

Romain Jeantet • Gérard Brulé  
Guillaume Delaplace

# Génie des procédés appliqué à l'industrie laitière

2<sup>e</sup> édition



*Editions*  
**TEC**  
& **DOC**

*Lavoisier*



# Génie des procédés appliqué à l'industrie laitière

2<sup>e</sup> édition

**Romain Jeantet, Gérard Brulé**

*Département agroalimentaire*

*Agrocampus Ouest, Rennes*

**Guillaume Delaplace**

*Laboratoire Processus Interfaces Hygiène des Matériaux*

*INRA, Villeneuve-d'Ascq*



11, rue Lavoisier  
75008 Paris

## Chez le même éditeur

*Fondements physicochimiques de la technologie laitière*

T. Croguennec, R. Jeantet, G. Brulé, 2008.

*Les produits laitiers*

R. Jeantet, T. Croguennec, M. Mahaut, P. Schuck, G. Brulé, 2008

*Science des aliments : Biochimie, microbiologie, procédés, produits.*

*Volume 1 : Stabilisation biologique et physicochimique.*

R. Jeantet, T. Croguennec, P. Schuck, G. Brulé, 2006

*Science des aliments : Biochimie, microbiologie, procédés, produits.*

*Volume 2 : Technologie des Produits alimentaires.*

R. Jeantet, T. Croguennec, P. Schuck, G. Brulé, 2006

*Initiation à la technologie fromagère*

M. Mahaut, R. Jeantet, G. Brulé, 2000

*Lait, nutrition et santé*

G. Debry, coord., 2000

*Structure et technofonctions des protéines du lait*

P. Cayot, 1998

*Le fromage*

A. Eck, J.-C. Gillis, coord., 3<sup>e</sup> édition, 1997

*Initiation à la physicochimie du lait*

collection « Guides technologiques des IAA »

J. Mathieu, 1997



© LAVOISIER, 2011

ISBN : 978-2-7430-1359-2 (2<sup>e</sup> édition, 2011)

ISBN : 2-7430-0509-2 (1<sup>re</sup> édition, 2001)

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris), est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (loi du 1<sup>er</sup> juillet 1992 – art. L. 122-4 et L. 122-5 et Code pénal art. 425).

# Table des matières

Avant-propos .....	VII
Symboles .....	IX
Abréviations .....	XII

## Chapitre 1

### Quelques notions importantes concernant les transferts, bilans et équilibres

1. Transferts par conduction .....	5
1.1. Transferts de chaleur : loi de Fourier .....	5
1.1.1. Établissement du régime stationnaire dans une plaque infinie .....	6
1.1.2. Transfert de chaleur dans une plaque infinie en régime stationnaire .....	8
1.1.3. Transfert de chaleur dans une plaque composite en régime stationnaire .....	8
1.1.4. Transfert de chaleur dans un tube en régime stationnaire .....	9
1.1.5. Transfert de chaleur en régime non stationnaire .....	11
1.2. Transferts de matière : loi de Fick .....	12
1.2.1. Établissement du régime stationnaire : transfert de matière dans une plaque infinie en régime transitoire .....	16
1.2.2. Transfert de matière dans une plaque infinie en régime stationnaire .....	17
1.3. Transferts de quantité de mouvement .....	18
1.3.1. Loi de Newton .....	18
1.3.2. Application au calcul des écoulements dans les conduites en régime laminaire .....	20
1.3.2.1. Écoulement dans un canal plein à section rectangulaire .....	21
1.3.2.2. Écoulement dans une conduite cylindrique : loi de Poiseuille .....	23
2. Transferts en mode convectif .....	25
2.1. Introduction à la similitude géométrique et physique : l'expérience de Reynolds .....	25
2.2. Intérêt de la similitude .....	26

2.3. Similitude totale .....	28
2.4. Similitude partielle .....	30
2.4.1. Invariants de similitude dans le domaine de la dynamique.....	30
2.4.2. Invariants de similitude et transferts de chaleur .....	32
2.4.3. Invariants de similitude et transferts de matière.....	34
2.5. Analyse dimensionnelle .....	34
2.5.1. Théorème $\pi$ .....	34
2.5.2. Déplacement d'une sphère dans un fluide sous l'action d'une force .....	35
2.5.3. Perte de charge dans une conduite cylindrique ou rectangulaire .....	36
2.5.4. Détermination des coefficients de transfert de chaleur .....	39
3. Exercices .....	40
3.1. Parois d'échange de chaleur .....	40
3.2. Viscosimétrie.....	40
3.3. Chauffage de lait par tube à passage de courant (TPC) .....	41
3.4. Congélation de produits laitiers .....	45

## Chapitre 2

### Traitements thermiques

1. Cinétiques de destruction microbienne et d'inactivation enzymatique..	49
1.1. Cinétique de destruction microbienne à température constante.....	49
1.2. Influence de la température sur la cinétique de destruction microbienne.....	51
1.3. Cinétique d'altération des constituants à température constante ....	54
1.4. Traitements thermiques à température variable .....	57
2. Mise en œuvre des traitements thermiques .....	59
2.1. Objectifs .....	59
2.1.1. Pasteurisation .....	59
2.1.2. Stérilisation .....	61
2.2. Traitement en vrac .....	62
2.2.1. Système discontinu .....	63
2.2.2. Système continu.....	63
2.2.2.1. Dimensionnement d'un échangeur de chaleur à contre-courant .....	64
2.2.2.2. Nombre d'unités de transfert .....	65
2.2.2.3. Cas particulier des zones de récupération .....	66
2.2.2.4. Dimensionnement d'un échangeur de chaleur à co-courant .....	67
2.2.3. Matériel.....	68
2.2.3.1. Pasteurisation .....	68
2.2.3.2. Stérilisation .....	70
2.3. Traitement après conditionnement.....	72
3. Exercices .....	74
3.1. Pasteurisation de lait écrémé.....	74
3.2. Stérilisation de lait de consommation.....	77

## Chapitre 3

### Décantation et filtration

1. Décantation .....	81
1.1. Loi de Stokes .....	81
1.2. Décantation sous l'action de la pesanteur.....	83
1.2.1. Séparation de particules en milieu liquide en décanteur horizontal .....	83
1.2.2. Cas du décanteur oblique .....	84
1.2.3. Séparation de liquides non miscibles .....	85
1.3. Décantation centrifuge .....	86
1.3.1. Écrémage du lait .....	86
1.3.2. Cyclones .....	90
2. Filtration tangentielle.....	92
2.1. Lois de transfert de solvant.....	93
2.1.1. Loi de Darcy .....	93
2.1.2. Modèle du film .....	95
2.2. Lois de transfert de solutés - Sélectivité.....	96
2.2.1. Exclusion stérique - Loi de Ferry .....	96
2.2.2. Exclusion ionique .....	99
2.3. Influence des paramètres de filtration.....	101
2.4. Dimensionnement des installations .....	104
2.4.1. Calcul des surfaces de filtration .....	104
2.4.2. Puissance installée .....	107
2.4.2.1 Module tubulaire (rayon R, longueur L) .....	107
2.4.2.2 Module à plaques ou spirales (distance entre plaques 2e, longueur L, largeur l) .....	107
2.5. Diafiltration .....	108
2.6. Composition des fractions obtenues .....	110
3. Exercices .....	110
3.1. Clarification de lactosérum doux en décanteur horizontal.....	110
3.2. Clarification de lactosérum doux en décanteur centrifuge.....	111
3.3. Ultrafiltration de lait écrémé.....	112
3.4. Obtention de fraction protéique purifiée par diafiltration .....	114

## Chapitre 4

### Concentration par évaporation

1. Évaporation simple effet.....	118
1.1. Principe .....	118
1.2. Production de vide .....	120
1.2.1. Condensation par mélange eau-vapeur.....	120
1.2.2. Condensation par échangeur.....	122
2. Réduction de la consommation d'énergie .....	123
2.1. Évaporation multiple effet .....	123
2.2. Thermocompression.....	124
2.3. Recompression mécanique des vapeurs.....	128

3. Éléments de dimensionnement des évaporateurs .....	130
3.1. Surfaces d'évaporation .....	130
3.2. Pertes de charge .....	131
3.3. Temps de séjour .....	132
4. Exercices .....	135
4.1. Concentration par évaporation de lactosérum doux .....	135
4.2. Refroidissement d'un concentré par détente .....	136

## Chapitre 5 Séchage

1. Psychrométrie .....	138
2. Construction du diagramme enthalpique de l'air humide .....	140
3. Propriétés du diagramme enthalpique .....	143
3.1. Séchage par entraînement .....	143
3.2. Mélange d'airs .....	144
4. Cinétiques de séchage.....	146
5. Exercices .....	147
5.1. Isolation d'une tour de séchage .....	147
5.2. Séchage de lactosérum doux de pâte pressée cuite .....	150

## Chapitre 6 Agitation et mélange

1. Choix technologique d'un système d'agitation mélange .....	158
1.1. Classification usuelle des mobiles d'agitation.....	158
1.2. Paramètres opératoires à prendre en compte pour définir le système d'agitation .....	160
1.2.1. Vitesse d'agitation et chicanage de la cuve .....	160
1.2.2. Position et nombre d'étages d'agitation.....	161
1.2.3. Incorporation de gaz.....	162
1.2.4. Transfert de chaleur.....	163
1.2.5. Cavitation .....	165
1.2.6. Géométrie des fonds de cuve .....	165
2. Modélisation d'un procédé de mélange par essais sur maquette et analyse dimensionnelle .....	165
2.1. Intérêt et terminologie.....	165
2.2. Étude de deux cas résolus .....	167
2.2.1. Temps de mélange de deux fluides miscibles aux propriétés physiques identiques.....	167
2.2.2. Temps de réhydratation d'une poudre laitière .....	174
3. Exercice : dimensionnement du système d'agitation d'une cuve mécaniquement agitée .....	177
3.1. Analyse dimensionnelle de la puissance consommée .....	177
3.2. Établissement d'une relation de procédé .....	178

<b>Bibliographie</b> .....	183
<b>Annexes</b> .....	185
<b>Index</b> .....	193

# *Avant-propos*

Le lait a toujours été considéré, dans toutes les civilisations, comme un produit noble en raison de son adaptation parfaite aux besoins nutritionnels et physiologiques du jeune. Cependant, son instabilité biologique et physicochimique constitue un facteur limitant de son utilisation en l'état. Au cours des siècles, l'Homme a, sur la base d'observations, su empiriquement trouver les moyens de le stabiliser ou d'en extraire les éléments essentiels dans une forme plus stable. Cette recherche de report de consommation s'observe tout particulièrement dans les régions de production laitière à forte saisonnalité (montagnes par exemple).

Les opérations technologiques les plus anciennes consistaient à réduire la teneur en eau et à créer dans la phase aqueuse résiduelle des conditions physicochimiques stabilisantes par acidification et salage.

Les lipides et protéines, éléments les plus intéressants d'un point de vue nutritionnel, se trouvent dans le lait à l'état dispersé (globules gras, micelles de caséine). Ils sont instables au plan thermodynamique, ce qui facilite leur séparation et leur concentration : les fondements de la fabrication du beurre (crémage - barattage) et de la transformation du lait en fromage (coagulation - égouttage) ont donc été établis sur la base d'observations de phénomènes de déstabilisation se produisant naturellement.

Les travaux de Nicolas Appert et de Louis Pasteur au XIX<sup>e</sup> siècle ont permis de mieux comprendre les bases biologiques et physicochimiques de l'instabilité des aliments. Les traitements thermiques (pasteurisation - stérilisation) sont apparus comme un moyen efficace pour améliorer leur conservation. La deuxième technique majeure de stabilisation des aliments, en particulier du lait et des produits laitiers, est le séchage industriel, qui date des années 1900.

On peut donc considérer que l'essentiel des fondements technologiques toujours exploités de nos jours en industrie laitière date d'un siècle ou plus. Pourtant les années 1960 à 1970 ont vu une véritable révolution industrielle qui a fait du secteur laitier un des plus performants des industries agroalimentaires. On doit ce sursaut d'une part aux gros efforts de recherche et de diffusion des

connaissances en sciences laitières, dont Germain Mocquot et Charles Alais ont été les pionniers, et d'autre part à une approche analytique et conceptuelle des opérations technologiques qui a ainsi contribué sous l'impulsion de Marcel Loncin au développement du génie des procédés alimentaires et à la formation de nombreux ingénieurs dans le domaine, dont Michel Roignant qui a eu un rôle déterminant dans la rédaction de la première édition de cet ouvrage.

La maîtrise de la qualité et des coûts de revient des produits élaborés a beaucoup progressé grâce à une parfaite connaissance des matières premières et des mécanismes impliqués dans leur transformation, ainsi qu'à une bonne appréhension des phénomènes physiques et thermodynamiques qui régissent chacune des opérations unitaires.

Si les cadres de l'industrie laitière ont en général une très bonne connaissance de la matière première et de sa transformation, il leur est parfois plus difficile de maîtriser le domaine du génie alimentaire. Celui-ci permet pourtant de faire des bilans rigoureux d'énergie et de matière, d'identifier les facteurs limitants des différents types de transfert (énergie, matière ou quantité de mouvement) et de sélectionner les leviers les plus pertinents et efficaces pour améliorer les performances d'une opération unitaire ou d'un procédé.

L'objectif de cet ouvrage, qui s'adresse à tous les techniciens et ingénieurs de l'industrie laitière, est de contribuer à améliorer leurs compétences en génie alimentaire pour qu'ils puissent plus facilement comprendre et optimiser les procédés qu'ils utilisent et ainsi atteindre leurs objectifs qualitatifs et économiques.

Nous tenons à rendre hommage à Michel Roignant en lui dédiant cette nouvelle édition car il a eu, avant de nous quitter, le souci de transmettre ses connaissances et son expérience pédagogique à un point tel que l'enseignement dispensé dans le domaine agroalimentaire au sein d'Agrocampus Ouest est toujours très imprégné de sa conception de l'enseignement et de sa pédagogie.



Cette 2<sup>e</sup> édition de *Génie des procédés appliqué à l'industrie laitière* – augmentée et mise à jour – présente les lois de transfert et leur exploitation dans les opérations élémentaires mises en œuvre dans le secteur laitier : stabilisation par traitements thermiques ou réduction de la teneur en eau, séparation de phases et fractionnement des constituants, et pour la première fois, opérations de mélange et d'agitation.

Les principes physiques sur lesquels s'appuient ces opérations sont largement évoqués, afin de déterminer les leviers technologiques pertinents pour la conception et l'optimisation des procédés. Des exercices corrigés permettent au lecteur de s'approprier ces notions essentielles. Le caractère opérationnel est renforcé par une base de données physiques relatives aux produits laitiers.

Par son approche synthétique et didactique, cet ouvrage s'adresse à l'ensemble des professionnels du secteur. Il apportera aussi une contribution utile à la formation des étudiants des filières agroalimentaires ou biotechnologiques (Écoles d'Ingénieurs, Brevet de Technicien Supérieur, Instituts Universitaires de Technologie).

**Romain Jeantet** est professeur en génie des procédés alimentaires à Agrocampus Ouest (Rennes).

**Gérard Brulé** est professeur émérite d'Agrocampus Ouest.

**Guillaume Delaplace** est chargé de recherches en génie des procédés alimentaires au laboratoire PIHM de l'INRA (Villeneuve d'Ascq).

**Michel Roignant**† coauteur de la 1<sup>re</sup> édition, était professeur au Département Agroalimentaire d'Agrocampus Ouest.



978-2-7430-1359-2