

# Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	11
<b>Introduction</b> . . . . .	15
<b>Chapitre 1. Notions de base et bilans</b> . . . . .	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

1.3.4. L'équation du bilan . . . . .	38
1.3.4.1. Illustration : bilan matière sur un réservoir. . . . .	39
1.3.4.2. Illustration : bilan énergétique d'un chauffe-eau électrique. . . . .	41
1.4. Flux et densités de flux . . . . .	42
1.4.1. Flux énergétiques . . . . .	42
1.4.2. Flux de matière . . . . .	43
1.4.3. Densités de flux . . . . .	43
1.4.3.1. Illustration : transfert simultané de matière et d'énergie . . . . .	43
1.5. Régimes de fonctionnement . . . . .	48
1.5.1. Le régime permanent . . . . .	48
1.5.2. Le régime transitoire . . . . .	48
1.5.2.1. Illustration : bilan énergétique sur un chauffe-eau, régimes transitoire et permanent . . . . .	49
1.6. Surface d'échange . . . . .	51
1.6.1. Que représente la surface d'échange ? . . . . .	51
1.6.2. Illustration : surface d'échange dans un échangeur . . . . .	51
1.6.3. Illustration : surface d'échange à partir d'un dessin technique . . . . .	53
1.7. Différence de potentiel d'échange . . . . .	54
1.7.1. Différence de potentiel d'échange thermique . . . . .	55
1.7.1.1. Illustration : DPT et surface d'échange pour une cuve. . . . .	55
1.7.1.2. Illustration : DPT et surface d'échange élémentaires. . . . .	56
1.7.2. Différence de potentiel d'échange de matière . . . . .	57
1.7.2.1. Illustration : DPM dans une cellule d'ultrafiltration . . . . .	58
1.8. Exercices et solutions . . . . .	61
1.9. Lecture : dessalement de l'eau de mer . . . . .	106
1.9.1. Le niveau de purification . . . . .	106
1.9.2. Les sources d'eau utilisées . . . . .	106
1.9.3. Caractéristiques des eaux selon les sources. . . . .	107
1.9.4. Plusieurs techniques . . . . .	107
1.9.5. Le coût énergétique, l'élément décisif. . . . .	107
1.9.6. Des perspectives prometteuses . . . . .	108

## **Chapitre 2. Mécanismes et lois des transferts thermiques . . . . . 111**

2.1. Introduction. . . . .	111
2.2. Mécanisme et loi de la conduction . . . . .	111
2.3. Mécanisme et loi de la convection . . . . .	115
2.3.1. Exemples . . . . .	115
2.3.2. Loi de la convection . . . . .	116

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 $\lambda$ . . . . .	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 $\lambda$ . . . . .	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 $\pi$ 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
<b>Annexe. Base de données . . . . .</b>	<b>361</b>
<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>377</b>
<b>Index . . . . .</b>	<b>387</b>