

Romain Jeantet • Gérard Brulé  
Guillaume Delaplace

# Génie des procédés appliqué à l'industrie laitière

2<sup>e</sup> édition



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

*Lavoisier*

# 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

<b>1. Décantation</b> .....	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
<b>2. Filtration tangentielle</b> .....	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
<b>3. Exercices</b> .....	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

<b>1. Évaporation simple effet</b> .....	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
<b>2. Réduction de la consommation d'énergie</b> .....	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
--------------------	-----

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'appropriier 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