échangeurs classiquement utilisés pour la pasteurisation du lait (2,5 mm). De plus, la distance entre les plaques augmente légèrement entre le début et la fin de l'échangeur, pour éviter une trop grande surpression, dommageable pour la texture. Enfin, il est préférable de multiplier les échangeurs et de les positionner en parallèle, plutôt que de surdimensionner un échangeur et d'accroître le nombre de plaques. En effet, la perte de texture du yaourt sera plus importante s'il circule dans un échangeur de plus grand volume. La capacité des échangeurs mis en œuvre pour le refroidissement du yaourt brassé doit être réglée par rapport à celle de la conditionneuse. Elle est comprise entre 1 000 et 20 000 L · h⁻¹.

Après l'addition éventuelle d'ingrédients et le conditionnement, les pots de yaourts brassés sont refroidis de 20 °C à 4 °C par passage dans un tunnel ou directement dans le local de stockage final. Les produits sont ensuite stockés à 4 °C jusqu'à leur distribution.

3.4.3 Addition d'ingrédients

La liste des additifs autorisés dans les laits fermentés est restrictive. Fournie initialement à l'article 3 du décret n° 88-1203 du 30 décembre 1988, elle a été précisée par l'arrêté du 14 octobre 1991 (décret n° 89-674 du 18 septembre 1989). Elle concerne les arômes naturels et artificiels, les pulpes et jus de fruits, les confitures et fruits sur sucre ainsi que les sucres et additifs au pouvoir sucrant (miel, aspartam). Ces produits peuvent être apportés à hauteur de 30 % maximum en poids. L'incorporation de matières grasses et protéiques non laitières est interdite.

Onze colorants sont autorisés dans les laits fermentés aromatisés : curcumine E100, riboflavine E101i, riboflavine 5' phosphate E101ii, cochenille E120, indigotine E132, chlorophylles E140, caramel E150, caroténoïde E160, xanthophylles E161, rouge de betterave E162 et anthocyanes E163.

Seulement deux conservateurs sont autorisés dans les laits fermentés, car ils sont initialement présents dans les préparations de fruits destinées aux laits fermentés et aux yaourts aux fruits : l'acide sorbique E200 et le sorbate de potassium E202. La dose maximale est fixée à 0,2 %.

L'addition des différents ingrédients intervient soit avant la fermentation pour les yaourts fermes (sucres, arômes, colorants) soit, pour les yaourts brassés, après la fermentation, par l'addition de préparations de fruits.

3.5 Conditionnement

■ Matériaux d'emballages

Les yaourts sont généralement conditionnés dans deux types de matériaux d'emballage : le verre, réservé aux produits haut de gamme, ou le plastique. Les pots en carton paraffiné ont maintenant pratiquement disparu, après avoir été très populaires au début des années 1960.

Les matériaux d'emballage utilisés pour la gamme plastique doivent résister à l'acidité, éviter la perte d'arômes et être imperméables à l'oxygène pour empêcher la croissance des levures et des moisissures pendant la conservation. Les matériaux plastiques susceptibles de répondre à ce cahier des charges sont le polystyrène, le polypropylène et le polyéthylène. Le polystyrène est de loin le matériau le plus utilisé, car il présente l'avantage de pouvoir être prédécoupé ce qui facilite la sécabilité des pots.

Les opercules destinés aux pots préfabriqués sont généralement constitués d'aluminium ou de capsules plastiques adaptées au pot. Pour les pots thermoformés, des opercules en aluminium ou en matériau composite (papier/polyester ou polyester métallisé) sont thermoscellés.

■ Conditionnement

Le conditionnement est réalisé soit dans des emballages préfabriqués dans des usines spécialisées (pots en verre, coupes ou bouteilles en plastique rigide obtenues par moulage) soit dans des emballages formés directement sur la machine de conditionnement (pots en plastique semi-rigide). Lorsque les emballages ne sont pas formés sur place, ils sont décontaminés avant remplissage par exposition aux UV ou par vaporisation de peroxyde d'hydrogène. Lorsque les pots sont formés sur place, le chauffage du plastique nécessaire à leur mise en forme suffit à les décontaminer.

Dans le cas des yaourts fermes aromatisés ou aux fruits, les arômes ou les préparations de fruits sont introduits dans les pots, avant l'addition du lait. Pour les yaourts brassés aux fruits, les préparations de fruits sont ajoutées en ligne, avant le conditionnement, grâce à des mélangeurs statiques ou dynamiques. Ces mélangeurs comportent trois unités : une unité de dosage de la préparation de fruits, une unité de dosage du yaourt, et une chambre de mélange. Le mélange peut se faire de façon statique, avec

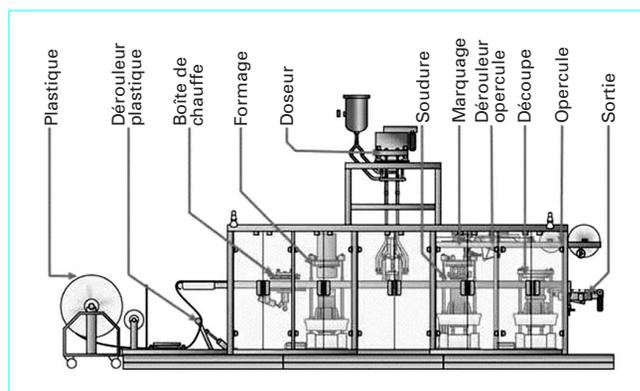


Figure 7 – Schéma de principe d'une thermoformeuse-remplisseuse en ligne (documentation Erca-Formseal)

une géométrie hélicoïdale de la chambre de mélange, ou dynamique, à l'aide d'une boucle de recirculation pour une bonne répartition des fruits.

Le remplissage et le dosage des pots sont effectués par des pompes volumétriques, sous air filtré. Les pots sont fermés de façon hermétique par thermoscellage, en utilisant des opercules décontaminés par rayonnement infrarouge. Les pots sont ensuite imprimés d'une date limite de consommation et d'un code permettant d'assurer leur traçabilité. Les lots, de 2 à 16 pots, sont confectionnés grâce à une sur-emballeuse.

Les machines de conditionnement atteignent des cadences très élevées, allant jusqu'à 50 000 pots par heure. Elles peuvent également doser un parfum ou un fruit par pot, soit 6 parfums ou 6 fruits pour 6 pots. Un exemple de thermoformeuse-remplisseuse, proposée par l'équipementier Erca-Formseal, spécialiste du conditionnement des produits laitiers frais, est présenté à la figure 7.

■ Étiquetage

L'étiquetage des yaourts et laits fermentés est très réglementé en France. Un certain nombre d'indications doivent obligatoirement figurer sur l'emballage, d'autres restent facultatives.

Les **mentions obligatoires** sont :

- l'indication de l'espèce animale si le lait mis en œuvre n'est pas exclusivement du lait de vache (exemple : yaourt au lait de brebis) ;
- la mention « maigre » si la teneur en matière grasse du produit, calculée sur la partie lactée, est inférieure à 1 % en poids ;
- la mention « sucré » ou « aromatisé à... » le cas échéant (exemple : yaourt aromatisé à la fraise) ;
- la mention des ingrédients ajoutés, comme la pulpe ou les préparations de fruits (exemple : yaourt à la fraise) ;
- la date limite de consommation, sous la forme « à consommer jusqu'au... ». Cette date, indiquée sous la responsabilité du fabricant, doit être postérieure au maximum de 24 jours à la date de fabrication.

Les **mentions optionnelles** sont :

- la mention « gras » si la teneur en matière grasse du produit, calculée sur la partie lactée, est supérieure à 3 % en poids ;
- la mention « nature », éventuellement associée au mot « sucré » pour les yaourts ayant été additionnés de sucre, afin de les distinguer plus facilement des yaourts aromatisés ou aux fruits.

Enfin, la réglementation française est très contraignante pour les décors et les images apposés sur l'emballage des yaourts aromatisés. Il est notamment interdit de représenter des fruits de façon réaliste sur les emballages de ces produits, afin de ne pas risquer de les confondre avec ceux qui contiennent de la pulpe ou des préparations de fruits.

■ Commercialisation

Après leur fabrication, les laits fermentés doivent être maintenus à une température maximale de + 6 °C pendant leur transport et leur entreposage, et de + 8 °C lors de la remise au consommateur.

4. Contrôles de la qualité en production

4.1 Objectifs

Les contrôles qualité sont effectués sur les matières premières et les produits finis, mais aussi pendant la fabrication (autocontrôles) et sur les équipements (maintenance préventive). Ils visent à assurer la mise sur le marché de produits sains (exempts de risques microbiologique, chimique ou physique) et conformes à la réglementation en vigueur. Ils permettent également de s'assurer que les laits fermentés présentent les qualités organoleptiques requises et attendues par le consommateur (flaveur, texture, couleur) et qu'ils seront stables pendant toute la durée de commercialisation, en vérifiant la non-contamination par des micro-organismes d'altération.

4.2 Contrôles des matières premières

Les quatre ingrédients principaux en fabrication de laits fermentés sont le lait, les poudres, les ferments et les préparations de fruits. Leur qualité sanitaire et leurs propriétés technologiques sont contrôlées à réception, de façon systématique pour le lait et en respectant un plan d'échantillonnage pour les autres ingrédients.

■ Contrôle de la qualité du lait

Le lait, qui arrive à l'usine en camions-citernes réfrigérés, est systématiquement contrôlé à réception. La température de transport, le nombre de germes totaux et de cellules somatiques, ainsi que l'acidité titrable renseignent sur sa qualité sanitaire. L'analyse de sa composition en matières grasses et en matières azotées ainsi que le dépistage des antibiotiques permettent d'apprécier sa qualité technologique. Le tableau 4 rapporte un exemple des spécifications requises pour un lait destiné à la fabrication de yaourt.

■ Contrôle de la qualité des poudres

Un cahier des charges est établi entre le fabricant de poudres et le producteur de laits fermentés pour s'assurer de la qualité microbiologique des poudres, et de leurs propriétés technologiques de composition et de solubilité. Le tableau 5 illustre, par un exemple, les critères de qualité requis pour une poudre de lait.

Tableau 4 – Exemple de spécifications requises à réception du lait

(D'après Tamime et Robinson, 2001)

Critère	Valeur
Température à réception	< 10 °C
Germes totaux	$\leq 10^5$ UFC · mL ⁻¹
Cellules somatiques	$\leq 4,0 \times 10^5$ cellules · mL ⁻¹
Acidité titrable	Acide lactique $\leq 0,2$ %
Composition chimique	Matières grasses ≥ 3 g · 100 g ⁻¹ Matières azotées ≥ 3 g · 100 g ⁻¹
Substances inhibitrices	$\leq 0,004$ µg · mL ⁻¹

Tableau 5 – Exemple de spécifications requises pour une poudre de lait utilisée en fabrication de yaourt
(D'après Tamime et Robinson, 2001)

Critère	Valeur
Acidité du lait reconstitué	$\leq 0,15$ %
Solubilité (ADPI) (1)	$\leq 0,5$ mL
Humidité	$\leq 4,5$ g · 100 g ⁻¹
Substances inhibitrices	$\leq 0,006$ IU · g ⁻¹
Germes totaux	$\leq 10^5$ UFC · g ⁻¹
Coliformes	≤ 100 UFC · g ⁻¹
<i>Staphylococcus aureus</i>	≤ 100 UFC · g ⁻¹
Levures	≤ 100 UFC · g ⁻¹
Moisissures	≤ 100 UFC · g ⁻¹

(1) ADPI : American Dry Product Institute.

■ Contrôle de la qualité des ferments

Les propriétés acidifiantes de chaque lot de ferments lactiques sont vérifiées en utilisant un système de suivi automatisé de leur cinétique d'acidification tel que le système Cinac. Le nombre de bactéries viables au sein des ferments et le ratio entre streptocoques et lactobacilles sont déterminés par comptages microscopiques ou par dénombrements sur boîtes de Pétri, en utilisant des milieux gélosés sélectifs.

Le système Cinac constitue actuellement une méthode de référence pour classer et comparer des ferments, sur la base de leur activité acidifiante. Ce système développé par Corrieu et coll. en 1988, est constitué de quatre parties fonctionnelles (figure 8) :

- un bain-marie thermostaté, dans lequel sont plongées les fioles de lait contenant les ferments à contrôler ;
- plusieurs sondes de pH (de 8 à 26) et de température (1 ou 2) ;
- une interface électronique constituée (i) d'une carte analogique, composée de transmetteurs, assurant la mise en forme du signal de chaque sonde et (ii) de trois cartes numériques, permettant la conversion numérique/analogique, la gestion des actionneurs pour la régulation et la communication entre l'ordinateur et les autres cartes,
- un micro-ordinateur type PC, relié à l'interface et fonctionnant avec le logiciel WCinac.

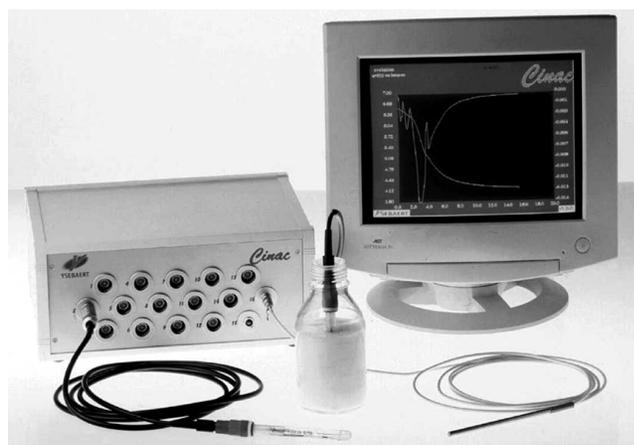


Figure 8 – Système Cinac de mesure de l'activité acidifiante des ferments lactiques (documentation Ysebaert)

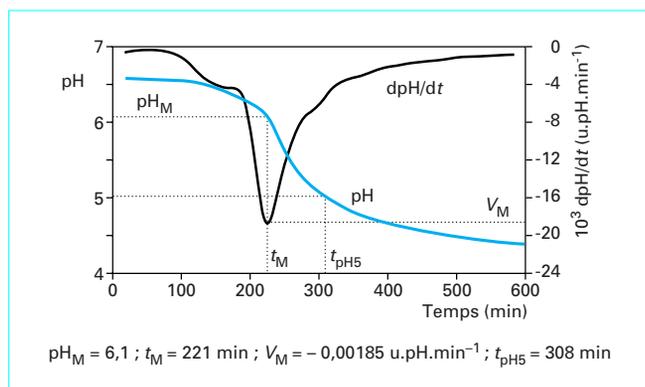


Figure 9 – Évolution du pH et de la vitesse d'acidification, mesurés à l'aide du système Cinac, lors d'une culture de *Streptococcus thermophilus* dans du lait à 42 °C

Le logiciel WCinac effectue simultanément, sur toutes les voies, l'étalonnage des sondes de pH en deux points, l'acquisition et le stockage des données de pH selon une période prédéfinie, la régulation de la température du bain-marie, le calcul en temps réel de la vitesse d'acidification et des descripteurs et les représentations graphiques. Il réalise aussi la conversion des données sous des formats compatibles avec d'autres logiciels.

La figure 9 présente, à titre d'exemple, l'évolution du pH et de la vitesse d'acidification (dpH/dt) au cours du temps, lors de l'incubation d'un ferment lactique thermophile du yaourt dans du lait à 42 °C. Les descripteurs généralement retenus sont la vitesse maximale d'acidification (V_M , en u.pH.min⁻¹), le pH correspondant à V_M (pH_M), le temps correspondant à V_M (t_M , en min) et les temps (t_{pHi} , en min), nécessaires pour atteindre certains pH_i . Les résultats obtenus sont répétables, à condition de bien normaliser les méthodes (étalonnage des sondes de pH, régulation de la température du bain-marie, préparation du lait, maîtrise des volumes d'inoculation).

■ Contrôle de la qualité des préparations de fruits

Les risques microbiologiques liés aux préparations de fruits concernent les levures et les moisissures. L'absence de contamination est vérifiée, à réception, par la mesure de la pression de CO₂ à l'intérieur du container. Celle-ci constitue un indicateur indirect de fermentations indésirables. Les propriétés physico-chimiques des préparations (Brix, pH, viscosité) et la distribution de la taille des fruits peuvent également être contrôlées.

4.3 Contrôles réalisés en cours de fabrication

Pendant la fabrication, certains points critiques comme la pasteurisation ou la cinétique d'acidification doivent être contrôlés. Le respect du barème de pasteurisation est vérifié, de façon classique, par l'enregistrement de la température de chambre et du débit d'alimentation de l'échangeur. L'acidification est, le plus souvent, contrôlée en effectuant des prélèvements et des mesures de l'acidité Dornic ou du pH. Cependant, sur certains sites industriels, il existe maintenant des systèmes d'enregistrement automatique du pH. Il peut s'agir d'une mesure directe du pH grâce à des électrodes en céramique, incassables et résistantes aux opérations de nettoyage-désinfection. Un système de mesure indirect du pH a été récemment développé : il consiste à mesurer le dégagement de chaleur observé pendant l'acidification, directement corrélé à la quantité d'acide lactique produit. Une calibration préalable est nécessaire pour accéder au pH.

4.4 Maintenance préventive

Certaines opérations de maintenance préventive font intégralement partie du système d'assurance qualité de l'usine, parce que leur conduite est déterminante pour la sécurité alimentaire. Ainsi, l'étanchéité des échangeurs de chaleur, en particulier ceux qui permettent le refroidissement du yaourt brassé après la fermentation, doit être régulièrement vérifiée pour s'assurer de l'absence de fuites de l'eau de refroidissement. Les systèmes de filtration, qui assurent la propreté de l'air de l'enceinte de conditionnement, doivent être contrôlés et les filtres, changés à intervalles de temps réguliers.

4.5 Contrôles des produits finis

Les caractéristiques microbiologiques, physico-chimiques et sensorielles des laits fermentés, sont contrôlées à la fin de leur fabrication.

■ Caractéristiques microbiologiques

Un dénombrement des flores spécifiques des laits fermentés est effectué afin de vérifier qu'ils répondent aux normes réglementaires. Une recherche des bactéries pathogènes est également réalisée : les seuls critères impératifs sont l'absence de *Salmonella* dans 25 g et de *Listeria monocytogenes* dans 1 g de produit.

■ Caractéristiques physico-chimiques et sensorielles

La teneur en protéines et en matières grasses est systématiquement contrôlée sur les produits finis. Le pH et/ou l'acidité titrable sont aussi mesurés. Enfin, la texture des laits fermentés, qui est un critère important pour leur qualité sensorielle, peut être caractérisée par différents systèmes (viscosimètre Brookfield, entonnoir de Posthumus, consistomètre Boswick, pénétromètre, texturomètre, rhéomètre). Les produits sont également dégustés par un panel d'experts entraînés. En effet, il est délicat de substituer complètement l'analyse sensorielle du produit par des analyses instrumentales.

5. Développements actuels en production de laits fermentés

Les laits fermentés sont des produits laitiers dont le marché est en croissance. Toutefois, leur évolution s'oriente selon les tendances générales qui sous-tendent l'apparition et le développement de nouveaux produits. Ces tendances sont liées à différents facteurs de société qu'il importe de prendre en compte :

- travail des femmes (produits présentant un gain de temps pour les courses et la cuisine) ;
- restauration hors foyer (développement de la restauration rapide) ;
- réduction de la taille des ménages (apparition des « portions ») ;
- aliments « santé » (ingrédients naturels, aliments allégés, tendance « bio ») ;
- grignotage (bouchées, facilité de transport, facilité à tenir, produit non salissant, facilité à consommer) ;
- produits à destination des enfants (snacking, texture adaptée, jouets) ;
- recherche de plaisir (onctuosité, crémeux, léger) ;
- produits « tradition » (« fait maison », « bio », terroir) ;
- voyage, évasion (arômes, produits ethniques).

Les conséquences de ces tendances se traduisent par l'apparition fréquente de nouveaux produits, qui, même s'ils ne sont pas toujours poursuivis, induisent une augmentation des parts de marché de ce secteur. Parmi ces différents produits, certains relèvent d'une innovation « produit », d'autres, d'une innovation « procédé ».

Les laits fermentés rencontrés sur le marché concernent donc des produits très variés, avec quatre grandes tendances :

- produits d'origine non occidentale (laits d'origine variée, produits concentrés) ;
- produits à durée de vie élevée (laits fermentés thermisés, séchés ou glacés) ;
- produits « plaisir » (laits fermentés glacés, à boire, à sucer, pétillants) ;
- produits « santé » (laits fermentés faiblement caloriques, probiotiques).

5.1 Laits fermentés d'origine non occidentale

■ Produits issus de différents types de laits

Ces produits sont principalement consommés sur le pourtour méditerranéen, au Proche-Orient, sur la péninsule indienne et en Russie. Ils apparaissent depuis quelques années sur le marché français.

Il s'agit de laits fermentés à base de lait de chèvre, de brebis, de bufflonne, de chamelle ou d'ânesse. Leur procédé de fabrication est proche de celui des yaourts. Ils se différencient des produits à base de lait de vache par leur teneur en caséines et matières grasses. En conséquence, la texture et l'arôme de ces produits diffèrent fortement des yaourts classiques.

■ Laits fermentés concentrés

Traditionnellement, les laits fermentés concentrés sont consommés en Orient. Les plus connus sont le labneh (Liban) et le chakka (Inde). Ils se caractérisent par une texture plus ferme, liée à une teneur en matières sèches plus élevée (22 à 24 %). La fermentation est généralement thermophile, avec les bactéries *S. thermophilus* et *L. bulgaricus*.

Leur fabrication traditionnelle fait intervenir un égouttage naturel du lactosérum dans un « sac », généralement en tissu, ce qui augmente la matière sèche du produit et sa concentration en acide lactique, et facilite sa conservation. Plus récemment, les techniques de centrifugation (5 min à 10 000 g) et d'ultrafiltration (2 à 4 étapes) ont été appliquées, à l'échelle industrielle, à la fabrication de ces produits.

5.2 Laits fermentés à durée de vie élevée

■ Laits fermentés thermisés

L'application d'un traitement thermique aux laits fermentés, à la fin de leur production, permet d'augmenter significativement leur durée de vie. Ce traitement permet d'inactiver les enzymes, les bactéries lactiques, mais aussi les autres micro-organismes éventuellement présents ou contaminants. Les produits obtenus n'ont cependant plus droit à l'appellation « yaourt », car les bactéries ne sont plus vivantes.

Deux types de traitement thermique sont généralement appliqués : pasteurisation (20 à 30 min à 50-55 °C) ou chauffage UHT (20 s à 1 min à 60-85 °C). Le chauffage est réalisé après la première étape de refroidissement du produit à 20 °C, puis le produit est brassé et conditionné à chaud. Pour stabiliser la texture des produits traités thermiquement, il est généralement recommandé d'ajouter des épaississants tels que des carragénanes, de l'amidon, de la gomme guar ou de la pectine.

■ Laits fermentés lyophilisés ou séchés

La production de laits fermentés en poudre permet de les conserver sous une forme stable et facile d'utilisation, pendant une longue durée. Cependant, ils ne contiennent plus de micro-organismes vivants en grande quantité et leurs caractéristiques organoleptiques (goût, texture) sont différentes de celles d'un yaourt ordinaire.

Produits principalement en Orient (par exemple, le kishk au Liban), ils sont traditionnellement fabriqués en deux étapes : concentration, mise sous forme de billes et séchage au soleil. Actuellement, c'est la technique de séchage par atomisation qui est utilisée pour la fabrication des produits commerciaux. Des additifs sont ajoutés au produit pour améliorer sa texture (stabilisants, sucrose, dextrose) lors de la réhydratation. Après leur reconstitution, les produits peuvent être consommés presque immédiatement (« yaourt instantané ») ou doivent être incubés plusieurs heures pour permettre la coagulation.

5.3 Laits fermentés « plaisir »

■ Laits fermentés glacés

Les laits fermentés glacés constituent, à la fois, une troisième alternative à l'augmentation de leur durée de vie, et des produits destinés au « plaisir » du consommateur. Ils se définissent comme des « glaces » caractérisées par un goût frais et acide.

La fabrication de ces produits est simple : le yaourt refroidi est mélangé avec les ingrédients (fruits, sucres, émulsifiants, stabilisants), puis surgelé. D'un point de vue réglementaire, il n'y a pas de règles strictes de composition, sauf aux Pays-Bas, où le produit doit contenir au minimum 70 % de yaourt. Au niveau commercial, ces produits sont bien développés et sont proposés sous des formes très diversifiées, en fonction de l'origine du lait, des micro-organismes utilisés et des arômes apportés.

■ Yaourts à boire

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

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

■ Laits fermentés pétillants

Ces produits, appelés également laits carbonatés, se caractérisent par leur capacité à développer un pétilllement lors de leur consommation. Ils sont commercialisés sous forme liquide (yaourt à boire pétillant), séchée (développement du pétilllement lors de la réhydratation du produit), ou mixte (addition d'une poudre qui génère un pétilllement, au yaourt au moment de sa consommation).

La fabrication des laits fermentés pétillants liquides est généralement réalisée par carbonatation du mix par du CO₂ ou par homogénéisation (4,8 Pa à 4 °C). Les produits secs sont additionnés de carbonates, de préférence de calcium, ce qui réduit leur caractère acide. Ces carbonates libèrent du CO₂ lorsque le produit est réhydraté. Il est aussi possible de reconstituer les produits secs dans de l'eau pétillante. Enfin, pour les yaourts commercialisés sous forme

mixte, la poudre carbonatée et additionnée de sucres, colorants et arômes, est hydratée au moment de la dégustation par le consommateur ce qui provoque un pétélement immédiat du produit.

5.4 Laits fermentés « santé »

■ Produits faiblement caloriques

Les laits fermentés faiblement caloriques correspondent aux produits à faible teneur en matière grasse. Ils se caractérisent par le remplacement de la fraction lipidique du lait par des substituts qui présentent des propriétés fonctionnelles et organoleptiques similaires, sans apporter de calories.

Il existe trois catégories de substituts : amidons modifiés (en provenance de maïs, de pomme de terre, de tapioca), fibres modifiées (issues du pois, de la betterave ou de l'inuline) ou protéines modifiées (de lait ou de soja). Ces molécules présentent, selon le cas, des propriétés émulsifiantes ou gélifiantes qui agissent sur la texture et la stabilité physique des produits. Elles sont ajoutées dans le lait à hauteur de 1 à 5 % et ne modifient pas les cinétiques fermentaires. Leur influence sur les caractéristiques organoleptiques du produit diffère selon leur nature.

■ Laits fermentés dits « probiotiques »

Le développement commercial des produits « probiotiques » est important et correspond à une demande du consommateur. Ces produits peuvent, en effet, présenter une activité sur la santé humaine, d'ordre préventif, voire thérapeutique. Cette activité est supérieure à celle du yaourt, puisque *S. thermophilus* et *L. bulgaricus* ne survivent pas dans le tractus intestinal.

Les probiotiques sont définis comme des micro-organismes vivants qui, ingérés en grande quantité, exercent des effets bénéfiques sur la santé. Les principaux micro-organismes reconnus pour leur activité probiotique figurent dans le tableau 6. Il est probable que seules les bactéries d'origine humaine sont susceptibles d'avoir une telle action.

Les connaissances relatives aux propriétés probiotiques de ces bactéries sont, à ce jour, encore incomplètes. Certains effets bénéfiques, cliniques ou biologiques, obtenus suite à la consommation des probiotiques, sont maintenant admis par la communauté scientifique. Des études cliniques en double aveugle, randomisées et contre placebo, ont montré que certaines souches avaient un rôle anti-diarrhéique (notamment chez le nourrisson), et une action positive pour le traitement de gastro-entérites et de dysfonctionnements liés à la prise d'antibiotiques. Certaines espèces peuvent présenter un rôle direct au niveau intestinal, si elles survivent lors du processus digestif. Quelques souches de *L. acidophilus* sont ainsi capables d'adhérer aux cellules de la paroi intestinale. Certaines bactéries développent également *in vivo* une activité antimicrobienne qui peut favoriser la flore utile : compétition vis-à-vis de certains pathogènes, inhibition des pathogènes aérobies par diminution du potentiel redox, diminution du pH intestinal par production d'acides organiques, production de composés inhibiteurs (bactériocines). Des effets biologiques associés à la

Tableau 6 – Principales espèces bactériennes retrouvées dans des préparations revendiquant une activité probiotique

Genre	Espèce
<i>Bifidobacterium</i>	<i>Bifidobacterium bifidum</i>
	<i>Bifidobacterium breve</i>
	<i>Bifidobacterium infantis</i>
	<i>Bifidobacterium longum</i>
	<i>Bifidobacterium sp.</i>
<i>Enterococcus</i>	<i>Enterococcus faecium</i>
<i>Lactobacillus</i>	<i>Lactobacillus acidophilus</i>
	<i>Lactobacillus casei</i>
	<i>Lactobacillus fermentum</i>
	<i>Lactobacillus johnsonii</i>
	<i>Lactobacillus plantarum</i>
	<i>Lactobacillus reuteri</i>
<i>Lactobacillus rhamnosus</i>	

consommation de probiotiques ont aussi été démontrés chez l'homme et l'animal, comme la modulation des fonctions intestinale et immunitaire. Certains lactobacilles démontrent une activité immunostimulante, et agissent sur les mécanismes immunitaires spécifiques et non spécifiques. D'autres effets bénéfiques attribués aux probiotiques restent sujets à controverse, en raison du manque de résultats obtenus avec des études cliniques rigoureuses réalisées chez l'homme. Ainsi, certaines souches probiotiques pourraient posséder des propriétés anti-mutagènes ou exercer une activité anti-tumorale. L'administration orale de certains probiotiques pourrait aussi prévenir de maladies atopiques (allergies) et traiter des maladies inflammatoires de l'intestin (maladie de Crohn). Néanmoins, ces derniers effets sont encore très discutés au sein de la communauté scientifique.

6. Conclusion

La production de laits fermentés représente une technologie complexe, qui fait intervenir différents facteurs : en premier lieu, des facteurs biologiques, associés à la mise en œuvre d'une matière première d'origine vivante, le lait, et à sa transformation par des micro-organismes, les bactéries lactiques ; en second lieu, des facteurs d'ordre technologique, liés à la mise en œuvre de différentes opérations unitaires. Cette complexité permet des combinaisons très diverses, ce qui aboutit à l'élaboration de produits très variés. Les contraintes de qualité, à la fois hygiénique, organoleptique et nutritionnelle, doivent, en outre, impérativement être prises en compte.