

# Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	1
<b>Introduction</b> . . . . .	3
<b>Chapitre 1. Méthodes de détermination du coefficient de transfert par convection</b> . . . . .	7
1.1. Introduction. . . . .	7
1.2. Caractérisation du mouvement d'un fluide . . . . .	7
1.3. Coefficients de transfert et régimes d'écoulement . . . . .	9
1.4. Utilisation de l'analyse dimensionnelle . . . . .	10
1.4.1. Nombres adimensionnels utilisés en convection. . . . .	10
1.4.2. Applications de l'analyse dimensionnelle à la convection . . . . .	13
1.4.2.1. Application à la convection forcée à l'intérieur d'un tube . . . . .	13
1.4.2.2. Application à la convection naturelle le long d'un tube . . . . .	16
1.5. Utilisation des corrélations pour le calcul de h . . . . .	18
1.5.1. Corrélations pour les écoulements en convection forcée . . . . .	19
1.5.2. Corrélations pour les écoulements en convection naturelle . . . . .	20
<b>Chapitre 2. Convection forcée à l'intérieur d'une canalisation cylindrique.</b> . . . . .	21
2.1. Introduction. . . . .	21
2.2. Corrélations en régime laminaire . . . . .	21
2.2.1. Rappels sur les caractéristiques de l'écoulement laminaire à l'intérieur d'une canalisation . . . . .	22
2.2.2. Bilan énergétique . . . . .	23
2.2.2.1. Situation 1 : la densité du flux à la paroi du tube est constante. . . . .	24

2.2.2.2. Situation 2 : la température de la paroi du tube est constante. . . . .	27
2.2.3. Illustration : transport du phosphate en <i>slurry</i> dans une canalisation cylindrique . . . . .	28
2.2.4. Corrélations pour la zone d'entrée en régime laminaire . . . . .	31
2.2.4.1. Corrélation de Seider et Tate . . . . .	31
2.2.4.2. Corrélation de Hausen . . . . .	32
2.2.4.3. Illustration : modélisation du transfert au début d'une canalisation . . . . .	32
2.3. Corrélations en régime de transition . . . . .	35
2.4. Corrélations en régime turbulent . . . . .	36
2.4.1. Relation de Dittus-Boelter-McAdams . . . . .	36
2.4.2. Relation de Colburn-Seider-Tate . . . . .	37
2.4.3. Illustration : amélioration du transfert par passage au turbulent. . . . .	38
2.4.4. Corrélations particulières en régime turbulent . . . . .	39
2.4.4.1. Corrélations tenant compte des effets d'entrée en régime turbulent. . . . .	39
2.4.4.2. Corrélations tenant compte des effets de la dissipation visqueuse en régime turbulent. . . . .	40
2.4.5. Illustration : canalisation cylindrique de qualité industrielle. . . . .	43
2.5. Corrélations dimensionnelles pour l'air et l'eau . . . . .	45

### Chapitre 3. Convection forcée à l'intérieur de canalisations non cylindriques . . . . .

3.1. Introduction. . . . .	47
3.2. Notion de diamètre hydraulique. . . . .	47
3.3. Nombre de Nusselt et nombre de Reynolds hydrauliques. . . . .	49
3.4. Corrélations en régime laminaire établi . . . . .	49
3.4.1. Canalisations de section droite rectangulaire ou carrée en régime laminaire . . . . .	49
3.4.2. Canalisations de section droite elliptique en régime laminaire . . . . .	50
3.4.3. Canalisations de section droite triangulaire en régime laminaire . . . . .	51
3.4.4. Illustration : design d'une conduite d'air conditionné. . . . .	52
3.4.5. Canalisations annulaires en régime laminaire . . . . .	55
3.4.5.1. Coefficient de transfert pour les échanges avec le tube interne. . . . .	56
3.4.5.2. Coefficient de transfert pour les échanges avec le tube externe . . . . .	57
3.4.5.3. Illustration : calcul des coefficients de transfert pour une canalisation annulaire . . . . .	58

3.5. Corrélations en régime turbulent pour les canalisations non cylindriques . . . . .	61
3.5.1. Canalisations de section droite rectangulaire ou carrée en régime turbulent . . . . .	61
3.5.2. Canalisations de section droite elliptique ou triangulaire en régime turbulent . . . . .	62
3.5.3. Illustration : le design impose le régime d'écoulement . . . . .	64
3.5.4. Canalisations annulaires en régime turbulent . . . . .	66
3.5.4.1. Coefficient de transfert pour des échanges avec le tube interne en régime turbulent . . . . .	66
3.5.4.2. Coefficient de transfert pour des échanges avec le tube externe en régime turbulent . . . . .	67
3.5.4.3. Illustration : canalisation annulaire en régime turbulent . . .	68

## **Chapitre 4. Convection forcée à l'extérieur de canalisations ou autour d'objets . . . . .**

4.1. Introduction . . . . .	71
4.2. Écoulement à l'extérieur d'une canalisation cylindrique . . . . .	72
4.3. Corrélations pour la zone de stagnation . . . . .	73
4.4. Corrélations utilisables au-delà de la zone de stagnation . . . . .	74
4.5. Convection forcée à l'extérieur de canalisations non cylindriques . . .	74
4.5.1. Canalisations de section droite carrée . . . . .	74
4.5.1.1. Carré droit . . . . .	74
4.5.1.2. Carré incliné à 45° . . . . .	75
4.5.2. Canalisations de section droite elliptique . . . . .	76
4.5.3. Canalisations de section droite hexagonale . . . . .	76
4.5.3.1. Canalisation hexagonale avec deux côtés horizontaux . . .	76
4.5.3.2. Canalisation hexagonale avec deux côtés verticaux . . . . .	77
4.6. Convection forcée au-dessus d'un plan horizontal . . . . .	78
4.6.1. Plan à température constante . . . . .	78
4.6.2. Plan à densité de flux constante . . . . .	79
4.7. Convection forcée autour d'objets non cylindriques . . . . .	80
4.7.1. Convection forcée autour d'un plan parallèle à l'écoulement . . .	81
4.7.2. Convection forcée autour d'une sphère . . . . .	81
4.8. Transferts convectifs dans les écoulements en film sur des canalisations . . . . .	82
4.8.1. Tubes verticaux . . . . .	83
4.8.2. Tubes horizontaux . . . . .	84
4.9. Convection forcée dans les canalisations en serpents . . . . .	85
4.9.1. Coefficient de transfert par convection à l'intérieur du serpent . .	85

4.9.2. Coefficient de transfert par convection avec la paroi externe du serpent . . . . .	86
4.9.2.1. Turbine du type disque à pales . . . . .	87
4.9.2.2. Turbine à pales droites. . . . .	88
4.9.3. Coefficient de transfert par convection entre le fluide et la cuve .	89
4.9.3.1. Turbine du type disque à pales . . . . .	89
4.9.3.2. Turbine à pales droites. . . . .	89

## **Chapitre 5. Transferts d'énergie par convection naturelle . . . . . 91**

5.1. Introduction. . . . .	91
5.2. Caractérisation du mouvement de convection naturelle. . . . .	91
5.3. Corrélations en convection naturelle . . . . .	93
5.4. Plaques verticales soumises à une convection naturelle. . . . .	94
5.5. Plaques inclinées soumises à une convection naturelle . . . . .	96
5.6. Plaques horizontales soumises à une convection naturelle . . . . .	97
5.6.1. Cas des planchers chauffants . . . . .	97
5.6.2. Refroidissement par les plafonds. . . . .	98
5.7. Cylindres verticaux soumis à une convection naturelle . . . . .	99
5.8. Cylindres horizontaux soumis à une convection naturelle . . . . .	100
5.9. Sphères soumises à une convection naturelle . . . . .	101
5.10. Surfaces coniques verticales soumises à une convection naturelle. . .	102
5.11. Surfaces verticales quelconques soumises à une convection naturelle. . . . .	103
5.12. Enceintes limitées par des surfaces parallèles . . . . .	103
5.12.1. Corrélation de Hollands <i>et al.</i> pour les enceintes horizontales. . .	105
5.12.2. Corrélation d'ElSherbiny <i>et al.</i> pour les enceintes verticales. . .	106
5.13. Enceintes planes inclinées . . . . .	107
5.14. Enceintes limitées par deux cylindres concentriques. . . . .	109
5.15. Enceintes limitées par deux sphères concentriques. . . . .	111
5.16. Corrélations simplifiées pour l'air en convection naturelle . . . . .	112
5.16.1. Plan ou cylindre vertical en convection naturelle dans l'air . . .	113
5.16.2. Cylindre horizontal en convection naturelle dans l'air . . . . .	113
5.16.3. Plan horizontal en convection naturelle dans l'air . . . . .	113
5.16.4. Sphère en convection naturelle dans l'air . . . . .	114
5.16.5. Carte électronique avec composants et circuits imprimés en convection naturelle dans l'air . . . . .	114
5.16.6. Petits composants électroniques ou câbles en convection naturelle dans l'air . . . . .	115
5.17. Surfaces à ailettes : dissipateurs thermiques dans les systèmes électroniques. . . . .	115
5.17.1. Les systèmes de dissipation . . . . .	116

5.17.2. Résistance thermique d'un dissipateur . . . . .	117
5.18. Optimisation de la résistance thermique d'un dissipateur . . . . .	120
5.18.1. Détermination du coefficient de transfert dissipateur-air . . . . .	121
5.18.2. Calcul de l'espacement optimum entre les ailettes . . . . .	122
5.18.3. Relation pratique . . . . .	123
5.18.4. Calcul du flux de chaleur évacué . . . . .	123
5.18.5. Algorithme de mise en œuvre . . . . .	123
5.18.6. Illustration : conception optimale d'un dissipateur thermique . .	123
5.19. Montage optimal des circuits imprimés . . . . .	127
5.19.1. Calcul de l'espacement optimum entre les cartes électroniques .	128
5.19.2. Coefficient de transfert entre les cartes électroniques et l'air . .	129
5.19.3. Calcul du flux de chaleur évacué . . . . .	130
5.19.4. Algorithme de mise en œuvre . . . . .	130
5.19.5. Illustration : évacuation optimale de la chaleur générée par des cartes électroniques . . . . .	132
5.20. Convections forcée et naturelle superposées. . . . .	133
5.20.1. Cas de tubes verticaux : corrélation de Martinelli et Boelter . . .	134
5.20.2. Cas de tubes horizontaux : corrélation de Proctor et Eubank. . .	135
5.20.3. Cylindres, disques ou sphères en rotation . . . . .	136
5.20.3.1. Cylindre en rotation . . . . .	137
5.20.3.2. Disque en rotation . . . . .	138
5.20.3.3. Sphère en rotation. . . . .	138

## **Chapitre 6. Convection dans les nanofluides, les métaux liquides et les sels fondus . . . . .**

	141
6.1. Introduction. . . . .	141
6.2. Transferts dans les nanofluides . . . . .	142
6.2.1. Données physiques . . . . .	143
6.2.1.1. Conductivité thermique . . . . .	144
6.2.1.2. Viscosité . . . . .	145
6.2.1.3. Masse volumique et capacité calorifique . . . . .	146
6.2.2. Nanofluides circulant dans des tubes . . . . .	147
6.2.2.1. En régime turbulent . . . . .	147
6.2.2.2. En régime laminaire . . . . .	148
6.2.3. Nanofluides circulant dans des canalisations annulaires . . . . .	149
6.2.4. Superposition des convections naturelle et forcée dans les nanofluides . . . . .	150
6.3. Transferts dans les métaux liquides. . . . .	150
6.3.1. Données physiques . . . . .	150
6.3.2. Métaux liquides en convection forcée dans des canalisations cylindriques . . . . .	152

6.3.3. Métaux liquides en convection forcée dans un espace annulaire . . . . .	152
6.3.3.1. Échanges avec le tube interne . . . . .	152
6.3.3.2. Échanges avec le tube externe . . . . .	153
6.3.4. Métaux liquides en écoulement sur un plan horizontal . . . . .	154
6.3.5. Métaux liquides en convection forcée entre deux plans parallèles . . . . .	154
6.3.6. Métaux liquides soumis à une convection naturelle . . . . .	154
6.4. Transferts dans les sels fondus . . . . .	155
6.4.1. Données physiques . . . . .	155
6.4.2. Sels fondus en convection forcée en régime laminaire dans des canalisations cylindriques . . . . .	157
6.4.2.1. Corrélation de Kays . . . . .	157
6.4.2.2. Corrélation de Skupinsky . . . . .	157
6.4.3. Sels fondus en convection forcée en zone de transition dans des canalisations cylindriques . . . . .	158
6.4.4. Sels fondus en convection forcée en régime turbulent dans des canalisations cylindriques . . . . .	158
6.5. Lecture : Eugène Péclet et Lord Rayleigh . . . . .	159
6.5.1. Eugène Péclet . . . . .	159
6.5.2. Lord Rayleigh . . . . .	160
<b>Chapitre 7. Exercices et solutions . . . . .</b>	<b>163</b>
<b>Annexe 1. Base de données . . . . .</b>	<b>327</b>
<b>Annexe 2 . Régressions . . . . .</b>	<b>387</b>
<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>391</b>
<b>Index . . . . .</b>	<b>405</b>