Didier Ronze
coordonnateur

Introduction au génie des procédés

Editions TEC & DOC

Lavoisier

Introduction au génie des procédés

Didier Ronze
coordonnateur

Editions TEC & DOC
11, rue Lavoisier
F-75008 Paris

Chez le même éditeur

Phénomènes de transfert en génie des procédés
J.-P. Couderc, C. Gourdon, A. Liné, 2008

Introduction à l'écotoxicologie
F. Ramade, 2007

La chimie verte
P. Colonna, coord., 2006

Le génie chimique à l'usage des chimistes
J. Liéto, 2e édition, 2004

Sécurité des procédés chimiques – Connaissances de base et méthodes d'analyse de risques
collection « Génie des procédés de l'École de Nancy »
A. Laurent, 2003

Génie de la réaction chimique
collection « Traité de génie des procédés »
D. Schweich, 2001

DANGER
LE
PHOTOCOPILLAGE
TUE LE LIVRE

© LAVOISIER, 2008

ISBN : 978-2-7430-1066-9

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 1er-juillet 1992 - art. L 122-4 et L 122-5 et Code pénal art. 425).

Liste des auteurs

Didier Colson
maître de conférences des universités
IUT A – département Génie chimique – Génie des procédés
Université Claude Bernard – Lyon 1
43, bd du 11 novembre 1918
69622 Villeurbanne cedex

Jean Costes
professeur des universités
IUT Paul Sabatier – département Génie chimique – Génie des procédés
137, avenue de Rongueil
BP 67701
31077 Toulouse cedex

Gilles Févotte
professeur des universités
IUT A – département Génie chimique – Génie des procédés
Université Claude Bernard – Lyon 1
43, bd du 11 novembre 1918
69622 Villeurbanne cedex

Noël Hiquily
maître de conférences des universités
IUT Paul Sabatier – département Génie chimique – Génie des procédés
137, avenue de Rongueil
BP 67701
31077 Toulouse cedex

Jean-Paul Klein
professeur des universités
IUT A – département Génie chimique – Génie des procédés
Université Claude Bernard – Lyon 1
43, bd du 11 novembre 1918
69622 Villeurbanne cedex

Denis Mangin
maître de conférences des universités
IUT A – département Génie chimique – Génie des procédés
Université Claude Bernard – Lyon 1
43, bd du 11 novembre 1918
69622 Villeurbanne cedex

Catherine Morlay
maître de conférences des universités
IRCELYON
Université Claude Bernard – Lyon 1
43, bd du 11 novembre 1918
69622 Villeurbanne cedex

Ridha Mosrati
maître de conférences des universités
IUT de Caen – département Génie chimique – Génie des procédés
2, boulevard du Maréchal Juin
14032 Caen cedex

Nordine Mouhab
maître de conférences des universités
IUT de Rouen – département Génie chimique – Génie des procédés
76821 Mont Saint Aignan cedex

Éric Peyrol
maître de conférences des universités
IUT A – département Génie thermique et énergie
Université Claude Bernard – Lyon 1
71, rue Peter Fink
01000 Bourg-en-Bresse

Nicolas Roche
professeur des universités
IUT de Marseille
Traverse Charles Susini
BP 157
13388 Marseille cedex 13

Didier Ronze
professeur des universités
IUT A – département Génie chimique – Génie des procédés
Université Claude Bernard – Lyon 1
43, bd du 11 novembre 1918
69622 Villeurbanne cedex

Séverine Vessot-Crastes
maître de conférences des universités
IUT A – département Génie chimique – Génie des procédés
Université Claude Bernard – Lyon 1
43, bd du 11 novembre 1918
69622 Villeurbanne cedex

Préface

Les Instituts Universitaires de Technologies ont été créés en 1966 pour répondre aux besoins de qualifications en techniciens supérieurs de l'économie française. C'est en 1968 que la spécialité de Génie Chimique voit le jour. Elle est destinée à former les cadres intermédiaires de l'industrie chimique, ceux-ci s'inséreront aussi bien dans les bureaux d'études qui conçoivent les installations que dans les unités de production des usines chimiques. Jusqu'au début des années 1990, ce sont 4 départements d'IUT seulement qui forment à peine 300 diplômés par an. Ces départements historiques sont implantés à Nancy, Toulouse, Saint-Nazaire et Lyon. Avec les plans successifs d'Université 2000 et d'U3M, 7 autres départements sont créés dans les 20 dernières années.

Ainsi, la spécialité compte aujourd'hui 11 départements sur les quelques 650 départements d'enseignement présents dans les IUT. Elle compte parmi les spécialités à petits effectifs aux côtés des mastodontes comme la mécanique, le génie électrique, la gestion ou le commerce.

En 1994, lors de la rénovation des programmes pédagogiques nationaux des Diplômes Universitaires de Technologie, la commission pédagogique nationale propose des évolutions sensibles qui se traduisent par de nouveaux modules de formation et une évolution du nom de la spécialité. Le DUT s'appellera désormais Génie Chimique-Génie des Procédés. Cette évolution marque le souci de la spécialité de s'adapter à l'évolution de l'économie de la France. Ainsi, d'une chimie très fortement orientée sur la chimie lourde dans les années 60, le paysage économique évolue vers une chimie fine à forte valeur ajoutée fortement liée à la pharmacie, à la cosmétique et aux industries de pointe. Les techniciens supérieurs formés dans les IUT s'insèrent de plus en plus dans d'autres secteurs d'activité que la chimie où ils valorisent leurs compétences de spécialistes du procédé.

Ces dernières années, la transformation et les mutations de l'industrie chimique s'accélèrent et de nouvelles préoccupations apparaissent comme la qualité, la sécurité et la protection de l'environnement. Les programmes évoluent à nouveau pour s'adapter à ce paysage et en 2005, ces notions sont introduites ou renforcées dans la formation.

L'ouvrage qui nous est proposé n'est pas un ouvrage de plus dans la documentation importante dont disposent les étudiants ou les professionnels du domaine des procédés. En effet, il vise à regrouper au sein d'un même livre les principales disciplines nécessaires à l'élaboration des compétences du technicien supérieur en Génie Chimique-Génie des Procédés. Il aborde naturellement les fondamentaux comme les transferts de matière, de fluide et de chaleur. Il décrit les opérations unitaires en mettant l'accent sur les opérations solide-fluide, solide-liquide et liquide-liquide dont on connaît l'importance dans la chimie moderne. Cet ouvrage veille à aborder également la technologie des appareils qui permettent d'assurer ces transformations et les principes qui conduisent à leurs dimensionnements. La réaction chimique et biochimique ainsi que le calcul des réacteurs y trouvent naturellement une large place. Ajoutons que chaque chapitre fait une place importante aux procédés discontinus ou semi-continus qui prennent une importance croissante dans l'industrie chimique ou pharmaceutique actuelle. Sur un autre plan, des disciplines plus récentes mais néanmoins incontournables de nos jours, dans les métiers du procédé, sont également abordées et traitées : la régulation, la qualité, la sécurité et les préoccupations environnementales. Cet ouvrage permet donc d'aborder de façon complémentaire les compétences fondamentales de la science Génie Chimique-Génie des Procédés et les compétences plus récentes mais indispensables des procédés d'aujourd'hui.

Cet ouvrage trouvera sans nul doute sa place dans les bibliothèques de tous les spécialistes du procédé comme un document immédiatement accessible pour répondre aux questions quotidiennes qui leurs sont posées. Le propos des auteurs n'est pas de proposer un ouvrage complet faisant le tour de l'état de l'art sur chacun des thèmes abordés. Chacun pourra compléter sa connaissance en faisant référence aux nombreux ouvrages scientifiques ou technologiques qui développent l'un ou l'autre de ces thèmes. Enfin, sur des problématiques plus précises et pointues, il sera opportun de consulter les publications de recherche récentes pour trouver des réponses aux questions posées.

Sur un plan pédagogique, cet ouvrage trouvera son public en formation initiale dans les IUT d'abord, au sein des départements Génie Chimique-Génie des Procédés mais aussi au sein des départements Chimie où la discipline y est enseignée. Certaines sections de Techniciens Supérieurs dans les secteurs de la Chimie et de la Pharmacie sauront également s'approprier ce livre. Ne doutons pas non plus qu'il puisse constituer une première approche de la science des procédés pour nombre de futurs ingénieurs. La formation, aujourd'hui, ne se conçoit plus comme une formation unique au sortir du baccalauréat mais comme une formation tout au long de la vie. Les auteurs se sont également placés dans cette perspective. Ce document enrichira les modules mis en place par les IUT dans ce cadre de la formation continue et permettra aux candidats à la Validation des Acquis de l'Expérience de confronter leurs compétences acquises à une référence abordable dans chaque domaine.

Cette publication marque un véritable travail collectif qu'il convient de saluer. Lorsque Didier RONZE nous a parlé de ce projet en 2004, il nous semblait que le principal obstacle résidait dans la faiblesse en nombre des effectifs enseignants et enseignants chercheurs de cette discipline dans les rangs des IUT. Comparé

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

à d'autres secteurs qui, depuis longtemps, ont structuré leurs productions pédagogiques collectives comme par exemple le secteur des Techniques de Commercialisation ou le secteur du Génie Électrique et de l'Informatique Industrielle, le caractère quasi-confidentiel du Génie Chimique-Génie des Procédés apparaissait comme un véritable handicap. Toutefois, le réseau des départements de la spécialité est parvenu à se fédérer pour trouver les collègues qui se sont investis dans cet ouvrage. Au terme d'un travail qui aura duré 4 ans, nous saluons la première production collective des enseignants en IUT de la spécialité Génie Chimique-Génie des Procédés. Nous souhaitons voir cette dynamique se développer et investir d'autres champs (par exemple ressources numériques). Forts de l'expérience collective des auteurs, nous ne doutons pas de leur production à venir.

Jean-Marie Hornut
Directeur de l'IUT Nancy Brabois
Enseignant au département Génie Chimique – Génie des Procédés
Membre du Bureau Conseil de l'Assemblée des Directeurs d'IUT

Jean-François Mazoin
Directeur de l'IUT Toulouse A
Enseignant au département Génie Chimique – Génie des Procédés
Président de l'Assemblée des Directeurs d'IUT

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

On ne aprent pas seulement pour scavoir,
mais pour monstrer et ouvrer

Discours *Vivat Rex* de Jean Gerson
à Charles VI, 1405

Avant-propos

Cet ouvrage est le fruit d'une démarche commune de l'ensemble des départements Génie chimique-Génie des procédés des IUT de France. Tous ont souhaité voir paraître un ouvrage bénéficiant de l'importante expérience d'enseignement accumulée depuis plusieurs dizaines d'années au cours de la formation de quelques milliers de techniciens supérieurs actuellement en fonction.

L'objectif est de proposer au lecteur, réunies en un seul volume, les bases fondamentales du Génie des procédés sous une forme accessible, nécessaire à une utilisation aisée. Ces bases sont celles correspondant à la formation dispensée aux futurs techniciens supérieurs et seront utiles tant à l'étudiant ou au technicien désireux de rafraîchir ses connaissances, qu'à l'industriel souhaitant accéder aisément à l'essentiel. L'ouvrage offre ainsi une présentation complète des outils essentiels permettant d'aborder de nombreux problèmes de procédés.

Ses ambitions ne sont toutefois pas d'être exhaustif, ni de présenter les plus récents développements de la recherche dans un domaine par ailleurs très vaste et très diversifié. La taille nécessairement limitée de l'ouvrage a conduit les auteurs à effectuer des choix parfois cruels ; ainsi, ne sont pas traités ici par exemple les séparations par membranes, les réacteurs électrochimiques, l'agitation… non plus que des développements plus poussés de chacun des chapitres. Le lecteur trouvera en effet sans difficultés un ou plusieurs ouvrages complets, en français ou en anglais, permettant d'obtenir des développements plus poussés pour chacun des thèmes abordés.

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

Table des matières

Chapitre 1

Thermodynamique *(Noël Hiquily, Didier Colson, Denis Mangin et Éric Peyrol)* 1

1. Introduction. 1
2. Notions préliminaires 1
   2.1. Délimitation de l'objet étudié 1
   2.2. Paramètres d'état d'un système. 2
   2.3. Équation d'état d'un système 2
      2.3.1. Système gazeux 2
      2.3.2. Système liquide ou solide. 4
   2.4. Transformation physique d'un système 4
   2.5. Fonctions d'état d'un système 5
3. Énergies et transfert d'énergie. Premier principe. 8
   3.1. Énergie emmagasinable 8
   3.2. Énergies micro et macroscopiques 8
      3.2.1. Énergie potentielle macroscopique 8
      3.2.2. Énergie cinétique macroscopique 8
      3.2.3. Énergie microscopique. Énergie interne 9
   3.3. Transfert d'énergie 9
      3.3.1. Travail des forces de pression 9
      3.3.2. Travail des forces de frottement. 11
      3.3.3. Transfert thermique 11
   3.4. Premier principe 14
      3.4.1. Formulation 14
      3.4.2. Application à un système fermé. 14
      3.4.3. Application à un système ouvert en régime de transformation stationnaire 17
      3.4.4. Limites du premier principe. 19
4. Deuxième principe 19
   4.1. Formulation 19
   4.2. Application à un système fermé 21
      4.2.1. Calcul de la variation d'entropie d'un système 21
      4.2.2. Calcul de l'échange entropique 23
      4.2.3. Calcul de la production entropique 23
      4.2.4. Rendement thermodynamique 23
   4.3. Application à un système ouvert en régime de transformation stationnaire 23
      4.3.1. Production d'entropie dans une canalisation avec étranglement. 24
      4.3.2. Variation de vitesse du fluide et production d'entropie à travers une buse d'injection 26
      4.3.3. Travail utile et production d'entropie d'une pompe. 27
      4.3.4. Rendement isentropique d'une turbine 28
      4.3.5. Température à la sortie d'un compresseur. 29
5. Les équilibres entre phases (*Didier Colson*) 29

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

5.1. Caractérisation d'un système à l'équilibre 30
5.1.1. Notion de phase – d'homogénéité – d'équilibre. 30
5.1.2. Variance d'un système à l'équilibre entre phases 31
5.2. Équilibres entre phases sur le corps pur. 33
5.2.1. Diagramme d'état du corps pur 33
5.2.2. Équilibres liquide-vapeur et solide-vapeur 35
5.2.3. Équilibre liquide-solide pour le corps pur. 37
5.2.4. Opérations sur les chaleurs latentes de changement d'état 38
5.3. Équilibres liquide-vapeur des systèmes binaires 40
5.3.1. Généralités 40
5.3.2. Détermination et représentation des équilibres L-V/Ébulliométrie 40
5.3.3. Solutions (ou mélanges) binaires idéales – Activité 44
5.3.4. Solutions réelles – Coefficients d'activité 46
5.3.5. Diagrammes enthalpiques — Chaleur de mélange 49
5.4. Équilibres liquide-gaz binaires et ternaires 52
5.4.1. Systèmes binaires : solubilité d'un gaz pur dans un liquide 52
5.4.2. Systèmes ternaires : équilibre de partage d'un soluté en phase diluée 53
5.5. Équilibres liquide-liquide ternaires 55
5.5.1. Équilibres liquide – liquide avec immiscibilité totale. 55
5.5.2. Équilibres liquide-liquide avec miscibilité partielle 56
5.6. Équilibres liquide-solide des systèmes binaires. 58
5.6.1. Systèmes « simples » à eutectiques (cas idéal) 58
5.6.2. Autres systèmes 60
5.7. Équilibres liquide-vapeur des systèmes ternaires 61
5.7.1. Diagrammes d'équilibre. 61
5.7.2. Cas particulier des pseudo-binaires : liquide ternaire/vapeur binaire 62
6. Les machines thermiques (*Denis Mangin, Éric Peyrol*) 62
6.1. Thermodynamique appliquée à la compression et à la détente 63
6.1.1. Travail nécessaire aux compressions réversibles. 63
6.1.2. Détentes 68
6.1.3. Cycles et rendements : cycle de Carnot 69
6.2. Machines réelles 74
6.2.1. Compresseurs volumiques (alternatifs) 74
6.2.2. Machines productrices de travail : centrales thermiques à turbines (à vapeur). 80
6.2.3. Machines productrices de froid à compression simple – Pompes à chaleur 84
6.2.4. Liquéfacteur 90
Principaux symboles et unités (SI) 92
Références bibliographiques 94

Chapitre 2

Mécanique des fluides *(Nicolas Roche)* 95
1. Introduction. 95
2. Définitions et propriétés des fluides 96
2.1. États de la matière. 96
2.2. Masse volumique et densité 96
2.3. Tensions superficielle et interfaciale 97
2.4. Viscosité 99
2.5. Pression de vapeur saturante – Tension de vapeur. 101

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

2.6. Régimes d'écoulement – Nombre de Reynolds 102
2.7. Notions de rhéologie des fluides. 104
3. Statique des fluides. 106
3.1. Loi fondamentale de la statique des fluides 106
3.2. Application à la mesure des pressions 108
4. Dynamique des fluides. 111
4.1. Bilan matière – Conservation de la matière 111
4.2. Énergie mécanique d'un fluide. 112
4.3. Conservation de l'énergie mécanique. 113
4.3.1. Loi de Bernoulli 113
4.3.2. Applications (mesure de vitesse, mesure de débits, vidange de bac…) . . . 114
4.4. Pertes d'énergie mécanique – Pertes de charges 118
4.4.1. Définition des pertes de charges (pertes de charges générales, singulières) 118
4.4.2. Estimation des pertes de charge générales (relations empiriques, abaques) 120
4.4.3. Estimation des pertes de charge singulières – Notion de longueur équivalente 124
4.4.4. Courbes de réseau – Association de réseaux. 125
4.5. Gain d'énergie mécanique – Pompes 129
4.5.1. Types de pompes 130
4.5.2. Hauteur manométrique totale (H), courbe caractéristique d'une pompe 132
4.5.3. Puissance et rendement des pompes 133
4.5.4. Cavitation des pompes – NPSH. 134
4.5.5. Couplages pompes et réseaux – Points de fonctionnement. 136
4.5.6. Association de pompes. 137
4.5.7. Critères de similitudes 138
5. Nomenclature 139
Références bibliographiques 140

Chapitre 3

Opérations solide-fluide *(Gilles Févotte)*. 141
1. Introduction, séparation fluide/solide 141
2. Populations de particules et caractéristiques des milieux poreux. 143
3. Caractérisation d'une particule isolée 144
3.1. Taille d'une particule de forme donnée 144
3.2. Surface spécifique de particules. 147
3.3. Forme des particules. 148
4. Caractérisation d'un lot de particules. 150
4.1. Notion de classes de tailles, illustration dans le cas du tamisage 150
4.2. Fonctions de répartition granulométrique 151
4.2.1. Expression des tailles par leur répartition en masse 152
4.2.2. Expression des tailles par leur répartition en nombre 152
4.2.3. Exemple d'analyse granulométrique, cas du tamisage 154
4.3. Définition de populations de particules par des paramètres statistiques moyens. 156
4.3.1. Définitions des tailles moyennes des particules d'un lot 156
4.4. Expressions mathématiques des fonctions de distribution granulométrique et coefficient de variation 158

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

4.4.1. Distribution normale ou gaussienne 158
4.4.2. Distribution log-normale 159
4.4.3. Distribution de Rosin-Rammler-Bennett. 161
4.5. Caractérisation de la réalisation du lit 162
4.5.1. Porosité 162
4.6. Surface spécifique du lit a_c 163
4.7. Échantillonnage de particules. 164
4.7.1. Position du problème 164
4.7.2. Échantillonnage de milieux particulaires statiques. 165
4.7.3. Échantillonnage de milieux particulaires en mouvement 165
5. Mesure des tailles et des caractéristiques des lots de particules 166
5.1. Mesure de la distribution de tailles de particules. 166
5.1.1. Analyseurs de particules par diffraction laser. 166
5.1.2. Sondes FBRM (*Focused Beam Reflectance Measurement*) 166
5.1.3. Analyse d'images 167
5.1.4. Le Coulter Counter. 168
6. Mécanique des systèmes fluide/particule unique 168
6.1. Définition de la notion de coefficient de traînée 168
6.2. Régimes d'écoulement des fluides autour de particules isolées 169
6.2.1. Régime de Stokes ($Re_g < 0,2$). 169
6.2.2. Régime intermédiaire ou régime d'Allen ($0,2 < Re_g < 500$) 170
6.2.3. Régime de Newton ($Re_g > 500$) 170
6.2.4. Expression empirique générale du coefficient de traînée C_D 170
6.3. Calcul de la vitesse terminale de chute d'une particule isolée. 170
6.3.1. Position du problème 170
6.3.2. Définition du nombre d'Archimède Ar 172
6.3.3. Calcul de la vitesse terminale de chute d'une particule 172
6.3.4. Exemple 173
7. Calcul des pertes de charge dans les milieux poreux fixes 174
7.1. Approche phénoménologique, loi de Darcy 174
7.2. Notion de résistance à l'écoulement des milieux poreux 175
7.2.1. Définition de la résistance par analogie avec la loi d'Ohm. 175
7.2.2. Association de résistances 176
7.2.3. Résistance de l'unité de surface du milieu poreux 177
7.2.4. Exemple particulier d'application : cas d'une cartouche poreuse 177
7.3. Représentation des écoulements en milieux poreux, modèle de Kozeny Carman. 178
7.3.1. Position du modèle et calculs préliminaires 178
7.3.2. Cas du régime laminaire 180
7.3.3. Cas du régime turbulent. 182
7.4. Utilisation des expressions des pertes de charge et calcul du nombre de Reynolds. 183
8. Filtration 184
8.1. Introduction, généralités. 184
8.2. Théorie de la filtration sur support. 185
8.2.1. Notations utiles. 185
8.2.2. Définition du débit de filtration. 186
8.2.3. Relations fondamentales entre les caractéristiques des éléments en présence 186
8.2.4. Résistance à l'écoulement lors d'une filtration 188
8.2.5. Représentation de la filtration au cours du temps 190
8.2.6. Les principaux modes opératoires de la filtration sur support 192

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

8.3. Calcul de la durée du lavage des gâteaux de filtration dans le cas discontinu . . . 197
8.3.1. Lavage par déplacement ou lavage par élution 198
8.3.2. Lavage par repulpage 199
8.3.3. Comparaison sommaire des deux techniques de lavage 199
8.4. Technologie de la filtration : quelques éléments 200
8.4.1. Critères de sélection et classement des technologies de filtration sur support 200
8.4.2. Filtre monoplaque. 202
8.4.3. Filtres rotatifs à tambour sous vide 203
8.4.4. Filtres-presses automatiques 204
8.4.5. Filtres sous pression à cartouches 205
9. Fluidisation 206
9.1. Le phénomène de fluidisation. 206
9.2. Applications des lits fluidisés. 208
9.2.1. Généralités 208
9.2.2. Principales applications industrielles des lits fluidisés. 210
9.3. Classification des particules vis-à-vis de la fluidisation, diagramme de Geldart 210
9.4. Calcul théorique et empirique de la vitesse minimale de fluidisation et des pertes de charge en lit fixe 211
9.4.1. Cas du régime laminaire 212
9.4.2. Cas du régime turbulent. 212
9.5. Calcul de la vitesse maximale de fluidisation 214
9.5.1. Particules assimilées à des sphères 214
9.5.2. Vitesse d'entraînement de particules non-sphériques 214
9.6. Expansion du lit, calcul du degré de vide ε en fluidisation liquide-solide homogène 215
9.7. Exemple. 217
10. Notation 219
Références bibliographiques 221

Chapitre 4

Transfert de chaleur *(Jean Costes et Nordine Mouhab)* 223
1. Introduction. 223
2. Généralités sur les transferts de chaleur 223
2.1. Les causes du transfert de chaleur 223
2.2. Les différents modes de transmission de la chaleur. 224
2.2.1. La conduction 224
2.2.2. La convection 224
2.2.3. Le rayonnement 225
2.3. Combinaisons des différents modes de transfert de chaleur 225
2.4. Analogie entre transfert de chaleur et électricité ; définition de la résistance thermique 227
3. Transfert de chaleur par conduction. 228
3.1. Loi de transmission de la chaleur par conduction : loi de Fourier. 228
3.2. Transfert de chaleur dans une paroi constituée d'un seul matériau. 230
3.2.1. Paroi plane de section droite constante 230
3.2.2. Cylindre creux 231
3.2.3. Sphère creuse 232
3.3. Conduction à travers plusieurs corps placés en série. 233

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

4. Transfert de chaleur par convection 235
4.1. Équation générale de la convection : loi de Newton 235
4.2. Détermination du coefficient d'échange par convection h. 236
4.2.1. Transfert de chaleur sans changement d'état du fluide 237
4.2.2. Transfert de chaleur avec changement d'état du fluide 240
5. Transfert de chaleur entre deux fluides séparés par une paroi. Application à l'isolation thermique 240
5.1. Paroi plane calorifugée 240
5.2. Paroi cylindrique calorifugée 243
5.2.1. Équation générale du transfert de chaleur 243
5.2.2. Définition du rayon critique de l'isolant (calorifuge) 245
5.3. Caractéristiques et propriétés des isolants thermiques 247
5.3.1. Définition d'un isolant et intérêt de l'isolation thermique. 247
5.3.2. Choix de l'isolant 247
5.3.3. Calcul de l'épaisseur du calorifuge nécessaire 248
6. Les échangeurs de chaleur 248
6.1. Différents types d'échangeurs à fluides séparés 248
6.1.1. Échangeurs tubulaires 249
6.1.2. Échangeurs compacts. 249
6.2. Coefficient global d'échange de l'échangeur 250
6.2.1. Relation générale 250
6.2.2. Échangeur propre ou neuf. Échangeur encrassé ou sale 253
6.2.3. Estimation de l'encrassement d'un échangeur. 254
6.2.4. Ordre de grandeur du coefficient global d'échange d'un échangeur sale (U_s) 255
6.3. Échangeurs tubulaires simples : relation générale 256
6.4. Échangeurs complexes : échangeurs à faisceau et calandre avec plusieurs passes pour les fluides, échangeurs à courants croisés 259
6.4.1. Échangeurs à faisceau tubulaire et calandre avec plusieurs passes pour les fluides. 259
6.4.2. Échangeurs à courants croisés 262
6.5. Notions de base pour le dimensionnement d'un échangeur de chaleur 262
6.5.1. Dualité transfert de chaleur – Perte de charge. 262
6.5.2. Dimensionnement d'un échangeur de chaleur. 263
6.6. Efficacité d'un échangeur. Méthode du nombre d'unités de transfert : NUT 265
Nomenclature. 268
Références bibliographiques 268

Chapitre 5

Opérations unitaires *(Didier Colson et Denis Mangin)* 269
1. Généralités sur les opérations unitaires 269
1.1. Notion d'étage théorique (ou de plateau théorique) 269
1.1.1. Définition 270
1.1.2. Mise en œuvre (pratique) 270
1.2. Diagrammes d'équilibre – Relations de bilan 271
1.2.1. Données et diagrammes d'équilibre. 271
1.2.2. Bilans de matière et enthalpique – Règle des leviers. 273
1.3. Association d'étages théoriques (en continu) 275
1.3.1. Association en cascade à courants croisés. 275
1.3.2. Association en cascade à contre-courant. 276
1.3.3. Hauteur équivalente à un plateau théorique (HEPT). 277

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

1.4. Notion d'unité de transfert 278
1.5. Contacteurs gaz-liquide et liquide-liquide 279
1.5.1. But et principe des contacteurs 280
1.5.2. Description des écoulements 281
1.5.3. Caractérisation – Limites 284
2. Distillation 286
2.1. Bilans de matière et enthalpique 286
2.1.1. Expression des bilans 286
2.1.2. Représentation graphique 287
2.1.3. Hypothèses générales 288
2.2. Méthodes de distillation 289
2.2.1. Distillation éclair (ou distillation flash) 289
2.2.2. Distillation simple différentielle – Évaporation 292
2.2.3. Rectification 296
2.3. Rectification 296
2.3.1. Principe et mise en œuvre 296
2.3.2. Hypothèses de McCabe et Thiele 297
2.3.3. Fonctionnement à reflux total – Identification 298
2.3.4. Distillation (rectification) discontinue 302
2.3.5. Rectification continue (avec les hypothèses de McCabe et Thiele) 310
2.3.6. Méthode de Ponchon et Savarit appliquée à la distillation continue 322
2.4. Colonnes industrielles : technologie, performances 330
2.4.1. Généralités 331
2.4.2. Colonnes à garnissage 334
2.4.3. Colonnes à plateaux 349
2.4.4. Choix du matériel 378
2.5. Distillations particulières 380
2.5.1. Distillation des mélanges ternaires (avec les hypothèses de Lewis) 381
2.5.2. Distillation des mélanges complexes 382
2.5.3. Autres distillations 383
3. Extraction liquide-liquide 386
3.1. Généralités 386
3.1.1. Intérêt de l'extraction liquide-liquide 386
3.1.2. Définitions 386
3.1.3. Choix du solvant d'extraction 387
3.2. Les outils mathématiques et techniques 388
3.2.1. Équilibres liquide-liquide 389
3.2.2. Les méthodes d'extraction 392
3.2.3. Rendement d'extraction 393
3.3. Extraction liquide-liquide sur un étage 393
3.3.1. Opération discontinue sur un étage théorique 393
3.3.2. Opération continue – Efficacité d'un étage réel 397
3.4. Extraction liquide-liquide sur une cascade d'étages théoriques à courant croisés 398
3.4.1. Cas où solvant et diluant sont immiscibles 399
3.4.2. Cas général (miscibilité partielle) 402
3.5. Extraction à contre-courant simple en continu 403
3.5.1. Description et modélisation d'une colonne 403
3.5.2. Cas où diluant et solvant sont immiscibles 403
3.5.3. Cas général : méthode de Ponchon et Savarit (méthode du pôle) 409
3.5.4. Conditions limites de fonctionnement – Conditions optimales 412

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

3.6. Description et calcul de l'appareillage utilisé . . . 414
3.6.1. Les colonnes d'extraction liquide-liquide . . . 415
3.6.2. Les extracteurs centrifuges . . . 417
3.6.3. Les mélangeurs-décanteurs (décanteurs-émulseurs) . . . 418
3.6.4. Dimensionnement (et conduite) d'une colonne . . . 418
4. Absorption/désorption . . . 421
4.1. Généralités . . . 421
4.1.1. Équilibre entre une phase gazeuse et une phase liquide . . . 421
4.1.2. Absorption (/désorption) sélective . . . 422
4.1.3. Absorption (/désorption) isotherme . . . 423
4.1.4. Absorption (/désorption) adiabatique . . . 423
4.2. Extraction gaz-liquide et liquide gaz en semi-continu . . . 423
4.2.1. Principe et mise en œuvre . . . 424
4.2.2. Extraction isotherme . . . 427
4.2.3. Extraction adiabatique avec variation de température . . . 428
4.3. Extraction G-L et L-G en continu à contre-courant . . . 431
4.3.1. Appareillage . . . 431
4.3.2. Modélisation d'une colonne d'absorption (/désorption) . . . 433
4.3.3. Existence et détermination d'un rapport de débit limite . . . 434
4.3.4. Extraction isotherme . . . 435
4.3.5. Effets thermiques dans une colonne adiabatique . . . 438
5. Cristallisation . . . 440
5.1. Introduction . . . 440
5.2. L'état cristallin . . . 440
5.2.1. Lois de cristallographie . . . 440
5.2.2. Maille élémentaire et réseau cristallin . . . 441
5.2.3. Symétries des cristaux . . . 442
5.2.4. Morphologie et structure ; faciès et croissance . . . 442
5.3. Solubilité et sursaturation . . . 444
5.3.1. Solubilité . . . 444
5.3.2. Sursaturation . . . 447
5.4. Principe de la cristallisation en solution . . . 448
5.4.1. Les différentes nucléations . . . 448
5.4.2. La croissance . . . 453
5.4.3. Évolution de la suspension . . . 456
5.5. Conduite et contrôle d'une cristallisation . . . 456
5.5.1. Procédés discontinus . . . 456
5.5.2. Procédés continus . . . 459
5.5.3. Contrôle de la pureté et du faciès des cristaux . . . 460
5.6. Technologie des cristallisoirs . . . 460
5.7. Bilans de matière et d'énergie . . . 462
5.7.1. Cristallisoir continu en régime permanent . . . 462
5.7.2. Cristallisoir discontinu . . . 463
6. Séchage . . . 463
6.1. Généralités. Définitions . . . 464
6.1.1. Spécificité des produits industriels – Description . . . 464
6.1.2. Équilibres solide + liquide – gaz . . . 465
6.2. Techniques et appareillage pour le séchage . . . 471
6.2.1. Les divers modes de séchage . . . 471
6.2.2. Appareillage . . . 473
6.2.3. Utilisation spécifique – Choix d'un procédé . . . 476

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

6.3. Principes théoriques du séchage 476
6.3.1. Cinétiques de séchage : courbes caractéristiques 477
6.3.2. Séchage par ébullition 480
6.3.3. Hygrométrie 482
6.3.4. Séchage (adiabatique) en continu par entraînement 490
7. Adsorption/désorption 492
7.1. Principe 493
7.1.1. Nature des phases – Type d'adsorption 493
7.1.2. Mécanismes d'adsorption. 493
7.1.3. Caractéristiques des adsorbants 494
7.2. Équilibres d'adsorption 496
7.2.1. Phase (gazeuse ou liquide) pure ou diluée dans un inerte 496
7.2.2. Mélanges binaires gazeux ou liquides 500
7.3. Adsorption sur lit fixe – Percolation. 501
7.3.1. Principe d'adsorption – Élution 501
7.3.2. Courbes dynamiques d'adsorption – Élution. 503
7.4. Adsorption sur phase mobile 509
7.4.1. Adsorption par contact 509
7.4.2. Adsorption en lit fluidisé 510
Nomenclature. 511

Chapitre 6

Génie de la réaction chimique *(Jean-Paul Klein)* 517
1. Introduction. 517
2. Évolution du mélange réactionnel – Cinétique des réactions. 518
2.1. Description d'un mélange réactionnel 518
2.2. Avancement d'une réaction à stœchiométrie simple (stœchiométrie unique) 519
2.3. Avancement d'une réaction à stœchiométrie multiple 521
2.4. La réaction chimique – Stœchiométrie et étapes élémentaires 524
2.5. Réaction équilibrée 526
2.6. Réaction homogène - hétérogène 527
2.7. Cinétique d'une réaction 528
2.8. Notion d'activation – Catalyseurs. 528
2.9. Expression analytique des vitesses de réaction 529
2.9.1. Expressions de la cinétique, fonction des concentrations des réactifs 529
2.9.2. Expression de k en fonction de la température 531
2.10. Cinétique de transformation d'une espèce chimique 532
2.10.1. Cinétique de transformation d'une espèce chimique. 532
2.10.2. Notion de sélectivité. 532
2.10.3. Réactions n'admettant pas d'ordre 533
2.11. Variations de volume dues à la réaction 534
2.11.1. Phase gazeuse (gaz parfaits) 534
2.11.2. Phase liquide. 535
3. Bilans de matière dans les réacteurs idéaux. 535
3.1. Notion de réacteur idéal 535
3.2. Bilan de matière dans un réacteur 537
3.3. Réacteur fermé parfaitement agité 538
3.3.1. Expression du bilan matière 538
3.3.2. Cinétiques d'ordre 1 et 2 (A $\rightarrow$ Produits). 539
3.3.3. Réaction d'ordre 2 (A + B $\rightarrow$ Produits) 540

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

3.4. Réacteur piston 541
3.4.1. Équation de bilan matière en régime permanent 541
3.4.2. Notions d'âge interne et de temps de séjour 542
3.4.3. Applications 543
3.4.4. Calcul du temps de séjour relatif à une stœchiométrie unique pour un avancement donné 543
3.5. Réacteur parfaitement agité continu 545
3.5.1. Équation de bilan de matière en régime permanent 545
3.5.2. Applications 546
3.5.3. Généralisation 546
3.6. Réacteur semi-fermé parfaitement agité 547
3.6.1. Équations de bilan 547
3.6.2. Applications 548
3.7. Généralisation à une stœchiométrie multiple 549
3.7.1. Réacteur fermé – Réacteur piston 550
3.7.2. Réacteur parfaitement agité continu en régime permanent 551
3.8. Comparaison piston-parfaitement agité continu : cas d'une réaction simple 551
3.8.1.Réaction A $\rightarrow$ Produits $r = k\,C_A^n$ 552
4. Bilans thermiques dans les réacteurs idéaux 553
4.1. Introduction 553
4.2. Équation de bilan thermique dans un réacteur parfaitement agité 554
4.3. Cas du réacteur parfaitement agité continu en régime permanent 555
4.4. Cas du réacteur fermé parfaitement agité 557
4.5. Cas du réacteur piston en régime permanent 559
4.6. Remarque importante sur la formulation des bilans thermiques 559
5. Association de réacteurs idéaux 560
5.1. Remarques préliminaires 560
5.2. La cascade de réacteurs parfaitement agités en série 562
5.2.1. Réaction du 1er ordre en fluide non dilatable (débit volumique constant) 562
5.2.2. Solutions graphiques pour une réaction d'ordre quelconque 563
5.3. Le réacteur piston à recyclage 566
5.4. Conclusion 568
6. Écoulement dans les réacteurs réels continus. Distribution des temps de séjour 568
6.1. Définitions 569
6.1.1. Temps de séjour – Âge interne – Espérance de vie 569
6.1.2. Réacteurs idéaux 569
6.2. Notion de distribution des temps de séjour 569
6.2.3. Définition 569
6.2.2. Propriétés des DTS 571
6.3. Mesure des distributions de temps de séjour 571
6.3.1. Injection-impulsion ou de DIRAC 571
6.3.2. Injection-échelon 573
6.3.3. Aspects pratiques de la mesure des DTS 573
6.4. Mise en œuvre des modèles 576
6.4.1. Données de base 576
6.4.2. Modèles d'écoulement 577
6.4.3. Fonction de transfert : transformation de Laplace 579
6.4.4. DTS des réacteurs idéaux 580
6.5. Ajustement des modèles à l'expérience 581
6.6. Exemples 582

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

6.6.1. Le modèle des mélangeurs en cascade 582
6.6.2. Représentation d'un réacteur mal agité 584
6.6.3. Réacteur à lit fixe alimenté par le bas 585
6.7. Généralisation de la DTS à plusieurs entrées et plusieurs sorties 589
6.8. Modèle hydrodynamique et conversion chimique 590
7. Influence de la cinétique physique. Exemple des réactions gaz-liquide. Approche simplifiée 591
7.1. Rappels sur le transfert de matière gaz-liquide 591
7.1.1. Introduction 591
7.1.2. Équilibre de solubilité d'un gaz dans un liquide 592
7.1.3. Transfert de matière sans réaction chimique 592
7.2. Transfert gaz-liquide avec réaction chimique 594
7.3. Caractérisation du transfert de matière – Nombre de sulfite 597
8. Technologie des réacteurs 599
8.1. Introduction : classification des réacteurs 599
8.2. Fonctionnement des réacteurs 599
8.3. Réacteurs monophasiques 602
8.3.1. Réacteurs discontinus 602
8.3.2. Réacteur continu parfaitement agité 605
8.3.3. Les réacteurs tubulaires 606
8.3.4. Les mélangeurs statiques 607
8.4. Les réacteurs gaz-liquide 608
8.4.1. Les colonnes à bulles 608
8.4.2. Appareils agités mécaniquement 609
8.4.3. Colonnes garnies ou à plateaux 613
8.4.4. Appareils à faible rétention liquide 614
8.4.5. Conclusion 614
8.5. Réacteurs liquide-liquide 615
8.6. Réacteurs catalytiques 618
8.6.1. Les cuves agitées 619
8.6.2. Les lits fixes 620
8.6.3. Les lits mobiles et les lits entraînés 622
8.6.4. Les lits fluidisés 623
8.7. Critères de choix 623
Références bibliographiques 625

Chapitre 7

Régulation *(Didier Ronze)* 627
1. Introduction 627
2. Définitions 628
2.1. Définition des variables 628
2.1.1. Procédé. Variables d'entrée, de sortie 628
2.1.2. Grandeurs réglante, réglée, perturbatrice 629
2.2. Types de variables 630
2.2.1. Variables de tension. Variables de débit 630
2.3. Fonction de transfert 631
2.4. Modèle linéaire d'un procédé 632
3. Bilans procédés en régime transitoire 634
3.1. Méthodologie 634
3.2. Procédés du premier ordre (naturellement stables) 635

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

3.2.1. Procédé hydraulique . . . 635
3.2.2. Procédé thermique . . . 637
3.3. Procédé intégrateur (naturellement instable) . . . 639
3.4. Procédé du deuxième ordre (naturellement stable) : manomètre différentiel . . . 641
4. Identification industrielle des procédés . . . 644
4.1. Procédés linéaires ou non-linéaires. Caractéristique statique . . . 644
4.2. Paramètres de réponse d'un procédé . . . 645
4.2.1. Procédés naturellement stables . . . 645
4.2.2. Procédés naturellement instables . . . 646
4.3. Identification en boucle ouverte . . . 647
4.3.1. Méthodologie . . . 647
4.3.2. Système du premier ordre . . . 647
4.3.3. Système avec retard – méthode de Broïda . . . 648
4.3.4. Système d'ordre supérieur – Méthode de Strejc . . . 649
5. Boucles de régulation . . . 653
5.1. Commande en boucle ouverte . . . 653
5.2. Commande par action anticipée (feedforward control) . . . 654
5.3. Commande par rétroaction (feedback control) . . . 654
5.4. Schéma TI. Schéma bloc . . . 655
6. Régulateurs . . . 657
6.1. Qualités d'une régulation . . . 657
6.2. Sens d'action du régulateur . . . 658
6.3. Lois de commande simples . . . 659
6.3.1. Loi de commande par tout ou rien . . . 659
6.3.2. Loi de commande proportionnelle . . . 659
6.4. Équation générale d'un régulateur PID . . . 660
6.5. Régulateur à action proportionnelle . . . 660
6.5.1. Équation d'un régulateur P . . . 660
6.5.2. Réponse d'un régulateur P aux signaux test . . . 661
6.5.3. Application de l'action proportionnelle . . . 662
6.6. Étude de l'action intégrale I . . . 663
6.6.1. Équation de l'action intégrale . . . 663
6.6.2. Caractéristiques de l'action intégrale . . . 664
6.7. Action dérivée D . . . 666
6.8. Régulation. Asservissement . . . 667
7. Exemple d'utilisation d'un régulateur PID . . . 668
7.1. Présentation de l'exemple. Schéma fonctionnel . . . 668
7.1.1. Schéma TI . . . 668
7.1.2. Schémas fonctionnels . . . 669
7.2. Étude du système en asservissement . . . 672
7.2.1. Schéma fonctionnel . . . 672
7.2.2. Fonctions de transfert . . . 672
7.2.3. Réponse du système bouclé à un échelon de consigne . . . 673
7.3. Étude du système en régulation . . . 674
7.3.1. Schéma fonctionnel . . . 674
7.3.2. Fonctions de transfert . . . 674
7.3.3. Réponse du système bouclé à un échelon de débit . . . 675
8. Méthodes de réglage des actions PID . . . 676
8.1. Méthode par approches successives . . . 676
8.1.1. Procédés naturellement stables . . . 676
8.1.2. Procédés naturellement instables . . . 678

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

8.2. Méthode de Ziegler et Nichols 679
8.2.1. Réglage en boucle ouverte 679
8.2.2. Réglage en boucle fermée 680
8.3. Réglage à partir de l'identification du procédé 681
8.3.1. Procédé naturellement stable 682
8.3.2. Procédé naturellement instable 683
Notations 684
Références bibliographiques 686

Chapitre 8

Bioréacteurs *(Ridha Mosrati)* 687
1. Réacteurs enzymatiques 687
1.1. Cinétiques enzymatiques homogènes : modèle de Michaelis-Menten 687
1.2. Inhibition des activités enzymatiques 690
1.2.1. Inhibition compétitive 690
1.2.2. Inhibition incompétitive 691
1.2.3. Inhibition non-compétitive 692
1.2.4. Inhibition par excès de substrat 692
1.3. Influence de la température 693
1.4. Influence du pH 694
1.5. Cinétiques hétérogènes des enzymes immobilisés 694
1.5.1. Les principaux modes d'immobilisation 694
1.5.2. Influence des limitations diffusionnelles externes 696
1.5.3. Influence des limitations diffusionnelles internes 698
1.6. Calcul des réacteurs enzymatiques homogènes 701
1.6.1. Réacteur discontinu 702
1.6.2. Réacteur continu parfaitement agité 703
1.6.3. Réacteur ouvert à écoulement piston 704
1.6.4. Comparaison des performances 705
2. Réacteurs microbiens 707
2.1. Introduction 707
2.2. Notations et définitions 708
2.3. Cinétique de croissance microbienne 709
2.3.1. Influence des substrats 711
2.3.2. Facteurs inhibant la croissance 712
2.3.3. Influence de la température et du pH sur la croissance 713
2.4. Cinétique d'utilisation d'un substrat 714
2.4.1. Conversion à rendement constant du substrat en biomasse 714
2.4.2. Conversion à rendement $Y_{X/S}$ constant avec un terme de maintenance . . . 715
2.5. Cinétiques de formation des produits 716
2.6. Calcul des réacteurs microbiens 717
2.6.1. Fermenteur discontinu parfaitement agité 718
2.6.2. Fermenteur continu parfaitement agité 720
2.6.3. Fermenteur continu avec recyclage 725
2.7. Aération des fermenteurs 728
2.7.1. Description du transfert de l'oxygène dans les fermenteurs 728
2.7.2. Détermination du K_l.a dans les bioréacteurs 730
2.7.3. Évaluation de la demande en oxygène des micro-organismes 732
Références bibliographiques 733

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

Chapitre 9

Qualité – Sécurité – Environnement *(Séverine Vessot-Crastes et Catherine Morlay)* 735
1. Traitement des eaux 735
1.1. Introduction 735
1.2. Caractéristiques et paramètres d'analyse des eaux naturelles et industrielles 736
1.3. Préparation des eaux industrielles 739
1.3.1. Traitements généraux 739
1.3.2. Préparation des eaux des circuits de refroidissement et des générateurs de vapeur 745
1.4. Épuration des eaux résiduaires industrielles 747
1.4.1. Origine des eaux résiduaires industrielles 747
1.4.2. Caractérisation des eaux résiduaires industrielles 747
1.4.3. Effets de la pollution par les eaux résiduaires industrielles 748
1.4.4. Conditions de rejet des eaux résiduaires industrielles 748
1.4.5. Traitement des eaux résiduaires industrielles 749
2. Sécurité 752
2.1. Les grands dangers de l'industrie chimique 752
2.1.1. Risque toxique 753
2.1.2. Feu/incendie 755
2.1.3. Risques d'explosion 758
2.1.4. Risques vers l'environnement 759
2.2. Moyens de prévention et de protection 760
2.2.1. Prévention des explosions 760
2.2.2. Prévention des risques chimiques 762
2.3. Méthodes d'analyse des risques 762
3. Qualité 765
3.1. Principes généraux 765
3.2. Les principaux référentiels Qualité 765
3.2.1. Norme ISO 9001 765
3.2.2. Bonnes pratiques de fabrication (BPF) 766
3.2.3. Bonnes pratiques de laboratoire (BPL) 766
3.2.4. Accréditation COFRAC 767
3.2.5. Autres référentiels 767
Références bibliographiques 767

Index 769

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

Fruit d'une démarche collégiale de l'ensemble des départements Génie chimique-Génie des procédés des IUT de France, **Introduction au génie des procédés** est une synthèse pédagogique et pratique couvrant toutes les disciplines intervenant dans la mise en œuvre des procédés.

En 800 pages, **Introduction au génie des procédés** décrit les outils essentiels permettant de résoudre de nombreux problèmes de génie des procédés :

- processus fondamentaux du GP : transfert de matière, de fluide, de chaleur
- opérations unitaires en mettant l'accent sur les opérations solide-fluide, solide-liquide et liquide-liquide
- technologie des appareils et principes de leurs dimensionnements
- réactions chimiques et biochimiques
- calcul des réacteurs.

Des disciplines récentes comme la régulation, la sécurité et les préoccupations environnementales, incontournables aujourd'hui, ont été introduites dans l'ouvrage.

Chaque chapitre laisse une place importante aux procédés discontinus ou semi-continus.

De nombreux schémas et tableaux clarifient l'exposé et favorisent l'approche synthétique des sujets. Des exemples pratiques, des bibliographies adaptées invitent à des recherches complémentaires.

Conforme au programme d'enseignement du DUT GC-GP, cet ouvrage constitue un soutien indispensable pour les étudiants des IUT de génie des procédés et génie chimique, des écoles d'ingénieurs et des masters Génie des procédés. Il s'adresse aussi aux techniciens et agents de maîtrise en formation ou en activité souhaitant disposer d'un solide socle de connaissances actualisées.

Didier Ronze
est professeur des universités et enseigne à l'IUT A – département Génie chimique – Génie des procédés, Université Claude Bernard – Lyon 1 à Villeurbanne.
Il coordonne dans cet ouvrage les travaux de 13 enseignants en IUT.

978-2-7430-1066-9
9 782743 010669