



HAL
open science

Fabrication des yaourts et des laits fermentés

Catherine Béal, Sandra Helinck

► **To cite this version:**

Catherine Béal, Sandra Helinck. Fabrication des yaourts et des laits fermentés. Fabrication des yaourts et des laits fermentés, F6315, 2019, Techniques de l'Ingénieur. hal-03519802

HAL Id: hal-03519802

<https://hal.science/hal-03519802>

Submitted on 10 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Production of yogurts and fermented milks

par **Catherine BÉAL**

Fonction Professeur à AgroParisTech

Affiliation UMR 782 Génie et Microbiologie des Procédés Alimentaires, AgroParisTech INRA
Université Paris-Saclay, CBAI, 78850 Thiverval-Grignon, France

Sandra HELINCK

Fonction Maître de conférences à AgroParisTech

Affiliation UMR 782 Génie et Microbiologie des Procédés Alimentaires, AgroParisTech INRA
Université Paris-Saclay, CBAI, 78850 Thiverval-Grignon, France

Cet article est la version actualisée de l'article F6315 intitulé « Fabrication des yaourts et des laits fermentés» rédigé par Catherine BÉAL, Isabelle SODINI et paru en 2003.

Résumé (~500 - 700 signes) : Résumé du texte - Résumé du texte

La fermentation du lait par des bactéries lactiques provoque son acidification et sa gélification et conduit à l'obtention de yaourts et de laits fermentés. Cet article expose les bases microbiologiques et technologiques de cette transformation ainsi que les évolutions des propriétés sensorielles et hygiéniques des produits qui en découlent. Il décrit successivement les micro-organismes impliqués, les modifications biochimiques et physico-chimiques induites par la fermentation lactique, les étapes du procédé de fabrication à l'échelle industrielle ainsi que les contrôles qualité réalisés. Les développements récents liés à la production de laits fermentés sont finalement abordés.

Abstract (~500 – 700 signs): Text abstract - Text abstract

Lactic acid fermentation of milk by lactic acid bacteria induces its acidification and coagulation, thus leading to yogurts and fermented milks. This article presents the microbiological and technological bases of milk transformation and points out the subsequent modifications of the sensory and hygienic properties of the products. It successively describes the microorganisms, the biochemical and physico-chemical reactions involved in the lactic acid fermentation, the main steps of the process at industrial scale as well as quality controls that are performed. The last trends related to fermented milks production are finally indicated.

Mots-clés (~ 3-6) :

Yaourt, lait fermenté, fermentation lactique, acidification, bactéries lactiques, procédé de fabrication

Keywords (~ 3-6):

Yogurt, fermented milk, lactic acid fermentation, acidification, lactic acid bacteria, process

Table des matières

Introduction	4
1 Définitions et réglementation	4
2 La fermentation lactique	5
2.1 Microbiologie de la fermentation lactique	5
2.1.1 Micro-organismes utilisés	5
2.1.2 Caractères généraux des bactéries lactiques du yaourt	6
2.1.3 Croissance associative dans le yaourt	7
2.2 Biochimie de la fermentation lactique	7
2.2.1 Métabolisme du lactose et production d'acide lactique	7
2.2.2 Autres réactions métaboliques	8
2.2.3 Principaux produits formés lors de la fermentation	9
2.2.4 Principaux facteurs influençant le métabolisme des bactéries lactiques	9
2.2.5 Valeur nutritionnelle	10
2.3 Physico-chimie de la fermentation lactique	11
2.3.1 Organisation micellaire des caséines	11
2.3.2 Formation du gel lactique	12
2.3.3 Rôle du chauffage du mix et des ferments sur la texture du yaourt	12
3 Le procédé de fabrication des yaourts et des laits fermentés	13
3.1 Diagramme général de production	13
3.2 Prétraitement du lait	14
3.2.1 Réception et stockage	14
3.2.2 Standardisation	14
3.2.3 Homogénéisation et désaération	16
3.2.4 Traitement thermique et refroidissement	17
3.3 Fermentation du lait	18
3.3.1 Modes d'ensemencement	18
3.3.2 Cinétiques de la production de yaourt	19
3.3.3 Mise en œuvre de la fermentation	20
3.3.4 Contrôle et arrêt de la fermentation	20
3.4 Traitements post-fermentaires	21
3.4.1 Refroidissement	21
3.4.2 Brassage du coagulum	22
3.4.3 Concentration du coagulum	22
3.4.4 Addition d'ingrédients	22
3.5 Unités de production industrielle	23
3.5.1 Lignes de production intégrée	23
3.5.2 Nettoyage et désinfection des ateliers de production	24
3.6 Conditionnement des produits	24
3.6.1 Matériaux d'emballages	24
3.6.2 Machines de conditionnement	25
3.6.3 Étiquetage	26
3.6.4 Commercialisation	26
4 Contrôles de la qualité en production	26
4.1 Objectifs	26
4.2 Contrôles des matières premières	27
4.2.1 Contrôle de la qualité du lait	27
4.2.2 Contrôle de la qualité des poudres	27
4.2.3 Contrôle de la qualité des préparations de fruits	28
4.2.4 Contrôle de la qualité des ferments	28
4.3 Contrôles et maintenance réalisés en cours de fabrication	29
4.3.1 Contrôle en cours de process	29
4.3.2 Management de la qualité sanitaire	29
4.3.3 Maintenance préventive et corrective	30
4.4 Contrôles des produits finis	30

4.4.1	Caractéristiques microbiologiques	30
4.4.2	Caractéristiques physico-chimiques	30
4.4.3	Caractéristiques sensorielles	30
5	Développements actuels en production de laits fermentés	31
5.1	Laits fermentés à durée de vie élevée	31
5.1.1	Laits fermentés thermisés	31
5.1.2	Laits fermentés séchés	31
5.1.3	Utilisation de bactéries lactiques bio-protectrices dans les laits fermentés	32
5.2	Laits fermentés « plaisir »	32
5.2.1	Laits fermentés concentrés	32
5.2.2	Laits fermentés glacés	32
5.2.3	Yaourts et laits fermentés à boire	33
5.2.4	Laits fermentés pétillants	33
5.3	Laits fermentés « santé »	33
5.3.1	Produits faiblement caloriques	33
5.3.2	Laits fermentés incluant des micro-organismes probiotiques	33
5.3.3	Laits fermentés contenant des peptides bioactifs	35
5.4	Laits fermentés diversifiés	35
5.4.1	Produits issus de différents types de laits	35
5.4.2	Laits fermentés par des consortia microbiens complexes	35
5.4.3	Produits issus de lait biologique	36
5.4.4	Produits à base de laits fermentés	36
5.4.5	Produits fermentés à base de végétaux	36
6	Conclusion	36
	Glossaire	37
	Sigles, notations et symboles	39
7	Pour en savoir plus	40
7.1	Références bibliographiques	40
7.2	Autres ressources	41
7.2.1	Normes	41
7.2.2	Règlementation	41
7.2.3	Brevets	42
7.2.4	Sites internet	42
7.3	Données statistiques et économiques	42

Introduction

Les laits fermentés sont des produits laitiers obtenus par une fermentation essentiellement lactique du lait, qui aboutit à son acidification et à sa gélification. Contrairement aux fromages, la coagulation est due uniquement à l'action des bactéries lactiques et ne fait pas intervenir de coagulant. Historiquement, il s'agissait de permettre une meilleure conservation du lait, matière première rapidement périssable. Depuis le siècle dernier, ces produits ont gagné de l'intérêt auprès des consommateurs du fait de leurs propriétés nutritionnelles mieux connues, de leurs caractéristiques organoleptiques agréables (fraîcheur, acidité et onctuosité) et de leur diversité. Ils représentent ainsi une part importante de la consommation de produits laitiers, soit actuellement (2018) environ 21 kg par jour et par habitant en France.

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 environ 10 000 ans. Actuellement, ils sont commercialisés dans de très nombreux pays, à partir de productions industrielles ou artisanales.

Le lait fermenté le plus consommé dans les pays occidentaux est le yaourt. Toutefois, une grande variété de laits fermentés est produite dans le monde : les laits fermentés acides (yaourt, laban, leben, dahi), concentrés (yaourt grec, labneh, srikhand), à boire (ayran, dough, laban arbil, lassi, shenina, tan), éventuellement épaissis par l'utilisation de cultures spécifiques (viili), les produits acides et légèrement alcoolisés (kéfir, koumiss) et les laits fermentés peu acides (buttermilk, lait ribot). Certains laits fermentés contiennent des microorganismes appelés probiotiques, c'est-à-dire qui exercent un effet positif sur la santé du consommateur, lorsqu'ils sont vivants dans les produits et ingérés en quantité suffisante. Ces laits fermentés sont commercialisés partout dans le monde sauf en Europe où l'allégation santé n'est pas autorisée. A ces produits frais, s'ajoutent des produits dérivés comme les laits fermentés pasteurisés, congelés, en poudre ou carbonatés.

L'importance de ces produits, tant pour les consommateurs, qui les choisissent pour leur apport nutritionnel, leurs caractères sensoriels, leur facilité d'emploi et leur diversité, que sur les plans industriel et économique, justifie l'intérêt permanent qui leur est porté. La qualité des produits et la régularité des productions représentent en outre des sujets sur lesquels les efforts se poursuivent.

S'appuyant sur les enjeux de ces produits pour l'alimentation humaine et sur le contexte technico-économique favorable qui les entoure, cet article a pour objectif de donner une vision globale de la fabrication des laits fermentés, et notamment des yaourts. Il s'attachera tout d'abord à définir ces produits en précisant leur réglementation, à présenter les microorganismes impliqués dans leur élaboration et leurs spécificités, et à expliquer les mécanismes biochimiques liés à la transformation du lait par fermentation lactique et les mécanismes physico-chimiques qui justifient les modifications de texture des produits. Il présentera ensuite le procédé de fabrication des yaourts et laits fermentés en indiquant, pour chaque étape, les objectifs visés, les conditions mises en œuvre à échelle industrielle et les équipements utilisés, sur les lignes de production et de conditionnement. Seront notamment abordés les procédés de traitement du lait préliminaires à la fermentation, la fermentation lactique et les traitements post-fermentaires. Les questions relatives à la maîtrise de la qualité en cours de fabrication, des matières premières et des produits finis sont ensuite considérées. Enfin, les évolutions récentes visant le développement et la diversification de ces produits concluront cet article. Des données bibliographiques et économiques sont également indiquées en annexe.

1 Définitions et réglementation

Selon la réglementation française (décret n°88/1203 du 30 décembre 1988), 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 de 0,6 %. Il peut être additionné de certains ingrédients lui conférant une saveur spécifique (sucre, arômes, préparations de fruits, additifs), 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.

Au niveau européen, la réglementation s'appuie sur la directive Européenne 79/112/CEE du 18 décembre 1978 et sur le Codex Alimentarius (Codex Stan 243-2003). 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 sont précisés par le Codex Alimentarius (Codex Stan 192-1995).

Les laits fermentés peuvent être classés en plusieurs catégories, selon le lait utilisé pour leur fabrication, leur teneur en matières grasses, les micro-organismes impliqués dans leur transformation, leur texture et leurs caractéristiques aromatiques (figure 1). Les différences entre les produits sont générées grâce aux propriétés des microorganismes, à la formulation du mix (lait standardisé) et aux modalités de conduite des étapes du procédé de fabrication. Dans tous les cas, les produits sont considérés comme des produits laitiers frais, soumis à une date limite de consommation. Ils doivent donc être maintenus au froid (moins de 5°C) et présenter une durée de vie limitée (généralement 28 jours).

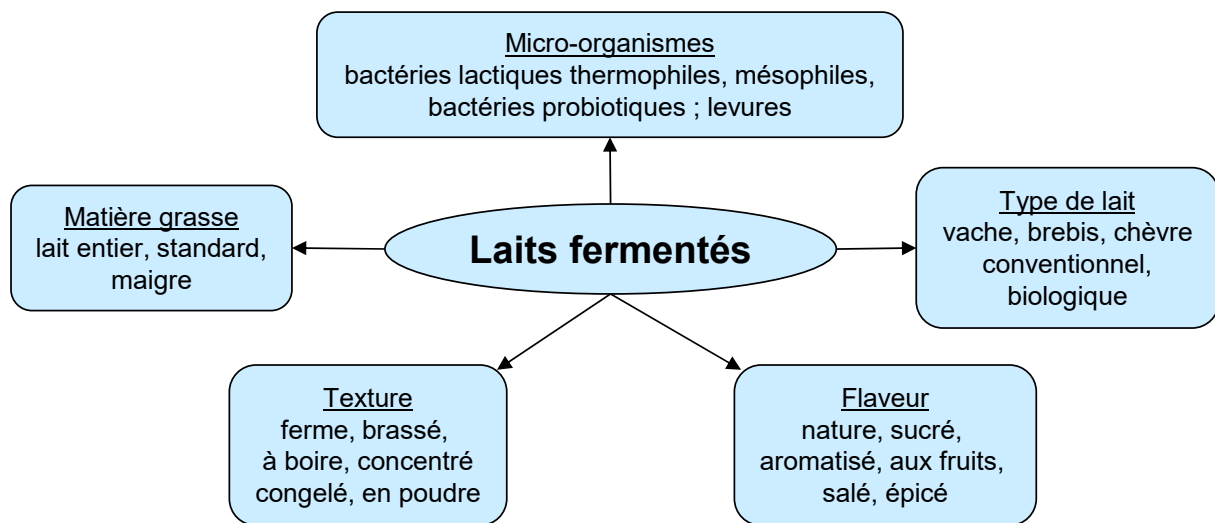


Figure 1 - Schéma général des critères de classification des laits fermentés

2 La fermentation lactique

La fermentation lactique est l'étape centrale du procédé de fabrication des laits fermentés. Elle 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 sensorielles du produit.

La principale conséquence de la fermentation lactique est d'augmenter la stabilité du produit, par inhibition des altérations microbiennes et enzymatiques éventuelles et donc d'allonger sa durée de conservation. Elle confère également au produit des propriétés nutritionnelles et organoleptiques particulières (saveur, texture, arômes).

2.1 Microbiologie de la fermentation lactique

2.1.1 Micro-organismes utilisés

Pour bénéficier de l'appellation yaourt, la réglementation Française impose la seule présence des deux bactéries lactiques thermophiles *Streptococcus thermophilus* et *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*. À titre d'illustration, la figure 3c (paragraphe 2.3.3) permet de visualiser des cellules de ces deux espèces bactériennes incluses dans un gel lactique de yaourt.

Pour les autres laits fermentés, d'autres bactéries lactiques, des bifidobactéries ou même des levures peuvent être utilisées [1]. Les principales espèces bactériennes rencontrées sont des lactobacilles (*Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus johnsonii*, *Lactobacillus paracasei*, *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus rhamnosus*), des lactocoques (*Lactococcus lactis* subsp. *lactis*) et/ou des bifidobactéries (*Bifidobacterium animalis*, *Bifidobacterium breve*, *Bifidobacterium bifidum*, *Bifidobacterium longum*). Plusieurs souches de ces microorganismes sont reconnues, hors de l'Europe, pour leur caractère probiotique (paragraphe 5.3.2). Certains produits impliquent également des levures, telles que *Kluyveromyces marxianus*, *Saccharomyces cerevisiae* ou *Candida inconspicua*.

Ces bactéries présentent toutes une parfaite innocuité, justifiée par leur absence de pathogénicité. Elles sont à ce titre considérées comme G.R.A.S. (generally recognized as safe) par la F.D.A. (Food and Drug Administration) aux Etats-Unis et possèdent le statut Q.P.S (qualified presumption of safety) délivré par l'E.F.S.A. (European Food Safety Authority).

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, température optimale) et organoleptiques (production d'exo-polysaccharides, synthèse de composés d'arômes, post-acidification). Ainsi, pour un lait fermenté nature et ferme, il peut être recommandé de sélectionner et d'associer des souches présentant une activité acidifiante élevée, une production de composés d'arômes importante, ainsi qu'une faible post-acidification. Pour élaborer un lait fermenté brassé aux fruits, des souches aptes à synthétiser des exo-polysaccharides seront préférées. Enfin, dans le cas des laits fermentés dits « probiotiques », le critère santé doit être considéré.

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 lactose dans le cas de la transformation du lait. Ce sont des bactéries Gram positif, 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 dit « homofermentaire » tandis que, si sa production est associée à une excrétion de dioxyde de carbone, d'acide acétique et/ou d'éthanol, le métabolisme est qualifié « d'hétéro-fermentaire ». L'acide lactique est produit sous l'une des formes isomères L(+) ou D(-) ou bien en mélange racémique. Ces caractères dépendent directement des bactéries impliquées.

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

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

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 mutuellement favorable aux deux espèces est appelée proto-coopération. Elle se traduit par une augmentation de la vitesse d'acidification par rapport à celles observées en cultures pures, un accroissement des concentrations bactériennes, une protéolyse plus prononcée et une amélioration de la production des composés d'arômes (acétaldéhyde notamment) et de la stabilité physique du produit (réduction des problèmes de synérèse).

S. thermophilus, qui présente naturellement une faible activité protéolytique, est stimulé par les petits peptides et acides aminés formés dans le lait grâce à l'activité protéolytique du lactobacille, permise par l'action de sa protéase de paroi PrtB. En retour, *S. thermophilus* fournit du CO₂ et de l'acide formique qui, tous deux, vont stimuler la croissance de *L. bulgaricus*.

Lorsque d'autres bactéries 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). Des phénomènes de croissance associative ont également été démontrés entre *S. thermophilus* et *L. helveticus* ou *L. acidophilus*. Enfin, des mécanismes d'inhibition spécifique entre 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 biologique des souches avant de les associer.

2.2 Biochimie de la fermentation lactique

La croissance des bactéries lactiques dans le lait induit de nombreux changements souhaités dans les produits, car en utilisant les constituants du lait (sucres, composés azotés, composés minéraux, vitamines) pour se développer, elles produisent des métabolites d'intérêt (acide lactique, composés d'arômes, exopolysaccharides, molécules ayant un rôle de conservation). Les conséquences de la synthèse de ces différents métabolites se traduisent par l'acidification du lait, sa coagulation ainsi que par des modifications des propriétés sensorielles et nutritionnelles des produits.

2.2.1 Métabolisme du lactose et production d'acide lactique

Les réactions qui relèvent du catabolisme du lactose sont essentielles au déroulement de la fermentation lactique car elles permettent la production d'énergie intracellulaire, nécessaire aux réactions d'anabolisme, et représentent donc leur fonctionnalité la plus importante. Le métabolisme du lactose 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 (voie d'Embden-Meyerhof-Parnas) pour former du pyruvate et de l'énergie intracellulaire stockée sous forme d'ATP (adénosine triphosphate). 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 par molécule de lactose, ou à quatre, si le galactose est catabolisé ;
- Le pyruvate est réduit en lactate par une réaction catalysée par l'enzyme lactate déshydrogénase, spécifique de ces bactéries. Cette réaction sert à réoxyder le cofacteur NAD⁺ (adénosine nicotinamide dinucléotide) précédemment réduit ;
- Finalement, le lactate est expulsé hors de la cellule en même temps que deux protons ((symport). Son accumulation extracellulaire 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 l'accumulation de l'acide lactique et à la diminution du pH du milieu

intracellulaire qui en résulte, qui forcent la cellule à utiliser son énergie pour maintenir son pH intracellulaire.

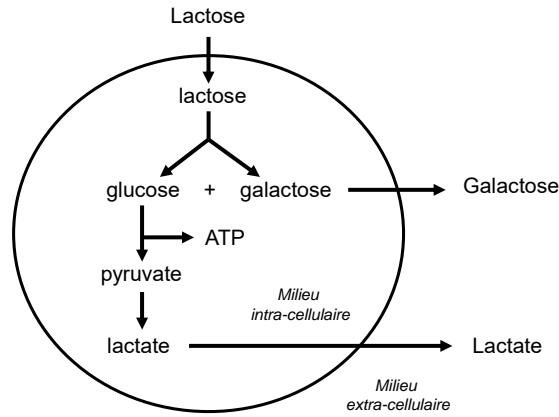


Figure 2 - Schéma simplifié des réactions du métabolisme homofermentaire chez les bactéries lactiques du yaourt

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 (eq. 1). 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 $g \cdot L^{-1}$). Dans cette équation, le paramètre $Y_{P/X}$ représente le rendement de production (en $g \cdot g^{-1}$) et le paramètre q_P , le taux de production d'acide lactique (en h^{-1}). Les valeurs de ces deux paramètres dépendent de la souche considérée et de son environnement :

$$(1) \frac{dP}{dt} = Y_{P/X} \cdot \frac{dX}{dt} + q_P \cdot X$$

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 d'acide lactique, car l'énergie intracellulaire est majoritairement utilisée pour le maintien du pH intracellulaire. 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 (figure 5, paragraphe [3.3.2](#)).

2.2.2 Autres réactions métaboliques

Parallèlement aux réactions du métabolisme carboné, les bactéries lactiques utilisent et transforment également les sources azotées du lait. Le lait contient environ 32 g/L de composés azotés, qui se répartissent en une fraction insoluble majoritaire (caséines) qui représente 80% de la source d'azote et une fraction soluble (acides aminés libres, petits peptides, protéines sériques, urée). Les bactéries lactiques sont capables d'utiliser les acides aminés, les petits peptides et les caséines du lait, mais avec une efficacité variable selon l'espèce ou la souche considérée. *L. bulgaricus* possède une protéase de paroi PrtB qui est active pour dégrader les protéines du lait, alors que seules quelques souches de *S. thermophilus* synthétisent la protéase de paroi PrtS qui leur confère cette fonctionnalité. Ces composés azotés participent à de nombreuses fonctions cellulaires, notamment la synthèse des protéines et la production de composés d'arômes (acétaldéhyde).

Les réactions du métabolisme bactérien font intervenir d'autres substrats essentiels mais en quantité moindre, comme les vitamines, les bases azotées ou les minéraux. Ainsi les bactéries lactiques sont particulièrement exigeantes en vitamines du groupe B (notamment acide pantothénique, 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 là encore une variabilité importante est observée selon les espèces bactériennes. Enfin, certains cations sont nécessaires au fonctionnement de certaines 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 provoque une diminution du pH du lait et donc son acidification. Cette acidification permet la gélification des caséines du lait (voir paragraphe 2.3) et donc la modification de la texture du produit. Elle va aussi 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 plus d'un mois pour un yaourt.

Les bactéries lactiques sont également responsables de la production de composés volatils qui contribuent à l'arôme des produits. Si la plupart des travaux s'accordent sur l'importance de l'acétaldéhyde dans l'arôme du yaourt, une centaine d'autres composés interviennent dans l'arôme global du produit, notamment l'acétoïne, le diacétyl, l'acétone et le 3-butanone. Les molécules identifiées sont essentiellement des acides volatils ou non volatils, des alcools, des esters et des composés carbonylés. Leur niveau de synthèse dépend fortement des bactéries impliquées et des voies métaboliques qui les caractérisent. L'acétaldéhyde est ainsi synthétisé à des teneurs variables, entre 5 et 40 mg/kg, par les deux bactéries du yaourt, principalement à partir du pyruvate et à un moindre degré à partir de la thréonine. L'acétoïne et le diacétyl sont formés à partir du citrate du lait via l' α -acétolactate, principalement par les espèces *S. thermophilus* et *L. lactis*.

Certaines souches de bactéries sont capables d'utiliser les substrats carbonés pour produire des polysaccharides exo-cellulaires (localisés à l'extérieur de la cellule) qui participent à l'accroissement de la viscosité du lait fermenté et présentent donc un intérêt pour l'élaboration des produits brassés. La viscosité se caractérise par la résistance d'un gel à l'écoulement. Ces exo-polysaccharides (E.P.S.) sont composés d'unités répétitives, linéaires ou branchées, de sucres (glucose, galactose, mannose, rhamnose, N-acétylglucosamine, N-acétylgalactosamine, fructo-furanose et glucofuranose) de longueur variable (di- à hepta-saccharides) et de taille variable (de 4×10^4 à 6×10^6 Da). Ils sont synthétisés sous forme d'unités répétitives grâce aux enzymes glycosyl-transférases qui assurent la translocation des monomères avant leur polymérisation. Les concentrations obtenues varient entre 30 et 600 mg/L. La viscosité des produits dépend de la quantité d'exo-polysaccharides produits, de la nature des sucres les composant, de la masse molaire des molécules formées et de leur viscosité intrinsèque.

2.2.4 Principaux facteurs influençant le métabolisme des bactéries lactiques

La croissance et l'acidification des bactéries lactiques, ainsi que leurs autres activités métaboliques, sont fortement influencées par des facteurs physiques, chimiques et microbiologiques.

2.2.4.1 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 (réactions enzymatiques intracellulaires) et la perméabilité des membranes cellulaires. Elle doit être fixée autour de 30 °C pour les bactéries mésophiles ou de 42 °C pour les espèces thermophiles et doit être prise en compte lors l'élaboration des mélanges de souches.
- L'activité de l'eau (a_w) est liée à la présence de sels ou de sucres dans les produits. Lorsqu'elle diminue, la quantité d'eau libre décroît et la disponibilité des nutriments est affectée. Concernant les laits fermentés, l'ajout de saccharose dans les produits sucrés diminue cette activité de l'eau. Ainsi, lorsque l' a_w devient inférieure à 0,99 ce qui correspond à une concentration en saccharose de 10 %, l'activité métabolique des bactéries est affectée.

2.2.4.2 Facteurs chimiques

- La composition du lait est un facteur d'influence prépondérant 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 facilement assimilable (acides aminés et oligopeptides) qui est donc un facteur de limitation. La composition en acides gras du lait agit aussi sur la croissance microbienne.
- Les éléments à l'état de traces affectent la fermentation, même à très faible concentration. Ainsi, la présence éventuelle d'antibiotiques (apportés pour la prophylaxie des animaux) ou de résidus de

détergents (consécutives aux opérations de nettoyage des installations) doit être maîtrisée car ces molécules impactent négativement la croissance bactérienne.

- Le traitement thermique subi par le lait avant l'étape de fermentation (paragraphe [3.2.4](#)) agit favorablement sur le métabolisme des bactéries. Outre son rôle principal de destruction des micro-organismes indésirables et pathogènes, il permet d'éliminer les principales substances antibactériennes naturellement présentes dans le lait (agglutinines, lacto-péroxydases) ce qui favorise les croissances bactériennes. De plus, il génère de faibles quantités d'acide formique à partir du lactose, ce qui stimule la croissance des lactobacilles. Enfin, il contribue à l'augmentation de la teneur du lait en petits peptides et acides aminés libres, favorisant ainsi le développement des streptocoques.
- Le pH est le dernier facteur chimique important pour la croissance des bactéries lactiques. Il intervient sur les vitesses d'activité enzymatique, la disponibilité en certains ions qui se complexent avec les protons et sur la perméabilité des membranes cellulaires. Lors de la production de yaourt, il évolue librement vers un pH acide, et représente donc un facteur majeur de ralentissement du métabolisme bactérien.

2.2.4.3 Facteurs microbiologiques

- Le choix des souches est crucial pour l'obtention des spécificités de chaque produit. Ce choix se fait en fonction des fonctionnalités de chaque souche (acidification, production d'arômes, aptitude texturante, post-acidification), au regard du cahier des charges établi pour le produit fini.
- Le taux d'ensemencement des bactéries lactiques dans le lait influence fortement sa transformation. Plus il est élevé, plus la fermentation est rapide. Généralement, ce taux se situe autour de 10^6 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 de ferments pour 100 L de lait selon les espèces bactériennes considérées.
- Les équilibres de population agissent également sur les cinétiques microbiennes et la post-acidification. 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 pratiquement toujours majoritaires. Ce rapport est défini soit, par le producteur de ferments en vue de l'élaboration des mélanges de souches destinées à l'ensemencement direct soit, par le fabricant de laits fermentés.
- Les bactéries lactiques sont sensibles aux bactériophages qui proviennent généralement du lait cru ou de l'environnement dans l'usine et qui provoquent une lyse des cellules, ralentissant ou empêchant la fermentation. Lors d'une infection phagique, la gélification du lait est perturbée et c'est la production entière qu'il convient de détruire. Une décontamination complète des locaux et des matériels est alors 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, les produits fermentés présentent des avantages spécifiques par rapport au lait non transformé.

2.2.5.1 Digestibilité du lactose

La présence de bactéries lactiques vivantes dans le produit permet une meilleure assimilation du lactose chez les consommateurs présentant une déficience en lactase. C'est d'ailleurs à ce jour la seule allégation santé qui a été reconnue par l'E.F.S.A. en 2011. La lactase bactérienne est en effet toujours active lors du passage des bactéries dans le tractus intestinal, où elle peut hydrolyser le lactose résiduel contenu dans les produits (environ 30 g/L), limitant ainsi la production d'acides organiques et de gaz (CO₂, hydrogène, méthane) dans le colon du consommateur. Il est cependant établi que les bactéries doivent être vivantes dans le yaourt au moment de sa consommation pour que cette fonctionnalité soit active.

2.2.5.2 Digestibilité des protéines

L'assimilation de la fraction azotée 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.

2.2.5.3 Teneur en vitamines et sels minéraux

Le calcium et le potassium sont généralement présents en concentration plus élevée dans les laits fermentés (2 et 2,5 mg/kg) que dans le lait, essentiellement grâce à la fortification en matières sèches effectuée en amont de la fermentation (paragraphe 3.2.2.2). De plus, bien qu'encore controversés, certains travaux montrent que le calcium contenu dans les yaourts et les laits fermentés présente une meilleure biodisponibilité que dans le lait, ce qui facilite son absorption.

La composition vitaminique du lait est également modifiée pendant la fermentation, en particulier les concentrations en vitamines du groupe B et en acide folique (tableau 2). Il faut cependant souligner qu'il existe une forte variabilité inter-souches.

Tableau 2 – Composition en vitamines du lait entier et d'un yaourt au lait entier [2]

Vitamines ($\mu\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$)	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

2.3 Physico-chimie de la fermentation lactique

La fermentation du lait est à l'origine des modifications physico-chimiques qui se traduisent par la gélification des caséines laitières et aboutissent à la texture souhaitée des produits.

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 : 33%, 11%, 33%, 11%) représentent 80 % de la matière azotée totale du lait. Elles se présentent sous la forme de particules sphériques appelées micelles, d'un diamètre moyen de 150 nm, en suspension dans le lait frais. Les micelles de caséines sont constituées d'un noyau hydrophobe et d'une enveloppe périphérique hydrophile et sont reliées entre elles par l'intermédiaire de ponts phospho-calciques.

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 (partie glycosylée) et α_s (partie phosphorylée), et quelques monomères de caséine β . Elle présente une charge négative, caractérisée par un potentiel zêta de -15 à -20 mV dans le lait à son pH natif. 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 en conséquence de l'accumulation extracellulaire de l'acide lactique et les propriétés physico-chimiques des micelles de caséines sont profondément modifiées. Les fonctions acides de certains acides aminés, comme l'acide glutamique, l'acide aspartique et la phosphosérine, fixent les protons formés, entraînant une annulation progressive de la charge négative des micelles et leur décalcification. Celles-ci se rapprochent et établissent entre elles des liaisons hydrophobes et électrostatiques, ce qui conduit à la formation du gel lactique. La gélification 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. Les micelles conservent néanmoins leur forme et leur intégrité.
- Entre pH 5,8 et 5,3 : la totalité du phosphate de calcium micellaire se solubilise, diminuant ainsi 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, leur donnant un format plus compact.
- En dessous de pH 4,8 : la répulsion électrostatique entre les acido-micelles s'annule au point isoélectrique 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 réseau tridimensionnel (gel) constitué de chaînes de caséines. Au-dessous de pH 4,6, l'agrégation des micelles est irréversible.

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

L'intensité du traitement thermique du mix, composé du lait et des 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 (pH 5,3 contre 4,6) et sont donc capables d'établir des liaisons entre elles à un pH plus élevé que celui des 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 donne 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 sécrètent des exo-polysaccharides dans le lait pendant l'acidification, ce qui contribue à accroître la complexité et l'enchevêtrement du réseau gélifié, ainsi que sa résistance au cisaillement. Les laits fermentés obtenus sont alors plus visqueux, ce qui oriente l'emploi de ces bactéries pour la production des yaourts brassés. Elles permettent de limiter la déstructuration du gel lors des traitements mécaniques et thermiques auxquels sont soumis les produits 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 fermenté avec des bactéries productrices d'exo-polysaccharides (figure 3c : présence de filaments de polysaccharides entre les bactéries et les agrégats protéiques).

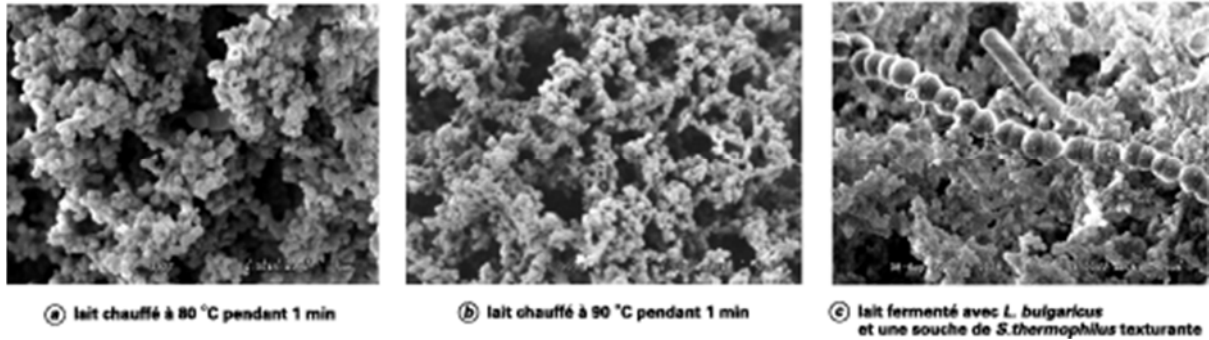


Figure 3 - Effet du chauffage du lait et des ferments utilisés sur l'organisation du réseau protéique des yaourts. Micrographies (source J.P. Tissier - INRA)

3 Le procédé de 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 phases successives, constituées chacune de plusieurs étapes : la préparation du lait qui aboutit au « mix » (lait ayant subi différentes étapes de préparation en vue de sa fermentation en yaourt), la fermentation (ou maturation ou incubation) qui aboutit à l'obtention d'une « masse blanche » (yaourt « brut » avant introduction des ingrédients et mise en œuvre des étapes de transformation ultérieures) et les traitements post-fermentaires qui aboutissent au produit fini. Le diagramme de production diffère selon le type de produit élaboré (yaourt ferme, brassé, à boire ou concentré) et présente des variantes selon sa teneur en matières grasses et son arôme. Le diagramme général de production des laits fermentés nature est présenté à la figure 4 et les étapes de la fabrication sont détaillées aux paragraphes suivants.

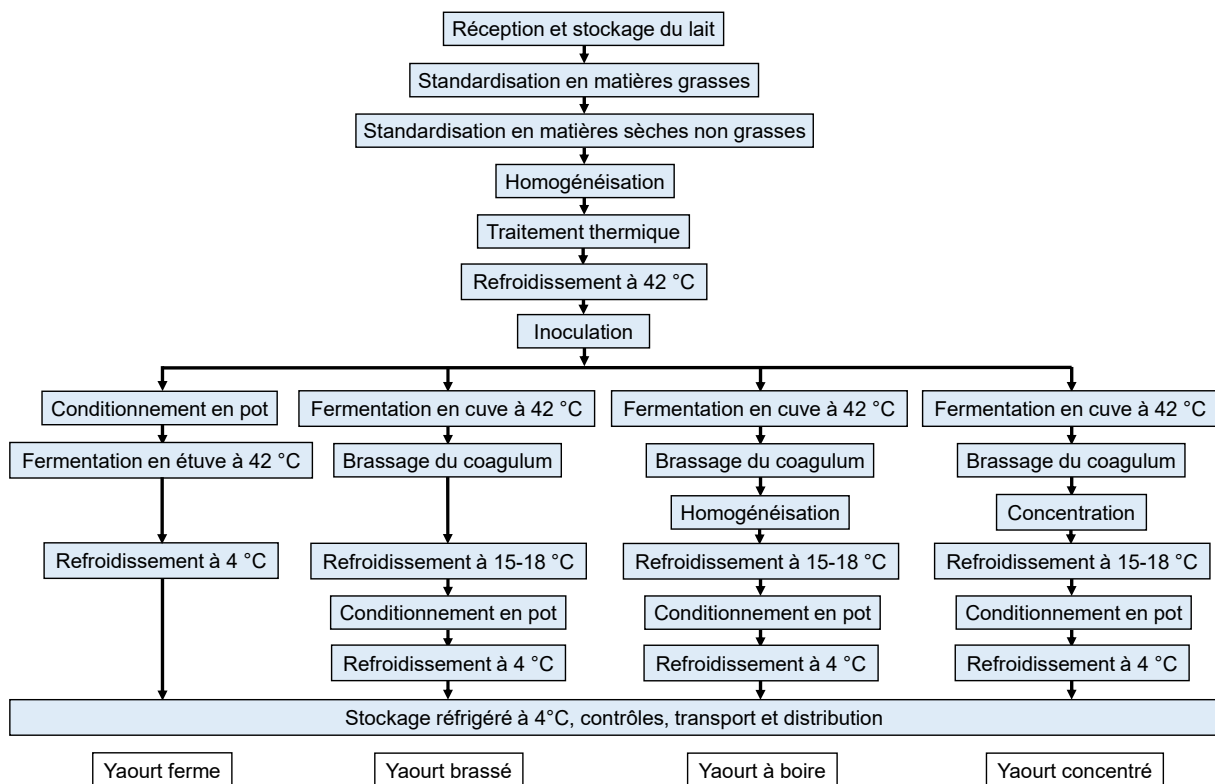


Figure 4 - Diagramme général de fabrication des principaux types de yaourts et laits fermentés « nature »

Les produits présentés dans ce diagramme se différencient principalement par leur viscosité, qui est la conséquence directe des étapes différentes mises en œuvre. Ainsi, la viscosité est de l'ordre de 1 Pa.s pour les yaourts fermes, de 1,5 Pa.s pour les yaourts brassés, de 0,5 Pa.s pour les yaourts à boire et de 4 à 5 Pa.s pour les yaourts concentrés. L'élaboration des produits aromatisés, sucrés ou aux fruits s'appuie sur des diagrammes similaires, avec introduction de ces ingrédients, soit sur les lignes de transfert, soit directement dans les pots. Enfin, l'élaboration des laits fermentés suit les mêmes étapes que celle des yaourts, seules diffèrent les espèces bactériennes en présence.

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), puis stocké au froid (< 5 °C) dans des tanks préalablement lavés et désinfectés. Il s'agit de cuves en inox de grand volume (jusqu'à 200 000 L), équipées d'un agitateur pour empêcher la remontée de la matière grasse et d'une double enveloppe pour maintenir le lait au froid. Si le lait est stocké plus d'une journée à l'usine, une légère thermisation à 60-65 °C pendant 15 secondes peut être pratiquée au moyen d'un échangeur à plaques, afin d'empêcher le développement de bactéries d'altération psychrophiles (par exemple *Pseudomonas* sp.) qui pourraient conférer de mauvais goûts au lait.

3.2.2 Standardisation

Le yaourt est élaboré à partir d'un mix, constitué du lait et de constituants apportés en vue de le standardiser. Le lait de vache est constitué d'eau, de lactose, de matières grasses, de matières azotées protéiques (caséines et protéines sériques) et de minéraux. Sa composition moyenne (tableau 3) varie selon la race, l'alimentation, la saison et le stade de lactation de l'animal. En fabrication de yaourt, le lait doit être standardisé en matières grasses et enrichi en protéines, pour réduire cette variabilité et répondre aux spécifications nutritionnelles et organoleptiques des produits.

Tableau 3 - Composition moyenne du lait de vache (teneurs exprimées en g pour 100 g) [2]

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 potassium</i>	0,14
<i>calcium</i>	0,12
<i>phosphore</i>	0,09

3.2.2.1 Standardisation en matières grasses

Les teneurs en matières grasses des yaourts du commerce sont inférieures à 1 % pour les yaourts maigres, autour de 2% pour les produits demi-écrémés et de 3,5 % pour les yaourts au lait entier, voire plus pour certaines références, comme le « yaourt à la grecque ». La teneur en matières grasses du lait cru variant entre 3,8 et 4,2 %, il est 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

Le calcul à effectuer pour la standardisation du lait en matières grasses prend en compte la valeur cible recherchée et les teneurs de chaque fraction.

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 (x) et de crème à 50 % de matières grasses (y) qu'il faudra mélanger :

$$x + y = 1\ 000$$

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

Soit :

$$x = 972 ; y = 28$$

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 55-70 °C, circule dans une écrémeuse (centrifugeuse à assiettes), afin de séparer la crème par centrifugation et d'éliminer les impuretés résiduelles (bourbes). L'efficacité de l'écraimage permet d'atteindre moins de 0,05 g de matières grasses pour 100 g de lait en sortie d'écrémeuse.

Le lait écrémé et la crème sont ensuite mélangés en ligne par des systèmes d'ajustement automatique pour atteindre la teneur en matières grasses souhaitée dans le produit fini. 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, est de 0,01 %.

3.2.2.2 Enrichissement en protéines

Le lait préalablement standardisé en matières grasses doit être enrichi en protéines laitières pour atteindre des taux protéiques finaux compris entre 3,2 et 5 %, ce qui contribue à former un yaourt consistant et exempt de synérèse et à modifier sa valeur nutritionnelle. Or, la teneur en matières azotées totales du lait de vache, exprimée en équivalent protéines, fluctue pendant l'année entre 2,9 et 3,7 %. Un enrichissement est donc toujours nécessaire, mais les quantités de protéines ajoutées sont variables et dépendent de la texture recherchée (yaourt ferme, yaourt brassé, yaourt à boire), afin d'atteindre des teneurs comprises entre 4 et 5 %. En pratique, la fortification en protéines laitières se fait par des ajouts de lait concentré, de poudre de lait écrémé ou de lacto-remplaceurs (rétenant de lait, lactosérum, concentrés de protéines sériques, caséinates), ou par concentration partielle par filtration tangentielle (microfiltration ou ultrafiltration ou osmose inverse).

L'enrichissement du lait de fabrication par ajout de poudre de lait écrémé ou de lait concentré est la technique la plus largement répandue dans l'industrie. Elle présente l'avantage d'obtenir 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 d'enrichissement. Le choix entre lait en poudre ou concentré est dicté par la facilité d'approvisionnement de l'usine en ces 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).

L'enrichissement par les lacto-remplaceurs présente l'avantage d'être moins coûteuse, mais la mention « protéines laitières » doit être indiquée sur l'emballage. Si l'enrichissement par de la poudre de rétenant donne de bons résultats en termes de texture du produit, il n'en est pas de même pour les concentrés de protéines sériques, les caséinates, ou le lactosérum, qui peuvent occasionner des défauts d'arômes (odeur de sérum ou de fromage) si leur taux d'incorporation est important (supérieur à 2 %). L'ajout de lacto-remplaceurs 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 d'enrichissement n diminue la synérèse des yaourts grâce à la capacité de rétention d'eau élevée des protéines sériques dénaturées. De plus, lorsque les caséinates sont utilisés pour enrichir le lait en protéines, ils augmentent de

façon importante la viscosité des produits, qui présentent cependant une texture moins lisse que ceux enrichis par de la poudre de lait écrémé.

Le ratio entre les caséines et les protéines sériques détermine fortement 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. Ces mélanges sont en effet plus fonctionnels à équivalence protéique que la poudre de lait, et aussi plus économiques. Actuellement, sur le marché européen, ils sont majoritairement utilisés. Ils sont composés 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 caséinates 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 est réalisé par ajout d'une poudre de lait écrémé caractérisée par un taux protéique de 34 %. 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, avec x la quantité de lait, et z la quantité de poudre :

$$x + z = 1\ 000$$

$$3,3 x + 34 z = 4,5 \cdot 1\ 000$$

Soit :

$$x = 961 ; z = 39$$

Finalement, il est 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, lacto-remplaceurs, sucre) dans la phase aqueuse (lait standardisé en matières grasses) doit permettre leur complète dispersion et leur 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 les défauts de texture ultérieurs du yaourt, et ne pas ralentir la fermentation. 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 qui peut atteindre 10-25 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 en 20 min environ. 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 peuvent atteindre 2700 kg · h⁻¹. Enfin, il est aussi possible d'incorporer les ingrédients secs directement dans des cuves de mélange. Différentes géométries sont proposées pour le système d'agitation (turbines, hélices, surface raclée). La qualité du mélange est alors fonction de la vitesse d'agitation et de la géométrie du système.

3.2.3 Homogénéisation et désaération

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 et d'empêcher leur remontée à la surface des produits pendant la fermentation et le stockage. Ainsi, le diamètre moyen des globules gras natifs, qui est initialement de 3,5 µm avec une dispersion de 1 à 10 µm, devient inférieur à 2 µm, ce qui réduit significativement leur vitesse de déplacement et permet de les maintenir en suspension (F2710).

Cette opération, indispensable pour éviter la remontée naturelle des globules gras dont la densité est inférieure à celle de la phase aqueuse, 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, grâce à la plus grande cohérence du produit. Enfin, elle confère un aspect plus blanc au lait (modification de l'absorption de la lumière) 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 favorable 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 au niveau de 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 (F2710). 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 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ dans l'entrefer, et l'homogénéisation a lieu en 10 à 15 μs . Le débit d'homogénéisation peut atteindre 4 000 à 30 000 $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$. 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. La température d'homogénéisation dépend du positionnement de l'équipement par rapport au traitement thermique ; elle est comprise entre 65 et 70 °C si l'homogénéisateur est en amont, et entre 90 et 98 °C s'il est situé en aval.

Certaines installations industrielles positionnent un désaérateur en amont de l'homogénéisateur. Son objectif est de réduire la concentration en oxygène dissous dans le lait, afin d'accélérer la fermentation, d'améliorer la texture et la stabilité des gels lactiques et de réduire des défauts d'arôme. L'équipement est composé d'une cuve cylindro-conique placée sous vide dans laquelle le produit circule en couche mince à une température d'environ 70°C. La dépressurisation subie dans la cuve permet d'évacuer l'air qui est pompé et refroidi afin de condenser les vapeurs et d'éviter de concentrer le lait.

3.2.4 Traitement thermique et refroidissement

Le traitement thermique appliqué au mix est toujours drastique. Il vise à réduire la charge microbienne, à inactiver les peroxydases du lait, à produire des facteurs de stimulation des bactéries (acide formique et composés azotés assimilables) et à améliorer les propriétés physiques du yaourt (viscosité, capacité de rétention d'eau). Il contribue à dénaturer 80 % de la fraction protéique sérique, soit totalement l' α -lactalbumine et la β -lactoglobuline, ce qui assure 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 le regroupement des micelles au moment de l'acidification et évitent la formation d'agrégats de grande taille et de larges pores dans le gel 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.

Le niveau de traitement thermique appliqué correspond à une pasteurisation, en accord avec la réglementation française (décret n°88/1203 du 30 décembre 1988). Deux systèmes peuvent être utilisés pour chauffer le mix : le traitement batch ou le traitement en continu. Les barèmes de traitement thermique sont variables selon le type d'installation : 15-30 min à 85-90 °C lors des traitements batch, ou 3-7 min à 90-95 °C lors des traitements thermiques continus. Le lait est ensuite refroidi à la température de fermentation (entre 37 °C et 45 °C).

Le traitement batch est réalisé dans des cuves à double enveloppe, par injection directe de vapeur dans la double enveloppe, ou par circulation d'eau chauffée avec de la vapeur.

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 de chaleur tubulaires ou, plus fréquemment, d'échangeurs à plaques. L'équipement comprend une section de préchauffage permettant au lait de passer de 5 °C à 45 °C parallèlement au refroidissement du lait chauffé, une section de chauffage impliquant de l'eau chaude pour passer de 45 °C à 92 °C, une section de chambrage située à l'extérieur de l'échangeur, constituée de tubes en acier inoxydable compactés à l'intérieur de la cuve thermostatée et permettant le maintien du lait à la température souhaitée (par exemple 92 °C) pendant la durée souhaitée (par exemple 5 min), une section de refroidissement du lait traité, en contre-courant avec la section de préchauffage (de 92 °C à 50 °C) et une section de refroidissement final avec de l'eau froide (de 50 °C à 42 °C) afin d'amener le lait à la température de fermentation (42 °C). Les débits de circulation sont compris entre 4 000 et 30 000 L · h⁻¹.

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

Cette étape de fermentation est également appelée maturation ou incubation. Lorsqu'elle est conduite en cuve, elle aboutit à l'obtention d'une « masse blanche », qui correspond à un yaourt nature qui est éventuellement aromatisé (ajout de fruits) et retravaillé afin d'élaborer les différentes formes commercialisées (yaourt brassé, yaourt à boire, yaourt concentré) (Figure 4, paragraphe 3.1).

3.3.1 Modes d'ensemencement

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

Actuellement, c'est l'ensemencement direct plutôt que semi-direct qui est pratiqué, en associant des souches bien caractérisées et dont les propriétés biologiques et technologiques sont, au préalable, connues, afin de répondre au cahier des charges du client. Ainsi, l'industriel producteur de yaourts ou de laits fermentés achète des ferments à des industriels producteurs de ferments lactiques. Ces ferments sont constitués de mélanges de souches et sont commercialisés sous forme congelée à une concentration d'environ 10¹⁰ UFC/g (stockage à < -40 °C) ou sous forme lyophilisée à une concentration d'environ 5 × 10¹⁰ UFC/g (stockage à < 4 °C). Ils sont ajoutés, en quantité suffisante (par exemple entre 5 × 10⁵ et 1 × 10⁷ UFC/mL), directement dans la cuve de fabrication (ensemencement direct) ou dans la cuve mère (ensemencement semi-direct), sous des contraintes d'asepsie très strictes pour éviter toute contamination.

Le rapport entre les différentes espèces et souches bactériennes en présence influe fortement sur la cinétique de fabrication. Pour les yaourts, le rapport entre *S. thermophilus* et *L. bulgaricus* est fixé par chaque fabricant, en privilégiant l'impact de chaque association sur les caractéristiques finales du produit.

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 mais varie selon le produit élaboré (voir paragraphe 3.3.4). Après l'ensemencement, le lait inoculé est agité afin d'homogénéiser le mélange. Un ensemencement en ligne peut être effectué lors du transfert du lait du pasteurisateur vers les cuves de fermentation (cas des yaourts brassés, à boire et concentrés) ou vers l'unité de conditionnement (cas des yaourts fermes).

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 brassé par les bactéries thermophiles *Streptococcus thermophilus* et *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*.

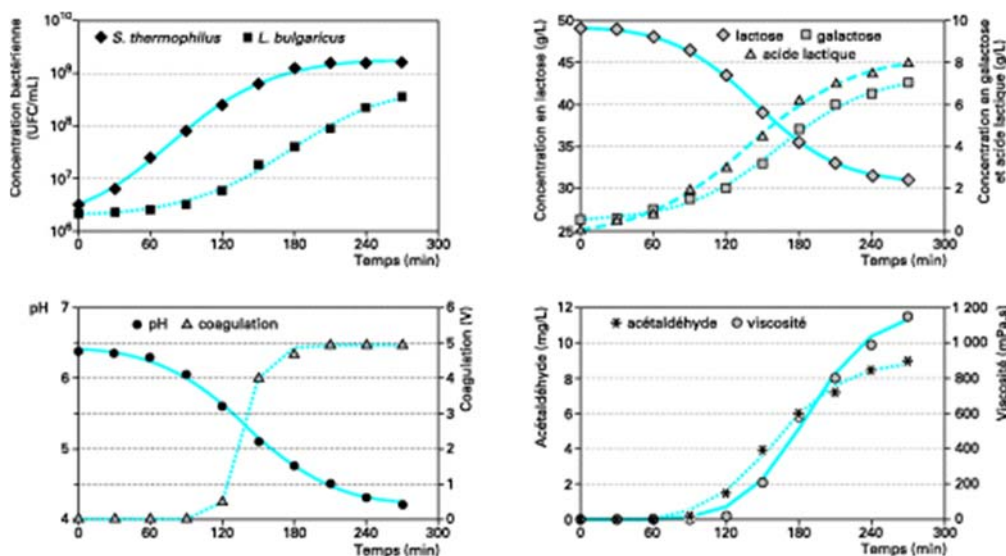


Figure 5 - Évolution des principales caractéristiques microbiologiques et physico-chimiques lors de l'étape d'incubation d'un yaourt brassé

La croissance de *S. thermophilus* débute la première et se termine après 3 h 30. Le lactobacille, qui nécessite les facteurs de croissance issus de l'activité métabolique des streptocoques, croît à partir de 2 h de culture et sa croissance se poursuit pendant les 6 h 30 de la fermentation car cette espèce bactérienne est moins sensible à l'acidité qui se développe dans le produit. Généralement, le rapport final entre les deux espèces est nettement en faveur du streptocoque (ici il est égal à 4:1), et la concentration bactérienne finale est supérieure à 10^8 UFC/mL.

Au cours de la culture, la concentration en lactose, principal substrat de la croissance bactérienne, décroît de 49 g/L à 31 g/L. Il reste donc une quantité importante de lactose dans le produit fini. 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.

La production d'acide lactique s'accompagne d'une diminution progressive du pH, qui passe de 6,4 à 4,2 dans l'exemple présenté. Cette acidification du lait provoque sa gélification (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 à une valeur de 5 V jusqu'à ce que le pH atteigne 4,8, pour se stabiliser ensuite.

Le dernier graphe de la figure 5 montre que la viscosité du yaourt s'accroît avec le temps, consécutivement à la gélification du lait et à la production de polysaccharides exo-cellulaires sécrétés par les bactéries. 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 1,2 milliard par millilitre, une acidité définie par une teneur en acide lactique de 8 g/L et un pH inférieur à 4,5, une concentration en lactose plus faible que dans le lait (63 % de la teneur initiale) et la présence de composés qui vont influencer sur les qualités organoleptiques de texture et de flaveur. Il est donc conforme à la réglementation française (décret n°88/1203 du 30 décembre 1988).

3.3.3 Mise en œuvre de la fermentation

Selon le type de yaourt produit, ferme, brassé, à boire ou concentré, la fermentation prend place dans les pots ou dans les cuves de fermentation, dont la forme, la taille et l'instrumentation varient.

Dans le cas du yaourt ferme, la coagulation se déroule directement dans le pot, après conditionnement aseptique du laitensemencé. L'inoculation et, éventuellement, l'ajout d'arômes ou de colorants sont réalisés dans le lait, préalablement au conditionnement. Le cas échéant, les préparations de fruits sont apportées directement dans le pot avant son remplissage. Puis, le mixensemencé est distribué dans les pots qui sont ensuite rapidement thermo-scellés (voir paragraphe 3.5), datés, incubés et refroidis. L'incubation est conduite soit en chambre chaude, 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 supportant les pots de yaourts dépendent de l'acidité du produit recherchée.

Dans le cas des yaourts brassés, à boire et concentrés, la fermentation est effectuée dans les cuves de fabrication. Celles-ci sont munies d'une double enveloppe afin d'assurer les transferts thermiques et d'un système d'agitation afin d'homogénéiser le mix et de réhydrater les ferments lors de l'ensemencement. Elles sont aussi équipées d'un système de nettoyage en place. La cuve peut être soit multifonctions (traitement thermique du mix, fermentation, refroidissement), soit uniquement dédiée à la fermentation, soit prévue pour la fermentation et le refroidissement. Le volume des cuves disponibles dans le commerce varie de quelques dizaines de litres à plusieurs dizaines de milliers de litres. En fin de fermentation, le gel est brassé dans la cuve, puis pompé pour être refroidi et conditionné.

3.3.4 Contrôle et arrêt de la fermentation

Le contrôle des fermentations reste encore rudimentaire, contrairement aux autres étapes de la production. La complexité des réactions microbiologiques et biochimiques, rend en effet leur automatisation difficile. Dans la pratique, seules la température et la durée sont systématiquement contrôlées.

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 (20 à 45 °C), comme indiqué dans le tableau 4.

La durée de l'incubation est la deuxième condition essentielle à bien maîtriser. Elle est définie en fonction du temps nécessaire pour atteindre le pH cible du produit, qui dépend des microorganismes utilisés (type, concentration et activité), de la composition du mix (traitement thermique, aw) et de la température de fermentation. Cette durée varie 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 (tableau 4). La maîtrise de la durée de fermentation assure un arrêt de la culture à un pH donné et évite une acidification trop poussée. Si un tunnel d'incubation est utilisé, la vitesse de déplacement des produits doit être contrôlée pour ajuster la durée à l'objectif souhaité.

Tableau 4 – Températures et durées de fermentation lors de l'élaboration de différents laits fermentés

Laits fermentés	Température de fermentation	Durée de fermentation
Yaourt	42 - 45 °C	3 – 4 h
Laban, leben, labneh	37 – 42 °C	3 – 6 h
Buttermilk	20 °C	12 h
Viili	20 °C	18 h
Kéfir, koumiss	18 – 20 °C	24 h
Yakult	37 °C	7 jours

Le contrôle du pH, variable clé qui définit la qualité du produit, est plus complexe car il évolue librement dans le produit. En production de yaourts fermes, le pH est mesuré et contrôlé de façon aléatoire sur les produits par titration ou pH-métrie. Pour ce faire, des prélèvements sont régulièrement effectués, notamment en fin de maturation, pour bien cibler l'arrêt de la fermentation.

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. L'emploi de ces dernières demeure toutefois exceptionnel à cause de leurs difficultés d'utilisation (fragilité, étalonnage, encrassement). Des sondes pH en céramique sont utilisables pour effectuer des mesures en ligne, mais elles restent coûteuses. 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 (1 à 2°C) pendant la fermentation, due au métabolisme exothermique des bactéries lactiques, permettent aussi de suivre en ligne l'évolution de la concentration en acide lactique et donc du pH.

L'arrêt de la fermentation est décidé au moment où le pH requis est atteint. Celui-ci est toujours un peu supérieur au pH final recherché, pour prendre en compte la poursuite de l'acidification qui se déroule lors du refroidissement. Le produit obtenu, appelé « masse blanche » doit être stabilisé rapidement afin de bloquer le niveau d'acidité recherché.

3.4 Traitements post-fermentaires

3.4.1 Refroidissement

Le refroidissement est l'opération qui permet de stopper la fermentation. Il doit permettre de faire passer la « masse blanche » rapidement de 40-45 °C à 4 °C, afin de bloquer au plus vite 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 en une seule étape, de 42 °C à 5 °C, soit dans des chambres froides avec 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 après maturation est une des étapes les plus critiques. En effet, la perte de charge dans le refroidisseur génère un cisaillement qui va impacter la texture du produit car le gel obtenu après maturation est sensible au cisaillement. Il est conduit en deux étapes. Une première phase de refroidissement amène le lait fermenté de 40-45 °C à environ 18-25 °C en moins d'une heure. 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 une viscosité moindre, donc plus rapidement et en limitant les dommages structuraux sur le gel.

La première phase du refroidissement peut être réalisée selon deux modalités :

- 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 peut provoquer 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 pour limiter la déstructuration du caillé lors de cette étape. 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 30 000 L · h⁻¹ et permet de refroidir le produit en 30-60 min.

Afin de limiter le cisaillement appliqué au gel, le choix de la pompe est également primordial. Généralement, des pompes volumétriques sont recommandées afin de respecter la fragilité du produit, en tenant compte de sa viscosité et de la température. Ces pompes sont de type piston rotatifs ou circonférentielles, à cavité progressive (type MoineauTM), de type « bi-vis » ou de type « Maso » avec impulseur.

L'addition éventuelle d'ingrédients (arômes, colorants, fruits) est effectuée en-ligne lors du transfert du produit de l'échangeur avec l'unité de conditionnement. Après conditionnement, les pots sont finalement refroidis de 20 °C à 4 °C par passage dans un tunnel ou directement dans le local de stockage final, puis stockés à 4 °C jusqu'à leur distribution.

3.4.2 Brassage du coagulum

Le brassage du coagulum intervient uniquement en production de yaourts brassés et de yaourts à boire. Il est effectué soit par un brassage lent de la « masse blanche », 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, soit enfin en associant ces deux pratiques. Cette opération est une autre étape critique du process de fabrication des yaourts brassés car il ne faut pas détruire la texture du gel afin que celle-ci soit retrouvée intacte dans le produit fini. Il importe donc de bien gérer les contraintes mécaniques subies dans les équipements de pompage, de refroidissement, de mélange et de conditionnement.

Pour l'élaboration des yaourts à boire, le brassage est suivi d'une étape de fouettage vigoureux qui déstructure le gel en partie et lui confère une texture liquide.

Enfin, 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 d'une tête de lissage. Cette opération confère aussi au produit une brillance et une fermeté accrues. Elle est réalisée obligatoirement pour les laits fermentés concentrés et de plus en plus souvent pour les autres produits.

3.4.3 Concentration du coagulum

L'élaboration des yaourts concentrés permet d'accroître leur teneur en matière sèche, notamment protéique, dans le produit. Les procédés utilisés pour cette concentration ont subi une forte évolution, en lien avec le développement du marché des yaourts de type « Grec ». Traditionnellement, l'élimination du lactosérum contenu dans le yaourt se faisait par égouttage au travers de sacs en tissu, de la peau d'un animal ou de pots en terre. Si ces méthodes existent encore à échelle artisanale, la production à grande échelle implique soit des systèmes de séparation mécanique par centrifugation (par exemple 5 min à une accélération (nombre de g) pouvant varier de 4000 à 11 700 g), soit des procédés de séparation membranaire (association de 2 à 4 modules d'ultrafiltration).

3.4.4 Addition d'ingrédients

La liste des additifs autorisés dans les laits fermentés est restrictive. Elle est fournie par le Codex Alimentarius (Codex Stan 192-1995), et peut être adaptée aux réglementations de chaque pays. En France, cette liste est présentée à l'article 3 du décret n°88/1203 du 30 décembre 1988, et est précisée par l'arrêté du 14 octobre 1991 (décret n°89/674 du 18 septembre 1989). Elle concerne les sucres et additifs au pouvoir sucrant (miel, aspartam), les arômes naturels et artificiels, les colorants, les conservateurs, les stabilisants et épaississants, les pulpes et jus de fruits, les confitures et fruits sur sucre. Ces produits peuvent être apportés à hauteur de 30 % maximum en poids. L'incorporation de matières grasses et protéiques non laitières est interdite.

Afin de réduire la perception de l'acidité des produits et de modifier sa saveur, le lait peut être additionné de sucre ou d'agents sucrants avant la fermentation (F6150 et F6151). Cet ajout est généralement effectué 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 et dont l'intérêt est de rester 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.

Les arômes (F4100) autorisés sont nombreux, et il faut se référer au règlement d'exécution (UE) n°872/2012 de la Commission Européenne du 01 octobre 2012 pour connaître la liste exhaustive des substances aromatisantes autorisées ainsi que leurs éventuelles restrictions d'utilisation.

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 2 g . kg⁻¹.

Les yaourts et laits fermentés contenant des fruits ou totalement écrémés nécessitent l'emploi de stabilisants ou d'épaississants pour améliorer leur texture. Les stabilisants sont principalement d'origine végétale et dérivent d'algues (alginates, carraghénanes F5080) ou de cellulose (méthyl-cellulose). Les épaississants sont d'origine animale (gélatine F4800), végétale (pectine F5000) ou microbienne (xanthane F4300). Leur ajout peut être effectué lors de l'enrichissement en protéines et ne doit pas dépasser une teneur de 5 g . kg⁻¹, sauf pour la gélatine et la pectine (10 g . kg⁻¹).

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 au moment du conditionnement, comme pour l'addition des préparations de fruits. Les équipements utilisés pour l'ajout de ces ingrédients sont du même type que ceux employés pour l'enrichissement en protéines (voir paragraphe [3.2.2.2](#)).

3.5 Unités de production industrielle

3.5.1 Lignes de production intégrée

La production de yaourts et de laits fermentés à grande échelle est effectuée dans des unités de production intégrées, fonctionnant en continu. La figure 6 présente, à titre d'exemple, le schéma d'une unité de production de yaourt brassé.

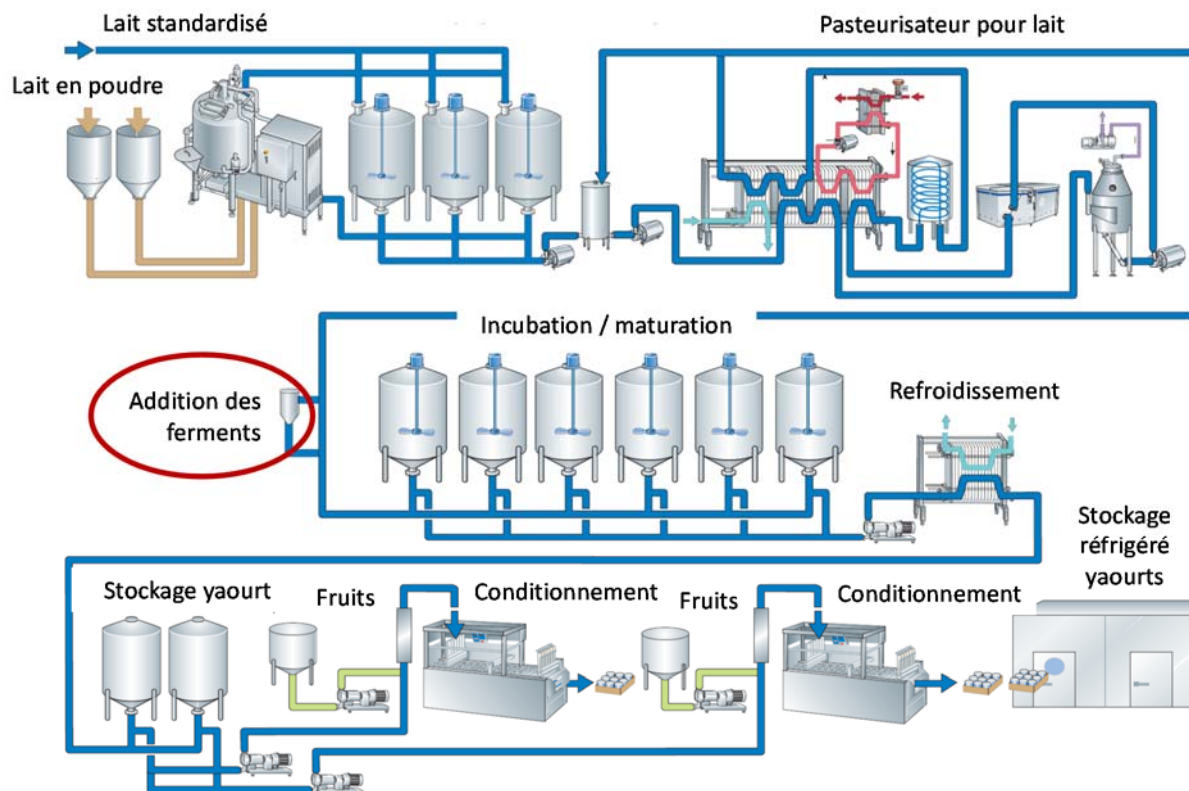


Figure 6. Schéma d'une ligne de production de yaourt brassé (Reproduit avec l'aimable autorisation de Tetra Pak AB Lund, Sweden)

Le degré d'automatisation de ces chaînes de production est de plus en plus élevé ; il s'appuie sur l'utilisation de nombreux capteurs (température, débit, pH) et actionneurs (pompes, électrovannes) qui assurent une régularité plus grande des productions, une meilleure sécurité pour les opérateurs présents sur les lignes et une facilité de gestion accrue.

3.5.2 Nettoyage et désinfection des ateliers de production

Des procédures de nettoyage en place et de désinfection automatisées des équipements sont mises en œuvre pour assurer l'hygiène des produits. Elles associent différentes opérations de lavage avec des détergents alcalins pour éliminer les résidus organiques, acides pour supprimer les dépôts minéraux et désinfectants pour réduire la charge microbienne résiduelle. Ces traitements sont appliqués pendant des durées et à des températures appropriées et sont précédés et suivis de rinçages soigneux, dont l'efficacité peut être contrôlée par des mesures de conductivité électrique.

3.6 Conditionnement des produits

Le conditionnement des laits fermentés est obligatoire pour permettre leur distribution. Il sert à contenir le produit, à garantir son hygiène, à préserver sa valeur nutritionnelle, à le protéger des chocs, de la lumière et de l'oxygène, et sert de support pour l'information à apporter au consommateur.

3.6.1 Matériaux d'emballages

Les laits fermentés sont conditionnés dans deux types de matériaux d'emballage : le verre, réservé aux produits de type 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. Certains emballages sont préfabriqués dans des usines spécialisées (pots en verre, coupes ou bouteilles en plastique rigide obtenues par moulage), d'autres sont formés directement sur les machines de conditionnement (pots en plastique semi-rigide). 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.

Il existe d'autres emballages pour les laits fermentés, tels que les gourdes pour les enfants (sachets souples à bouchon de 90 g en complexe tri-couche à base de polyéthylène téréphtalate et de polyéthylène), ou les fontaines à yaourts à boire (sachets souples de 1,5 kg, pour usage familial, avec robinet de distribution hermétique).

3.6.2 Machines de conditionnement

Différentes machines de conditionnement sont utilisées en fabrication de yaourt, assurant selon le cas le remplissage, le thermoformage et le scellement des opercules. Elles diffèrent en fonction du type d'emballage, des modalités employées pour assurer l'hygiène des produits, et du niveau d'automatisation.

Les emballages préformés sont décontaminés sur la ligne de conditionnement, avant remplissage, par exposition aux UV ou par vaporisation de peroxyde d'hydrogène. Lorsque les pots sont thermo-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 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 thermo-scclage, 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 peuvent atteindre des cadences très élevées, allant jusqu'à 66 000 pots par heure. Elles peuvent dans certains cas doser un parfum ou un fruit par pot, soit 6 parfums ou 6 fruits pour 6 pots. Un exemple de thermo-formeuse-remplisseuse, proposée par l'équipementier Erca-Formseal, spécialiste du conditionnement des produits laitiers frais, est présenté à la figure 7.

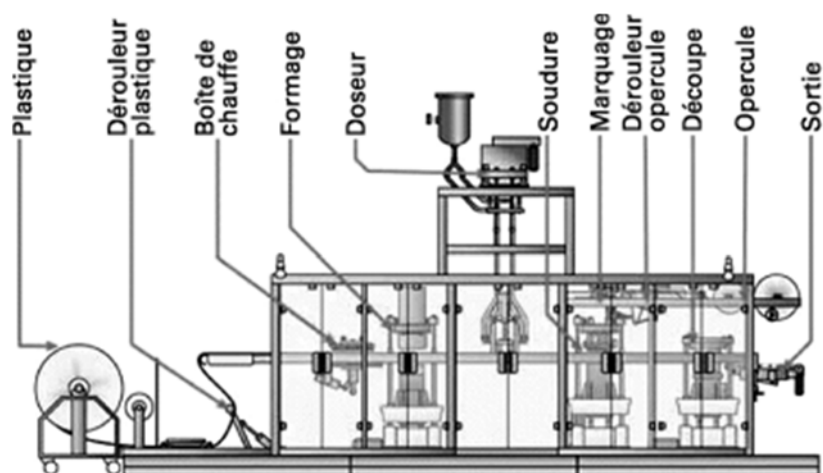


Figure 7 - Schéma de principe d'une thermo-formeuse-remplisseuse en ligne (Reproduit avec l'aimable autorisation de la société Erca, Courtaboeuf, France)

3.6.3 Étiquetage

L'étiquetage des yaourts et laits fermentés est très règlementé 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 non laitiers ajoutés, comme le sucre, la pulpe ou les préparations de fruits (exemple : yaourt à la fraise) ;
- le numéro de lot et 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.

La liste des allergènes présents dans les produits doit être précisée. Dans le cas des laits fermentés, ils correspondent principalement au lait et aux protéines laitières, mais peuvent, le cas échéant, inclure d'autres allergènes tels que le soja, les fruits à coque, le gluten, ou certaines céréales.

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.

3.6.4 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. Cette contrainte permet d'assurer le maintien d'une bonne qualité hygiénique des produits, mais aussi de limiter leur évolution dans le temps, notamment leur post-acidification éventuelle.

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 et sur les équipements (maintenance préventive). Ils visent à assurer la mise sur le marché de produits sûrs (exempts de risques microbiologique, chimique ou physique) conformément au règlement (CE) n°178/2002 du Parlement Européen et du Conseil du 28 janvier 2002, appelé « Paquet hygiène ». Ce dernier arrête les définitions, principes et obligations s'appliquant à toutes les étapes de la production et de la distribution des denrées alimentaires afin que celles-ci soient sûres sur le plan sanitaire. De plus, les contrôles permettent de s'assurer que les laits fermentés présentent les qualités organoleptiques requises et

attendues par le consommateur (saveur, arôme, texture, couleur) et que leurs propriétés seront stables pendant toute la durée de commercialisation.

4.2 Contrôles des matières premières

Les quatre ingrédients principaux en fabrication de laits fermentés sont le lait liquide, les poudres, les ferments et, éventuellement, les additifs et 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.

4.2.1 Contrôle de la qualité du lait

Le lait, qui arrive à l'usine en camions citernes réfrigérés, est 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 densité, de son point cryoscopique, de sa composition en matières grasses et en matières azotées ainsi que le dépistage des antibiotiques permettent d'apprécier sa qualité technologique. Le tableau 5 rapporte un exemple des spécifications requises pour un lait destiné à la fabrication de yaourt.

Tableau 5 - Exemple de spécifications requises à réception du lait [2]

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

4.2.2 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 en termes de composition et de solubilité. Le tableau 6 illustre, par un exemple, les critères de qualité requis pour une poudre de lait.

Tableau 6 - Exemple de spécifications requises pour une poudre de lait utilisée en fabrication de yaourt [2]

Critère	Valeur
Acidité du lait reconstitué	≤ 0,15 %
Solubilité (selon ADPI)	≤ 0,5 mL
Humidité	≤ 4,5 g · 100 g ⁻¹
Substances inhibitrices	≤ 0,006 IU · g ⁻¹
Germes totaux	≤ 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
ADPI : <i>American Dry Product Institute</i>	

4.2.3 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 contenant. Celle-ci constitue un indicateur indirect de fermentations indésirables. Les propriétés physico-chimiques des préparations (degré Brix, pH, viscosité) et la distribution de la taille des fruits peuvent également être contrôlés.

4.2.4 Contrôle de la qualité des ferments

L'évaluation de la qualité des ferments porte tout d'abord sur leur pureté, qui est contrôlée pour vérifier l'absence de contamination.

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. Depuis quelques années, la cytométrie en flux, couplée à l'utilisation de marqueurs fluorescents adaptés, permet d'obtenir de façon plus rapide et plus fiable les comptages cellulaires, tout en différenciant les cellules viables des cellules mortes au sein des mélanges.

Les propriétés acidifiantes de chaque lot de ferments lactiques sont systématiquement vérifiées en utilisant un système de suivi automatisé de leur cinétique d'acidification tel que le système Cinac. Ce système constitue actuellement une méthode de référence pour classer et comparer des ferments, sur la base de leur activité acidifiante. Développé par Corrieu et coll. en 1988, il est constitué de quatre parties fonctionnelles :

- Un bain-marie thermostaté, dans lequel sont plongés les fioles ou flacons de lait contenant les ferments à contrôler ;
- Plusieurs sondes de pH (de 8 à 32 voies) 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, relié à l'interface et fonctionnant avec le logiciel WCinac.

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 d'activité acidifiante et les représentations graphiques. Il réalise aussi la conversion des données sous des formats compatibles avec d'autres logiciels de traitement de données et assure un historique des mesures effectuées. Une version récente du logiciel, appelée iCinac, permet d'utiliser des sondes de pH avec transmetteur intégré, qui informent également sur la température et le potentiel d'oxydo-réduction de chaque échantillon analysé. Ces outils sont commercialisés depuis 2011 par la société AMS France et sa filiale Alliance Instruments.

La figure 8 présente, à titre d'exemple, l'évolution du pH et de la vitesse d'acidification (dpH/dt) au cours du temps, mesurés à l'aide du système Cinac lors de l'incubation d'un ferment lactique thermophile du yaourt dans du lait à 42 °C.

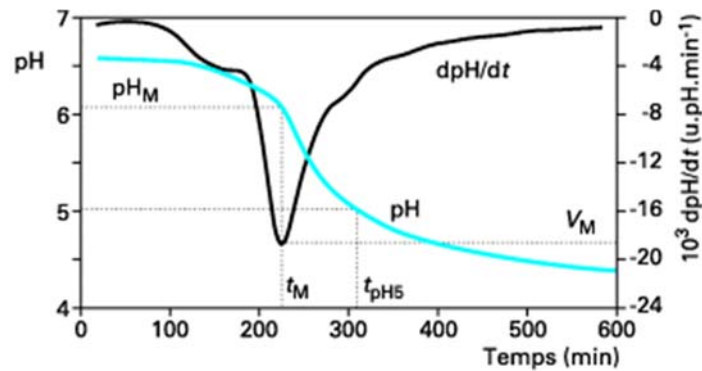


Figure 8 - Évolution du pH et de la vitesse d'acidification, mesurés à l'aide du système Cinac, lors d'une culture de *Streptococcus thermophilus* dans du lait à 42 °C

Les descripteurs d'activité acidifiante généralement retenus sont la vitesse maximale d'acidification (V_M , en $u \cdot \text{pH} \cdot \text{min}^{-1}$), le pH correspondant à V_M (pH_M), le temps correspondant à V_M (t_M , en min) et le temps (t_{pHi} , en min) nécessaire pour atteindre un certain pH_i . Dans la figure 8, les valeurs de ces descripteurs valent $V_M = -0,0185 u \cdot \text{pH} \cdot \text{min}^{-1}$; $t_M = 221 \text{ min}$; $\text{pH}_M = 6,1$; $t_{\text{pH5}} = 308 \text{ min}$.

Un ferment est considéré comme actif lorsque la valeur de son t_{pHi} est faible, alors qu'à l'inverse, une valeur élevée de t_{pHi} traduit un ferment peu actif. Les résultats sont répétables à condition de bien normaliser les méthodes (composition et traitement thermique du lait, étalonnage des sondes de pH, maîtrise des volumes d'inoculation, régulation de la température du bain-marie).

4.3 Contrôles et maintenance réalisés en cours de fabrication

4.3.1 Contrôle en cours de process

Dans les unités de production industrielle, l'automatisation est de plus en plus poussée ce qui permet une plus grande régularité des productions et d'atteindre des niveaux élevés de qualité et de sécurité sanitaire des produits. Dans ce but, différents capteurs sont utilisés, essentiellement pour mesurer les températures, les pressions, les niveaux, les débits. Ils sont associés à des automates programmables qui assurent la régulation des principaux paramètres du process et contrôlent les ouvertures des vannes, les pompes et les moteurs.

Au cours de la fermentation, l'acidification est le plus souvent contrôlée en effectuant des prélèvements et des mesures de l'acidité Dornic ou du pH. Sur certains sites industriels, des systèmes d'enregistrement automatique du pH sont utilisés. 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 indirecte du pH a également été 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.

4.3.2 Management de la qualité sanitaire

L'utilisation de systèmes de management de la sécurité des denrées alimentaires (ISO 22000, International Food Standards) permet de maîtriser les risques et d'assurer la sécurité des produits. Les entreprises mettent en place un plan de maîtrise sanitaire, appelé PMS, qui décrit les mesures qu'elles prennent pour assurer l'hygiène et la sécurité sanitaire de leurs productions vis-à-vis des dangers biologiques, physiques, chimiques et allergènes. Dans ce PMS, se trouve notamment le système HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Point) dont la démarche consiste à identifier et évaluer les dangers, et à mettre en place des systèmes de maîtrise afin d'assurer la sécurité sanitaire de l'aliment [F1113].

Pendant la fabrication de yaourts et laits fermentés, certaines étapes sont identifiées comme des points critiques microbiologiques : il s'agit de la pasteurisation du lait, du conditionnement du produit et du stockage réfrigéré. Le respect du barème de pasteurisation est vérifié, de façon classique, par l'enregistrement de la température de chambrage et du débit d'alimentation de l'échangeur. Le conditionnement constitue, en outre, un point critique physique.

4.3.3 Maintenance préventive et corrective

Certaines opérations de maintenance préventive font intégralement partie du système d'assurance qualité de l'usine, car elles sont déterminantes pour la sécurité des aliments. 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, en raison de micro-perforations des plaques de l'échangeur. 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.

En cas d'apparition de bactériophages dans les produits, il est nécessaire de mettre en place des plans d'actions préventifs et/ou correctifs. Les procédures de correction consistent à identifier l'origine des phages (grâce à l'utilisation de méthodes rapides et sensibles telles que la Polymerase Chain Reaction (PCR, P3315), à vérifier l'efficacité des procédés de nettoyage et de désinfection (prélèvements réalisés sur les surfaces, dans l'ambiance, sur les matières premières, sur les produits finis), et à réaliser une désinfection complète de l'atelier. Les démarches préventives intègrent la sélection de cocktails de souches microbiennes permettant de limiter les attaques phagiques, et d'assurer une rotation temporelle de ces cocktails afin de limiter les risques de développement des phages.

4.4 Contrôles des produits finis

Les caractéristiques microbiologiques, physico-chimiques et sensorielles des laits fermentés, sont contrôlées à la fin de leur fabrication, sur des échantillons prélevés de façon aléatoire. Le plan d'échantillonnage est défini par chaque site de production en fonction de ses bonnes pratiques hygiéniques.

4.4.1 Caractéristiques microbiologiques

Un dénombrement des flores spécifiques des laits fermentés (*S. thermophilus* et *L. bulgaricus* dans les yaourts) est effectué afin de vérifier qu'ils répondent aux normes réglementaires (plus de 10^7 UFC / g à la date de péremption).

Le règlement n°2073/2005 de la Commission Européenne du 15 novembre 2005 concerne les critères microbiologiques applicables aux denrées alimentaires. Dans les critères de sécurité à respecter, figure uniquement l'absence de la bactérie pathogène *Listeria monocytogenes* dans 25 g de produit. Mais les fabricants vérifient également l'absence de *Salmonella* dans 25 g de produit, et que ceux-ci contiennent moins de 10 UFC / g d'entérobactéries et de coliformes totaux et moins de 100 UFC / g de levures et moisissures.

4.4.2 Caractéristiques physico-chimiques

Les teneurs en protéines et en matières grasses sont systématiquement contrôlées sur les produits finis. Le pH et/ou l'acidité titrable sont aussi mesurés. En fonction du produit élaboré (ferme, brassé, à boire, concentré), différents critères liés à la texture des laits fermentés (fermeté, consistance, viscosité) sont évalués après conditionnement des produits, par des outils de mesure tels que des pénétromètres, texturomètres, viscosimètres, rhéomètres. Le degré de synérèse est un autre critère évalué dans le cas des yaourts fermes.

La composition aromatique peut être vérifiée par analyse des composés volatils par chromatographie en phase gazeuse. Ces contrôles, coûteux, restent cependant peu pratiqués.

4.4.3 Caractéristiques sensorielles

Les produits sont régulièrement évalués par un panel d'experts entraînés afin de vérifier leur acceptabilité par les consommateurs. En effet, il est délicat de substituer complètement l'analyse sensorielle du produit par des analyses instrumentales. L'évaluation sensorielle porte principalement sur l'apparence du produit (couleur, degré de synérèse), sa texture (fermeté, consistance, onctuosité) à la cuillère et en bouche, l'odeur et l'arôme qu'il dégage, ainsi que son goût (acidité, fraîcheur, persistance). L'accroissement éventuel de l'acidité lors du stockage (post-acidification) est également vérifié.

5 Développements actuels en production de laits fermentés

Au niveau mondial, le marché des laits fermentés est en croissance, notamment sur les continents américains et asiatiques. En revanche, le marché en France stagne voire diminue depuis quelques années. Les produits « classiques » sont les plus affectés alors que des marchés de « niche », comme les laits fermentés biologiques, ceux au lait de chèvre et les laits fermentés issus de petites marques progressent.

Globalement, cinq principales tendances liées à différents facteurs de société sont à l'origine des développements actuels :

- Tendance « praticité », se traduisant principalement par le développement de produits à durée de vie accrue ;
- Tendance « plaisir », orientant les produits vers de l'onctuosité, un caractère crémeux, une diversité des goûts et arômes ;
- Tendance « santé », incluant le développement des ingrédients naturels et des aliments allégés ou facilitant une régulation du poids ;
- Tendance « durabilité », favorisant l'essor des ingrédients naturels, des produits « bio » et des laits de chèvre ou des boissons d'origine végétale;
- Développement de nouveaux marchés, notamment en Asie et aux Amériques.

Ces tendances se traduisent par l'apparition fréquente de nouveaux produits, qui, même s'ils ne sont pas toujours pérennes sur le marché, dynamisent ce secteur et induisent une augmentation des parts de marché.

5.1 Laits fermentés à durée de vie élevée

5.1.1 Laits fermentés thermisés

L'application d'un traitement thermique aux laits fermentés, à la fin de leur production, augmente 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. Dans la plupart des pays, les produits thermisés n'ont cependant pas droit à l'appellation « yaourt », car les bactéries ne sont plus vivantes.

Trois types de traitement thermique sont généralement appliqués après la fermentation : pasteurisation basse (20 à 30 min à 50-55 °C), pasteurisation haute (20 s à 1 min à 60-85 °C) ou traitement « High Temperature Short Time » (température de 140°C pendant quelques secondes). 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 carraghénanes, de l'amidon, de la gomme guar ou de la pectine.

5.1.2 Laits fermentés 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 classique.

Produits principalement en Orient (par exemple, 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.

Les grains de Kéfir peuvent également être commercialisés sous forme déshydratée. Ils doivent alors être réhydratés dans de l'eau tiède pendant environ 2 h, avant d'être utilisés pour la fermentation du lait.

5.1.3 Utilisation de bactéries lactiques bio-protectrices dans les laits fermentés

Les laits fermentés, notamment ceux contenant des fruits, peuvent être contaminés par des moisissures ou des levures. Les contaminations par ces microorganismes sont responsables de gaspillage alimentaire et de pertes économiques. En effet, ils sont résistants à de bas pH et peuvent se développer aux températures de conservation des laits fermentés. Afin de limiter l'utilisation de conservateurs dans ces produits, certaines bactéries lactiques peuvent être utilisées pour leur fonction de bio-protection, répondant ainsi à l'attente de naturalité des consommateurs. Il s'agit par exemple de souches de *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus harbinensis* et *Lactobacillus rhamnosus*. Les activités antifongiques de ces bactéries sont dues à la production d'acides organiques tels que lactique, acétique, benzoïque et hexanoïque. Il est cependant important de s'assurer que ces bactéries lactiques, utilisées pour leur action de bio-protection, ne modifient pas les qualités sensorielles des laits fermentés.

5.2 Laits fermentés « plaisir »

5.2.1 Laits fermentés concentrés

Les laits fermentés concentrés sont consommés traditionnellement 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 %) que celle du yaourt.

Leur fabrication traditionnelle fait intervenir une fermentation lactique, généralement thermophile, avec les bactéries *S. thermophilus* et *L. bulgaricus*. Celle-ci est suivie d'un égouttage naturel du lactosérum dans un sac ou une jarre, 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 étages) ont été appliquées à la fabrication de ces produits à l'échelle industrielle (Figure 4, paragraphe 3.1).

Ces produits concentrés connaissent actuellement un développement important, notamment en Amérique du Nord et en France, où ils sont commercialisés sous la dénomination « yaourt à la Grecque ». En effet, ils se caractérisent par une teneur moindre en sucres (dont le lactose) liée à l'étape de séparation post-fermentation, et une teneur plus élevée en protéines. Ils sont appréciés des personnes qui cherchent à réguler leur poids. Leur fermeté plus grande et leur onctuosité leur permet aussi d'être utilisés dans l'élaboration d'autres produits tels que des soupes, sauces ou desserts.

5.2.2 Laits fermentés glacés

Les laits fermentés glacés ont été développés pour le « plaisir » du consommateur mais ils constituent aussi une troisième alternative à l'augmentation de leur durée de vie. Ils rentrent dans la catégorie des « crèmes glacées », car contenant du lait et ou de la crème, mais se différencient des autres produits car ils sont plus riches en calcium et sont caractérisés par un goût frais et acide.

La fabrication de ces produits est simple (F8011) : le yaourt refroidi est mélangé avec les ingrédients (fruits, sucres, émulsifiants, stabilisants), puis surgelé. La survie des bactéries sous forme congelée diffère selon les souches, et ces spécificités doivent être prise en compte lors de l'élaboration des produits afin d'assurer, lors de la consommation, la présence des espèces souhaitées. D'un point de vue réglementaire, il n'y a pas de règle stricte de composition, sauf aux Pays-Bas, où le produit doit contenir au minimum 70 % de yaourt. Ces produits sont largement commercialisés, sous des formes très diversifiées, en fonction de l'origine du lait, des micro-organismes utilisés et des arômes apportés.

5.2.3 Yaourts et laits fermentés à boire

Un yaourt à boire est un lait fermenté brassé, de faible viscosité. Il est souvent sucré et/ou 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 après la fermentation (Figure 4, paragraphe 3.1), soit par passage dans des pompes centrifuges, soit par agitation mécanique dans le tank de fabrication, soit par introduction d'une étape de fouettage juste avant le conditionnement. 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.

5.2.4 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 dans le yaourt au moment de sa consommation).

La fabrication des laits fermentés pétillants liquides est généralement réalisée par carbonatation du mix par incorporation de CO₂. 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 pétilllement immédiat du produit.

5.3 Laits fermentés « santé »

5.3.1 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 F4690 (dérivés de maïs, de pomme de terre, de tapioca), fibres modifiées (issues du pois, de la betterave ou de l'inuline) ou protéines modifiées F4820 (à partir de lait ou de soja). Ces composés présentent, selon le cas, des propriétés émulsifiantes ou gélifiantes qui agissent sur la texture et la stabilité physique des produits. Ils sont ajoutés 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.

5.3.2 Laits fermentés incluant des micro-organismes probiotiques

Les probiotiques ont été définis par la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations ; Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture) et l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) en 2001 comme des micro-organismes vivants qui sont bénéfiques à la santé de l'hôte lorsqu'ils sont administrés en quantité adéquate. Ces effets sur la santé peuvent être d'ordre préventif ou d'ordre thérapeutique. Ils sont rendus possibles par l'aptitude de ces micro-organismes à survivre au passage dans tractus intestinal et à se retrouver vivants dans l'intestin. La plupart du temps, ces probiotiques sont commercialisés sous forme de compléments alimentaires, mais peuvent également être proposés au sein de laits fermentés, si la réglementation du pays l'autorise.

Les connaissances relatives aux propriétés santé de ces bactéries sont encore incomplètes à ce jour. Certains effets bénéfiques sont cependant globalement admis par la communauté scientifique [4], sous

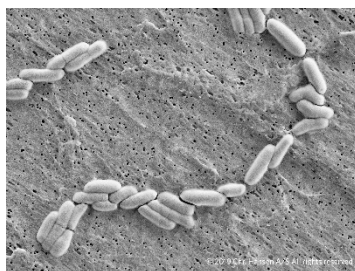
réserve que les bactéries survivent lors du processus digestif. Des études cliniques en double aveugle, randomisées et contre placebo, ont montré que certaines souches avaient un rôle antidiarrhéique (notamment chez le nourrisson), et une action positive pour le traitement de gastro-entérites et de dysfonctionnements liés à la prise d'antibiotiques. Quelques souches de *L. acidophilus* sont ainsi capables d'adhérer aux cellules de la paroi intestinale. Certaines bactéries développent *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). D'autres effets biologiques positifs associés à la consommation de probiotiques ont été démontrés chez l'homme et l'animal, comme la modulation des fonctions immunitaires. Ainsi, certains lactobacilles démontrent une activité immunostimulante, et agissent sur les mécanismes immunitaires spécifiques et non spécifiques. A l'inverse, d'autres souches de bactéries lactiques tendent à réduire la réponse immunitaire de l'hôte et leur consommation est proposée pour prévenir certaines maladies atopiques (allergies) et traiter des maladies inflammatoires de l'intestin (maladie de Crohn). Enfin, d'autres effets bénéfiques restent sujets à controverse au sein de la communauté scientifique, en raison du manque de résultats obtenus par des études cliniques rigoureuses réalisées chez l'homme.

Les principales bactéries reconnues dans la littérature pour leur activité santé figurent dans le tableau 7. Elles sont parfois associées à des levures, telles que *Saccharomyces boulardii*.

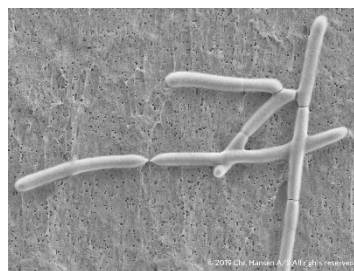
Tableau 7 - Principales espèces bactériennes probiotiques rencontrées dans des préparations revendiquant une activité santé

Genre	Espèce
<i>Bifidobacterium</i>	<i>Bifidobacterium bifidum</i>
	<i>Bifidobacterium breve</i>
	<i>Bifidobacterium infantis</i>
	<i>Bifidobacterium animalis</i> subsp. <i>lactis</i>
	<i>Bifidobacterium longum</i>
	<i>Bifidobacterium</i> sp.
<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>

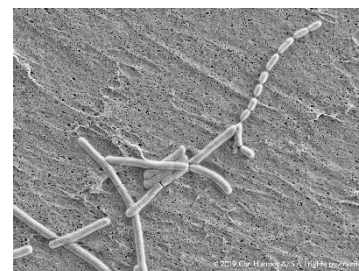
La figure 9 montre, à titre d'exemple, des photos prises au microscope électronique à balayage, de trois espèces de bactéries probiotiques disponibles dans le commerce.



B. lactis BB-12



L. acidophilus La-5



L. rhamnosus LBB

Figure 9 – Photographies prises au microscope électronique à balayage des souches *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* BB-12, *Lactobacillus acidophilus* La-5 et *Lactobacillus rhamnosus* LGG (© 2019 Chr. Hansen A/S. All rights reserved).

La revendication « probiotique » n'est plus autorisée en Europe depuis 2006, suite à la publication du règlement n°1924/2006 du Parlement Européen et du Conseil du 20 Décembre 2006 portant sur les allégations santé. En effet, les allégations « santé » doivent être justifiées, soit en termes d'effets bénéfiques sur la physiologie de l'hôte (article 13 du règlement), soit en termes de réduction du risque de maladies (article 14 du règlement). Concernant les probiotiques dans des denrées alimentaires, les allégations ne peuvent être autorisées qu'après évaluation par le panel « produits diététiques, nutrition et allergies » (NDA) de l'E.F.S.A. (EFSA, 2011). En conséquence, la seule revendication autorisée porte sur « l'amélioration de la digestion du lactose » liée à la réduction de sa teneur lors de la fermentation, qui permet aux personnes intolérantes de consommer des produits laitiers sans être trop gênées. Cette allégation concerne donc tous les laits fermentés par des bactéries lactiques, et n'est donc pas spécifiquement liée aux bactéries dites « probiotiques ».

Les produits contenant ces bactéries restent commercialisés en Europe, mais sans revendiquer d'effet positif sur la santé. Néanmoins, l'allégation est autorisée partout ailleurs dans le monde, ce qui génère un marché important et croissant, notamment sur les continents américain et asiatique, en réponse à une demande forte des consommateurs pour ces produits.

5.3.3 Laits fermentés contenant des peptides bioactifs

Des peptides bioactifs, principalement les tripeptides IPP (isoleucine-proline-proline) et VPP (valine-proline-proline) sont présents dans certains laits fermentés et démontrent un effet régulateur sur certains processus métaboliques chez l'homme. Ces tripeptides proviennent des caséines et sont libérés par le système protéolytique des bactéries lactiques (protéases et peptidases), notamment par des lactobacilles (*L. acidophilus* ; *L. helveticus*). Leur effet le plus connu et le plus étudié est leur capacité hypotensive. En inhibant une enzyme impliquée dans la tension artérielle (angiotensin converting enzyme), ils contribuent à diminuer la tension artérielle de l'hôte lors d'une consommation journalière de laits fermentés les contenant. Des laits fermentés avec des peptides bioactifs à effet hypotenseur sont commercialisés au Japon et en Finlande, mais leur commercialisation n'est pas généralisée aux autres pays.

5.4 Laits fermentés diversifiés

5.4.1 Produits issus de différents types de laits

Des laits fermentés peuvent être élaborés à partir de lait de chèvre, de brebis, de bufflonne, de chamelle ou d'ânesse. Ces produits sont principalement consommés sur le pourtour méditerranéen, au Proche-Orient, sur la péninsule indienne et en Russie. Leur procédé de fabrication est proche de celui des yaourts, bien que souvent mis en œuvre à plus petite échelle. Ils se différencient des produits à base de lait de vache par leur teneur en caséines et matières grasses, mais aussi par les mélanges de souches impliquées dans la fermentation. En conséquence, la texture et l'arôme de ces produits diffèrent significativement de ceux des yaourts classiques. Le maintien des productions, parfois à petite échelle, est un enjeu fort, car elles participent au maintien d'activités économiques locales et à la préservation de la biodiversité microbienne, contribuant ainsi à une meilleure durabilité de la filière.

Le développement de laits fermentés à partir de laits de chèvre et de brebis est particulièrement important en France, avec une augmentation des ventes de près de 50% entre 2014 et 2016. Quant aux produits à base des autres laits, leur développement reste encore très limité en occident.

5.4.2 Laits fermentés par des consortia microbiens complexes

Certains laits fermentés sont obtenus en utilisant des mélanges de microorganismes (consortia microbiens) plus complexes qu'une simple association de bactéries lactiques. C'est notamment le cas du kéfir.

Originaire des montagnes du Caucase, c'est un produit laitier fermenté proche d'un yaourt à boire et légèrement pétillant, élaboré à base de grains de kéfir qui sont composés de consortia de microorganismes. Essentiellement consommé à l'étranger, ce produit revient dans les linéaires en France depuis 2017. Les

kéfir traditionnels sont élaborés à partir de grains de kéfir, composés de bactéries lactiques telles que *Lactobacillus kefirianofaciens*, *Streptococcus thermophilus*, *Lactobacillus paracasei*, *Leuconostoc mesenteroides*, de bactéries comme *Acetobacter* et de levures telles que *Saccharomyces cerevisiae*, *Kazachstania* et *Candida*. La fermentation du lait est principalement lactique et faiblement alcoolique. Actuellement, des levains de composition maîtrisée sont utilisés pour produire des kéfirs ; ils peuvent être uniquement constitués de bactéries lactiques homo- et hétéro fermentaires ou de bactéries lactiques et de levures telles que *Kluyveromyces* sp. Ce type de consortium permet la production de CO₂, d'esters, d'acides carboxyliques et de cétones qui aromatisent le kéfir.

5.4.3 Produits issus de lait biologique

La part des laits fermentés issus de lait biologique est en croissance constante, en réponse à un souci de plus en plus marqué des consommateurs pour des produits à caractère « naturel ». Les principales différences entre un lait biologique et un lait conventionnel portent sur leurs teneurs en résidus de pesticides et de médicaments à usage vétérinaire, réduites dans les laits « bio » et leur composition en acides gras polyinsaturés, notamment en acide α -linoléique, précurseur des acides gras oméga-3, qui est accrue dans les laits « bio » [3].

Ainsi, entre 2014 et 2016, la proportion de laits fermentés biologiques fabriqués en France est passée de 3% à 3,6%, soit un accroissement de 20% des volumes produits.

5.4.4 Produits à base de laits fermentés

Les laits fermentés peuvent être incorporés à d'autres produits alimentaires, ce qui contribue à une nouvelle forme de diversification de leur marché. On trouve ainsi des sauces au yaourt pour salades et crudités, des biscuits sucrés au yaourt, des boissons au yaourt, des aliments à base de yaourt destinés aux sportifs.

Des applications voient également le jour en cosmétique, avec par exemple des crèmes de soin au yaourt, des crèmes solaires, des gels douches, des shampoings.

5.4.5 Produits fermentés à base de végétaux

Dans un contexte de prise de conscience de l'impact environnemental de notre alimentation, de recherche d'un bon équilibre nutritionnel et de prise en compte des besoins futurs, notamment en ressources protéiques, pour nourrir une population croissante sur la planète, le développement de produits fermentés à base de végétaux est en plein essor. Ce ne sont pas des laits fermentés au sens strict, puisque la matière première n'est pas laitière, mais leurs caractéristiques de texture et d'acidité s'en rapprochent.

Jusqu'à très récemment, les produits à base de soja occupaient quasi exclusivement le marché des produits fermentés végétaux en occident. Mais depuis quelques années, les recherches se multiplient sur la fermentation de matrices végétales telles que le lait d'amande ou le lait de coco, par des bactéries lactiques et des bifidobactéries. Plusieurs produits sont ainsi devenus disponibles sur le marché.

6 Conclusion

La production de laits fermentés représente une technologie complexe, qui fait intervenir un grand nombre d'étapes autour d'une étape clé de transformation biologique, la fermentation. Celle-ci est précédée de différentes opérations visant à préparer le lait pour former un « mix », et est suivie d'autres opérations qui transforment « la masse blanche » en divers produits finis. La fermentation repose sur la mise en œuvre d'une matière première d'origine organique, le lait, et sa transformation par des micro-organismes, les bactéries lactiques, qui modifient les différents composants du lait. Ainsi le lactose est dégradé en acide lactique, les protéines sont coagulées, et de nouvelles molécules sont synthétisées, notamment des composés d'arôme et des exo-polysaccharides. Ces transformations contribuent à l'obtention d'un produit gélifié, ayant un goût et un arôme caractéristiques et capable de se conserver plusieurs semaines. Ces propriétés font des laits fermentés des aliments de base dans l'alimentation européenne et orientale, et en croissance sur les continents asiatique et américains.

La mise en œuvre de différentes opérations unitaires, pour la préparation et la standardisation du lait en amont, et pour le traitement des produits en aval de la fermentation permet de diversifier les produits et de répondre aux demandes des consommateurs, tout en tenant compte des contraintes de qualité, à la fois hygiénique, organoleptique et nutritionnelle. Différents contrôles qualité sont ainsi effectués afin d'assurer un niveau élevé de ces critères qualitatifs à toutes les étapes de la production (à la réception des matières premières, au cours de la transformation et sur les produits finis).

La diversification des laits fermentés permet de répondre à un marché mondial en croissance, grâce au développement de produits à durée de vie accrue, de laits fermentés toujours plus « gourmands », de produits répondant à une demande des consommateurs soucieux de leur santé. Plus récemment, s'ajoute une nouvelle dimension visant une plus grande durabilité des productions de laits fermentés. En particulier, des efforts spécifiques sont conduits afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre (CO₂ notamment) en optimisant la collecte du lait (réduction du nombre de kilomètres lors du transport du lait de la ferme à la laiterie, meilleure utilisation du volume des camions, formation des chauffeurs à l'éco-conduite), de réduire l'utilisation de l'eau notamment lors des opérations de nettoyage (optimisation et récupération de l'eau), d'optimiser les sources d'énergie utilisées (chaudières de moindre puissance, utilisation de sources d'énergie renouvelable), de réduire les emballages et d'utiliser des matériaux recyclables et issus de ressources durables, et enfin de limiter le plus possible les pertes de matières et le gaspillage. Ces efforts induisent une réduction de l'impact environnemental global des productions, tout en participant au maintien d'une activité industrielle et en favorisant une activité économique dynamique.

Enfin, l'ensemble de ces évolutions s'accompagne d'un souci constant de maîtrise de la qualité des produits, sur les plans sanitaires et nutritionnels bien-sûr, mais aussi organoleptiques et de plus en plus, sur le plan environnemental.

Glossaire

Activité de l'eau (aw) ; *water activity (aw)*

L'aw représente la pression de vapeur d'eau d'un produit humide divisée par la pression de vapeur saturante à la même température. Elle est comprise entre 0 et 1.

Bactériocine ; *bacteriocin*

Une bactériocine est un peptide ou une petite protéine produite par une bactérie et possédant des propriétés antibiotiques.

Bactériophage ; *bacteriophage*

Un bactériophage est un virus infectant spécifiquement des bactéries.

Caséines ; *casein*

Les caséines sont les principales protéines du lait, elles représentent 82% de la fraction protéique totale dans le lait de vache.

Centrifugation ; *centrifugation*

Technique permettant de séparer les phases liquide et solide d'un mélange, en se basant sur l'application d'une force centrifuge

Chromatographie en phase gazeuse ; *gas chromatography*

Technique permettant de séparer les molécules gazeuses d'un mélange ou les molécules susceptibles d'être vaporisées par chauffage sans être dénaturées.

Coagulation : *coagulation*

Phénomène par lequel certains constituants (telles que les caséines) d'une masse liquide telle que le lait s'assemblent pour former une masse plus compacte (coagulum, gel).

Echangeur de chaleur : *heat exchanger*

Dispositif permettant de transférer de l'énergie thermique d'un fluide vers un autre fluide, sans les mélanger, par l'intermédiaire d'une surface d'échange.

Exo-polysaccharide : *exopolysaccharide*

Polymère constitué de plusieurs oses liés entre eux par des liaisons osidique, synthétisé par les bactéries et excrété dans le milieu extracellulaire.

Filtration tangentielle : *cross-flow filtration*

Technique de filtration destinée à séparer les composants d'un liquide selon leur taille au travers d'une membrane de taille de pores donnée, basée sur une circulation du flux de liquide parallèle au filtre, rendue possible grâce à l'application d'une pression de part et d'autre de la membrane.

Hétérofermentaire : *heterofermentative*

La voie métabolique hétérofermentaire produit, à partir d'un ose tel que le glucose, de l'acide lactique et des quantités significatives de CO₂ et d'éthanol ou d'acétate.

Homofermentaire : *homofermentative*

La voie métabolique homofermentaire produit, à partir d'un ose tel que le glucose, uniquement de l'acide lactique.

Homogénéisation : *homogenisation*

Procédé mécanique consistant à réduire la taille des globules gras dans le lait pour éviter leur remontée à la surface du liquide et favoriser leur maintien en suspension.

Lacto-remplaceur : *milk replacer*

Composé dérivé du lait proprement dit, destiné à remplacer le lait dans certaines préparations.

Lait fermenté : *fermented milk*

Produit laitier obtenu par une fermentation essentiellement lactique du lait, caractérisé par son caractère acide et gélifié.

Masse blanche : *white mass*

Yaourt « brut » obtenu à l'issue de l'étape de fermentation (maturation), avant introduction des ingrédients et mise en œuvre des étapes de transformation post-fermentaires.

Maturation : *maturation*

Phase de la fabrication du yaourt correspondant à la fermentation.

Métabolisme : *metabolism*

Ensemble des réactions chimiques qui se déroulent au sein d'une cellule vivante pour lui permettre de se reproduire, de se maintenir en vie et de répondre aux conditions de son environnement.

Mix : *mix*

Lait ayant subi différentes étapes de préparation en vue de sa fermentation en yaourt (standardisation, traitement thermique, éventuellement ajout d'ingrédients).

Pasteurisation : *pasteurization*

Technique de débactérisation des aliments fondée sur un chauffage à une température comprise entre 60°C et 90°C, sans ébullition, pendant une durée définie, suivi d'un refroidissement brusque, afin d'allonger la durée de conservation des aliments.

Post-acidification : *postacidification*

Phénomène d'acidification qui se produit dans le produit fini, lorsqu'il est commercialisé.

Probiotique : *probiotic*

Les micro-organismes probiotiques sont des micro-organismes vivants qui, lorsqu'ils sont ingérés en quantité suffisante, exercent un effet positif sur la santé du consommateur, au-delà des effets nutritionnels traditionnels.

Protéolyse : *proteolysis*

Mécanisme de dégradation des protéines du lait sous l'action d'enzymes appelées protéases.

Séchage par atomisation : *spray-drying*

Technique de déshydratation basée sur un principe de pulvérisation d'un liquide (atomisation) sous forme de fines gouttelettes dans une enceinte cylindrique verticale, au contact d'un courant d'air chaud, afin d'évaporer l'eau.

Synérèse : *syneresis*

Phénomène qui correspond à l'expulsion active d'une partie du lactosérum par contraction du gel, pouvant se produire après un temps plus ou moins long après la coagulation.

Traitement thermique UHT : *UHT treatment*

Technique de stérilisation consistant à porter le lait à une température très élevée (entre 135°C et 150°C) pendant un temps très court (quelques secondes seulement), afin de détruire tous les micro-organismes (dont les spores) tout en préservant les qualités du lait.

Ultrafiltration : *ultrafiltration*

Technique de séparation membranaire basée sur le principe de la filtration tangentielle, destinée à séparer les composants d'un liquide selon leur taille au travers d'une membrane de taille de pores comprise entre 1 et 100 nanomètres.

Sigles, notations et symboles

Symbole	Description	Unité
---------	-------------	-------

X	Concentration bactérienne	$g \cdot L^{-1}$
P	Concentration en acide lactique	$g \cdot L^{-1}$
qP	Taux de production d'acide lactique	h^{-1}
YP/X	Rendement de production	$g \cdot g^{-1}$

Sigle	Description
G.R.A.S.	Generally recognized as safe
Q.P.S.	Qualified presumption of safety
E.F.S.A.	European Food Safety Authority
ATP	Adénosine triphosphate
NAD+	Adénosine nicotinamide dinucléotide
UFC	Unités formant colonie
INRA	Institut national de la recherche agronomique
ADPI	American Dry Product Institute
PMS	Plan de maîtrise sanitaire
PCR	Polymerase Chain Reaction
HACCP	Hazard Analysis and Critical Control Point
UHT	Traitement thermique ultra-haute température
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
OMS	Organisation Mondiale de la Santé

7 Pour en savoir plus

7.1 Références bibliographiques

- [1] Béal C. et Helinck S. (2015). Yogurt and other fermented milks. In: Microorganisms and fermentation of traditional foods. Ray R.C. and Montet D. (Ed.), CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 139-185.
- [2] Tamime A.Y. et Robinson R.K. (2007). Yoghurt: science and technology. CRC Press, Boca Raton, FL.
- [3] Florence A.C.R., Béal C., Silva R.C., Bogsan, C.S.B., Pilleggi, A.L.O.S., Gioielli, L.A., et Oliveira, M.N. (2012). Fatty acid profile, trans-octadecenoic, α -linolenic and conjugated linoleic acid contents differing in certified organic and conventional probiotic fermented milks. Food Chemistry, 135: 2207-2214.
- [4] Kavita. R. Pandey, K.R., Naik S. R. et Vakil B.V. (2015). Probiotics, prebiotics and synbiotics- a review. Journal of Food Science and Technology, 52 : 7577-7587.

À lire également dans nos bases

- Aimar P., Daufin G. (2004). Séparations par membrane dans l'industrie alimentaire. [J2796].
- Boursier B. (2005). Amidons natifs et amidons modifiés alimentaires. [F4690].
- Boutonnier J.-L. (2018). Crème glacée, glace et sorbet- Aspects physico-chimiques. [F8011].

- Canon, K. (2008). Plan de maîtrise sanitaire et HACCP. [F1113].
- Coulon D. (2008). Matériaux d'emballage flexibles multicouches- Modalités de choix et applications. [F1325].
- Crouzet J. (1998). Arômes alimentaires. [F4100].
- Decloux M. (2002). Procédés de transformation en sucrerie (partie 1). [F6150].
- Decloux M. (2003). Procédés de transformation en sucrerie (partie 2). [F6151].
- Gelatin Manufacturers of Europe (GME) (2001). La gélatine alimentaire : production et applications. [F4800].
- Gesan-Guiziou G. (2007). Filtration membranaire (OI, NF, UF, MFT) – Applications en agroalimentaire. [J2795].
- Parfait B., Vidaud D. (2002). Analyse des acides nucléiques. [P3315].
- Roustel S. (2010). Homogénéisation à haute pression des dispersions alimentaires liquides. [F2710].
- Simon J.-L. (2001). Gomme xanthane : agent viscosant et stabilisant. [F4300].
- Snappe J.-J., Lepoudere A., Sredzinski N. (2010). Protéines lactières. [F4820].
- Tilly, G. (2010). Pectines. [F5000].
- Veynachter B. et Pottier P. (2007). Centrifugation et décantation. [A5550] et [A5560].
- Wagner M., Mellouet A.-G. et Zuber F. (2016). Traitement thermique en continu de produits pompables. [F3080].
- Zamorano J., Canivet F. (2018). Carraghénanes : agents gélifiants, épaississants et stabilisants. [F5080].

7.2 Autres ressources

7.2.1 Normes

FAO/WHO (2001) Health and nutritional properties of probiotics in food including powder milk with live lactic acid bacteria - Joint FAO/WHO expert consultation.

FAO/WHO (2011) Codex Alimentarius: codex standards for fermented milks 243-2003. In FAO/WHO (ed.) Milk and milk products, 2nd ed., pp. 6–16. Rome.

FAO/WHO (2018) Codex Alimentarius: codex standards for food additives 192-1995. In FAO/WHO (ed.), révisé en 2018. 475 pages.

7.2.2 Règlementation

Décret n°88/1203 du 30 décembre 1988, relatif aux laits fermentés et au yaourt ou yoghourt. Version consolidée au 31 décembre 2018.

Décret n°89/674 du 18 septembre 1989, relatif aux additifs pouvant être employés dans les denrées destinées à l'alimentation humaine.

Directive Européenne n°79/112/CEE du 18 décembre 1978, relative au rapprochement des législations des états membres concernant l'étiquetage et la présentation des denrées alimentaires destinées au consommateur final ainsi que la publicité faite à leur égard.

Règlement (CE) n°178/2002 du Parlement Européen et du Conseil du 28 janvier 2002 établissant les principes généraux et les prescriptions générales de la législation alimentaire, instituant l'Autorité européenne de sécurité des aliments et fixant des procédures relatives à la sécurité des denrées alimentaires.

Règlement (CE) n°1924/2006 du Parlement Européen et du Conseil du 20 décembre 2006 concernant les allégations nutritionnelles et de santé portant sur les denrées alimentaires.

Règlement (CE) n°2073/2005 de la Commission Européenne du 15 novembre 2005 concernant les critères microbiologiques applicables aux denrées alimentaires.

Règlement d'exécution (UE) n°872/2012 de la Commission du 01 octobre 2012 portant adoption de la liste de substances aromatisantes prévue par le règlement (CE) n°2232/96 du Parlement européen et du Conseil.

7.2.3 Brevets

Corrieu G., Spinnler H.E., Jomier Y. and Picque D. (1988). Automated system to follow up and control the acidification activity of lactic acid bacteria. French patent 2 629 612.

7.2.4 Sites internet

CNIEL (2018) : <http://www.filiere-laitiere.fr/fr/chiffres-cles/filiere-laitiere-francaise-en-chiffres> (consulté le 31 décembre 2018).

7.3 Données statistiques et économiques

En France, la consommation des laits fermentés est importante (environ 20 kg par habitant et par an mais en régression depuis 2010 (-1 à -3 % par an). Elle correspond à un peu plus de 7 % de la consommation totale de produits laitiers.

La répartition des produits indiquée sur la figure 9, fait apparaître une prédominance des yaourts (93 %) au détriment des autres laits fermentés (7 %). Par ailleurs, les produits aromatisés ou aux fruits (68 %) devancent largement les produits dits « naturels » (32 %). La part des yaourts brassés et à boire progresse et représente actuellement la moitié de la production nationale. Enfin, les produits non issus de lait de vache restent encore très minoritaires (1,2%) malgré une progression continue depuis quelques années.

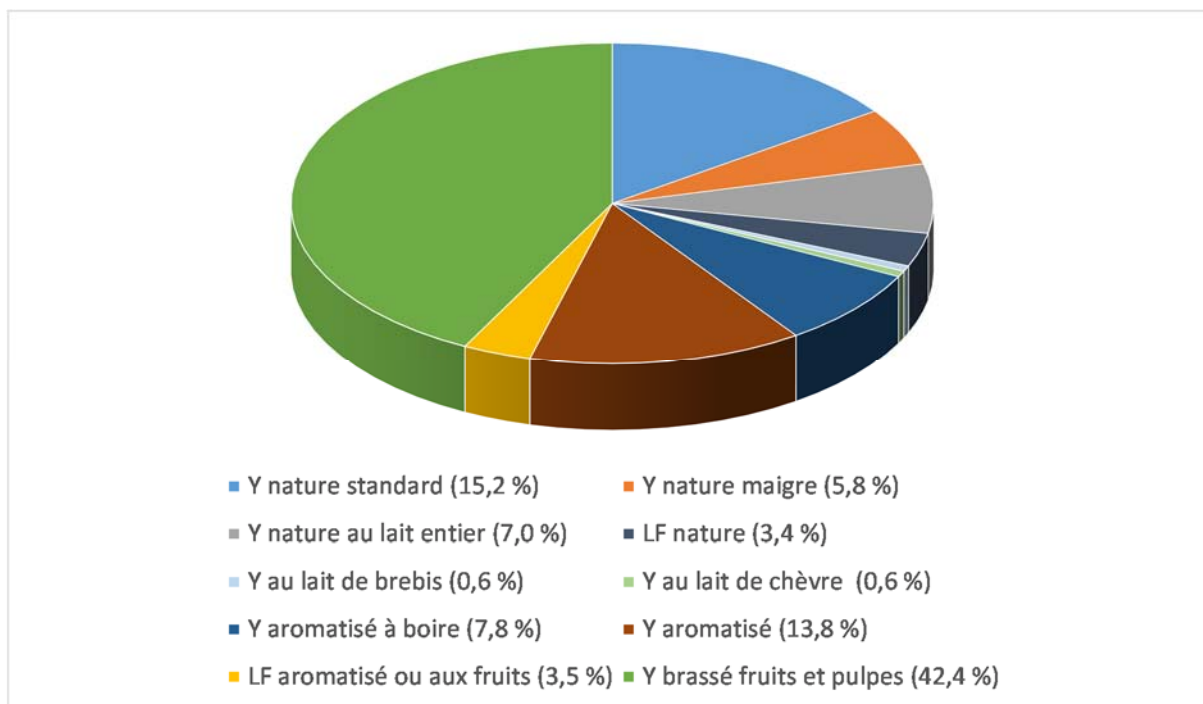


Figure 9 - Répartition des laits fermentés en France en 2016, hors produits fermiers (source CNIEL, 2018)

Les principales compagnies productrices de yaourts et de laits fermentés dans le monde sont listées au tableau 8.

Tableau 8 : Principales compagnies productrices de yaourts et laits fermentés dans le monde

Nom des compagnies	Pays
Bright Food Co	China
China Mengniu Dairy Co. Ltd	China
Chobani	USA
Danone Group	Europe
General Mills Inc.	USA
Inner Mongolia Yili Industrial Group Company Ltd	China
Lactalis Group	Europe
Meiji Holdings Co.	Japon
Nestlé SA	Europe
Yakult Honsha Company Ltd	Japon