

Table des matières

PREMIÈRE PARTIE

ÉLÉMENTS DE MODÉLISATION.....15

I. TRANSFERTS DANS LES CONTACTEURS POLYPHASIQUES.....17

I.1 Les trois échelles caractéristiques du transfert 17

I.2 Échelle moléculaire : grandeurs de transfert et d'équilibre 19

I.2.1 Propriétés physiques et propriétés moléculaire de transport, généralités19

I.2.2 Masse volumique.....22

I.2.3 Capacité calorifique massique.....23

I.2.4 Viscosité dynamique.....24

I.2.5 Conductivité thermique.....26

I.2.6 Diffusivité matérielle.....27

I.2.7 Équilibre gaz-liquide.....33

I.2.8 Tension interfaciale35

I.3 Échelle microscopique : transferts aux interfaces..... 37

I.3.1 Expression des flux de transfert aux interfaces.....37

I.3.2 Modélisation du transfert interfacial39

I.3.3 Épaisseur des couches limites et valeurs des coefficients de transfert43

I.3.4 Théorie du double film et coefficient de transfert de matière global45

I.4 Échelle macroscopique : méthodologie et modèles usités..... 48

I.4.1 Volume de contrôle et équations de conservation.....48

I.4.2 Modèles de réacteurs ou de contacteurs pour une phase donnée48

I.4.3 Combinaison des modèles pour les contacteurs diphasiques.....49

I.5 Modèles simples de contacteurs diphasiques..... 51

I.5.1 Contacteur parfaitement agité côté gaz et liquide.....51

I.5.2 Contacteurs à écoulement piston côté gaz et coté liquide.....54

I.5.3 Contacteur à écoulement piston côté gaz et agité côté liquide.....61

I.5.4 Nombre d'unités de transfert, volume du contacteur et force motrice62

I.5.5 Cascade d'étages théoriques opérée à contre-courant.....65

I.6 Efficacité des contacteurs diphasiques 68

I.6.1 Généralités et terminologie68

I.6.2 Performance maximale et efficacité thermodynamique69

I.6.3 Performance réelle et efficacité globale74

I.6.4 Efficacité de Murphree.....78

I.7 Remarques conclusives 79

I.8 Exercices d'application 79

II. ABSORPTION RÉACTIVE GAZ-LIQUIDE.....83

II.1 Généralités et importance industrielle de l'absorption réactive..... 83

II.2 Modèle du film stagnant avec réaction irréversible d'ordre deux..... 83

II.2.1 Film diffusionnel stagnant en l'absence de réaction83

II.2.2 Schéma et bilans de matière dans le film réactionnel	84
II.2.3 Système d'équations adimensionnel	86
II.2.4 Signification des groupements adimensionnels	86
II.2.5 Définition du facteur d'accélération	88
II.2.6 Solutions approchées du système d'équations d'absorption réactive	88
II.3 Généralisation de la modélisation du transfert réactif	93
II.3.1 Modélisation pour d'autres lois cinétiques	93
II.3.2 Influence du modèle de transfert physique	94
II.3.3 Limitation partielle côté gaz et coefficient de transfert de matière global	95
II.4 Éléments de modélisation des réacteurs gaz-liquide	96
II.4.1 Méthodologie, modèles de dispersion considérés et principales hypothèses	96
II.4.2 Systèmes caractérisés par une réaction irréversible rapide	97
II.4.3 Systèmes caractérisés par une réaction lente au sein du liquide	105
II.5 Éléments de choix de la technologie du contacteur	111
II.6 Remarques conclusives	114
II.7 Exercices d'application	115
III. TRANSFERT ET RÉACTION EN CATALYSE HÉTÉROGÈNE	121
III.1 Généralités	121
III.1.1 Définition et importance industrielle de la catalyse hétérogène	121
III.1.2 Échelles spatiales à considérer en catalyse hétérogène	123
III.1.3 Les différentes étapes de la réaction catalytique dans un grain poreux	123
III.1.4 Vitesses spécifiques massiques et volumiques et lois cinétiques	124
III.2 Caractérisation du grain catalytique	126
III.2.1 Composition et préparation d'un catalyseur poreux	126
III.2.2 Caractéristiques géométriques et physicochimiques des grains catalytiques	126
III.2.3 Transfert de matière et de chaleur au sein du grain catalytique	129
III.3 Couplage entre le transfert intragranulaire et la réaction	131
III.3.1 Réaction irréversible d'ordre un dans un catalyseur isotherme	131
III.3.2 Limitation diffusionnelle interne pour d'autres configurations	136
III.4 Transferts extragranulaires et flux volumiques de disparition	139
III.4.1 Flux de chaleur et de matière et gradients extragranulaires	139
III.4.2 Conditions permettant de négliger les gradients extragranulaires	141
III.4.3 Flux de disparition par unité de volume de réacteur	142
III.4.4 Gradients extragranulaires dans les procédés industriels	143
III.5 Éléments de modélisation des réacteurs catalytiques fluide-solide	143
III.5.1 Technologies de mise en contact et dispersion des phases	143
III.5.2 Classification des modèles de réacteur catalytique à lit fixe	145
III.5.3 Modèle piston sans dispersion axiale	146
III.6 Remarques conclusives	151
III.7 Exercices d'application	152
IV. HYDRODYNAMIQUE DES ÉCOULEMENTS DIPHASIQUES	153
IV.1 Grandeurs hydrodynamiques caractéristiques et terminologie	153
IV.1.1 Dénomination des phases, vitesses, rétentions et masses volumiques	154

IV.1.2 Différents modes d'estimation de la rétention des phases	156
IV.1.3 Vitesses relatives et densité de flux de glissement.....	157
IV.2 Bilans de conservation.....	158
IV.2.1 Les deux approches de modélisation des écoulements diphasiques	158
IV.2.2 Modèles à deux phases : équations volumiques de conservation	158
IV.2.3 Modèles à trajectoire : bilan de forces sur une inclusion	160
IV.2.4 Lien entre les deux approches.....	162
IV.3 Quelques modèles simples et usités	162
IV.3.1 Écoulements à vitesse uniforme, modèle du fluide homogène équivalent.....	162
IV.3.2 Écoulements gouvernés par la résultante des forces de pesanteur et la traînée	163
IV.4 Remarques conclusives	168
IV.5 Exercice d'application.....	168
 DEUXIÈME PARTIE	
 SYSTÈMES FLUIDE-SOLIDE	
169	
 V. CARACTÉRISATION GÉOMÉTRIQUE D'UN SOLIDE DIVISÉ.....	
171	
V.1 Caractérisation géométrique d'une particule	171
V.1.1 Diamètres équivalents et aire spécifique.....	171
V.1.2 Facteur de sphéricité en surface volumique	172
V.2 Caractérisation géométrique d'une population de particules.....	174
V.2.1 Techniques d'analyse granulométrique	174
V.2.2 Courbes de distribution granulométrique.....	175
V.2.3 Moments statistiques associés aux courbes de distribution en nombre.....	176
V.2.4 Diamètres caractéristiques d'une population de particules	177
V.2.5 Lois de distribution.....	182
V.3 Caractérisation géométrique d'un lit de particules	185
V.3.1 Porosité, aire spécifique et tortuosité.....	185
V.3.2 Valeurs typiques de porosité en lit fixe	186
V.3.3 Corrélation de la porosité et de la tortuosité	188
V.4 Remarques conclusives	189
V.5 Exercices d'application.....	189
 VI. ÉCOULEMENT EN LIT FIXE	
191	
VI.1 Modélisation de l'écoulement rampant par la loi de Darcy	191
VI.1.1 Formulation de la loi de Darcy	191
VI.1.2 Précisions concernant les paramètres de la loi de Darcy	193
VI.2 Modélisation par analogie avec l'écoulement en conduite.....	193
VI.2.1 Dissipation d'origine visqueuse : relation de Kozeny-Carman	194
VI.2.2 Dissipation d'origine inertielle : relation de Burke-Plummer	195
VI.2.3 Dissipation visqueuse et inertielle : équation d'Ergun	196
VI.2.4 Perte de charge pour des porosités élevées : corrélation de Gibilaro.....	199
VI.3 Dispersion matérielle et thermique en lit fixe	199
VI.3.1 Coefficients de dispersion et conductivités effectives axiales et radiales	199

VI.3.2 Dispersion matérielle axiale et caractère piston.....	200
VI.4 Caractéristiques des lits fixes dans l'industrie.....	202
VI.4.1 Domaine paramétrique des principales applications commerciales	202
VI.4.2 Dimension des lits fixes et dispositions géométriques	204
VI.4.3 Uniformité radiale de l'écoulement.....	204
VI.5 Remarques conclusives	206
VI.6 Exercices d'application	207
VII.ÉCOULEMENT D'UNE PARTICULE ISOLÉE.....	211
VII.1 Hydrodynamique de l'écoulement autour d'une particule.....	211
VII.1.1 Lignes de courant et caractéristiques de l'écoulement	211
VII.1.2 Forces agissant sur la particule en régime stationnaire	212
VII.1.3 Corrélation de la traînée.....	213
VII.2 Vitesse terminale de chute	215
VII.2.1 Définition et bilan de forces d'un écoulement gravitaire à l'état stationnaire	215
VII.2.2 Analyse dimensionnelle et nombres adimensionnels usités	217
VII.2.3 Estimation de la vitesse terminale de chute.....	218
VII.2.4 Identification du régime de chute et largeur du domaine intermédiaire	219
VII.3 Remarques conclusives.....	221
VII.4 Exercices d'application.....	221
VIII. FLUIDISATION PARTICULAIRE.....	223
VIII.1 Bilan de quantité de mouvement dans un système fluide-solide.....	223
VIII.2 Vitesse minimale de fluidisation.....	225
VIII.2.1 Estimation de la vitesse minimale de fluidisation.....	225
VIII.2.2 Forces prépondérantes à la vitesse minimale de fluidisation.....	227
VIII.3 Caractéristiques du lit fluidisé	228
VIII.3.1 Mise en évidence expérimentale de la fluidisation	228
VIII.3.2 Étendue du domaine de fluidisation particulaire	229
VIII.3.3 Perte de charge et pression hydrostatique du lit	230
VIII.3.4 Expansion du lit en fluidisation particulaire.....	231
VIII.4 Remarques conclusives	232
VIII.5 Exercices d'application	233
IX. FLUIDISATION GAZ-SOLIDE.....	235
IX.1 Classification des poudres.....	236
IX.1.1 Classification proposée par Geldart, analyse qualitative	236
IX.1.2 Critères quantitatifs de transition entre les classes de poudre	238
IX.2 Régimes d'écoulement en fluidisation gaz-solide.....	239
IX.2.1 Description des régimes de fluidisation, analyse qualitative	239
IX.2.2 Carte de régimes de Grace.....	241
IX.2.3 Critères quantitatifs de transition entre les régimes de fluidisation.....	243
IX.3 Hydrodynamique des écoulements en fluidisation à bulles	244
IX.3.1 Caractérisation générale du lit	244

IX.3.2 Diamètre volumique des bulles.....	244
IX.3.3 Vitesse ascensionnelle des bulles.....	246
IX.3.4 Expansion du lit en régime à bulles	247
IX.4 Extrapolation et similitude dans les lits fluidisés.....	248
IX.4.1 Considérations générales quant à l'extrapolation des lits fluidisés	248
IX.4.2 Analyse dimensionnelle et critères de similitude	249
IX.5 Caractéristiques des lits fluidisés dans les industries chimiques	251
IX.5.1 Principales technologies de lits fluidisés et conditions opératoires typiques	251
IX.5.2 Principales applications industrielles	252
IX.6 Remarques conclusives	255
IX.7 Exercices d'application	255
X. TRANSFERTS FLUIDE-SOLIDE	261
X.1 Lois de transfert et nombres adimensionnels associés	261
X.2 Estimation des coefficients de transfert fluide-solide.....	262
X.2.1 Transfert sur des particules isolées, en lit fixe et en fluidisation particulaire.....	262
X.2.2 Transferts gaz-solide en fluidisation agrégative.....	264
X.2.3 Transfert de chaleur lit-paroi en lit fixe multitubulaire.....	266
X.3 Transfert de matière et paramètres opératoires des réacteurs.....	268
X.4 Remarques conclusives.....	269
X.5 Exercices d'application.....	270
XI. SÉPARATIONS MÉCANIQUES LIQUIDE-SOLIDE	271
XI.1 Généralités et classification des procédés	271
XI.2 Décantation gravitaire et flottation, généralités	274
XI.2.1 Prétraitements : coagulation et floculation	274
XI.2.2 Interactions entre particules et régimes de sédimentation	276
XI.3 Clarification ou décantation de suspensions diluées.....	278
XI.3.1 Vitesse de décantation d'un solide dans un clarificateur	278
XI.3.2 Configurations géométriques et opératoires des clarificateurs.....	279
XI.3.3 Dimensionnement d'un clarificateur pour des particules discrètes	283
XI.3.4 Dimensionnement d'un clarificateur pour des particules floculées	285
XI.4 Épaississement ou décantation de suspensions concentrées	287
XI.4.1 Sédimentation discontinue en zones.....	287
XI.4.2 Modélisation de Kynch de la décantation en système fermé	289
XI.4.3 Dimensionnement d'un épaisseur ouvert en régime permanent.....	292
XI.4.4 Éléments technologiques	294
XI.5 Flottation.....	297
XI.6 Filtration frontale, généralités	299
XI.6.1 Filtration frontale et filtration tangentielle.....	299
XI.6.2 Classifications des procédés de filtration frontale.....	299
XI.6.3 Prétraitements, adjuvants, lavage et déshydratation du gâteau	301
XI.7 Filtration sur support.....	303
XI.7.1 Équation de base de la filtration sur support.....	303

XI.7.2 Filtration à pression constante	307
XI.7.3 Filtration à débit constant	317
XI.7.4 Filtration à débit et pression variables	317
XI.7.5 Gâteaux compressibles	318
XI.8 Filtration en profondeur	319
XI.8.1 Mécanismes de capture	319
XI.8.2 Modélisation de la capture et de la saturation	320
XI.8.3 Perte de charge du lit filtrant	324
XI.8.4 Dimensionnement d'un procédé de filtration en profondeur	327
XI.8.5 Configuration des lits en traitement des eaux	327
XI.9 Décantation centrifuge et filtration centrifuge suivie d'essorage	329
XI.9.1 Définitions et domaine d'application	329
XI.9.2 Forces et pressions développées	330
XI.9.3 Décantation centrifuge	331
XI.9.4 Filtration centrifuge suivie d'essorage	338
XI.10 Remarques conclusives	342
XI.11 Exercices d'application	342
XII.SÉPARATIONS MÉCANIQUES GAZ-SOLIDE	349
XII.1 Généralités et classification des aérosols	349
XII.2 Collecte gravitaire et centrifuge	351
XII.2.1 Principe et domaine d'utilisation d'une chambre de sédimentation	351
XII.2.2 Principe de fonctionnement d'un cyclone et géométries associées	352
XII.2.3 Caractéristiques de l'écoulement au sein d'un cyclone	353
XII.2.4 Modèle simple de dimensionnement d'un cyclone	355
XII.2.5 Mise en œuvre des cyclones dans l'industrie	360
XII.3 Précipitation électrostatique	362
XII.3.1 Principe de fonctionnement d'un électrofiltre	362
XII.3.2 Disposition des électrodes et technique de collecte des poussières	364
XII.3.3 Modèle simple de dimensionnement d'un électrofiltre	366
XII.3.4 Caractéristiques opératoires des installations commerciales	368
XII.4 Filtre à manches	369
XII.4.1 Description générale de la technologie	369
XII.4.2 Caractéristiques opératoires des filtres à manche	375
XII.5 Comparaison des technologies sèches de dépoussiérage	377
XII.6 Technologies humides de séparation d'aérosols	378
XII.6.1 Séparateurs assistés par un film humide	378
XII.6.2 Laveurs de gaz	378
XII.7 Filtres pour le conditionnement de l'air	380
XII.7.1 Considérations générales et classification des filtres	380
XII.7.2 Structure et matériaux des filtres à air	382
XII.7.3 Mécanismes de capture, efficacité et perte de charge	383
XII.7.4 Technologie des filtres à air	388
XII.8 Remarques conclusives	390
XII.9 Exercices d'application	391

TROISIÈME PARTIE**SYSTÈMES GAZ-LIQUIDE ET GAZ-LIQUIDE-SOLIDE393****XIII. ÉCOULEMENT DE BULLES ET DE GOUTTES ISOLÉES395****XIII.1 Paramètres dimensionnels et adimensionnels usités.....395****XIII.2 Déformation des inclusions fluides.....397**

XIII.2.1 Formes observées des gouttes et des bulles..... 397

XIII.2.2 Carte de régimes..... 398

XIII.3 Coefficient de traînée et vitesse terminale d'une inclusion fluide.....400

XIII.3.1 Coefficient de traînée d'une inclusion sphérique..... 400

XIII.3.2 Coefficient de traînée terminale d'une inclusion pour le système air-eau..... 401

XIII.3.3 Vitesse terminale d'une inclusion fluide pour le système air-eau..... 402

XIII.3.4 Vitesse terminale d'une inclusion fluide dans un liquide..... 403

XIII.4 Remarques conclusives405**XIII.5 Exercices d'application406****XIV. ÉCOULEMENT GAZ-LIQUIDE EN CONDUITE407****XIV.1 Considérations générales.....407**

XIV.1.1 Importance industrielle des écoulements polyphasiques en conduite..... 407

XIV.1.2 Grandeurs caractérisant l'écoulement gaz-liquide en conduite..... 408

XIV.2 Configurations et régimes d'écoulement.....409

XIV.2.1 Les trois configurations de l'écoulement gaz-liquide..... 409

XIV.2.2 Régimes d'écoulement en co-courant vers le haut..... 410

XIV.2.3 Régimes d'écoulement en conduite horizontale..... 415

XIV.3 Modélisation et corrélation des paramètres hydrodynamiques.....416

XIV.3.1 Répartition spatiale du taux de vide..... 417

XIV.3.2 Variation de pression et perte de charge diphasique..... 418

XIV.3.3 Estimation du taux de vide et de la perte de charge par modèle homogène..... 418

XIV.3.4 Estimation du taux de vide par modèles à phases séparées..... 420

XIV.3.5 Corrélation de la perte de charge diphasique..... 424

XIV.4 Remarques conclusives.....427**XIV.5 Exercices d'application428****XV. COLONNES À BULLES429****XV.1 Généralités429**

XV.1.1 Exemples d'application de la technologie..... 429

XV.1.2 Caractéristiques géométriques et opératoires..... 430

XV.2 Caractéristiques hydrodynamiques des colonnes à bulles432

XV.2.1 Régimes d'écoulement..... 432

XV.2.2 Diamètre volumique des bulles..... 435

XV.2.3 Rétention de gaz..... 439

XV.2.4 Dispersion axiale des phases..... 447

XV.2.5 Coefficient de transfert de matière volumique gaz-liquide, côté liquide..... 448

XV.3 Éléments de modélisation des colonnes à bulles	450
XV.3.1 Différents modèles possibles et éléments de choix du modèle	450
XV.3.2 Éléments de conception et d'analyse de fonctionnement des colonnes	453
XV.4 Variantes géométriques et opératoires des colonnes à bulles	457
XV.5 Remarques conclusives	458
XV.6 Exercices d'application	459
XVI. ATOMISATION ET CONTACTEURS À GOUTTES	461
XVI.1 Généralités et principaux dispositifs d'atomisation	461
XVI.1.1 Importance industrielle de l'atomisation	461
XVI.1.2 Caractérisation des populations de gouttes	461
XVI.1.3 Principaux dispositifs d'atomisation	463
XVI.2 Mécanismes de l'atomisation	468
XVI.2.1 Atomisation primaire : désintégration des jets et des nappes	468
XVI.2.2 Atomisation secondaire : désintégration des gouttes primaires	470
XVI.3 Estimation du diamètre moyen des gouttes formées	474
XVI.3.1 Ordre de grandeur du diamètre pour les différentes technologies	474
XVI.3.2 Estimation du diamètre caractéristique des gouttes par corrélation	474
XVI.3.3 Caractéristiques de la distribution de taille des gouttes	476
XVI.3.4 Estimation du diamètre moyen des gouttes par extrapolation	476
XVI.4 Contacteurs à gouttes	477
XVI.4.1 Tour de pulvérisation	478
XVI.4.2 Laveur venturi	480
XVI.4.3 Sécheur atomiseur	486
XVI.4.4 Éléments de dimensionnement des contacteurs à gouttes	488
XVI.5 Remarques conclusives	489
XVI.6 Exercices d'application	490
XVII. CONTACTEURS À FILM TOMBANT	491
XVII.1 Généralités et domaines d'application de la technologie	491
XVII.1.1 Mise en contact des phases et géométrie des contacteurs	491
XVII.1.2 Distribution des temps de séjour et temps de séjour moyen des phases	491
XVII.1.3 Évaporateurs à film tombant	492
XVII.1.4 Réacteurs gaz-liquide à film tombant	493
XVII.2 Caractéristiques hydrodynamiques	494
XVII.2.1 Caractéristiques du film liquide	494
XVII.2.2 Transfert de matière et de chaleur	499
XVII.3 Éléments de dimensionnement des contacteurs	500
XVII.3.1 Écoulement piston des phases gaz et liquide	500
XVII.3.2 Estimation des coefficients de transfert	500
XVII.3.3 Estimation des dimensions du contacteur	506
XVII.4 Remarques conclusives	506
XVII.5 Exercices d'application	506

XVIII. COLONNES À PLATEAUX ET À GARNISSAGE.....	507
XVIII.1 Généralités.....	507
XVIII.1.1 Les trois étapes de dimensionnement d'un contacteur	507
XVIII.1.2 Technologies des contacteurs gaz-liquide opérés à contre-courant.....	508
XVIII.2 Colonnes à plateaux : éléments technologiques	509
XVIII.2.1 Circulation des phases.....	509
XVIII.2.2 Aires fonctionnelles des plateaux à courants croisés	513
XVIII.2.3 Espacement des plateaux.....	514
XVIII.3 Hydrodynamique des écoulements dans les colonnes à plateaux.....	514
XVIII.3.1 Description qualitative de l'hydrodynamique.....	514
XVIII.3.2 Estimation des caractéristiques hydrodynamiques.....	516
XVIII.4 Efficacité d'un plateau et efficacité de la colonne	522
XVIII.4.1 Efficacité locale ou ponctuelle.....	523
XVIII.4.2 Efficacité de Murphree du plateau	525
XVIII.4.3 Efficacité globale de la colonne.....	526
XVIII.5 Méthodologie de dimensionnement des colonnes à plateaux	527
XVIII.6 Colonnes à garnissage : éléments technologiques	531
XVIII.6.1 Caractéristiques du garnissage.....	531
XVIII.6.2 Distribution des fluides et maintien du garnissage.....	535
XVIII.6.3 Dévésiculeur.....	536
XVIII.7 Hydrodynamique des écoulements dans les colonnes garnies	536
XVIII.7.1 Description qualitative de l'hydrodynamique	536
XVIII.7.2 Estimation des caractéristiques hydrodynamiques.....	538
XVIII.8 Transfert de matière et hauteur de la colonne	545
XVIII.8.1 Nombre d'unités de transfert et hauteur d'une unité de transfert.....	545
XVIII.8.2 Coefficients de transfert de matière et aire interfaciale gaz-liquide	547
XVIII.8.3 Hauteur d'un étage théorique	549
XVIII.9 Méthodologie de dimensionnement des colonnes à garnissage.....	550
XVIII.10 Remarques conclusives et éléments de choix du contacteur	551
XVIII.10.1 Situations en faveur d'un garnissage.....	551
XVIII.10.2 Situations en faveur de plateaux	552
XVIII.10.3 Comparaison des capacités et des efficacités.....	552
XVIII.11 Exercices d'application.....	553
XIX. SÉPARATIONS MÉCANIQUES GAZ-LIQUIDE.....	555
XIX.1 Configurations des mélanges gaz-liquide.....	555
XIX.2 Séparation des aérosols liquides.....	556
XIX.2.1 Mécanismes de formation des aérosols liquides et diamètres caractéristiques.....	556
XIX.2.2 Principes physiques permettant la séparation.....	558
XIX.2.3 Caractéristiques comparées des technologies de capture.....	558
XIX.2.4 Séparation gravitaire, inertielle et par interception directe	560
XIX.2.5 Séparation par interception diffusionnelle	567
XIX.3 Ballons de séparation	570
XIX.3.1 Généralités et choix de l'orientation du ballon.....	570

XIX.3.2 Équipements internes des ballons de séparation.....	570
XIX.3.3 Éléments de dimensionnement des ballons de séparation.....	574
XIX.4 Remarques conclusives.....	577
XIX.5 Exercices d'application	577
XX.RÉACTEURS CATALYTIQUES GAZ-LIQUIDE-SOLIDE.....	579
XX.1 Généralités	579
XX.1.1 Applications commerciales	579
XX.1.2 Caractéristiques géométriques et opératoires des technologies triphasiques	579
XX.1.3 Réacteurs catalytiques gaz-liquide à solide suspendu.....	580
XX.1.4 Réacteurs catalytiques gaz-liquide à lit fixe.....	581
XX.2 Cinétique et transferts à l'échelle du grain catalytique.....	584
XX.2.1 Éléments de cinétique chimique des réactions catalytiques gaz-liquide	584
XX.2.2 Modélisation des transferts au sein du grain catalytique.....	585
XX.2.3 Modélisation des transferts extragranulaires	586
XX.2.4 Expression des flux de disparition des réactifs.....	589
XX.3 Réacteurs catalytiques à lit fixe opérés à co-courant descendant	591
XX.3.1 Régimes d'écoulement	591
XX.3.2 Perte de charge diphasique et saturation externe de liquide	593
XX.3.3 Efficacité de mouillage des grains catalytiques	596
XX.3.4 Homogénéité des écoulements à l'échelle du réacteur.....	598
XX.3.5 Estimation des coefficients de transfert de matière et de l'aire interfaciale	599
XX.3.6 Dispersion axiale des phases.....	600
XX.3.7 Éléments de modélisation des réacteurs catalytiques à lit fixe	602
XX.4 Réacteurs catalytiques triphasiques à solide suspendu	605
XX.4.1 Domaine d'utilisation de la technologie	605
XX.4.2 Hydrodynamique et transferts dans des colonnes à bulles triphasiques	605
XX.4.3 Éléments de modélisation des colonnes à bulles triphasiques	607
XX.5 Remarques conclusives	608
XX.6 Exercices d'application.....	609
ÉLÉMENTS DE CORRECTION DES EXERCICES	611
NOTATIONS.....	677
COURTES BIOGRAPHIES ET RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	689
LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES	703
INDEX.....	713