Michel Roustan
coordonnateur

TRANSFERTS GAZ-LIQUIDE DANS LES PROCÉDÉS DE TRAITEMENT DES EAUX ET DES EFFLUENTS GAZEUX

GÉNIE DES PROCÉDÉS DE L'ENVIRONNEMENT

INSA

Editions TEC & DOC

Table des matières

Préface III

Liste des auteurs IX

Table des matières XIII

Avant-Propos 1

PARTIE 1
Aspects et concepts fondamentaux

Chapitre 1
Les différents types de contacteurs gaz–liquide
Gilles Hébrard et Michel Roustan ——— 7

1. Domaines d'application 8
   1.1. Traitement d'eaux usées urbaines et industrielles 8
      1.1.1. Procédés biologiques d'épuration 8
      1.1.2. Procédés chimiques de traitement ou de conditionnement 8
   1.2. Production d'eaux potables et d'eaux à usages industriels 9
   1.3. Traitement d'effluents gazeux contaminés 9
   1.4. Traitement des boues 9
2. Caractéristiques et spécificités des contacteurs gaz–liquide 10
   2.1. Phase dispersée 10
   2.2. Phase continue 10
   2.3. Les rétentions de phase 10
      2.3.1. Rétention de gaz 10
      2.3.2. Rétention de liquide 11
   2.4. Diamètre des inclusions (bulles ou gouttes) 12
   2.5. Aire interfaciale volumique d'échange *a* 12
      2.5.1. Détermination à partir du diamètre et de la rétention 12
      2.5.2. Autres méthodes de détermination de l'aire interfaciale 13

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

2.6. Coefficient de transfert de film k_L, k_G 13
2.7. Coefficient volumique de transfert k_La, k_Ga 13
3. Présentation des différents types de contacteurs gaz–liquide utilisés dans le domaine des procédés de l'environnement 13
4. Les contacteurs dans lesquels le gaz est dispersé sous forme de bulles dans un liquide 14
4.1. Colonne à bulles 15
4.2. Gazosiphon (ou airlift) 16
4.3. Tube en U 17
4.4. Réacteurs agités mécaniquement 18
4.5. Lit fixe 19
4.6. Les mélangeurs statiques 20
4.7. Hydroéjecteur 21
5. Les contacteurs dans lesquels le liquide est dispersé sous forme de film ou gouttes 21
5.1. Les garnissages 22
5.1.1. Garnissages vrac 22
5.1.2. Garnissages structurés 23
5.1.3. Matériaux supports de biofilm 23
5.2. Colonne à garnissage 24
5.3. Colonne à pulvérisation 25
5.4. Colonne à plateaux perforés 26
5.5. Éjecteur 27
5.6. Venturi 27
5.7. Aérateur de surface 28
5.8. Colonne à film tombant 29
6. Comparaison des différents contacteurs 29

Chapitre 2

Solubilité des gaz dans les liquides

Jean-Noël Foussard 33

1. Condition thermodynamique d'équilibre 33
1.1. Fugacité en phase gazeuse 34
1.2. Fugacité en phase liquide 34
1.3. Détermination de la constante de Henry et du coefficient d'activité à dilution infinie à partir de la solubilité liquide–liquide .. 36
1.4. Équations d'équilibre 37
1.5. Les diverses façons d'exprimer la solubilité d'un gaz dans un liquide 37
1.6. Les diverses expressions 37
1.7. Solubilité dans l'eau de quelques gaz usuels 40
2. Influence de la composition de la phase liquide sur la solubilité des gaz 40
2.1. Solubilité en phase aqueuse 41
2.2. Exemples d'application 42
3. Dissolution dans l'eau des composés hydrolysables 44
3.1. Généralités sur les réactions de dissociation en milieu aqueux 44
3.2. Comportement en phase aqueuse des composés hydrolysables usuellement rencontrés 47

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

3.2.1. Équilibre du dioxyde de soufre entre une phase gazeuse et une phase aqueuse 47
3.2.2. Équilibre du dioxyde de carbone entre une phase gazeuse et une phase aqueuse 52
3.2.3. Équilibre du sulfure d'hydrogène entre une phase gazeuse et une phase aqueuse 57
3.2.4. Équilibre de l'ammoniac entre une phase gazeuse et une phase aqueuse 63

Chapitre 3
La diffusion moléculaire
Michel Roustan
(participation Jean-Noël Foussard) 71

1. Définitions élémentaires 72
2. Loi de Fick 75
2.1. Solutions particulières dans le cas de mélanges gazeux 76
2.1.1. Contre-diffusion équimolaire 77
2.1.2. Diffusion de A dans B non diffusant 79
2.2. Solutions particulières dans le cas de mélanges de liquides 84
2.2.1. Contre-diffusion équimolaire 85
2.2.2. Diffusion de A dans B non diffusant 85
3. Calcul des coefficients de diffusion 87
3.1. Coefficients de diffusion en phase gazeuse 87
3.1.1. Coefficients de diffusion pour un système de deux composés sous faible pression 87
3.1.2. Influence de la pression sur les coefficients de diffusion en phase gazeuse 89
3.1.3. Influence de la température sur les coefficients de diffusion en phase gazeuse 91
3.2. Coefficients de diffusion en phase liquide 92
3.2.1. Méthodes d'estimation des coefficients de diffusion en phase liquide à dilution infinie 92
3.2.2. Influence de la composition de la phase liquide sur les coefficients de diffusion 95
3.2.3. Coefficients de diffusion dans les mélanges de liquides 96
3.2.4. Diffusion dans les solutions électrolytiques 97
3.3. Coefficients de diffusion dans l'air et dans l'eau des composés usuels 98
4. Détermination expérimentale des coefficients de diffusion 99
4.1. Méthode de Winkermann (phase gazeuse) 99
4.2. Méthode des ballons (phase gazeuse) 103
4.3. Méthode des deux cellules (phase liquide) 105
5. Équation de continuité du transfert de matière 107
5.1. Établissement de l'équation de continuité 107
5.2. Simplification de l'équation de continuité 110
5.2.1. Fluide comportant un seul constituant 111
5.2.2. Fluide incompressible 111
5.2.3. Fluide immobile 111

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

6. Résolution de l'équation de continuité 112
6.1. Diffusion unidirectionnelle dans un film plan 112
6.1.1. Régime permanent sans réaction chimique 112
6.1.2. Régime permanent avec réaction chimique d'ordre zéro 113
6.1.3. Régime permanent avec réaction chimique d'ordre un 114
6.1.4. Régime non permanent sans réaction chimique 116
6.2. Diffusion à travers un film en écoulement laminaire 120
6.3. Diffusion dans des géométries sphériques 124
6.3.1. Diffusion dans des sphères en régime permanent sans réaction chimique 124
6.3.2. Diffusion dans des sphères en régime non permanent sans réaction chimique 125
6.3.3. Diffusion dans des sphères avec réaction chimique en régime permanent 127
7. Rappel des différentes expressions du flux de matière 128

Chapitre 4
Coefficient de transfert et modèle de transfert
Michel Roustan 131

1. Analyse dimensionnelle 132
2. Les modèles de transfert 135
2.1. Modèle du film 135
2.2. Modèle du double film (Lewis et Whitman) 136
2.3. Modèle de la pénétration ou d'Higbie 143
2.4. Modèle de Danckwerts (1951), théorie du renouvellement de surface 145
2.5. Modèle combiné : film–pénétration ou film–renouvellement 145
2.6. Modèle de la goutte rigide 147
2.7. Modèle du film tombant en écoulement laminaire 148
2.8. Modèles basés sur la turbulence 150
2.8.1. Turbulence générée soit par le frottement de la phase continue sur une paroi, soit par la présence d'élément mobile se déplaçant au sein du fluide 151
2.8.2. Pseudo-turbulence 153
2.9. Conclusions partielles 154
3. Corrélations pour le calcul des coefficients de transfert k 155
3.1. Bulles 155
3.1.1. Calcul du coefficient de transfert k_L 155
3.1.2. Calcul du coefficient de transfert k_G au sein de la bulle 158
3.2. Gouttes 158
3.2.1. Coefficient de transfert k_G fluide–goutte 158
3.2.2. Coefficient de transfert au sein de la goutte k_L 160
3.3. Film en en écoulement gravitaire 162
3.3.1. Colonnes à garnissage en vrac 162
3.3.2. Film tombant 162
3.3.3. Jets liquides verticaux 164
3.3.4. Écoulement à surface libre 165

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

Chapitre 5
Bulles, gouttes et films
Alain Liné
(participation Michel Roustan, Arnaud Cockx) ——— 169

1. Régimes d'écoulement gaz–liquide 169
   1.1. Régimes d'écoulement en conduite 170
      1.1.1. Écoulements à phases dispersées 171
      1.1.2. Écoulements à phases séparées 171
      1.1.3. Écoulement intermittent 171
      1.1.4. Écoulement annulaire dispersé 171
   1.2. Cartes d'écoulement en conduite 172
   1.3. Critères de transitions en conduite 173
   1.4. Régimes d'écoulement en colonne à bulles 174
   1.5. Carte d'écoulement en colonne 175
   1.6. Critères de transitions en colonne 176
2. Analyse physique des écoulements gaz–liquide 176
   2.1. Génération de bulles par capillaire 176
      2.1.1. Injection aux faibles valeurs du débit de gaz 177
      2.1.2. Injection à de plus fortes valeurs du débit de gaz 178
      2.1.3. Transition entre les régimes d'injection 180
   2.2. Déformation des bulles 181
   2.3. Diamètres équivalents de bulles, excentricité, coalescence et rupture 183
      2.3.1. Diamètre équivalent 183
      2.3.2. Excentricité 183
      2.3.3. Coalescence 184
      2.3.4. Rupture 185
   2.4. Rétention de phase 185
      2.4.1. Fraction volumique de phase dispersée 185
      2.4.2. Systèmes diphasiques 186
      2.4.3. Systèmes dilués et systèmes denses 186
   2.5. Aires interfaciales 187
      2.5.1. Aire interfaciale d'échange par unité de volume du contacteur 187
      2.5.2. Aire interfaciale d'échange par unité de volume de phase continue 188
      2.5.3. Aire interfaciale projetée 188
   2.6. Vitesses terminales de bulles et coefficients de traînée associés 189
      2.6.1. Nombre de Reynolds d'une bulle et vitesse relative 189
      2.6.2. Poussée d'Archimède et mouvement relatif 189
      2.6.3. Écoulement rampant ($Re_{bulle} << 1$) 190
      2.6.4. Écoulement à grand nombre de Reynolds ($Re_{bulle} >> 1$) 192
      2.6.5. Vitesse relative et coefficient de traînée : approches empiriques 192
   2.7. Temps de relaxation et nombre de Stokes 195
      2.7.1. Temps de relaxation 195
      2.7.2. Nombre de Stokes 196
   2.8. Bulles de gaz déformées : calottes et poches 196
      2.8.1. Calottes 196

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

2.8.2. Poches de Taylor 200
3. Modélisation générale des systèmes diphasiques 204
3.1. Position du problème en écoulement permanent et établi 204
3.2. Systèmes à phase dispersée 204
3.2.1. Modèle à deux fluides 204
3.2.2. Modèles simplifiés pour l'évaluation du taux de gaz 206
3.2.3. Évaluation du diamètre des inclusions fluides au sein d'un écoulement turbulent 208
3.3. Systèmes à phases séparées 208
4. Réacteurs à bulles 210
4.1. Colonnes à bulles en ascension libre 210
4.1.1. Rétention gazeuse 210
4.1.2. Diamètre des bulles 212
4.2. Airlift 212
4.2.1. Modèle hydrodynamique général 213
4.2.2. Validation pour un airlift à boucle interne 216
4.2.3. Validation pour un airlift à boucle externe 217
4.2.4. Simplification du modèle général et comparaison avec des modèles empiriques 218
4.3. Réacteurs agités aérés 223
4.3.1. Cas des liquides purs 223
4.3.2. Cas des solutions d'électrolytes 225
4.4. Mélangeur statique 225
4.4.1. Rétention gazeuse 225
4.4.2. Diamètre des bulles 225
5. Réacteurs à gouttes 227
5.1. Atomisation de liquide sous forme de gouttes 227
5.2. Résultats généraux en terme de traînée, vitesse limite 227
5.2.1. Écoulement rampant Re << 1 227
5.2.2. Écoulement à grand nombre de Reynolds de goutte 227
6. Écoulements de liquide sous forme de film 228
6.1. Régimes d'écoulement de film 228
6.2. Écoulement de film laminaire à interface lisse 229
6.2.1. Film plan 229
6.2.2. Film axisymétrique 230
6.3. Écoulement de film turbulent 231

Chapitre 6
Modélisation des écoulements dans les réacteurs gaz–liquide
Michel Roustan 237

1. Traçage et traceurs 238
2. Réacteurs idéaux 238
3. Les réacteurs réels 239
3.1. Temps de passage 239
3.2. Temps de séjour moyen 239
3.3. Courbe distribution des temps de séjour (DTS) 239

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

4. Obtention de la courbe DTS 240
4.1. La stimulation impulsion 240
4.2. La stimulation échelon 242
4.3. Relations entre F, C et la courbe DTS 242
4.4. Moyenne et variance de la distribution 243
4.5. Comportement des écoulements réels 243
5. DTS des écoulements idéaux 244
5.1. Écoulement piston 244
5.2. Écoulement parfaitement agité 245
6. Principes de la modélisation des réacteurs réels 247
6.1. Fonction de transfert 248
6.1.1. Enchaînement en série 248
6.1.2. Enchaînement en parallèle 249
6.1.3. Enchaînement avec recyclage 249
6.1.4. Enchaînement échange 250
6.2. Propriétés remarquables des fonctions de transfert 250
6.2.1. Courbe E 250
6.2.2. Courbe F 251
6.2.3. Moyenne et variance de la courbe DTS 251
6.2.4. Transformée de Laplace et inverse 251
7. Les modèles d'écoulement 252
7.1. Réacteur parfaitement agité 253
7.2. Réacteur piston 253
7.3. RPA avec zone morte et court-circuit 253
7.4. J réacteurs RPA en série (ou en cascade) 255
7.5. J RPA en série avec zone morte 257
7.6. Deux RPA en série de volumes différents 258
7.7. Un RPA en série avec une zone piston 259
7.8. J RPA en série avec une zone piston 260
7.9. Deux RPA en parallèle 261
7.10. Deux RPA en série avec recyclage 263
7.11. Piston avec recyclage 264
7.12. Un RPA échangeant de la matière avec une zone stagnante 265
7.13. Autres modèles 266
7.13.1. J RPA en série avec rétromélange 266
7.13.2. J RPA en série échangeant de la matière avec une zone stagnante 267
7.14. Modèle piston avec dispersion axiale 267
8. Analyse des courbes DTS expérimentales et choix des modèles 269
8.1. Analyse des courbes DTS expérimentales 270
8.2. Choix du modèle 270
9. Influence de l'écoulement sur les performances des réacteurs chimiques 276
9.1. Cinétique d'ordre zéro 276
9.2. Cinétique d'ordre un 277
9.2.1. Comparaison des temps de passage entre un RPA et un RP 278
9.2.2. Comparaison des temps de passage en fonction du type d'écoulement 280
9.3. Cinétique d'ordre deux 281

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

Chapitre 7
Bilan de matière sur les échangeurs gaz–liquide

Michel Roustan — 285

1. Mise en contact des phases et modes opératoires ... 286
2. Échangeurs de matière avec les deux phases en écoulement piston ... 287
   2.1. Notion de courbe ou droite opératoire ... 287
      2.1.1. Absorption à contre-courant ... 287
      2.1.2. Absorption à cocourant ... 290
      2.1.3. Désorption à contre-courant ... 292
      2.1.4. Désorption à cocourant ... 295
   2.2. Notion de potentiel d'échange moyen ... 297
      2.2.1. Absorption à contre-courant ... 299
      2.2.2. Absorption à cocourant ... 299
      2.2.3. Désorption à contre-courant ... 300
      2.2.4. Désorption à cocourant ... 300
   2.3. Notions de NUT et de HUT ... 301
   2.4. Établissement des équations de bilan de matière ... 302
      2.4.1. Absorption à contre-courant ... 302
      2.4.2. Désorption à contre-courant ... 308
      2.4.3. Absorption à cocourant ... 310
      2.4.4. Désorption à cocourant ... 312
   2.5. Comparaison des modes de fonctionnement ... 314
   2.6. Autre approche pour la résolution des équations de bilan ... 315
      2.6.1. Absorption à cocourant ... 315
      2.6.2. Absorption à contre-courant ... 317
   2.7. Établissement des bilans de matière avec des débits considérés non constants ... 318
3. Échangeur avec la phase liquide parfaitement mélangée et la phase gaz piston ... 320
   3.1. Absorption ... 321
      3.1.1. Bilan sur la phase gazeuse ... 322
      3.1.2. Bilan sur la phase liquide ... 323
   3.2. Désorption ... 325
      3.2.1. Bilan sur la phase liquide ... 326
      3.2.2. Bilan sur la phase gazeuse ... 328
   3.3. Synthèse des différentes expressions ... 329
4. Échangeur avec la phase liquide et la phase gazeuse parfaitement mélangées ... 329
   4.1. Absorption ... 330
      4.1.1. Bilan sur la phase gazeuse ... 331
      4.1.2. Bilan sur la phase liquide ... 332
   4.2. Désorption ... 333
      4.2.1. Bilan sur la phase liquide ... 333
      4.2.2. Bilan sur la phase gazeuse ... 334
   4.3. Synthèse des expressions des NUT et HUT ... 335
5. Récapitulatif des calculs des NUT ... 335
6. Écoulement quelconque pour les deux phases ... 337
   6.1. Absorption à contre-courant ... 337
      6.1.1. Phase liquide ... 337

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

6.1.2. Phase gazeuse 338
6.2. Absorption à cocourant 339
6.2.1. Phase liquide 339
6.2.2. Phase gazeuse 340
7. Cas d'échangeur de matière fonctionnant en régime non permanent 341
7.1. Désorption par un gaz d'un composé A dissous dans une phase liquide 341
7.2. Absorption d'une composé A contenu dans une phase gazeuse 342

■ Chapitre 8
Transfert de matière en présence d'une réaction chimique irréversible
Michel Roustan
(participation Gabriel Wild) ——— 345

1. Identification des régimes 346
1.1. Solution particulière : réaction du 1er ordre ou du pseudo–1er ordre 349
1.2. Solution générale pour une réaction du 2e ordre kC_AC_B 350
1.3. Les différents régimes réactionnels 351
2. Modélisation des différents régimes réactionnels (phase liquide parfaitement agitée) 353
2.1. Ha < 0,3 : réaction lente 353
2.2. Réaction lente, Ha < 0,3 et R + 1/Da > 10 355
2.3. Réaction suffisamment rapide 0,3 < Ha < 3 356
2.4. Régime de réaction rapide Ha > 3 357
2.5. Réaction instantanée, Ha > 3 et Ha > 10 E_{AL} 359
2.6. Réaction instantanée de surface, Ha infiniment grand 361
3. Modélisation des régimes réactionnels pour les deux phases en écoulement piston 362
3.1. Ha < 0,3 362
3.2. Ha < 0,3 et R + 1/Da > 10 362
3.3. Ha > 3 363
3.4. Instantanée à l'interface 363
4. Exemples de transferts gaz–liquide couplés avec une réaction chimique 364
4.1. Absorption de CO_2 364
4.1.1. Solutions aqueuses alcalines 365
4.1.2. Solutions d'amines 366
4.2. Absorption d'H_2S 368
4.3. Absorption de SO_2 368
4.4. Absorption de NH_3 369
4.5. Absorption de Cl_2 369
4.6. Oxydation par l'ozone dissous 370
5. Choix des contacteurs 371
6. Transferts gaz–liquide couplés avec une réaction chimique dans des géométries particulières 372
6.1. Diffusion en régime permanent dans un film immobile adossé à une paroi 372
6.2. Diffusion d'un composé A dans une goutte avec réaction chimique (régime permanent) 375

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

PARTIE 2
Mise en œuvre des transferts gaz–liquide

Chapitre 9
Aération forcée dans les procédés biologiques d'épuration

Alain Héduit, Stéphanie Capela, Sylvie Gillot et Michel Roustan — 383

1. Critères caractérisant le transfert d'oxygène en eau claire 384
1.1. Coefficient volumique de transfert d'oxygène 384
1.1.1. Influence de la température 385
1.1.2. Influence de la salinité 385
1.2. Concentration en oxygène dissous à saturation 385
1.2.1. Influence de la température 385
1.2.2. Influence de la pression 386
1.2.3. Expression de la saturation aux conditions standard 388
1.2.4. Influence de la salinité 388
1.3. Capacité d'oxygénation standard 389
1.4. Apport horaire en oxygène standard 389
1.5. Apport spécifique brut standard 390
1.6. Rendement d'oxygénation standard 390
1.7. Rendement d'oxygénation spécifique standard 390
1.8. Nombre de transfert 391
1.8.1. Aération de surface 391
1.8.2. Insufflation d'air 391
2. Détermination des performances d'aération en eau claire 392
2.1. Principe et méthode 392
2.2. Traitement des données 393
2.3. Autres méthodes 394
3. Critères caractérisant le transfert d'oxygène en présence de la biomasse épuratrice des stations d'épuration 395
4. Détermination des performances d'oxygénation en boues activées 396
4.1. La méthode de réoxygénation des boues 397
4.2. La méthode au peroxyde d'hydrogène 399
4.3. La méthode des bilans gazeux 401
4.3.1. Détermination du rendement local d'oxygénation 401
4.3.2. Détermination du rendement local standard 402
4.3.3. Détermination du rendement global standard du système d'aération 402
4.3.4. Détermination de la capacité d'oxygénation standard en boues 403
4.3.5. Détermination du coefficient volumique de transfert en boues 404
4.4. Méthode basée sur la vitesse de consommation d'oxygène par les micro-organismes 405
4.5. Méthode des gaz non réactifs 406
4.6. Comparaison des différentes méthodes 408
5. Aération de surface 409
5.1. Les turbines lentes 409
5.1.1. Principe de fonctionnement 409

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

5.1.2. Performances en eau claire 410
5.1.3. Facteurs influençant les performances en eau claire des turbines lentes 412
5.2. Les brosses 412
5.2.1. Principe de fonctionnement 412
5.2.2. Performances en eau claire 414
5.2.3. Facteurs influençant les performances en eau claire des brosses 414
5.3. Les turbines rapides 415
5.3.1. Principe de fonctionnement 415
5.3.2. Performances en eau claire 416
5.3.3. Facteurs influençant les performances en eau claire des turbines rapides 416
5.4. Facteurs influençant les performances des aérateurs de surface en boues 417
6. Insufflation d'air 417
6.1. Critères caractéristiques des systèmes d'insufflation d'air 418
6.2. L'insufflation d'air en moyennes bulles 418
6.2.1. Types de diffuseurs 418
6.2.2. Performances 419
6.3. L'insufflation d'air en fines bulles 420
6.3.1. Types de diffuseurs 420
6.3.2. Facteurs influençant le transfert d'oxygène 420
6.3.3. Synthèse des performances en eau claire 426
6.3.4. Modélisation du transfert en eau claire 426
6.3.5. Performances en eau usée 431
7. Insufflation d'air couplée avec une agitation 432
7.1. Chenaux d'aération 432
7.1.1. Types de chenaux 432
7.1.2. Performances 433
7.1.3. Effet de la vitesse horizontale du liquide 434
7.1.4. Prédiction de la vitesse de circulation horizontale du liquide. 434
7.2. Bassins cylindriques 436
7.3. Modélisation du transfert à l'aide de l'analyse dimensionnelle 436
8. Injection d'oxygène pur 437
9. Transfert d'oxygène en biofiltration 438

Chapitre 10
Aération naturelle dans les procédés d'épuration à biomasse fixée et les écosystèmes aquatiques
Jean-Luc Vasel 445

1. Les lits bactériens 446
1.1. Principe de fonctionnement 446
1.2. Comportement d'un lit bactérien non colonisé 448
1.2.1. Hydrodynamique 448
1.2.2. Transfert sur garnissage propre 451
1.3. Comportement d'un garnissage colonisé 453
1.3.1. Hydrodynamique 453
1.3.2. Transfert d'oxygène 454

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un vol

2. Les biodisques 457
2.1. Principe de fonctionnement 457
2.2. Transfert sur disques propres 459
2.3. Transfert sur disques colonisés 462
3. Les systèmes d'infiltration–percolation 464
3.1. Principe de fonctionnement 464
3.2. Lits conventionnels 465
3.3. Lits plantés verticaux 466
3.4. Hydrodynamique 467
3.4.1. Écoulement en milieu saturé 468
3.4.2. Écoulement en milieu non saturé 468
3.5. Transfert de matière 470
4. Réaération naturelle 471
4.1. Les rivières 471
4.1.1. Modèles dimensionnels 473
4.1.2. Modèles adimensionnels 474
4.1.3. Modèles de turbulence 475
4.2. Plans d'eau 477
4.3. Ouvrages hydrauliques 477
4.3.1. Modélisation du transfert pour un écoulement en surverse ... 478
4.3.2. Modélisation du transfert pour un écoulement en sous-verse 481
5. Couplage entre transfert d'oxygène et activité biologique 482

Chapitre 11
Élimination des odeurs et des COV
Marie-Hélène Manéro 489

1. La problématique COV et odeurs 490
1.1. Nature, définition 490
1.1.1. Origines industrielles 490
1.1.2. Les effets sur la santé et l'environnement 491
1.1.3. Aspects réglementaires 492
1.2. Les odeurs 493
2. Principales techniques de traitement 494
3. Méthodologie de dimensionnement d'une colonne d'absorption physique de COV par de l'eau 495
3.1. Paramètres hydrodynamiques 497
3.1.1. Débit de lavage 497
3.1.2. Vitesse d'engorgement 498
3.1.3. Diamètre de colonne Dc 500
3.1.4. Test Dc / d_p 501
3.1.5. Perte de charge 501
3.1.6. Taux de mouillage et surface mouillée 502
3.1.7. Rétention liquide 503
3.2. Détermination de la hauteur de garnissage 504
3.2.1. Détermination du nombre d'étages théoriques (NET) 504
3.2.2. Détermination de la hauteur de garnissage faisant appel aux notions de NUT et de HUT 505
3.3. Exemple d'application 507
3.3.1. Débit de lavage 508

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

3.3.2. Hydrodynamique 508
3.3.3. Taux de mouillage et surface mouillée 510
3.3.4. Hauteurs et volumes de garnissages 510
4. Absorption de polluants non hydrosolubles par des solvants organiques 511
4.1. Mise en œuvre du procédé 511
4.2. Exemple de dimensionnement 512
5. Le traitement des odeurs par absorption avec réaction chimique 514
5.1. Mise en œuvre du procédé 514
5.2. Données de dimensionnement 515
6. Le traitement des composés organiques volatils dissous dans les eaux souterraines par désorption à l'air 516
6.1. Techniques utilisées 516
6.2. Dimensionnement des colonnes à garnissage 517
6.2.1. Débit gazeux de désorption 518
6.2.2. Paramètres hydrodynamiques 518
6.2.3. Hauteur de garnissage 519
6.3. Exemple d'une élimination de chloroforme présent dans une nappe en utilisant une colonne à garnissage 520
6.3.1. Dimensions de la colonne 520
6.3.2. Influence de l'efficacité sur Z 520
6.3.3. Influence du taux de stripping sur le volume de garnissage ... 522
6.3.4. Influence de S sur les pertes de charge et sur les puissances à fournir 523
6.3.5. Optimisation du taux de stripping 524
6.4. Dimensionnement des colonnes à pulvérisation de liquide 525
6.4.1. Désorption dans une colonne 525
6.4.2. Stripping dans une atmosphère ouverte 528
6.4.3. Exemple de dimensionnement 529

■ Chapitre 12
Traitement des fumées et des gaz acides
Belkacem Benadda et Jacques Woillez ——— 533

1. Les gaz acides et les fumées 534
1.1. Nature des polluants 534
1.2. Impacts écologiques 534
1.2.1. Pluies acides 535
1.2.2. L'eutrophisation 535
1.2.3. L'effet de serre 535
1.2.4. L'amincissement de la couche d'ozone (l'ozone stratosphérique) 535
1.2.5. L'ozone troposphérique 536
1.3. Impact sanitaire 536
1.4. Réglementation 537
2. Différents procédés de traitement des émissions gazeuses 537
2.1. Épuration par voie sèche 538
2.2. Épuration par voie semi-humide 538
2.3. Épuration par voie humide 539
3. Principes des technologies utilisées 541
3.1. Principe et contraintes du lavage 541

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

3.2. Choix et dimensionnement du contacteur 542
4. Les colonnes à garnissage 544
4.1. Étude hydrodynamique des colonnes à garnissage 545
4.2. Étude du transfert de matière et de l'efficacité des colonnes à garnissage 546
4.3. Traitement d'un gaz contenant de l'NH_3 547
4.3.1. Données physiques 548
4.3.2. Calcul du débit de solvant 548
4.3.3. Calcul du diamètre de la colonne 550
4.3.4. Calcul de la hauteur 550
4.4. Traitement d'un gaz contenant du SO_2 551
4.4.1. Diamètre de la colonne 552
4.4.2. Hauteur de la colonne 552
4.5. Traitement d'un gaz de synthèse par absorption avec réaction chimique 552
4.5.1. Données physicochimiques 552
4.5.2. Bilan de matière 553
4.5.3. Identification du régime chimique 553
5. Les réacteurs à pulvérisation 555
5.1. Principales technologies 556
5.1.1. Les réacteurs à pluie 556
5.1.2. Les réacteurs à pulvérisation transverse 557
5.1.3. Les réacteurs à colonnes de gouttes ou Venturi 557
5.1.4. Les réacteurs évaporateurs 558
5.1.5. Comparaison des différents réacteurs à pulvérisation 559
5.2. Pulvérisateurs 559
5.2.1. Classification 559
5.2.2. Taille des gouttes générées par les pulvérisateurs monofluides 563
5.2.3. Taille des gouttes générées par les pulvérisateurs bifluides 565
5.3. Bases du dimensionnement 566
5.3.1. Captation des polluants gazeux 566
5.3.2. Dépoussiérage 569
5.3.3. Évaporation, condensation 571
5.4. Exemples de calcul 574
5.4.1. Réacteur à pluie 574
5.4.2. Réacteur à pulvérisation transverse 577
5.4.3. Laveurs Venturi 579
5.4.4. Réacteurs évaporateurs 580
5.5. Conclusions 583

Chapitre 13
Utilisation de l'ozone pour l'oxydation et la désinfection des eaux
Zdravka Do-Quang et Michel Roustan 589

1. Chimie de l'ozone 590
1.1. Mécanismes réactionnels 590
1.2. Réactions moléculaires 593
1.2.1. Oxydation des composés minéraux Fe et Mn 593
1.2.2. Désinfection de l'eau à potabiliser 596

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

1.3. Réactions radicalaires 597
1.4. Consommation d'ozone par une eau 598
1.5. Désinfection de l'eau usée urbaine 599
1.6. Sous-produits de l'ozonation : les bromates 601
2. Mise en œuvre de l'ozone : les réacteurs d'ozonation 603
2.1. Tours d'ozonation équipées de diffuseurs poreux 603
2.2. Réacteur à turbine 603
2.3. Réacteur tube en U 603
2.4. Réacteur équipé de mélangeurs statiques 605
3. Modélisation de l'hydrodynamique et du transfert de matière 607
3.1. Hydrodynamique 607
3.1.1. Hydrodynamique des tours d'ozonation 607
3.1.2. Hydrodynamique des réacteurs de type tube en U 609
3.1.3. Hydrodynamique des réacteurs équipés de mélangeurs statiques 611
3.2. Transfert de matière 612
3.2.1. Transfert de matière dans des tours d'ozonation 612
3.2.2. Transfert de matière dans le réacteur tube en U 614
3.2.3. Transfert de matière dans des réacteurs munis de mélangeurs statiques 615
4. Critères de choix du réacteur 616
5. Exemples d'application 616
5.1. Démanganisation 616
5.1.1. Détermination du temps de séjour de l'eau 617
5.1.2. Calcul de la quantité d'ozone à transférer 617
5.1.3. Équation du bilan matière 617
5.2. Inactivation des micro-organismes 618

Chapitre 14
Utilisation de l'air, du dioxyde de carbone, du chlore, du dioxyde de soufre dans les procédés de traitement des eaux
Jean-Pierre Duguet, Vincent Boisdon et Michel Roustan ——— 623

1. L'air : agent d'oxydation et de désorption 624
1.1. La déferrisation des eaux 624
1.1.1. Les réactions d'oxydation et de précipitation 624
1.1.2. Les cinétiques d'oxydation du fer par l'oxygène 625
1.1.3. Évaluation du régime réactionnel 626
1.1.4. Exemple de dimensionnement d'une colonne à bulles pour la déferrisation 626
1.2. La démanganisation 628
1.3. L'élimination du sulfure d'hydrogène 629
1.3.1. Réactions d'hydrolyse-dissociation 630
1.3.2. Désorption du sulfure d'hydrogène par l'air 630
1.4. Élimination du radon 631
2. Le dioxyde de carbone 631
2.1. Applications du CO_2 en traitement des eaux 631
2.1.1. Applications du CO_2 : traitement des effluents industriels 632
2.1.2. Applications du CO_2 : traitement des eaux à potabiliser 632
2.1.3. Applications du CO_2 : traitement des eaux de procédé 633

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

2.2. Mise en œuvre du CO_2 en traitement des eaux 633
2.3. Les réactions d'hydrolyse-dissociation 634
2.4. Les cinétiques de réaction 635
2.5. Les régimes réactionnels 636
2.6. Modélisation du transfert du CO_2 637
2.7. Mise en œuvre du transfert de CO_2 dans deux cas pratiques 639
2.7.1. Ajustement de pH en colonne à bulles 639
2.7.2. Neutralisation d'un effluent industriel d'un pH 12 à 8 641
3. Le chlore 643
3.1. Les réactions d'hydrolyse-dissociation 643
3.2. Le calcul du nombre de Hatta 643
3.3. Exemple de mise en œuvre 643
4. Le dioxyde de soufre 644
4.1. Les réactions d'hydrolyse–dissociation 644
4.2. Calcul du nombre de Hatta 645
4.3. Exemple d'application industrielle : la déchloration des eaux potables 645

Chapitre 15
Réacteurs sous hautes pression et température
Hubert Debellefontaine, Belkacem Benadda,
Jean-Noël Foussard, Faïçal Larachi et Michel Roustan ——— 649

1. Les domaines d'application 650
1.1. L'oxydation en voie humide 650
1.1.1. L'oxydation supercritique ($T > 373$ °C et $P > 221$ bar) 650
1.1.2. L'oxydation subcritique (175 °C < T < 320 °C et 20 < P < 150 bar) 651
1.2. L'ozonation sous pression 651
1.3. L'absorption sous pression 652
2. Les différents types de réacteurs sous pression 653
2.1. Les réacteurs diphasiques gaz–liquide 653
2.1.1. Les colonnes à dispersion de bulles 653
2.1.2. Les cuves agitées 655
2.1.3. Les réacteurs tubulaires gaz–liquide 657
2.2. Les réacteurs triphasiques gaz–liquide–solide 657
2.2.1. Colonnes d'absorption triphasiques 657
2.2.2. Oxydation humide en présence de catalyseurs solides 658
2.2.3. Description des réacteurs pour OVH catalytique 658
3. La spécificité des paramètres caractéristiques 659
3.1. Les équilibres entre phases à plusieurs constituants 659
3.1.1. Caractérisation thermodynamique des équilibres entre phases 659
3.1.2. Diverses expressions des constantes d'équilibre 660
3.1.3. Évolution de la solubilité des gaz dans l'eau dans un large domaine de température 663
3.2. Importance de la vaporisation de l'eau 665
3.2.1. Modification du débit gazeux liée à la température 665
3.2.2. Écriture du bilan thermique associé 666
3.3. Effet de la pression sur les propriétés physicochimiques de la phase gazeuse 668

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

3.3.1. Évolution de la masse volumique de la phase gazeuse 668
3.3.2. Évolution des coefficients de diffusion en phase gazeuse 669
3.3.3. Évolution de la viscosité des gaz avec la pression 669
3.4. Les paramètres de l'hydrodynamique 670
3.4.1. Hydrodynamique en colonnes garnies à cocourant de gaz et de liquide 670
3.4.2. Hydrodynamique en colonnes garnies à contre-courant de gaz et de liquide 671
3.4.3. Paramètres hydrodynamiques en colonnes diphasiques à bulles 673
3.5. Les paramètres de transfert 674
3.5.1. Transfert en colonnes garnies à cocourant de gaz et de liquide 674
3.5.2. Transfert en colonnes garnies à contre-courant de gaz et de liquide 677
3.5.3. Transfert de matière en cuve agitée sous haute pression 678
4. Exemples de modélisation de réacteurs sous pression 681
4.1. Les cinétiques réactionnelles en oxydation en voie humide 681
4.1.1. Modèles cinétiques de l'oxydation en voie humide 681
4.1.2. Exemples de lois de cinétique OVH 682
4.2. Les colonnes à bulles pour l'oxydation en voie humide 683
4.2.1. Le modèle SBM. Bilan d'un réacteur élémentaire 684
4.2.2. Les modèles associés aux équations de bilan 685
4.2.3. Étude d'un résultat typique obtenu 685
4.3. Les réacteurs catalytiques gaz–liquide–solide 688
4.3.1. Description du mouillage des grains de catalyseur 688
4.3.2. Mécanismes de transport des constituants, hypothèses et équations du modèle 688
4.3.3. Présentation d'un résultat typique et discussion 691

Chapitre 16
Modélisation par la mécanique des fluides numérique
Arnaud Cockx et Zdravka Do-Quang 695

1. La mécanique des fluides numérique 696
1.1. Le maillage 696
1.2. La résolution 697
1.3. La visualisation 697
2. Modélisation locale des écoulements à bulles 698
2.1. Conservation de la masse 698
2.2. Conservation de la quantité de mouvement 699
2.3. Équation de transport de la concentration 701
2.4. Modélisation de la turbulence 702
3. Simulation de bassin d'aération : chenal et gazosiphon (airlift) 705
3.1. Simulation monophasique 706
3.1.1. Pilote de laboratoire 706
3.1.2. Chenal industriel 708
3.2. Simulation diphasique 709

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

3.2.1. Simulation de l'hydrodynamique gaz–liquide 709
3.2.2. Simulation du transfert d'oxygène 713
4. Simulation de réacteurs d'ozonation 715
4.1. Simulation de l'hydrodynamique 715
4.2. Simulation du transfert de masse 717
4.3. Simulation de la désinfection 719
4.4. Application de la MFN pour la réhabilitation d'unités existantes 720

Chapitre 17
Détermination expérimentale des caractéristiques des dispersions gaz–liquide
Gabriel Wild et Michel Roustan ——— 723

1. Détermination des coefficients volumiques de transfert k_La 723
1.1. Techniques physiques 723
1.1.1. Les sondes à oxygène 724
1.1.2. La technique dynamique de détermination de k_La 728
1.1.3. Détermination de kLa par la technique en régime stationnaire ou permanent 731
1.1.4. La technique à l'hydrazine 732
1.2. Techniques chimiques 734
1.2.1. Mise en œuvre d'une réaction lente dans le film de transfert, mais rapide au sein du liquide 734
1.3. Techniques basées sur l'utilisation d'un gaz traceur 737
2. Détermination de l'aire interfaciale gaz–liquide 738
3. Détermination simultanée de l'aire interfaciale et du coefficient de transfert de matière k_L (technique de la droite de Danckwerts) 740
4. Détermination du coefficient volumique de transfert côté gaz k_Ga 741
5. Remarques générales sur les techniques présentées 741

Chapitre 18
Propriétés physicochimiques des composés
Jean-Noël Foussard ——— 745

1. Les grandeurs indépendantes de la température 745
2. Les grandeurs dépendantes de la température 746
3. La base de données 748

Chapitre 19
En guise de conclusion et de futur
Michel Roustan, Marie-Véronique Le Lann, Corinne Cabassud, Dominique Bastoul, Belkacem Benadda, Annabelle Couvert ——— 761

1. Airlift 762
1.1. Principe de fonctionnement 762
1.2. Fonctionnement diphasique G-L 764
1.2.1. Principales corrélations empiriques en diphasique 764
1.2.2. Modélisation des ALR 765

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

1.3. Fonctionnement triphasique G–L–S 767
1.3.1. Influence de la présence de solide sur la circulation et la rétention gazeuse 768
1.3.2. Influence du solide sur le transfert de matière gaz–liquide 769
2. Lit fluidisé inversé 770
2.1. Principe de fonctionnement du lit fluidisé inversé 771
2.2. Grandeurs caractéristiques du LFI 771
2.2.1. Vitesses critiques 772
2.2.2. Modélisation de U_{G3} 773
2.2.3. Transfert d'oxygène 775
3. Contacteur à TGV de gaz 775
3.1. Description de la colonne à gouttes transportées 776
3.2. Performance du procédé 777
4. Contacteur gaz–liquide sans bulles 778
4.1. Principe des contacteurs à membrane gaz–liquide 779
4.2. Choix de la membrane 781
4.3. Applications présentes et futures des contacteurs gaz–liquide sans bulles 782
4.4. Avantages des contacteurs sans bulles 782
5. Commande avancée 783
5.1. La commande prédictive 785
5.2. Application de la commande prédictive pour le contrôle d'une unité d'ozonation 787
5.3. Exemple de résultat obtenu en simulation 788
5.4. Conclusions 792