

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	XI
NOMENCLATURE	XIII
CHAPITRE 1 • INTRODUCTION À L'ÉNERGÉTIQUE ET AUX TRANSFERTS	1
1.1 Le système thermodynamique	1
1.2 La notion de température	4
1.2.1 Définition	4
1.2.2 L'équilibre thermique	4
1.2.3 L'étalonnage	4
1.3 L'évolution d'un système thermodynamique et les variables d'état associées	5
1.3.1 État d'un système	5
1.3.2 Variables spécifiques	6
1.4 L'énergie	6
1.4.1 Travail et chaleur	6
1.4.2 Transport, stockage, transfert et conversion de l'énergie	8
1.5 Le premier principe de la thermodynamique	10
1.5.1 Équivalence chaleur-travail	10
1.5.2 Énoncé du premier principe	10
1.6 Enthalpie et chaleurs spécifiques	12
1.6.1 Travail des forces de pression	12
1.6.2 Enthalpie	13
1.7 Les chaleurs spécifiques	14
1.8 L'énergie de changement de phase	16
1.8.1 Changement de phase	16
1.8.2 Diagramme d'équilibre	16
1.8.3 Chaleur latente de changement de phase	18

1.9	Les différents modes de transfert thermique	19
1.9.1	La nécessaire complémentarité entre thermodynamique et thermique	19
1.9.2	Conduction	20
1.9.3	Convection	20
1.9.4	Rayonnement	20
1.9.5	Écriture d'un bilan en régime transitoire	21
1.9.6	Les principales notations et grandeurs du transfert thermique	22
1.10	Références	23
	Exercices	23
	Solutions des exercices	27
CHAPITRE 2 • CONDUCTION DE LA CHALEUR		35
2.1	La conduction de la chaleur à l'échelle atomique	35
2.1.1	Structure des matériaux solides et des fluides au repos	35
2.1.2	Équilibre thermique et température dans les solides et les fluides au repos ..	36
2.1.3	Diffusion de la chaleur dans les structures solides et les fluides au repos ...	40
2.2	Modélisation de la diffusion	42
2.2.1	Loi de Fourier	42
2.2.2	Conductivité thermique	44
2.2.3	Lien entre chaleur spécifique et conductivité thermique	47
2.2.4	Expression de la loi de Fourier dans diverses configurations matérielles	48
2.3	La diffusivité thermique	49
2.4	Équation de diffusion de la chaleur	50
2.5	Notion de régime permanent et transitoire	53
2.6	Conditions initiales et conditions aux limites	55
2.6.1	Conditions initiales	56
2.6.2	Conditions aux limites en thermique	56
2.7	L'accommodation thermique	58
2.7.1	Nombre de Biot	58
2.7.2	Ailette de section constante	58
2.7.3	Accommodation thermique partielle en géométrie variable	63
2.7.4	Accommodation thermique totale	64
2.8	Transfert de chaleur aux interfaces solide - solide	67
2.9	Résolution de problèmes 1D en régime permanent	70

2.10	Résolution de problèmes 1D en régime transitoire	74
2.10.1	Utilisation de la transformée de Laplace	74
2.10.2	Quadripôle thermique en transfert 1D	75
2.10.3	Impédances thermiques en transitoire	78
2.10.4	Comportements asymptotiques	82
2.10.5	Modèles simplifiés	84
2.11	Principe de superposition	85
2.11.1	Description du principe	85
2.11.2	Réponse impulsionnelle dans des configurations de référence	85
2.12	Références	89
	Exercices	89
	Solutions des exercices	95
CHAPITRE 3 • TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONVECTION		103
3.1	Introduction	103
3.1.1	Description du phénomène de convection	103
3.1.2	Modélisation du transfert de chaleur par convection	104
3.2	Couches limites en transfert par convection	107
3.2.1	Couche limite hydrodynamique	107
3.2.2	Couche limite thermique	108
3.2.3	Écoulement laminaire et turbulent	109
3.3	Bilans de masse, de quantité de mouvement et d'enthalpie dans la couche limite	111
3.3.1	Définition d'un volume de contrôle	111
3.3.2	Bilan de masse	112
3.3.3	Bilan de quantité mouvement	113
3.3.4	Bilan thermique	115
3.4	Analyse Dimensionnelle – Principe de la méthode	119
3.5	Convection Forcée	120
3.5.1	Application de l'analyse dimensionnelle en convection forcée avec écoulement interne	120
3.5.2	Expressions du coefficient de convection h en convection forcée	124
3.6	Convection naturelle	129
3.6.1	Application de l'analyse dimensionnelle en convection naturelle	130
3.6.2	Régime turbulent en convection naturelle	132

Table des matières

3.6.3	Expressions du coefficient de convection h en convection naturelle	132
3.7	Méthodologie pour le calcul de transferts par convection en utilisant les corrélations expérimentales	138
3.8	Convection avec changement de phase	138
3.8.1	Convection lors de la condensation	138
3.8.2	Convection lors de l'ébullition	142
3.9	Convection de la chaleur par les solides en mouvement	146
3.10	Références	149
	Exercices	149
	Solutions des exercices	155
CHAPITRE 4 • RAYONNEMENT THERMIQUE		171
4.1	Le processus physique de rayonnement thermique	171
4.1.1	Démonstration de son existence à partir d'une expérience	171
4.1.2	Le spectre électromagnétique	173
4.1.3	Explication physique simplifiée de l'interaction photon - matière	173
4.2	Les corps noirs	182
4.2.1	Définition	182
4.2.2	Loi de Planck	182
4.3	L'angle solide	185
4.4	Grandeurs physiques	186
4.4.1	Grandeurs liées à l'émission	186
4.4.2	Grandeurs liées au récepteur	188
4.5	Rayonnement des corps noirs	190
4.5.1	Luminance des corps noirs	190
4.5.2	Lois de Wien	194
4.5.3	Loi de Stefan-Boltzmann	194
4.5.4	Émission spectrale du corps noir	195
4.6	Rayonnement des corps réels	196
4.6.1	Émissivité des corps réels	199
4.6.2	Absorption, réflexion et transmission des corps réels	203
4.6.3	Lien entre propriétés radiatives et propriétés optiques	205
4.6.4	La loi de Kirchhoff	207
4.6.5	Les corps gris	207

4.7	Références	208
	Exercices	209
	Solutions des exercices	212
CHAPITRE 5 • TRANSFERT PAR RAYONNEMENT ENTRE CORPS		221
5.1	Définitions des outils géométriques	221
5.1.1	Facteur de forme	221
5.1.2	Relation de réciprocité	223
5.1.3	Cas particulier de la cavité	225
5.1.4	Quelques valeurs du facteur de forme	226
5.2	Échanges radiatifs entre corps noirs	229
5.2.1	Échanges entre deux corps noirs	229
5.2.2	Échanges entre corps noirs dans une cavité	230
5.3	Échanges entre corps gris dans une cavité	231
5.3.1	Expression du flux net échangé	231
5.3.2	Influence d'un milieu participatif	234
5.3.3	Utilisation de l'analogie électrique	234
5.3.4	Résolution numérique	237
5.3.5	Boucliers radiatifs	239
5.4	Références	241
	Exercices	241
	Solutions des exercices	245
ANNEXES MATHÉMATIQUES		257
	Fonctions hyperboliques	257
	Fonction exponentielle intégrale	258
	Erreur fonction	259
	Fonction de Bessel J	261
	Fonctions de Bessel Modifiées I and K	262
	Quelques transformées de Laplace classiques	265