

Romain Jeantet • Gérard Brulé
Guillaume Delaplace

Génie des procédés appliqué à l'industrie laitière

2^e édition



Editions
TEC
& **DOC**

Lavoisier

2-637-9-1

2-637-9-1



Génie des procédés appliqué à l'industrie laitière

2^e édition

Romain Jeantet, Gérard Brulé

Département agroalimentaire

Agrocampus Ouest, Rennes

Guillaume Delaplace

Laboratoire Processus Interfaces Hygiène des Matériaux

INRA, Villeneuve-d'Ascq

**Editions
TEC
& DOC**

11, rue Lavoisier
75008 Paris

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 π	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

Bibliographie	183
Annexes	185
Index	193