HAL open science

# Initiation à la technologie laitière

Romain Jeantet, Thomas Croguennec, Gilles Garric, Gérard Brulé

**To cite this version:**

Romain Jeantet, Thomas Croguennec, Gilles Garric, Gérard Brulé. Initiation à la technologie laitière. Editions Tec & Doc Lavoisier, 2 ième édition, 210 p., 2017, 978-2743022617. hal-01522982

**HAL Id: hal-01522982**

**https://hal.science/hal-01522982**

Submitted on 5 Jun 2020

**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.

Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License

Romain Jeantet ▾ Thomas Croguennec
Gilles Garric ▾ Gérard Brulé

# INITIATION À LA TECHNOLOGIE FROMAGÈRE

2e édition

Lavoisier
TEC & DOC

## Chez le même éditeur

*La transformation fromagère caprine fermière – Bien fabriquer pour mieux valoriser ses fromages de chèvre*
*M. Pradal, 2012*

*Les poudres laitières et alimentaires*
*P. Schuck, A. Dolivet, R. Jeantet, 2012*

*Génie des procédés appliqués à l'industrie laitière (2° Éd.)*
*R. Jeantet, G. Brulé, G. Delaplace, 2011*

*Les critères microbiologiques des denrées alimentaires : Réglementation, agents microbiens, autocontrôle*
*É. Dromigny, 2011*

*Les produits laitiers*
*R. Jeantet, T. Croguennec, M. Mahaut, P. Schuck, G. Brulé, 2e éd., 2008*

*Fondements physicochimiques de la technologie laitière*
*T. Croguennec, R. Jeantet, G. Brulé, 2008*

*Grand dictionnaire illustré de parasitologie médicale et vétérinaire*
*J. Euzéby, 2008*

*Science des aliments : Biochimie - Microbiologie - Procédés - Produits*
*Volume 1 : Technologie des produits alimentaires*
*R. Jeantet, T. Croguennec, P. Schuck, G. Brulé, 2006*

*Science des aliments : Biochimie - Microbiologie - Procédés - Produits*
*Volume 2 : Stabilisation biologique et physico-chimique*
*R. Jeantet, T. Croguennec, P. Schuck, G. Brulé, 2006*

Pour plus d'informations sur nos publications :

newsletters.lavoisier.fr/9782743022617

**Romain Jeantet**

Professeur en Génie des procédés
et technologie laitière
Agrocampus Ouest

**Thomas Croguennec**

Professeur en Physicochimie
des bioproduits
Agrocampus Ouest

**Gilles Garric**

Ingénieur de Recherches
INRA Rennes

**Gérard Brulé**

Professeur émérite
Agrocampus Ouest

# Initiation à la technologie fromagère

**2e édition**

Lavoisier
TEC & DOC
editions.lavoisier.fr

Direction éditoriale : Fabienne Roulleaux
Édition : Brigitte Peyrot
Fabrication : Estelle Perez-Le Du
Composition et couverture : Patrick Leleux PAO, Caen

© 2017, Lavoisier, Paris
ISBN : 978-2-7430-2261-7

# Table des matières

**Avant-propos** . . . . . XI

*Chapitre 1*

**Le lait** . . . . . 1

1. Physicochimie et biochimie du lait . . . . . 1
   1.1. Composition du lait . . . . . 1
   1.2. Quelques propriétés physicochimiques du lait . . . . . 4
      1.2.1. Masse volumique à 20 °C . . . . . 4
      1.2.2. Viscosité à 20 °C. . . . . 4
      1.2.3. Point de congélation. . . . . 4
      1.2.4. pH et acidité . . . . . 4
      1.2.5. État de l'eau. . . . . 4
2. Constituants . . . . . 5
   2.1. Lipides. . . . . 5
      2.1.1. Composition de la matière grasse du lait . . . . . 5
      2.1.2. Structure du globule gras . . . . . 7
      2.1.3. Évolution biochimique, chimique et physique de la matière grasse . . . . . 10
   2.2. Matières azotées . . . . . 11
      2.2.1. Caséines . . . . . 12
      2.2.2. Protéines solubles ou azote protéique non caséinique . . . . . 18
      2.2.3. Matières azotées non protéiques (NPN) . . . . . 18
   2.3. Minéraux du lait. . . . . 18
   2.4. Lactose . . . . . 20
   2.5. Vitamines . . . . . 21
   2.6. Enzymes . . . . . 22

*Chapitre 2*

**Généralités sur la technologie fromagère** . . . . . 23

1. Classification et réglementation. . . . . 24
2. Standardisation physicochimique et biologique des laits. . . . . 28
3. Coagulation . . . . . 30
   3.1. Coagulation acide . . . . . 30
   3.2. Coagulation par voie enzymatique . . . . . 31
   3.3. Coagulation mixte . . . . . 31
4. Égouttage . . . . . 31
   4.1. Facteurs d'égouttage des gels lactique et présure . . . . . 31
   4.2. Bilan matière, rendements et taux de récupération . . . . . 33
   4.3. Cinétiques d'égouttage et d'acidification : diversité fromagère . . . 34
   4.4. Découplage des cinétiques d'égouttage et d'acidification. . . . . 36

5. Affinage . . . . . 37
5.1. Substrats . . . . . 38
5.2. Agents d'affinage . . . . . 38
5.2.1. Enzymes du lait . . . . . 38
5.2.2. Enzymes coagulantes . . . . . 38
5.2.3. Enzymes d'origine microbienne . . . . . 38
5.3. Influence de l'affinage sur la flaveur des fromages . . . . . 39
6. Accidents de fromagerie et défauts des fromages . . . . . 40
6.1. Défauts de coagulation et d'égouttage . . . . . 40
6.2. Défauts d'affinage . . . . . 41
6.2.1. Défauts de texture et gonflements . . . . . 41
6.2.2. Défauts d'aspect (croûtage et moisissures indésirables) . . . . . 41
6.2.3. Défauts de saveur et d'arôme . . . . . 41

*Chapitre 3*

**Préparation des laits de fromagerie** . . . . . 43

1. Standardisation physicochimique . . . . . 43
1.1. Standardisation en matières azotées protéiques des laits . . . . . 44
1.1.1. Élimination de l'eau par évaporation, ou par osmose inverse 48
1.1.2. Concentration par nanofiltration . . . . . 49
1.1.3. Concentration par ultrafiltration . . . . . 49
1.1.4. Enrichissement du lait en caséinates . . . . . 50
1.1.5. Enrichissement du lait en caséine native par microfiltration . 50
1.2. Standardisation en matière grasse des laits . . . . . 50
1.2.1. Standardisation quantitative . . . . . 50
1.2.2. Standardisation qualitative . . . . . 52
1.3. Équilibres salins du lait, ajustement du pH et teneur en lactose . . . 53
1.3.1. Équilibres salins . . . . . 53
1.3.2. pH d'emprésurage . . . . . 57
1.3.3. Lactose . . . . . 58
2. Standardisation biologique . . . . . 59
2.1. Laits réfrigérés . . . . . 59
2.2. Schémas technologiques . . . . . 61
2.3. Bactéries lactiques . . . . . 61
2.4. Les différentes formes d'ensemencement . . . . . 63
2.4.1. Levains traditionnels . . . . . 64
2.4.2. Cuve à levains . . . . . 64
2.4.3. Ensemencement direct des laits de fabrication . . . . . 65

*Chapitre 4*

**Coagulation** . . . . . 67

1. Mécanismes de coagulation . . . . . 68
1.1. Coagulation par acidification (isoélectrique) . . . . . 68
1.1.1. Modifications physicochimiques de la micelle au cours de l'acidification . . . . . 68
1.1.2. Influence des paramètres de coagulation sur les caractéristiques des gels . . . . . 70
1.2. Coagulation enzymatique . . . . . 73
1.2.1. Enzymes coagulantes . . . . . 73

1.2.2. Modélisation de la coagulation présure . . . . . 75
1.2.3. Facteurs de la coagulation présure . . . . . 78
1.3. Thermogélification . . . . . 86
2. Suivi de la coagulation . . . . . 86
2.1. Méthode visuelle . . . . . 86
2.2. Méthodes physiques . . . . . 86
2.2.1. Méthodes rhéologiques . . . . . 86
2.2.2. Méthodes de comptage particulaire . . . . . 87
2.2.3. Méthode ultrasonique . . . . . 87
2.2.4. Méthodes optiques . . . . . 88
2.3. Méthode chimique. . . . . 88
2.4. Méthode thermique . . . . . 88

*Chapitre 5*

**Égouttage du coagulum** . . . . . 89
1. Mécanisme de l'égouttage . . . . . 89
1.1. Égouttage du coagulum acide . . . . . 89
1.2. Égouttage du coagulum présure . . . . . 89
1.3. Égouttage du coagulum mixte . . . . . 90
2. Facteurs d'égouttage . . . . . 90
2.1. Traitements technologiques du lait . . . . . 91
2.2. Paramètres de coagulation . . . . . 91
2.3. Traitements physiques en cuve . . . . . 92
2.3.1. Tranchage . . . . . 92
2.3.2. Brassage . . . . . 93
2.3.3. Chauffage . . . . . 93
2.4. Moulage/pressage . . . . . 94
2.5. Acidification . . . . . 95
2.6. Salage . . . . . 98
3. Caractéristiques physicochimiques des différentes classes de fromages après salage suivant les modalités d'égouttage . . . . . 98
3.1. Caillés lactiques . . . . . 99
3.2. Caillés mixtes à dominante lactique . . . . . 99
3.3. Caillés mixtes à caractère présure dominant . . . . . 100
3.4. Caillés présures. . . . . 100
4. Rendements fromagers . . . . . 101

*Chapitre 6*

**Affinage des fromages** . . . . . 103
1. Salage . . . . . 103
1.1. Techniques de salage. . . . . 103
1.2. $A_w$ et activités biologiques . . . . . 107
2. Agents d'affinage . . . . . 109
2.1. Enzymes naturelles du lait. . . . . 109
2.1.1. Plasmine . . . . . 110
2.1.2. Lipase . . . . . 110
2.1.3. Autres enzymes . . . . . 111
2.2. Présure . . . . . 111
2.3. Agents microbiens des fromages . . . . . 112

2.3.1. Bactéries lactiques . . . . . 115
2.3.2. Bactéries propioniques (*Propionibacterium*) . . . . . 115
2.3.3. Microcoques et bactéries corynéformes . . . . . 116
2.3.4. Levures . . . . . 116
2.3.5. Moisissures . . . . . 117
2.4. Principaux systèmes enzymatiques d'origine microbienne . . . . . 117
2.4.1. Enzymes protéolytiques . . . . . 119
2.4.2. Lipases . . . . . 120
2.4.3. Systèmes actifs sur les acides aminés . . . . . 122
2.4.4. Systèmes actifs sur les acides gras . . . . . 123

3. Contrôle de l'affinage . . . . . 123
3.1. Température . . . . . 124
3.2. pH . . . . . 126
3.3. Activité de l'eau ($a_w$) . . . . . 127
3.4. Aération et composition de l'atmosphère . . . . . 128

4. Évolution des constituants du caillé . . . . . 131
4.1. Fermentation du lactose et transformations de l'acide lactique . . . 131
4.2. Lipolyse et dégradation des acides gras . . . . . 133
4.3. Protéolyse et dégradation des acides aminés . . . . . 136
4.4. Dynamique minérale . . . . . 138

5. Influence de l'affinage sur la flaveur des fromages . . . . . 139
5.1. Fromages de type pâte fraîche . . . . . 140
5.2. Fromages à pâte molle à croûte fleurie . . . . . 141
5.3. Pâtes molles à croûte lavée . . . . . 141
5.4. Fromages à pâte persillée . . . . . 141
5.5. Fromages à pâte pressée . . . . . 142
5.6. Fromages à pâte pressée cuite . . . . . 143

*Chapitre 7*

**Accidents de fromagerie et défauts des fromages** . . . . . 145

1. Défauts de coagulation et d'égouttage . . . . . 145
1.1. Facteurs d'inhibition et substances stimulantes du lait cru . . . . . 145
1.1.1. Facteurs inhibiteurs naturels du lait cru . . . . . 145
1.1.2. Influence des substances stimulantes et du traitement thermique sur la croissance des bactéries lactiques . . . . . 147
1.1.3. Facteurs exogènes . . . . . 148
1.2. Facteurs affectant la coagulation et l'égouttage . . . . . 149
1.2.1. Laits de mammite . . . . . 149
1.2.2. Laits réfrigérés . . . . . 149

2. Défauts d'affinage . . . . . 152
2.1. Défauts de texture et de gonflements . . . . . 152
2.1.1. Pâte sèche . . . . . 152
2.1.2. Pâte coulante . . . . . 152
2.1.3. Fromage sans ouverture . . . . . 152
2.1.4. Fromage lainé . . . . . 152
2.1.5. Fromage trop ouvert . . . . . 153
2.1.6. Gonflements précoces . . . . . 153
2.1.7. Gonflements tardifs ou gonflements butyriques . . . . . 153
2.2. Défauts d'aspect et de croûtage . . . . . 154
2.2.1. Accidents du « bleu » . . . . . 155

2.2.2. « Poil de chat » . . . . . 155
2.2.3. « Graisse » ou « peau de crapaud » . . . . . 155
2.2.4. Autres défauts d'origine fongique. . . . . 155
2.2.5. Défauts dus aux bactéries. . . . . 156
2.2.6. Croûte cartonneuse. . . . . 156
2.3. Défauts de saveur et d'arôme . . . . . 156
2.3.1. Défauts de saveur et d'amertume . . . . . 156
2.3.2. Goût de rance . . . . . 157
2.3.3. Autres défauts de flaveur . . . . . 159

*Chapitre 8*

**Technologies comparées des grands types de fromages** . . . . . 161

1. Les grandes familles de fromages . . . . . 161
1.1. Fromages frais . . . . . 161
1.1.1. Technologie traditionnelle . . . . . 161
1.1.2. Technologie MMV. . . . . 165
1.1.3. Qualités nutritionnelles des fromages frais. . . . . 165
1.2. Pâtes molles à croûte fleurie ou lavée . . . . . 165
1.2.1. Coagulation . . . . . 170
1.2.2. Moulage. . . . . 170
1.2.3. Affinage. . . . . 172
1.3. Pâtes persillées . . . . . 172
1.4. Fromages à pâte pressée . . . . . 174
1.4.1. Pâtes pressées non cuites (PPNC) . . . . . 175
1.4.2. Pâtes pressées cuites (PPC) . . . . . 175
1.5. Pâtes dures . . . . . 177
1.6. Pâtes filées . . . . . 178
1.7. Fromages fondus . . . . . 179

2. Qualités nutritionnelles et hygiéniques. . . . . 180
2.1. Intérêt nutritionnel . . . . . 180
2.2. Qualité hygiénique . . . . . 181

3. Perspectives d'évolution . . . . . 187
3.1. Déterminants de la texture . . . . . 187
3.1.1. Teneurs et caractéristiques des protéines et lipides . . . . . 188
3.1.2. Maîtrise des pH de coagulation et des caillés au démoulage 188
3.1.3. Degré de minéralisation des caillés . . . . . 191
3.2. Production d'arôme en phase liquide . . . . . 192
3.3. Exemples de découplages . . . . . 192
3.3.1. Spécialités de type pâte pressée. . . . . 193
3.3.2. Spécialités de type pâte molle tartinable . . . . . 193

**Conclusion** . . . . . 195

**Bibliographie** . . . . . 197

**Index** . . . . . 205

# Avant-propos

Le lait, sécrétion des glandes mammaires qui se déclenche à la parturition des femelles mammifères, est le premier aliment du jeune qui vient de naître et l'aliment le mieux adapté à ses besoins physiologiques ; les caractéristiques de cette sécrétion varient au cours des premiers jours suivant la naissance et diffèrent selon les espèces. Le lait est l'aliment de choix du nourrisson, non seulement parce qu'il apporte l'énergie et les éléments indispensables à sa croissance, mais aussi parce qu'il contient des prébiotiques et des éléments aux propriétés immunostimulantes qui aident le jeune à s'adapter à son nouvel environnement. Dans toutes les cultures et civilisations, le lait a acquis un caractère sacré car il est un don de la nature indispensable à la survie de l'espèce.

Le lait, par ses grandes qualités nutritionnelles, a toujours été considéré comme un aliment à part entière, mais sa consommation a souvent été limitée en raison de sa grande instabilité. En outre, l'élevage fut longtemps freiné dans son développement car il ne permettait pas de bien valoriser les terres cultivables ; l'activité pastorale s'implanta essentiellement dans les régions agricoles défavorisées par les conditions climatiques et pédologiques. L'irrégularité de la production, par son caractère saisonnier, et la grande fragilité du produit ont incité les producteurs à rechercher des formes de report des éléments essentiels du lait. C'est dans ce contexte que sont apparues il y a plusieurs millénaires les premières transformations fromagères. L'homme s'aperçut rapidement que la déstabilisation du lait par maturation ou par ajout de sécrétion gastrique facilitait l'expulsion de l'eau et créait des conditions favorables à la conservation. Au cours des siècles, sur la base d'observations, les hommes de l'art qu'étaient les fromagers ont su trouver des conditions de fabrication générant une très grande diversité de texture, de goût et d'arômes que les progrès de la science laitière permettent aujourd'hui d'expliquer en partie.

Au cours du XX^e^ siècle, nous avons assisté à une véritable révolution aussi bien dans les techniques d'élevage (sélection, reproduction, alimentation) que dans celles de transformation ; il en a résulté des gains de productivité importants et une nette amélioration de la qualité de l'ensemble des produits laitiers, ce qui a contribué à accroître la consommation du lait de différents mammifères et de ses dérivés. Les principales espèces exploitées dans le monde sont la vache (4/5^e^ de la production), la bufflonne (1/10^e^ de la production), la brebis et la chèvre. Seule une partie de ces laits est consommée en l'état ; le reste est transformé en produits fermentés, en fromages, en beurre et ingrédients (lactose, caséines, matière grasse anhydre) ;

une des caractéristiques de l'ensemble de ces produits transformés est la faible teneur en eau par rapport à celle du lait (Figure 1).

Cet ouvrage est une présentation des différentes technologies mises en œuvre dans la transformation du lait en fromage. Les acquis de la science laitière de ces dernières années nous permettent de mieux comprendre les mécanismes physico-chimiques et biologiques impliqués dans cette transformation, et de proposer au technologue une démarche raisonnée pour parvenir à une plus grande maîtrise de la qualité des produits élaborés.

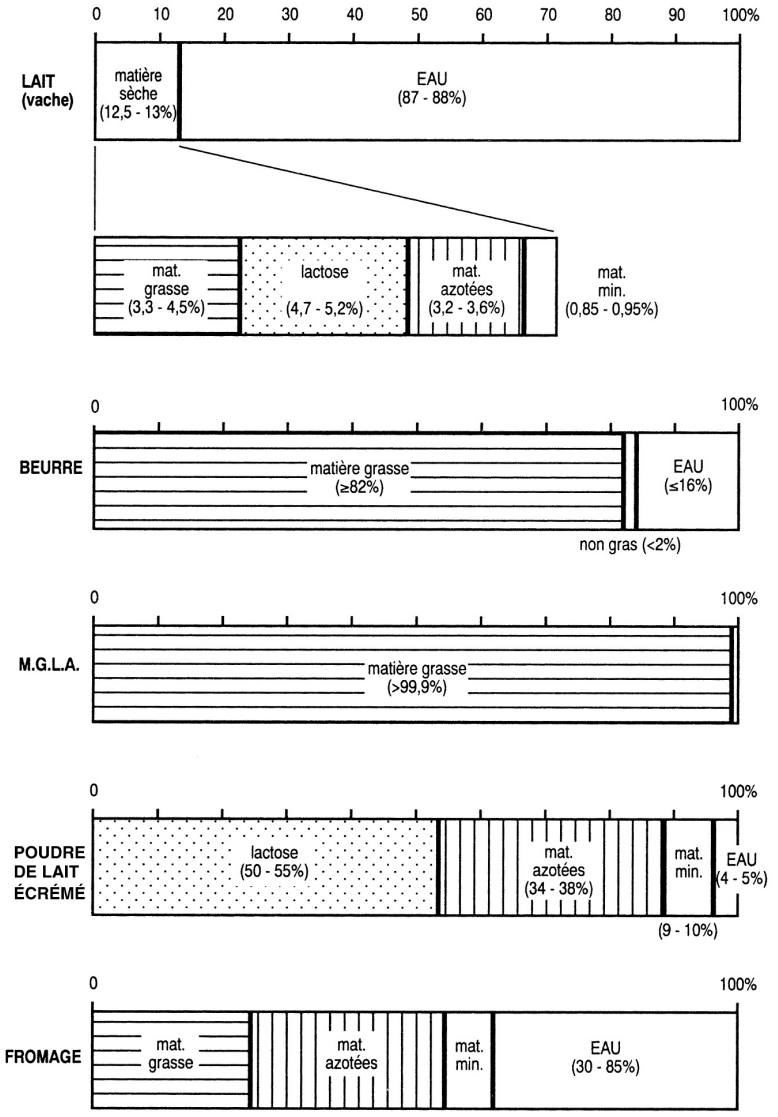


***Figure 1.*** « Silhouette analytique » des produits laitiers (d'après Alais, 1984 et Mietton et al., 1994).

# INITIATION À LA TECHNOLOGIE FROMAGÈRE

**2e édition**

**Le livre**

***Initiation à la technologie fromagère*** présente les principales étapes de la transformation fromagère, de la coagulation du lait à l'affinage des fromages obtenus selon les principales voies technologiques. En s'appuyant sur les acquis de la science laitière, il permet de mieux appréhender et comprendre les mécanismes physicochimiques et biologiques impliqués aux différentes étapes de cette transformation.

Cette 2e édition intègre les dernières connaissances en matière de composition et de structure des constituants du lait. Par ailleurs, la réorganisation du texte permet de mieux illustrer les liens entre physicochimie laitière, paramètres technologiques appliqués et caractéristiques des fromages obtenus.

L'analyse des causes des défauts de coagulation, d'égouttage et d'affinage conduit à l'identification des leviers pour parvenir à une plus grande maîtrise de la qualité des produits élaborés.

**Les auteurs**

**Romain Jeantet**, **Thomas Croguennec** et **Gérard Brulé** sont enseignants à Agrocampus Ouest (Rennes). **Gilles Garric** est ingénieur de recherches à l'INRA (Rennes).

**Le public**

Cet ouvrage synthétique s'adresse aux techniciens et ingénieurs de l'industrie laitière ainsi qu'aux étudiants des filières agroalimentaires (BTS industries agroalimentaires, IUT génie biologique, licences professionnelles et écoles d'ingénieurs spécialisées en agroalimentaire, etc.).

editions.lavoisier.fr

978-2-7430-2261-7