

Sciences de l'ingénieur

Mounir Bennajah
Naoil Chaouni

ÉCHANGEURS DE CHALEUR

Technologie, calcul et design

Editions TECHNIP

2-621-4-1

2-621-4-1

Mounir Bennajah

Naoil Chaouni

Sciences de l'ingénieur

ÉCHANGEURS DE CHALEUR

Technologie, calcul
et design



2014



Editions TECHNIP, 1 rue du Bac, 75007 Paris

Sommaire

Introduction	1
Rappels	7
1. Équations basiques de transfert de chaleur	7
1.1 Transfert de chaleur par conduction (loi de Fourier).....	7
1.2 Transfert par convection.....	9
1.3 Transfert par rayonnement	9
2. Écriture du bilan de chaleur	11
3. Exemples d'application	14
3.1 Mur plan multicouches, notion de coefficient global d'échange.....	14
3.2 Conduite cylindrique recouverte d'un revêtement (diffusion radiale)	17
3.3 Application au dimensionnement d'une conduite de pompage de soufre	21
Échangeurs de chaleur	27
1. Types des échangeurs de chaleur.....	28
1.1 Échangeurs tubulaires et multitubulaires.....	29
1.2 Échangeurs à plaques	32
1.3 Autres types d'échangeurs	36
2. Encrassement des échangeurs de chaleur	41
2.1 Types d'encrassement	42
2.2 Effet de l'encrassement sur le fonctionnement des échangeurs	43
3. Coefficient global d'un échangeur de chaleur	46
3.1 Coefficient global de transfert d'un échangeur à faisceaux et calandre	47
3.2 Coefficient global de transfert d'un échangeur à plaques ..	48
Coefficient d'échange convectif sans changement de phases dans les échangeurs de chaleur	51
1. Nombres adimensionnels pour le calcul du coefficient de transfert.....	53
2. Corrélations pour le calcul du coefficient de transfert en convection forcée.....	55

2.1 Cas d'une plaque plane parallèle à l'écoulement laminaire.....	55
2.2 Cas d'une plaque plane parallèle à l'écoulement turbulent	56
2.3 Cas d'un écoulement entre deux plaques	56
2.4 Cas d'un écoulement laminaire perpendiculaire à un tube.....	56
2.5 Cas d'un écoulement turbulent perpendiculaire à un tube	57
2.6 Cas d'un écoulement perpendiculaire à un faisceau de tubes	57
2.7 Cas d'un écoulement laminaire dans un tube	57
2.8 Cas d'un écoulement turbulent dans un tube.....	59
2.9 Cas d'un écoulement dans un espace annulaire.....	60
3. Corrélations pour le calcul du coefficient de transfert en convection libre.	65

Coefficient d'échange convectif en transfert avec changement de phase	67
1. Condensation	67
1.1 Types de condensations	68
2. Coefficient d'échange en condensation	69
2.1 Modèle de Nusselt : condensation en film sur une plaque plane verticale.	69
2.2 Condensation de vapeur pure	72
2.3 Condensation à l'intérieur des tubes horizontaux.....	75
3. Ébullition	77
3.1 Courbe d'ébullition	78
3.2 Ébullition nucléée.....	78
3.3 Crise d'ébullition	79
3.4 Ébullition transitoire.....	80
3.5 Ébullition en film.....	81
4. Exemples d'application	82

Technologie des échangeurs de chaleur	85
1. Echangeurs tubulaires	85
1.1 Sélection des échangeurs tubulaires	85
1.2 Appellations et désignations « TEMA »	86
1.3 Considérations géométriques des faisceaux tubulaires.....	91
2. Echangeurs à plaques	101
3. Condenseurs industriels.....	102
3.1 Condenseurs à air	102

3.2	Condenseurs à eau.....	103
3.3	Condenseur coaxial	103
3.4	Condenseur bouteille	103
3.5	Condenseur tubulaire ou multitubulaire	104
3.6	Condenseurs industriels de grande taille.....	105
4.	Bouilleurs	106
4.1	Bouilleur Kettle	106
4.2	Bouilleur concentrateur vertical à circulation forcée	107
4.3	Bouilleur à compression mécanique (circulation forcée des vapeurs).....	108
4.4	Bouilleur à film tombant type Kestner	109
5.	Algorithme de choix des bouilleurs / évaporateurs	109
	Performances et calcul des échangeurs de chaleur.....	111
1.	Méthode de différence de température moyenne logarithmique DTML.	113
1.1	Cas d'un échangeur mono passe co-courant	113
1.2	Cas d'un échangeur mono passe à contre-courant	115
1.3	Extrapolation de l'utilisation de DTLM à un échangeur quelconque	121
2.	Méthode d'efficacité et du nombre d'unités de transfert.....	129
2.1	Cas d'un échangeur mono tubulaire à co-courant	131
2.2	Cas d'un échangeur mono tubulaire à contre-courant.....	133
2.3	Extrapolation du calcul $\epsilon - NUT$ à un échangeur quelconque.....	134
3.	Choix des échangeurs de chaleurs.....	140
4.	Méthodologie de design des échangeurs de chaleurs.	141
	Exemples de design.....	143
1.	Echangeur à faisceaux et calandres sans changement de phase.....	143
2.	Echangeur tubulaire à condensation partielle :	
	application aux mélanges binaires.....	160
2.1	Algorithme conventionnel de calcul adopté.....	162
2.2	Détails des étapes de calcul.....	163
2.3	Calcul de design de l'échangeur étudié.....	177
2.4	Résultats de design du condenseur obtenus par le programme VBA et par AspenB-JAC	184
2.5	Maquette graphique de l'appareil.....	186
2.6	Gain annuel relatif à l'installation de l'échangeur	187

Optimisation et intégration énergétique	
des flux de chaleur dans les réseaux d'échangeurs	189
1. Méthode du pincement thermique	189
1.1 Signification du Pinch	190
1.2 Représentation des réseaux d'échangeurs	191
2. Conception de réseaux à l'aide de la méthode de pincement ..	193
2.1 Principe de la méthode	193
2.2 Règles de faisabilité.....	193
2.3 Critère des capacités	195
3. Algorithme de conception et d'optimisation d'un réseau d'échangeurs de chaleur	197
4. Exemple industriel.....	199
4.1 Extraction de données	201
4.2 Choix du ΔT min	201
4.3 Détermination des besoins énergétiques : courbes composites	202
4.4 Conception du train d'échange de chaud optimal	209