

OPÉRATIONS POLYPHASIQUES EN GÉNIE DES PROCÉDÉS

Hydrodynamique,
transferts, réactions,
séparations mécaniques

Compléments
vidéos et corrigés
téléchargeables

2^e éd.

Sabine Rode

Table des matières

PREMIÈRE PARTIE

| | |
|---|-----------|
| ÉLÉMENTS GÉNÉRIQUES..... | 19 |
| I. CONTEXTE, CONCEPTS ET MÉTHODOLOGIES | 21 |
| I.1 Le génie des procédés et l'importance des opérations polyphasiques..... | 21 |
| I.1.1 Thématiques et matières abordées en génie des procédés | 21 |
| I.1.2 Lois physiques, théorèmes, concepts et méthodologies | 23 |
| I.1.3 Nature multi-échelle des opérations | 24 |
| I.1.4 Classification des opérations unitaires, exemples d'opérations polyphasiques... | 25 |
| I.1.5 Classification des opérations selon la nature des phases impliquées..... | 27 |
| I.1.6 Relation entre technologie et modélisation..... | 29 |
| I.2 Système thermodynamique, lois de conservation et bilans | 30 |
| I.2.1 Système thermodynamique, frontière, volume de contrôle | 30 |
| I.2.2 Conditions d'équilibre des systèmes monophasiques et polyphasiques | 31 |
| I.2.3 Lois de conservation et bilans en sciences physiques..... | 32 |
| I.2.4 Bilans en génie des procédés | 33 |
| I.2.5 Formes génériques et configurations d'un bilan de matière ou de chaleur..... | 34 |
| I.2.6 Expression des termes constitutifs d'un bilan pour un système monophasique .. | 40 |
| I.2.7 Bilans pour dimensionner un procédé ou un appareil au sein du procédé..... | 48 |
| I.3 Réacteurs idéaux et étage théorique | 53 |
| I.3.1 Définition des réacteurs idéaux RPA et RP et de l'étage théorique | 53 |
| I.3.2 Intérêt, pertinence et limites des hypothèses RPA, RP et étage théorique | 55 |
| I.3.3 Application : réaction monophasique isotherme en RPA et en RP | 57 |
| I.4 Réacteurs réels et distribution des temps de séjour | 61 |
| I.4.1 Définition et mesure de la distribution des temps de séjour | 61 |
| I.4.2 DTS d'un RPA et d'une cascade de RPA..... | 63 |
| I.4.3 DTS d'un RP selon l'importance de la dispersion axiale, nombre de Péclet | 65 |
| I.4.4 Analogie entre la DTS d'une cascade de RPA et la DTS d'un RP..... | 67 |
| I.4.5 DTS d'un réacteur quelconque par association de réacteurs idéaux..... | 67 |
| I.4.6 Application : réaction monophasique isotherme dans une cascade de RPA | 69 |
| I.5 Modèles physiques, analyse dimensionnelle et similitude | 70 |
| I.5.1 Fondements de l'analyse dimensionnelle | 70 |
| I.5.2 Grandeurs physiques, dimensions, unités et interdépendance | 71 |
| I.5.3 Théorème de Vaschy-Buckingham, grandeurs connues et grandeurs cibles | 75 |
| I.5.4 Établissement de modèles par approche phénoménologique ou empirique | 78 |
| I.5.5 Exemples d'analyse dimensionnelle aveugle | 83 |
| I.5.6 Relations physiques décrites par un nombre adimensionnel invariant | 87 |
| I.5.7 Modèles empiriques par combinaison de relations asymptotiques..... | 89 |
| I.5.8 Similitude, maquettes et changement d'échelle..... | 89 |

| | |
|---|------------|
| I.6 Remarques conclusives | 91 |
| I.7 Exercices d'application | 93 |
| II. TRANSFERTS DANS LES CONTACTEURS POLYPHASIQUES | 95 |
| II.1 Les trois échelles caractéristiques du transfert | 95 |
| II.2 Échelle moléculaire : grandeurs de transfert et d'équilibre | 97 |
| II.2.1 Propriétés physiques et propriétés moléculaire de transport, généralités | 97 |
| II.2.2 Masse volumique..... | 100 |
| II.2.3 Capacité thermique massique..... | 101 |
| II.2.4 Viscosité dynamique | 102 |
| II.2.5 Conductivité thermique | 104 |
| II.2.6 Diffusivité matérielle..... | 105 |
| II.2.7 Équilibre gaz-liquide | 111 |
| II.2.8 Tension interfaciale | 113 |
| II.3 Échelle microscopique : transferts aux interfaces..... | 115 |
| II.3.1 Irréversibilité et conditions créant un transfert interfacial | 115 |
| II.3.2 Expression des flux de transfert aux interfaces | 116 |
| II.3.3 Modélisation du transfert interfacial | 118 |
| II.3.4 Épaisseur des couches limites et valeurs des coefficients de transfert | 122 |
| II.3.5 Théorie du double film et coefficient de transfert de matière global | 124 |
| II.4 Échelle macroscopique : méthodologie et modèles usités | 127 |
| II.4.1 Volume de contrôle et équations de conservation..... | 127 |
| II.4.2 Modèles de réacteurs ou de contacteurs pour une phase donnée | 127 |
| II.4.3 Combinaison des modèles pour les contacteurs diphasiques | 128 |
| II.5 Configurations simples de contacteurs diphasiques | 130 |
| II.5.1 Contacteur parfaitement agité côté gaz et liquide | 130 |
| II.5.2 Contacteurs à écoulement piston gaz et liquide, co-courant et contre-courant | 133 |
| II.5.3 Contacteur à écoulement piston côté gaz et parfaitement agité côté liquide.... | 140 |
| II.5.4 Nombre d'unités de transfert, volume du contacteur et force motrice | 141 |
| II.5.5 Analogie avec la modélisation d'un échangeur de chaleur à plaques | 143 |
| II.5.6 Cascade d'étages théoriques à contre-courant : équations de Kremser..... | 144 |
| II.5.7 Lien entre la cascade d'étages théoriques et le RP-RP contre-courant | 146 |
| II.6 Efficacité des contacteurs diphasiques | 147 |
| II.6.1 Généralités et terminologie | 147 |
| II.6.2 Performance maximale et efficacité thermodynamique | 148 |
| II.6.3 Performance réelle et efficacité globale | 153 |
| II.6.4 Théorème de Prigogine, minimisation de la création d'entropie, réversibilité. | 156 |
| II.6.5 Cas particulier des colonnes à plateaux : efficacité de Murphree | 157 |
| II.7 Remarques conclusives | 159 |
| II.8 Exercices d'application..... | 159 |
| III. ABSORPTION RÉACTIVE GAZ-LIQUIDE..... | 163 |
| III.1 Généralités et importance industrielle de l'absorption réactive | 163 |

| | |
|--|------------|
| III.2 Modèle du film stagnant avec réaction irréversible d'ordre deux | 163 |
| III.2.1 Film diffusionnel stagnant en l'absence de réaction | 163 |
| III.2.2 Schéma et bilans de matière dans le film réactionnel | 164 |
| III.2.3 Système d'équations adimensionnel | 166 |
| III.2.4 Signification des groupements adimensionnels | 166 |
| III.2.5 Définition du facteur d'accélération | 168 |
| III.2.6 Solutions approchées du système d'équations d'absorption réactive | 168 |
| III.3 Généralisation de la modélisation du transfert réactif..... | 173 |
| III.3.1 Modélisation pour d'autres lois cinétiques | 173 |
| III.3.2 Influence du modèle de transfert physique | 174 |
| III.3.3 Limitation partielle côté gaz et coefficient de transfert de matière global..... | 175 |
| III.4 Éléments de modélisation des réacteurs gaz-liquide | 176 |
| III.4.1 Méthodologie, modèles de dispersion considérés et principales hypothèses.. | 176 |
| III.4.2 Particularités des systèmes à réaction rapide | 177 |
| III.4.3 Réaction rapide, réacteur à compositions uniformes | 177 |
| III.4.4 Réaction rapide, réacteur à écoulements pistons opéré à contre-courant..... | 180 |
| III.4.5 Particularités des systèmes à réaction lente | 185 |
| III.4.6 Réaction lente, réacteur à compositions uniformes..... | 185 |
| III.4.7 Réaction lente, réacteur à écoulements pistons opéré à co-courant | 188 |
| III.5 Éléments de choix de la technologie du contacteur | 191 |
| III.6 Remarques conclusives | 195 |
| III.7 Exercices d'application | 195 |
| IV. TRANSFERT ET RÉACTION EN CATALYSE HÉTÉROGÈNE | 201 |
| IV.1 Généralités..... | 201 |
| IV.1.1 Définition et importance industrielle de la catalyse hétérogène | 201 |
| IV.1.2 Échelles spatiales à considérer en catalyse hétérogène..... | 203 |
| IV.1.3 Les différentes étapes de la réaction catalytique dans un grain poreux | 203 |
| IV.1.4 Vitesses spécifiques massiques et volumiques et lois cinétiques | 204 |
| IV.2 Caractérisation du grain catalytique | 206 |
| IV.2.1 Composition et préparation d'un catalyseur poreux | 206 |
| IV.2.2 Caractéristiques géométriques et physicochimiques des grains catalytiques . | 206 |
| IV.2.3 Transfert de matière et de chaleur au sein du grain catalytique..... | 209 |
| IV.3 Couplage entre le transfert intragranulaire et la réaction..... | 211 |
| IV.3.1 Réaction irréversible d'ordre un dans un catalyseur isotherme..... | 211 |
| IV.3.2 Limitation diffusionnelle interne pour d'autres configurations | 216 |
| IV.4 Transferts extragranulaires et flux volumiques de transformation..... | 219 |
| IV.4.1 Flux de chaleur et de matière et gradients extragranulaires..... | 219 |
| IV.4.2 Conditions permettant de négliger les gradients extragranulaires | 221 |
| IV.4.3 Flux de transformation par unité de volume de réacteur | 222 |
| IV.4.4 Gradients extragranulaires dans les procédés industriels..... | 223 |
| IV.5 Éléments de modélisation des réacteurs catalytiques fluide-solide | 223 |

| | |
|---|------------|
| IV.5.1 Technologies de mise en contact et dispersion des phases | 223 |
| IV.5.2 Classification des modèles de réacteur catalytique à lit fixe | 225 |
| IV.5.3 Modèle piston sans dispersion axiale..... | 226 |
| IV.6 Remarques conclusives..... | 231 |
| IV.7 Exercices d'application | 232 |
| V. ÉLÉMENTS DE MÉCANIQUE DES FLUIDES | 233 |
| V.1 Équations de conservation dans un écoulement monophasique | 234 |
| V.1.1 Bilans macroscopiques, équation de Bernoulli | 234 |
| V.1.2 Bilans différentiels, équations de Navier-Stokes | 238 |
| V.2 Hydrodynamique des écoulements en conduite cylindrique | 239 |
| V.2.1 Variation de la pression motrice et perte de charge | 239 |
| V.2.2 Régimes d'écoulement et profils de vitesse | 240 |
| V.2.3 Perte de charge linéique | 241 |
| V.2.4 Pertes de charge singulières | 243 |
| V.2.5 Caractéristiques des écoulements dans les procédés commerciaux | 244 |
| V.2.6 Dispersion axiale et caractère piston de l'écoulement | 245 |
| V.3 Grandeurs caractérisant les écoulements polyphasiques | 248 |
| V.3.1 Dénomination des phases, vitesses, rétentions et masses volumiques | 248 |
| V.3.2 Différents modes d'estimation de la rétention des phases | 250 |
| V.3.3 Vitesses relatives et densité de flux de glissement..... | 251 |
| V.4 Équations de conservation des écoulements diphasiques | 252 |
| V.4.1 Les deux approches de modélisation des écoulements diphasiques..... | 252 |
| V.4.2 Modèles à deux phases : équations volumiques de conservation..... | 252 |
| V.4.3 Modèles à trajectoire : bilan des forces sur une inclusion..... | 254 |
| V.4.4 Lien entre les deux approches | 256 |
| V.5 Modèles diphasiques simples et usités | 256 |
| V.5.1 Écoulements à vitesse uniforme, modèle du fluide homogène équivalent..... | 256 |
| V.5.2 Écoulements gouvernés par la résultante des forces de pesanteur et la traînée | 257 |
| V.6 Remarques conclusives | 262 |
| V.7 Exercice d'application..... | 262 |
| DEUXIÈME PARTIE | |
| SYSTÈMES FLUIDE-SOLIDE..... | 263 |
| VI. CARACTÉRISATION GÉOMÉTRIQUE D'UN SOLIDE DIVISÉ..... | 265 |
| VI.1 Caractérisation géométrique d'une particule | 265 |
| VI.1.1 Diamètres équivalents et aire spécifique..... | 265 |
| VI.1.2 Facteur de sphéricité en surface volumique..... | 266 |
| VI.2 Caractérisation géométrique d'une population de particules | 268 |
| VI.2.1 Techniques d'analyse granulométrique | 268 |
| VI.2.2 Courbes de distribution granulométrique | 269 |

| | |
|--|------------|
| VI.2.3 Moments statistiques associés aux courbes de distribution en nombre | 270 |
| VI.2.4 Diamètres caractéristiques d'une population de particules | 271 |
| VI.2.5 Lois de distribution | 276 |
| VI.3 Caractérisation géométrique d'un lit de particules | 282 |
| VI.3.1 Porosité, aire spécifique et tortuosité | 282 |
| VI.3.2 Valeurs typiques de porosité en lit fixe | 283 |
| VI.3.3 Corrélation de la porosité et de la tortuosité | 286 |
| VI.4 Remarques conclusives..... | 286 |
| VI.5 Exercices d'application | 287 |
| VII.ÉCOULEMENT EN LIT FIXE | 289 |
| VII.1 Considérations générales | 289 |
| VII.1.1 Avantages et inconvénients de la technologie..... | 289 |
| VII.1.2 Caractéristiques locales de l'écoulement..... | 289 |
| VII.1.3 Importance et modes d'estimation de la perte de charge linéique..... | 290 |
| VII.2 Modélisation de l'écoulement rampant par la loi de Darcy | 290 |
| VII.2.1 Formulation de la loi de Darcy | 290 |
| VII.2.2 Précisions concernant les paramètres de la loi de Darcy | 292 |
| VII.3 Modélisation par analogie avec l'écoulement en conduite | 292 |
| VII.3.1 Dissipation d'origine visqueuse : relation de Kozeny-Carman | 293 |
| VII.3.2 Dissipation d'origine inertielle : relation de Burke-Plummer | 294 |
| VII.3.3 Dissipation visqueuse et inertielle : équation d'Ergun | 295 |
| VII.3.4 Perte de charge linéique en lit fixe pour des porosités élevées..... | 298 |
| VII.3.5 Forme différentielle de l'équation d'Ergun | 298 |
| VII.4 Dispersion matérielle et thermique en lit fixe..... | 299 |
| VII.4.1 Coefficients de dispersion et conductivités effectives axiales et radiales | 299 |
| VII.4.2 Dispersion matérielle axiale et caractère piston de l'écoulement..... | 300 |
| VII.5 Caractéristiques des lits fixes dans l'industrie | 303 |
| VII.5.1 Domaine paramétrique des principales applications industrielles..... | 303 |
| VII.5.2 Dimensions des lits fixes et dispositions géométriques..... | 304 |
| VII.5.3 Uniformité radiale de l'écoulement..... | 305 |
| VII.6 Remarques conclusives | 307 |
| VII.7 Exercices d'application..... | 308 |
| VIII. ÉCOULEMENT D'UNE PARTICULE ISOLÉE | 311 |
| VIII.1 Hydrodynamique de l'écoulement autour d'une particule..... | 311 |
| VIII.1.1 Lignes de courant et caractéristiques de l'écoulement..... | 311 |
| VIII.1.2 Forces agissant sur la particule en régime stationnaire | 312 |
| VIII.1.3 Corrélation de la traînée | 313 |
| VIII.2 Vitesse terminale de chute | 315 |
| VIII.2.1 Bilan des forces dans un écoulement gravitaire à l'état stationnaire | 315 |
| VIII.2.2 Analyse dimensionnelle et nombres adimensionnels usités..... | 317 |

| | |
|---|------------|
| VIII.2.3 Estimation de la vitesse terminale de chute | 318 |
| VIII.2.4 Identification du régime de chute et largeur du domaine intermédiaire..... | 319 |
| VIII.3 Comparaison des modélisations : particule fixe et suspendue..... | 320 |
| VIII.4 Remarques conclusives..... | 321 |
| VIII.5 Exercices d'application | 322 |
| IX. FLUIDISATION PARTICULAIRE | 323 |
| IX.1 Bilan de quantité de mouvement dans un système fluide-solide..... | 323 |
| IX.2 Vitesse minimale de fluidisation | 325 |
| IX.2.1 Estimation de la vitesse minimale de fluidisation..... | 325 |
| IX.2.2 Forces prépondérantes à la vitesse minimale de fluidisation..... | 327 |
| IX.3 Caractéristiques du lit fluidisé..... | 328 |
| IX.3.1 Mise en évidence expérimentale de la fluidisation | 328 |
| IX.3.2 Étendue du domaine de fluidisation particulaire | 329 |
| IX.3.3 Perte de charge et pression hydrostatique du lit..... | 330 |
| IX.3.4 Expansion du lit en fluidisation particulaire | 331 |
| IX.4 Comparaison des modélisations : lit fixe et lit fluidisé | 332 |
| IX.5 Remarques conclusives..... | 333 |
| IX.6 Exercices d'application | 333 |
| X. FLUIDISATION GAZ-SOLIDE | 337 |
| X.1 Classification des poudres | 338 |
| X.1.1 Classification proposée par Geldart, analyse qualitative | 338 |
| X.1.2 Critères quantitatifs de transition entre les classes de poudre | 340 |
| X.2 Régimes d'écoulement en fluidisation gaz-solide | 341 |
| X.2.1 Description des régimes de fluidisation, analyse qualitative | 341 |
| X.2.2 Carte de régimes de Grace | 343 |
| X.2.3 Critères quantitatifs de transition entre les régimes de fluidisation | 345 |
| X.3 Hydrodynamique des écoulements en fluidisation à bulles | 346 |
| X.3.1 Caractérisation générale du lit..... | 346 |
| X.3.2 Diamètre volumique des bulles | 346 |
| X.3.3 Vitesse ascensionnelle des bulles..... | 348 |
| X.3.4 Expansion du lit en régime à bulles | 349 |
| X.4 Extrapolation et similitude dans les lits fluidisés..... | 350 |
| X.4.1 Considérations générales quant à l'extrapolation des lits fluidisés..... | 350 |
| X.4.2 Analyse dimensionnelle et critères de similitude..... | 351 |
| X.5 Caractéristiques des lits fluidisés dans l'industrie | 353 |
| X.5.1 Principales technologies de lits fluidisés et conditions opératoires typiques ... | 353 |
| X.5.2 Principales applications industrielles | 355 |
| X.6 Remarques conclusives | 357 |
| X.7 Exercices d'application | 358 |

| | |
|--|------------|
| XI. TRANSFERTS FLUIDE-SOLIDE..... | 363 |
| XI.1 Lois de transfert et nombres adimensionnels associés | 363 |
| XI.2 Estimation des coefficients de transfert fluide-solide | 364 |
| XI.2.1 Transfert sur des particules isolées, en lit fixe et en fluidisation particulaire | 364 |
| XI.2.2 Transferts gaz-solide en fluidisation agrégative | 366 |
| XI.2.3 Transfert de chaleur lit-paroi en lit fixe multitubulaire | 368 |
| XI.3 Transfert de matière et paramètres opératoires des réacteurs | 370 |
| XI.4 Remarques conclusives..... | 371 |
| XI.5 Exercices d'application | 372 |
| XII.SÉPARATIONS MÉCANIQUES LIQUIDE-SOLIDE..... | 373 |
| XII.1 Généralités et classification des procédés..... | 373 |
| XII.2 Décantation gravitaire et flottation, généralités | 376 |
| XII.2.1 Prétraitements : coagulation et floculation | 376 |
| XII.2.2 Interactions entre particules et régimes de sédimentation | 378 |
| XII.3 Clarification ou décantation de suspensions diluées | 380 |
| XII.3.1 Vitesse de décantation d'un solide dans un clarificateur..... | 380 |
| XII.3.2 Configurations géométriques et opératoires des clarificateurs..... | 381 |
| XII.3.3 Dimensionnement d'un clarificateur pour des particules granulaires | 385 |
| XII.3.4 Dimensionnement d'un clarificateur pour des floes..... | 387 |
| XII.4 Épaississement ou décantation de suspensions concentrées..... | 389 |
| XII.4.1 Sédimentation discontinue en zones..... | 389 |
| XII.4.2 Modélisation de Kynch de la décantation en système fermé..... | 391 |
| XII.4.3 Dimensionnement d'un épaisseur ouvert en régime permanent..... | 394 |
| XII.4.4 Éléments technologiques | 396 |
| XII.5 Flottation..... | 399 |
| XII.6 Filtration frontale, généralités | 401 |
| XII.6.1 Filtration frontale et filtration tangentielle | 401 |
| XII.6.2 Classifications des procédés de filtration frontale | 401 |
| XII.6.3 Prétraitements, adjuvants, lavage et déshydratation du gâteau..... | 403 |
| XII.7 Filtration sur support | 405 |
| XII.7.1 Équation de base de la filtration sur support | 405 |
| XII.7.2 Filtration à pression constante | 409 |
| XII.7.3 Filtration à débit constant | 419 |
| XII.7.4 Filtration à débit et pression variables..... | 419 |
| XII.7.5 Gâteaux compressibles | 420 |
| XII.8 Filtration en profondeur | 421 |
| XII.8.1 Mécanismes de capture | 421 |
| XII.8.2 Modélisation de la capture et de la saturation | 422 |
| XII.8.3 Perte de charge du lit filtrant | 426 |
| XII.8.4 Dimensionnement d'un procédé de filtration en profondeur..... | 429 |
| XII.8.5 Configuration des lits en traitement des eaux..... | 429 |

| | |
|---|------------|
| XII.9 Décantation centrifuge et filtration centrifuge suivie d'essorage..... | 431 |
| XII.9.1 Définitions et domaine d'application | 431 |
| XII.9.2 Forces et pressions développées | 432 |
| XII.9.3 Décantation centrifuge..... | 433 |
| XII.9.4 Filtration centrifuge suivie d'essorage | 440 |
| XII.10 Remarques conclusives | 444 |
| XII.11 Exercices d'application..... | 444 |
| XIII. SÉPARATIONS MÉCANIQUES GAZ-SOLIDE | 453 |
| XIII.1 Généralités et classification des aérosols solides | 453 |
| XIII.2 Collecte gravitaire et centrifuge | 455 |
| XIII.2.1 Principe et domaine d'utilisation d'une chambre de sédimentation..... | 455 |
| XIII.2.2 Principe de fonctionnement d'un cyclone et géométries associées..... | 456 |
| XIII.2.3 Caractéristiques de l'écoulement au sein d'un cyclone..... | 457 |
| XIII.2.4 Modèle simple de dimensionnement d'un cyclone | 459 |
| XIII.2.5 Mise en œuvre des cyclones dans l'industrie..... | 464 |
| XIII.3 Précipitation électrostatique..... | 466 |
| XIII.3.1 Principe de fonctionnement d'un électrofiltre..... | 466 |
| XIII.3.2 Disposition des électrodes et technique de collecte des poussières | 468 |
| XIII.3.3 Modèle simple de dimensionnement d'un électrofiltre..... | 470 |
| XIII.3.4 Caractéristiques opératoires des installations commerciales..... | 472 |
| XIII.4 Filtre à manches..... | 473 |
| XIII.4.1 Description générale de la technologie | 473 |
| XIII.4.2 Caractéristiques opératoires des filtres à manche | 479 |
| XIII.5 Comparaison des technologies sèches de dépolluage | 481 |
| XIII.6 Technologies humides de collecte d'aérosols solides | 482 |
| XIII.6.1 Séparateurs assistés par un film humide | 482 |
| XIII.6.2 Laveurs de gaz | 482 |
| XIII.7 Exemple d'application : les procédés de traitement des fumées | 484 |
| XIII.8 Filtres pour le conditionnement de l'air | 486 |
| XIII.8.1 Considérations générales et classification des filtres | 486 |
| XIII.8.2 Structure et matériaux des filtres à air..... | 488 |
| XIII.8.3 Mécanismes de capture, efficacité et perte de charge | 489 |
| XIII.8.4 Technologie des filtres à air | 494 |
| XIII.9 Remarques conclusives..... | 496 |
| XIII.10 Exercices d'application | 497 |
| TROISIÈME PARTIE | |
| SYSTÈMES GAZ-LIQUIDE ET GAZ-LIQUIDE-SOLIDE | 499 |
| XIV. ÉCOULEMENT DE BULLES ET DE GOUTTES ISOLÉES | 501 |
| XIV.1 Grandeurs et relations physiques, nombres adimensionnels..... | 501 |

| | |
|---|------------|
| XIV.2 Déformation des inclusions fluides | 503 |
| XIV.2.1 Formes observées des gouttes et des bulles | 503 |
| XIV.2.2 Carte d'existence des différentes formes | 504 |
| XIV.3 Coefficient de traînée et vitesse terminale d'une inclusion fluide | 506 |
| XIV.3.1 Coefficient de traînée d'une inclusion sphérique..... | 506 |
| XIV.3.2 Coefficient de traînée terminale d'une inclusion pour le système air-eau ... | 507 |
| XIV.3.3 Vitesse terminale d'une inclusion fluide pour le système air-eau..... | 508 |
| XIV.3.4 Vitesse terminale d'une inclusion fluide dans un liquide | 509 |
| XIV.4 Remarques conclusives | 511 |
| XIV.5 Exercices d'application | 512 |
| XV. ÉCOULEMENT GAZ-LIQUIDE EN CONDUITE | 513 |
| XV.1 Considérations générales | 513 |
| XV.1.1 Importance industrielle des écoulements polyphasiques en conduite | 513 |
| XV.1.2 Grandeurs caractérisant l'écoulement gaz-liquide..... | 514 |
| XV.2 Configurations et régimes d'écoulement | 515 |
| XV.2.1 Les trois configurations de l'écoulement gaz-liquide | 515 |
| XV.2.2 Régimes d'écoulement en co-courant vers le haut..... | 516 |
| XV.2.3 Régimes d'écoulement en conduite horizontale..... | 521 |
| XV.3 Modélisation et corrélation des paramètres hydrodynamiques | 522 |
| XV.3.1 Répartition spatiale du taux de vide | 523 |
| XV.3.2 Variation de pression et perte de charge diphasique | 524 |
| XV.3.3 Estimation du taux de vide et de la perte de charge par modèle homogène.. | 524 |
| XV.3.4 Estimation du taux de vide par modèles à phases séparées..... | 526 |
| XV.3.5 Corrélation de la perte de charge linéique diphasique | 530 |
| XV.4 Critères de dimensionnement de conduites industrielles | 533 |
| XV.5 Remarques conclusives | 533 |
| XV.6 Exercices d'application | 534 |
| XVI. COLONNES À BULLES | 535 |
| XVI.1 Généralités | 535 |
| XVI.1.1 Exemples d'application de la technologie | 535 |
| XVI.1.2 Caractéristiques géométriques et opératoires..... | 536 |
| XVI.2 Caractéristiques hydrodynamiques des colonnes à bulles | 538 |
| XVI.2.1 Régimes d'écoulement..... | 538 |
| XVI.2.2 Diamètre volumique des bulles..... | 541 |
| XVI.2.3 Rétention de gaz..... | 545 |
| XVI.2.4 Dispersion axiale des phases..... | 553 |
| XVI.2.5 Coefficient de transfert de matière volumique gaz-liquide, côté liquide | 554 |
| XVI.3 Éléments de modélisation des colonnes à bulles | 556 |
| XVI.3.1 Différents modèles possibles et éléments de choix du modèle | 556 |
| XVI.3.2 Éléments de conception et d'analyse de fonctionnement des colonnes | 559 |

| | |
|--|------------|
| XVI.4 Variantes géométriques et opératoires des colonnes à bulles | 563 |
| XVI.5 Remarques conclusives..... | 564 |
| XVI.6 Exercices d'application..... | 565 |
| XVII. ATOMISATION ET CONTACTEURS À GOUTTES..... | 567 |
| XVII.1 Généralités et principaux dispositifs d'atomisation | 567 |
| XVII.1.1 Importance industrielle de l'atomisation | 567 |
| XVII.1.2 Caractérisation des populations de gouttes..... | 567 |
| XVII.1.3 Principaux dispositifs d'atomisation | 569 |
| XVII.2 Mécanismes de l'atomisation..... | 574 |
| XVII.2.1 Atomisation primaire : désintégration des jets et des nappes | 574 |
| XVII.2.2 Atomisation secondaire : désintégration des gouttes primaires..... | 576 |
| XVII.3 Estimation du diamètre moyen des gouttes formées | 580 |
| XVII.3.1 Ordre de grandeur du diamètre pour les différentes technologies | 580 |
| XVII.3.2 Estimation du diamètre caractéristique des gouttes par corrélation | 580 |
| XVII.3.3 Caractéristiques de la distribution de taille des gouttes..... | 582 |
| XVII.3.4 Estimation du diamètre moyen des gouttes par extrapolation | 582 |
| XVII.4 Contacteurs à gouttes..... | 583 |
| XVII.4.1 Tour de pulvérisation..... | 584 |
| XVII.4.2 Laveur venturi | 586 |
| XVII.4.3 Sécheur atomiseur | 592 |
| XVII.4.4 Éléments de dimensionnement des contacteurs à gouttes | 594 |
| XVII.5 Remarques conclusives | 595 |
| XVII.6 Exercices d'application | 596 |
| XVIII. CONTACTEURS À FILM TOMBANT | 597 |
| XVIII.1 Généralités et domaines d'application de la technologie | 597 |
| XVIII.1.1 Mise en contact des phases et géométrie des contacteurs | 597 |
| XVIII.1.2 Distribution des temps de séjour et temps de séjour moyen des phases ... | 597 |
| XVIII.1.3 Évaporateurs à film tombant | 598 |
| XVIII.1.4 Réacteurs gaz-liquide à film tombant..... | 599 |
| XVIII.2 Caractéristiques hydrodynamiques | 600 |
| XVIII.2.1 Caractéristiques du film liquide | 600 |
| XVIII.2.2 Transfert de matière et de chaleur | 605 |
| XVIII.3 Éléments de dimensionnement des contacteurs | 606 |
| XVIII.3.1 Écoulement piston des phases gaz et liquide..... | 606 |
| XVIII.3.2 Estimation des coefficients de transfert..... | 606 |
| XVIII.3.3 Estimation des dimensions du contacteur | 612 |
| XVIII.4 Remarques conclusives..... | 612 |
| XVIII.5 Exercices d'application | 612 |

| | |
|---|------------|
| XIX. COLONNES À PLATEAUX ET À GARNISSAGE..... | 613 |
| XIX.1 Généralités..... | 613 |
| XIX.1.1 Les trois étapes de dimensionnement d'un contacteur..... | 613 |
| XIX.1.2 Technologies des contacteurs gaz-liquide opérés à contre-courant | 614 |
| XIX.2 Colonnes à plateaux : éléments technologiques..... | 615 |
| XIX.2.1 Circulation des phases | 615 |
| XIX.2.2 Aires fonctionnelles des plateaux à courants croisés | 619 |
| XIX.2.3 Espacement des plateaux | 620 |
| XIX.3 Hydrodynamique des écoulements dans les colonnes à plateaux | 620 |
| XIX.3.1 Description qualitative de l'hydrodynamique..... | 620 |
| XIX.3.2 Estimation des caractéristiques hydrodynamiques | 622 |
| XIX.4 Efficacité d'un plateau et efficacité de la colonne | 628 |
| XIX.4.1 Efficacité locale ou ponctuelle..... | 629 |
| XIX.4.2 Efficacité de Murphree du plateau | 631 |
| XIX.4.3 Efficacité globale de la colonne | 632 |
| XIX.5 Méthodologie de dimensionnement des colonnes à plateaux | 633 |
| XIX.6 Colonnes à garnissage : éléments technologiques | 637 |
| XIX.6.1 Caractéristiques du garnissage | 637 |
| XIX.6.2 Distribution des fluides et maintien du garnissage | 641 |
| XIX.6.3 Dévésiculateur | 642 |
| XIX.7 Hydrodynamique des écoulements dans les colonnes garnies | 642 |
| XIX.7.1 Description qualitative de l'hydrodynamique | 642 |
| XIX.7.2 Estimation des caractéristiques hydrodynamiques | 644 |
| XIX.8 Transfert de matière et hauteur de la colonne | 651 |
| XIX.8.1 Nombre d'unités de transfert et hauteur d'une unité de transfert..... | 651 |
| XIX.8.2 Coefficients de transfert de matière et aire interfaciale gaz-liquide | 653 |
| XIX.8.3 Définition et valeurs typiques de la hauteur d'un étage théorique, <i>HET</i> | 655 |
| XIX.9 Méthodologie de dimensionnement des colonnes à garnissage..... | 656 |
| XIX.10 Remarques conclusives et éléments de choix du contacteur | 657 |
| XIX.10.1 Situations en faveur d'un garnissage | 657 |
| XIX.10.2 Situations en faveur de plateaux | 658 |
| XIX.10.3 Comparaison des capacités et des efficacités..... | 658 |
| XIX.11 Exercices d'application..... | 659 |
| XX. SÉPARATIONS MÉCANIQUES GAZ-LIQUIDE | 661 |
| XX.1 Configurations des mélanges gaz-liquide | 661 |
| XX.2 Séparation des aérosols liquides..... | 662 |
| XX.2.1 Mécanismes de formation des aérosols liquides et techniques séparatives... .. | 662 |
| XX.2.2 Principes physiques permettant la séparation..... | 664 |
| XX.2.3 Caractéristiques comparées des technologies de capture | 664 |
| XX.2.4 Séparation gravitaire, inertielle et par interception directe | 666 |
| XX.2.5 Séparation par interception diffusionnelle sur des filtres fibreux | 673 |

| | |
|--|------------|
| XX.2.6 Séparation par précipitation électrostatique humide | 676 |
| XX.3 Ballons de séparation | 677 |
| XX.3.1 Généralités et choix de l'orientation du ballon | 677 |
| XX.3.2 Équipements internes des ballons de séparation | 677 |
| XX.3.3 Éléments de dimensionnement des ballons de séparation..... | 680 |
| XX.4 Remarques conclusives | 683 |
| XX.5 Exercices d'application | 684 |
| XXI. RÉACTEURS CATALYTIQUES GAZ-LIQUIDE-SOLIDE..... | 685 |
| XXI.1 Généralités..... | 685 |
| XXI.1.1 Applications commerciales..... | 685 |
| XXI.1.2 Caractéristiques géométriques et opératoires des réacteurs triphasiques..... | 685 |
| XXI.1.3 Réacteurs catalytiques gaz-liquide à solide suspendu..... | 686 |
| XXI.1.4 Réacteurs catalytiques gaz-liquide à lit fixe | 687 |
| XXI.2 Cinétique et transferts à l'échelle du grain catalytique..... | 690 |
| XXI.2.1 Éléments de cinétique chimique des réactions catalytiques gaz-liquide..... | 690 |
| XXI.2.2 Modélisation des transferts au sein du grain catalytique | 691 |
| XXI.2.3 Modélisation des transferts extragranulaires..... | 692 |
| XXI.2.4 Expression des flux de transformation des réactifs..... | 695 |
| XXI.3 Réacteurs catalytiques à lit fixe opérés à co-courant descendant..... | 697 |
| XXI.3.1 Régimes d'écoulement | 697 |
| XXI.3.2 Perte de charge diphasique et saturation externe de liquide | 699 |
| XXI.3.3 Efficacité de mouillage des grains catalytiques | 702 |
| XXI.3.4 Homogénéité des écoulements à l'échelle du réacteur | 704 |
| XXI.3.5 Estimation des coefficients de transfert de matière et de l'aire interfaciale. | 705 |
| XXI.3.6 Dispersion axiale des phases..... | 706 |
| XXI.3.7 Éléments de modélisation des réacteurs catalytiques à lit fixe | 708 |
| XXI.4 Réacteurs catalytiques triphasiques à solide suspendu | 711 |
| XXI.4.1 Domaine d'utilisation de la technologie | 711 |
| XXI.4.2 Hydrodynamique et transferts dans des colonnes à bulles triphasiques | 711 |
| XXI.4.3 Éléments de modélisation des colonnes à bulles triphasiques | 713 |
| XXI.5 Remarques conclusives..... | 714 |
| XXI.6 Exercices d'application..... | 715 |
| NOTATIONS..... | 717 |
| BIOGRAPHIES ET RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 729 |
| INDEX..... | 747 |