

Table des matières

Introduction	1
Chapitre 1. Les technologies disponibles	3
1.1. Introduction	3
1.2. L'échangeur le plus simple : le monotube ou coaxial	3
1.3. Les échangeurs à tubes et calandre	4
1.4. L'échangeur à cuve-serpentin	5
1.5. Les échangeurs compacts.	7
1.5.1. Les échangeurs tubes-ailettes à courants croisés.	7
1.5.2. Les radiateurs de voiture.	8
1.5.3. Les échangeurs à plaques et ailettes	9
1.5.4. Les échangeurs à plaques	10
1.5.5. Les échangeurs à spirale	12
1.5.6. Les échangeurs à circuits imprimés	14
1.6. Les échangeurs de chaleur régénératifs rotatifs.	17
1.7. Les échangeurs à changement de phase	18
1.7.1. Les condenseurs.	18
1.7.2. Les rebouilleurs et les évaporateurs	20
1.7.2.1. Les rebouilleurs.	20
1.7.2.2. Les évaporateurs à simple effet	21
1.7.2.3. Les évaporateurs à multiples effets	21
1.7.2.4. Les évaporateurs frigorifiques	22
1.7.3. Les échangeurs à caloducs.	23

1.8. Les échangeurs pour l'électronique de puissance	25
1.8.1. Les radiateurs électroniques et les dissipateurs thermiques	25
1.8.2. Les dissipateurs à convection forcée.	26
1.8.3. Les échangeurs à plaque refroidie	27
1.8.4. Les refroidisseurs à micro-canaux	27
1.8.5. Les échangeurs réfrigérés	29
1.8.6. Les échangeurs pulvérisateurs : <i>spray coolers</i>	30
1.8.7. Les micro-caloducs pour les systèmes électroniques	31
1.8.8. Les échangeurs à chambre d'évaporation	32

Chapitre 2. Conception des échangeurs tubulaires 35

2.1. Introduction.	35
2.2. L'échangeur tubulaire coaxial.	36
2.3. L'échangeur cuve-serpentin tubulaire	36
2.4. Technologie des échangeurs multitubulaires	38
2.4.1. Les plaques tubulaires	38
2.4.2. Échangeurs à têtes fixes	38
2.4.3. Échangeurs à têtes flottantes	40
2.4.4. Échangeurs multipasses	40
2.4.5. Les chicanes transversales.	42
2.4.6. Disposition des tubes à l'intérieur des échangeurs tubulaires	43
2.4.6.1. Les nappes de tubes	43
2.4.6.2. Les faisceaux de tubes.	43
2.4.6.3. Les mailles du faisceau	44
2.4.6.4. Le pas et les écartements de la maille.	45
2.4.6.5. La limite extérieure des tubes dans la calandre	46
2.5. Description de l'écoulement dans un échangeur tubulaire	47
2.6. Position des chicanes transversales et paramètres de l'écoulement	49
2.6.1. Position des chicanes dans la calandre.	50
2.6.2. Géométrie des chicanes	50
2.6.3. Illustration : a_L , δ_L et θ à partir de ε	51
2.6.4. Jeux chicane-calandre et tube-chicane.	53
2.6.5. Aire libre longitudinale	54
2.6.6. Aire libre transversale	54
2.6.7. Les débits d'écoulement	54
2.7. Calcul du nombre de Reynolds pour l'écoulement dans la calandre	55
2.7.1. Le diamètre hydraulique.	56
2.7.2. La méthode Bell-Delaware	57

2.7.2.1. Calcul de l'aire minimale de passage au centre du faisceau . .	57
2.7.2.2. Aire de passage des fuites entre la calandre et la chicane . .	58
2.7.2.3. Aire de passage des fuites entre les tubes et la chicane . . .	58
2.7.2.4. Aire de passage par <i>bypass</i>	59
2.7.2.5. Nombre effectif de nappes à courants croisés entre chicanes	59
Chapitre 3. Conception des échangeurs compacts	61
3.1. Introduction	61
3.2. Paramètres généraux des échangeurs compacts	62
3.2.1. La compacité	62
3.2.2. Le diamètre hydraulique	62
3.2.3. La porosité	63
3.2.4. Relation entre la compacité et le diamètre hydraulique	63
3.3. Conception des échangeurs compacts tubes-ailettes	64
3.3.1. Échangeurs à tubes individuellement ailetés	64
3.3.2. Échangeurs à tubes collectivement ailetés	65
3.3.2.1. Configuration d'écoulement	65
3.3.2.2. Séparation des flux	65
3.3.2.3. Caractéristiques globales des échangeurs à tubes collectivement ailetés	66
3.3.2.4. Spécification des échangeurs à tubes collectivement ailetés .	66
3.4. Conception des échangeurs plaques-ailettes	69
3.4.1. Configuration d'écoulement	69
3.4.2. Type et disposition des ailettes	69
3.4.3. Fixations ailettes-plaques et modules d'échange	70
3.4.4. Les paramètres géométriques	71
3.4.4.1. Les longueurs d'écoulement	72
3.4.4.2. Le nombre de modules	72
3.4.4.3. Le nombre de canaux	72
3.4.4.4. La hauteur d'un module	72
3.4.4.5. Le volume disponible	73
3.4.4.6. La compacité côté i	73
3.4.4.7. L'aire d'échange	73
3.4.4.8. L'aire frontale	73
3.4.4.9. La porosité	73
3.4.5. Calcul du diamètre hydraulique pour les échangeurs plaques-ailettes	74

3.4.6. Calcul du nombre de Reynolds	74
3.5. Conception des échangeurs à plaques	75
3.5.1. Les échangeurs à plaques et joints	77
3.5.2. Les échangeurs à plaques brasées	78
3.5.3. Les paramètres de dimensionnement	79
3.5.3.1. Le nombre de passes	79
3.5.3.2. Le débit intraplaque	80
3.5.3.3. Les paramètres des plaques	80
3.5.3.4. Les écartements longitudinal et transversal	81
3.5.3.5. Calcul de la longueur d'écoulement dans la plaque.	81
3.5.3.6. Calcul du diamètre hydraulique	81
3.5.3.7. Calcul du nombre de Reynolds.	82
3.6. Technologie des échangeurs à spirale	83
3.6.1. L'écartement.	84
3.6.2. Le diamètre hydraulique	84
3.6.3. Le nombre de Reynolds	85
3.6.4. Relation entre le nombre de tours et la longueur.	85
3.7. Technologie des échangeurs à circuits imprimés	86
3.7.1. Relation diamètre- <i>pitch</i> - t_f	88
3.7.2. Contraintes sur les nombres de canaux par nappe	89
3.7.3. Contraintes sur les nombres de nappes	89
3.7.4. Le diamètre hydraulique	90
3.7.5. Le nombre de Reynolds	90
3.7.6. La résistance mécanique	90
3.8. Nouveaux développements des échangeurs compacts.	91

Chapitre 4. Choix des échangeurs et paramètres

de dimensionnement	93
4.1. Introduction.	93
4.2. Choix du type d'échangeur à utiliser	94
4.2.1. La nature des fluides et les domaines de température.	94
4.2.2. Pression et température de conception.	95
4.2.3. Programme thermique d'un échangeur	95
4.2.4. La sélection proprement dite	96
4.3. Sélection des circuits des fluides : côté tubes ou côté calandre ?	98
4.4. Choix de la configuration d'écoulement	98
4.5. Illustration : choix d'un échangeur et détermination de son programme thermique	99

4.6. Le dimensionnement, un problème complexe	100
4.6.1. Les paramètres à déterminer	101
4.6.1.1. Le diamètre des tubes	101
4.6.1.2. La longueur des tubes	101
4.6.1.3. Le nombre de passes côté tubes	101
4.6.1.4. Le nombre de passes côté calandre	102
4.6.1.5. La disposition des tubes dans la calandre.	102
4.6.1.6. Choix de la maille	102
4.6.1.7. Choix du pas des tubes (<i>pitch</i>)	103
4.6.1.8. Le diamètre de la calandre	104
4.6.1.9. Le type de chicanes et leur espacement e_c	106
4.6.1.10. L'aire libre laissée par les chicanes a	106
4.6.1.11. La résistance d'encrassement	107
4.6.2. L'origine de la complexité.	108
Chapitre 5. Les méthodes de dimensionnement.	111
5.1. Introduction.	111
5.2. Analyse des profils des températures dans un échangeur	112
5.3. Le coefficient global d'échange.	114
5.3.1. Coefficient global pour un échangeur propre.	115
5.3.1.1. Cas d'un échangeur à plaques	116
5.3.1.2. Cas d'un échangeur tubulaire.	116
5.3.2. Coefficient global pour un échangeur encrassé	117
5.3.2.1. Cas d'un échangeur à plaques encrassé.	118
5.3.2.2. Cas d'un échangeur tubulaire encrassé	119
5.3.3. Coefficient global pour échangeurs à ailettes.	119
5.3.3.1. Cas des échangeurs tubes-aillettes encrassés	120
5.3.3.2. Cas des échangeurs plaques-aillettes encrassés	121
5.4. Illustration : coefficient global d'échange pour un échangeur sale	121
5.5. Calcul du flux échangé	124
5.5.1. Bilans thermiques	124
5.5.2. Relation flux-surface d'échange	125
5.6. Méthode basée sur le calcul de l'efficacité : méthode NUT	126
5.6.1. Définition de l'efficacité.	126
5.6.2. Efficacité d'un échangeur à co-courant	127
5.6.3. Le nombre d'unités de transfert (NUT)	129
5.6.4. Illustration : températures de sortie d'un échangeur.	129

5.6.5. Calcul de l'efficacité pour les autres types d'échangeurs	131
5.6.6. Calculs pratiques de l'efficacité	136
5.6.7. Illustration : récupération de chaleur sur un rejet thermique industriel	137
5.7. Méthode basée sur la moyenne logarithmique des différences de température : méthode MLDT.	140
5.7.1. Cas d'un échangeur monopasse.	141
5.7.2. Illustration : comparaison des configurations d'écoulement	142
5.7.3. Cas des échangeurs multipasses et à courants croisés.	144
5.7.4. Détermination des facteurs correctifs	146
5.7.4.1. Expressions des facteurs correctifs pour les échangeurs multipasses côté tubes et les échangeurs monopasses côté calandre	147
5.7.4.2. Facteurs correctifs pour échangeurs à plusieurs passes côté calandre	149
5.7.4.3. Facteurs correctifs pour les échangeurs à courants croisés	150
5.7.4.4. Illustration : génération des abaques à partir des expressions du facteur correctif et du NUT	152
5.7.4.5. Facteurs correctifs pour les échangeurs à plaques.	153
5.7.4.6. Facteurs correctifs pour les échangeurs à spirale	154

Chapitre 6. Algorithmes de calcul des échangeurs 155

6.1. Introduction.	155
6.2. Le principe du dimensionnement des échangeurs	156
6.3. Algorithme de calcul des échangeurs multitubulaires	157
6.4. Illustration : mise en œuvre de l'algorithme tubes-calandre	163
6.5. Algorithme de calcul des échangeurs à courants croisés	176
6.5.1. Algorithme général	178
6.5.2. Cas des échangeurs embarqués	182
6.6. Illustration : dimensionnement des radiateurs de voiture	186
6.7. Algorithme de calcul des échangeurs à plaques	198
6.8. Illustration : mise en œuvre de l'algorithme échangeurs à plaques	203
6.9. Algorithme de calcul des échangeurs à spirale	211
6.10. Illustration : mise en œuvre de l'algorithme échangeurs à spirale	214
6.11. Algorithme de calcul des échangeurs à circuits imprimés.	221
6.12. Illustration : mise en œuvre de l'algorithme de calcul des PCHE	225

Annexe 1. Base de données	233
Annexe 2. Calcul des coefficients de transfert par convection dans les échangeurs	271
Annexe 3. Calcul des pertes de charge dans les échangeurs	301
Annexe 4. Encrassement des échangeurs	315
Bibliographie	321
Index	335