

COLLECTION ENERGIE
Série Ingénierie de l'énergie



Volume 1

Transferts d'énergie et de matière

*approche bilancielle
et concepts de base*

Abdelhanine Benallou

ISTE
editions

Table des matières

Avant-propos	11
Introduction	15
Chapitre 1. Notions de base et bilans	23
1.1. L'énergie thermique et le premier principe de la thermodynamique	23
1.2. L'énergie thermique et le second principe de la thermodynamique	25
1.3. Pour une comptabilité de l'énergie et de la matière : bilans	26
1.3.1. Les entrées et les sorties du système	27
1.3.1.1. Les entrées et les sorties de matière	27
1.3.1.2. Illustration : calcul de la matière entrant dans un réacteur	27
1.3.1.3. Les entrées et les sorties d'énergie.	28
1.3.1.4. Illustration : gain d'énergie dans un séchoir	29
1.3.2. L'accumulation dans le système	30
1.3.2.1. L'accumulation de matière	30
1.3.2.2. Illustration : accumulation de matière dans une cuve.	31
1.3.2.3. L'accumulation d'énergie.	32
1.3.2.4. Illustration : accumulation d'énergie dans une cuve	33
1.3.3. La génération dans le système	34
1.3.3.1. La génération de matière	34
1.3.3.2. Illustration : génération de matière dans un réacteur	35
1.3.3.3. La génération d'énergie	36
1.3.3.4. Illustration : génération d'énergie dans un réacteur.	37

2.3.3. Convection forcée <i>versus</i> convection naturelle	116
2.4. Mécanisme de transfert par rayonnement	117
2.4.1. Correction pour tenir compte de la nature de la surface	119
2.4.2. Correction géométrique : le facteur d'angle	120
2.4.3. Échanges par rayonnement entre surfaces noires en influence totale	121
2.4.3.1. Illustration : calcul du flux net pour des surfaces noires en influence totale	122
2.4.4. Échanges par rayonnement entre surfaces noires en positions quelconques	122
2.4.4.1. Illustration : calcul du flux net pour des surfaces noires en positions quelconques	123
2.4.5. Échanges par rayonnement entre surfaces grises en positions quelconques	123
2.4.5.1. Illustration : flux net pour des surfaces grises en positions quelconques	124
2.5. Exercices et solutions	125
2.6. Lecture : Joseph Fourier	149
Chapitre 3. Mécanismes et procédés de transfert de matière	151
3.1. Introduction.	151
3.2. Classification des mécanismes de transfert de matière	152
3.3. Mécanismes de transfert dans les systèmes monophasiques	153
3.3.1. Le mécanisme lacunaire	153
3.3.2. Le mécanisme interstitiel	154
3.3.3. Le <i>random walk</i>	154
3.3.4. Le modèle cinétique des gaz	154
3.3.5. Le modèle quantique	156
3.3.5.1. Excitation par absorption d'énergie	157
3.3.5.2. Désexcitation par émission d'énergie	158
3.4. Les procédés de transfert de la matière en milieux monophasiques	158
3.4.1. Transfert sous l'action d'un gradient de concentration : l'osmose	159
3.4.1.1. La pression osmotique.	159
3.4.1.2. Le flux osmotique	161
3.4.1.3. Illustration : calcul de la densité du flux osmotique	162
3.4.2. Transfert sous l'action d'un gradient de pression : l'ultrafiltration.	164
3.4.2.1. Calcul du flux généré par osmose inverse	165
3.4.2.2. Efficacité de la membrane	165

2.3.3. Convection forcée <i>versus</i> convection naturelle	116
2.4. Mécanisme de transfert par rayonnement	117
2.4.1. Correction pour tenir compte de la nature de la surface	119
2.4.2. Correction géométrique : le facteur d'angle	120
2.4.3. Échanges par rayonnement entre surfaces noires en influence totale	121
2.4.3.1. Illustration : calcul du flux net pour des surfaces noires en influence totale	122
2.4.4. Échanges par rayonnement entre surfaces noires en positions quelconques	122
2.4.4.1. Illustration : calcul du flux net pour des surfaces noires en positions quelconques	123
2.4.5. Échanges par rayonnement entre surfaces grises en positions quelconques	123
2.4.5.1. Illustration : flux net pour des surfaces grises en positions quelconques	124
2.5. Exercices et solutions	125
2.6. Lecture : Joseph Fourier	149
Chapitre 3. Mécanismes et procédés de transfert de matière	151
3.1. Introduction	151
3.2. Classification des mécanismes de transfert de matière	152
3.3. Mécanismes de transfert dans les systèmes monophasiques	153
3.3.1. Le mécanisme lacunaire	153
3.3.2. Le mécanisme interstitiel	154
3.3.3. Le <i>random walk</i>	154
3.3.4. Le modèle cinétique des gaz	154
3.3.5. Le modèle quantique	156
3.3.5.1. Excitation par absorption d'énergie	157
3.3.5.2. Désexcitation par émission d'énergie	158
3.4. Les procédés de transfert de la matière en milieux monophasiques	158
3.4.1. Transfert sous l'action d'un gradient de concentration : l'osmose	159
3.4.1.1. La pression osmotique	159
3.4.1.2. Le flux osmotique	161
3.4.1.3. Illustration : calcul de la densité du flux osmotique	162
3.4.2. Transfert sous l'action d'un gradient de pression : l'ultrafiltration	164
3.4.2.1. Calcul du flux généré par osmose inverse	165
3.4.2.2. Efficacité de la membrane	165

3.4.2.3. Choix de la pression opératoire	166
3.4.2.4. Constructions industrielles des cellules d'osmose inverse	167
3.4.2.5. Dimensionnement des unités d'ultrafiltration	169
3.4.3. La dialyse.	171
3.4.3.1. Calcul du flux	172
3.4.3.2. Calcul du coefficient global de dialyse U	174
3.4.3.3. Constructions industrielles des cellules de dialyse	175
3.4.4. La diffusion par gradient thermique	176
3.4.4.1. Exemple 1 : urification du silicium	177
3.4.4.2. Exemple 2 : diffusion thermique dans les liquides, l'effet Soret	178
3.4.4.3. Exemple 3 : diffusion thermique dans les gaz, la séparation isotopique	178
3.4.5. Diffusion par gradient de force : centrifugation	179
3.4.6. Diffusion électromagnétique	181
3.4.7. Transfert par flux laminaire	182
3.4.8. Transfert par laser.	183
3.4.9. Transfert sous l'action d'un champ électrique : l'électrodialyse	184
3.4.9.1. Calcul du flux	185
3.4.9.2. Calcul du courant électrique généré	186
3.4.9.3. Rendements des unités d'électrodialyse	187
3.4.9.4. Applications de l'électrodialyse	187
3.4.9.5. Consommations énergétiques de l'électrodialyse	188
3.4.9.6. Électrodialyse à l'énergie solaire	191
3.5. Mécanismes et procédés en milieux diphasiques.	192
3.5.1. La distillation	192
3.5.1.1. Mécanisme de transfert et différence de potentiel d'échange	193
3.5.1.2. La notion de plateau théorique	194
3.5.1.3. Méthodes de calcul des colonnes de distillation.	194
3.5.1.4. Méthode de calcul itérative implémentable sur tableur	194
3.5.1.5. Illustration : composition du deuxième étage d'une colonne de distillation	195
3.5.1.6. Illustration : relation itérative dans la section d'enrichissement	200
3.5.1.7. Illustration : calculs dans la section de <i>stripping</i>	203
3.5.2. Transfert de matière par absorption	206
3.5.2.1. Rappels sur les équilibres de solubilité	207
3.5.2.2. Illustration : absorption de l'hydrogène par l'eau	209

3.5.2.3. Différences de potentiel d'échange dans les colonnes d'absorption	211
3.5.2.4. Surface d'échange entre le gaz et le liquide	212
3.5.2.5. Flux de matière échangés dans les colonnes d'absorption	214
3.5.2.6. Calcul des colonnes d'absorption	214
3.5.2.7. Illustration : absorption du monoxyde de carbone par l'eau	215
3.6. Exercices et solutions	218
3.7. Lecture : enrichissement de l'uranium	273
3.7.1. Le combustible uranium	273
3.7.2. L'uranium dans la nature	274
3.7.3. Les réacteurs à uranium naturel	274
3.7.4. Les réacteurs à eau pressurisée	274
3.7.5. Les réacteurs à neutrons rapides	275
3.7.6. Classification des enrichissements de l'uranium	275
3.7.7. Les procédés d'enrichissement de l'uranium	276
3.7.8. L'industrie de l'enrichissement de l'uranium	276
Chapitre 4. Analyse dimensionnelle	277
4.1. Introduction	277
4.2. Dimensions de base	278
4.3. Dimensions des grandeurs dérivées	279
4.4. Analyse dimensionnelle d'une expression	281
4.4.1. Illustration : détermination des dimensions de λ	281
4.4.2. Illustration : détermination des dimensions de h	282
4.5. Systèmes d'unités et conversions	282
4.5.1. Illustration : dimensions et unités de l'énergie	283
4.5.2. Illustration : unités de la conductivité thermique λ	284
4.5.3. Illustration : unités du coefficient de transfert convectif h	285
4.6. Les nombres adimensionnels	286
4.6.1. Le nombre de Reynolds	287
4.6.2. Le nombre de Nusselt	287
4.6.3. Le nombre de Prandtl	288
4.6.4. Le nombre de Peclet	288
4.6.5. Le nombre de Grashof	289
4.6.6. Le nombre de Rayleigh	290
4.6.7. Le nombre de Stanton	290
4.6.8. Le nombre de Graetz	291
4.6.9. Le nombre de Biot	291

4.6.10. Le nombre de Fourier	292
4.6.11. Le nombre d'Elenbaas	292
4.6.12. Le nombre de Froude	293
4.6.13. Le nombre d'Euler	293
4.7. Développement de corrélations par analyse dimensionnelle	295
4.8. Méthode de Rayleigh	297
4.8.1. Illustration : application de la méthode de Rayleigh	299
4.8.2. Illustration : vérification de la loi de Fourier par application de la méthode de Rayleigh	301
4.9. Méthode de Buckingham	304
4.9.1. Illustration : application du théorème π de Buckingham	305
4.10. Exercices et solutions	308
4.11. Lecture : Osborne Reynolds et Ludwig Prandtl	356
4.11.1. Osborne Reynolds	356
4.11.2. Ludwig Prandtl	357
Annexe. Base de données	361
Bibliographie	377
Index	387