
TABLE DES MATIÈRES

Collection AUF	v
Préface	vii
Introduction	xix
CHAPITRE 1 INTRODUCTION AU TRANSFERT THERMIQUE	
1.1 Thermodynamique et transfert thermique	1
1.2 Modes fondamentaux de transfert thermique	4
1.2.1 Conduction	4
1.2.2 Convection	4
1.2.3 Rayonnement.....	5
1.2.4 Transfert thermique lors du changement de phase....	6
1.2.5 Modes combinés et transfert thermique global	6
1.3 Notions fondamentales	7
1.3.1 Température	7
1.3.2 Champ de température	8
1.3.3 Surface isotherme.....	9
1.3.4 Gradient de température.....	9
1.3.5 Energie-Chaleur	11
1.3.6 Flux thermique total	11
1.3.7 Flux thermique surfacique (densité de flux thermique)	11
1.4 Applications des transferts thermiques.....	11
1.5 Bibliographie	12
CHAPITRE 2 CONDUCTION THERMIQUE STATIONNAIRE	
2.1 Généralités.....	13
2.2 Notions fondamentales	13
2.2.1 Loi de Fourier.....	13
2.2.2 Conductivité thermique.....	16
2.2.3 Equation différentielle de la conduction. Formes particulières	21
2.2.4 Conditions d'unicité	25

	2.2.5	Résolution d'un problème de conduction pour un corps solide immobile	30
	2.3	Conduction stationnaire unidimensionnelle analysée par des méthodes analytiques	31
	2.3.1	Corps homogènes avec configurations géométriques simples, sans sources internes de chaleur	31
	2.3.2	Résistances thermiques de contact	54
	2.3.3	Corps ayant des structures composées sans sources internes de chaleurs	57
	2.3.4	Corps ayant des sources internes de chaleur	71
	2.4	conduction stationnaire bi- et tridimensionnelle analysée par des méthodes analytiques	92
	2.4.1	Plaque plane semi-infinie adiabatique	92
	2.4.2	Conduite cylindrique horizontale enterrée	95
	2.5	Bibliographie	100
CHAPITRE 3	CONDUCTION INSTATIONNAIRE		
	3.1	Introduction	103
	3.2	Valeurs caractéristiques de la conduction instationnaire.....	104
	3.2.1	Nombre de Biot	104
	3.2.2	Temps de capacité	105
	3.2.3	Nombre de Biot global	106
	3.2.4	Temps de diffusion.....	107
	3.2.5	Epaisseur de diffusion	107
	3.2.6	Conclusions	108
	3.3	Conduction instationnaire en géométrie monodimensionnelle.....	109
	3.3.1	Choc thermique simple en température – Mur semi-infini	110
	3.3.2	Mur semi-infini – Choc thermique en flux	114
	3.3.3	Mur d'épaisseur finie – Double choc thermique.....	117
	3.3.4	Mur semi-infini – Condition à la limite dépendant du temps – Epaisseur de peau thermique	121
	3.3.5	Conclusions	124
	3.4	Problèmes bidimensionnels et tridimensionnels	124
	3.5	Bibliographie	125
	3.6	Annexes	129
	3.6.1	Rappel des propriétés des transformations de Laplace	129
	3.6.2	Rappel sur la fonction d'erreur	129
	3.6.3	Décomposition de 1 en série de sinus	130
	3.6.4	Zéros de la fonction de Bessel d'ordre 0.....	132
CHAPITRE 4	CONVECTION FORCÉE		
	4.1	Introduction	133

4.2	Formulation d'un problème de convection forcée.....	135
4.2.1	Formulation locale	135
4.2.2	Formulation globale	138
4.3	Similitude appliquée à l'étude de la convection forcée.....	141
4.4	Analyse dimensionnelle.....	144
4.5	Transferts à travers une couche limite laminaire au voisinage d'une plaque plane	147
4.5.1	Généralités.....	147
4.5.2	Couche limite thermique laminaire le long d'une plaque plane	148
4.6	Transferts à travers une couche limite turbulente au voisinage d'une plaque plane	155
4.6.1	Description de la couche limite turbulente – hypothèse de Boussinesq.....	156
4.6.2	Couche limite hydrodynamique turbulente – coefficient de frottement	158
4.6.3	Couche limite turbulente thermique.....	164
4.6.4	Coefficient de transfert thermique convectif.....	168
4.7	Transfert thermique en conduite en régime laminaire établi	174
4.7.1	Equations générales.....	174
4.7.2	Champ de vitesse.....	175
4.7.3	Champ de température	176
4.7.4	Coefficient de transfert thermique convectif.....	177
4.8	Transfert thermique en conduite en régime turbulent établi	178
4.8.1	Champ de vitesse moyenne	178
4.8.2	Champ de température	180
4.8.3	Coefficient de transfert thermique convectif.....	182
4.9	Coefficients de transfert convectif pour quelques cas élémentaires	185
4.9.1	Convection forcée autour d'un cylindre à température uniforme et constante placé transversalement par rapport à l'écoulement.....	185
4.9.2	Convection forcée autour d'une sphère solide à température uniforme et constante	186
4.9.3	Convection forcée à travers un faisceau de tubes cylindriques de section circulaire alignés par rapport à l'écoulement.....	186
4.9.4	Convection à travers un faisceau de tubes cylindriques de section circulaire décalés par rapport à l'écoulement.....	187
4.10	Bibliographie	189

CHAPITRE 5 CONVECTION NATURELLE

5.1	Introduction	191
5.2	Formulation d'un problème de convection naturelle;	

	hypothèse de boussinesq.....	192
5.3	Adimensionnalisation des équations et paramètres de similitude	193
5.4	Convection naturelle le long d'une plaque plane verticale ..	197
5.5	Convection naturelle dans les configurations les plus utilisées	204
5.5.1	Convection naturelle au-dessus d'une plaque chaude ou en-dessous d'une plaque froide horizontale	204
5.5.2	Convection naturelle au-dessus d'une plaque froide ou en-dessous d'une plaque chaude horizontale	204
5.5.3	Convection naturelle au-dessus d'un cylindre horizontal chaud d'axe horizontal	205
5.5.4	Convection naturelle au-dessus d'une sphère chaude	205
5.5.5	Convection naturelle autour d'un cylindre vertical...	206
5.5.6	Convection naturelle dans une enceinte dont les parois verticales sont portées à une température constante.....	206
5.5.7	Convection naturelle dans une enceinte dont les parois inclinées sont portées à des températures différentes.....	216
5.6	Applications de la convection libre	218
5.6.1	Effet thermosiphon – application au chauffage sanitaire par panneau solaire	218
5.6.2	Écoulements atmosphériques: circulation de Hadley-Ferrel, vent thermique	224
5.6.3	Chauffage d'une poche d'aluminium par thermoplongeur	230
5.7	Bibliographie	233

CHAPITRE 6 RAYONNEMENT THERMIQUE

6.1	Introduction	235
6.2	Rayonnement électromagnétique	236
6.3	Notions fondamentales	237
6.4	Loi de Lambert – corps lambertien.....	240
6.5	Le corps noir, référence du rayonnement thermique.....	242
6.5.1	Définition d'un corps noir.....	242
6.5.2	Lois du corps noir.....	242
6.5.3	Émittance du corps noir	246
6.5.4	Résumé des lois d'émission associées aux corps noirs.....	247
6.6	Emission de rayonnement des corps réels	248
6.7	Caractérisation de l'interaction du rayonnement avec les milieux matériels	250
6.7.1	Réflexion, absorption et transmission hémisphériques.....	250

6.7.2	Réflexion, absorption et transmission spéculaires	252
6.7.3	Milieux semi-transparents ou semi-absorbants.....	253
6.7.4	Rayonnement de gaz et de vapeur dans une enceinte	258
6.8	Lois de Kirchhoff	265
6.8.1	Démonstration partielle.....	265
6.8.2	Panneau solaire à effet de serre.....	267
6.8.3	Radiosité.....	271
6.8.4	Résistance thermique équivalente.....	271
6.9	Rayonnement entre surfaces.....	272
6.9.1	Cas de deux surfaces élémentaires lambertiennes	273
6.9.2	Cas de deux surfaces élémentaires noires	274
6.9.3	Facteurs d'angle – relation de réciprocité	275
6.9.4	Cas de deux surfaces noires finies isothermes	276
6.9.5	Coefficient de transfert thermique équivalent.....	278
6.9.6	Facteurs d'angle pour des géométries simples.....	278
6.9.7	Transfert thermique entre surfaces de corps noirs dans une enceinte vide et close	284
6.9.8	Transfert thermique entre surfaces de corps gris d'une enceinte vide	286
6.10	Bilan radiatif terrestre.....	291
6.10.1	Rayonnement solaire.....	291
6.10.2	Bilan radiatif terrestre	294
6.11	Bibliographie	296
6.12	Annexe: Glossaire des termes connexes au transferts radiatifs	297

CHAPITRE 7 TRANSFERT DE CHALEUR ET DE MASSE LORS DU CHANGEMENT DE PHASE

7.1	INTRODUCTION.....	301
7.2	Phénomènes de transfert de chaleur lors de la condensation de la vapeur.....	301
7.2.1	Présentation générale	301
7.2.2	Condensation pelliculaire sur des surfaces planes verticales	302
7.2.3	Condensation de la vapeur sur des surfaces cylindriques horizontales	312
7.2.4	Condensation en gouttes	316
7.2.5	Influences sur le transfert de chaleur lors de la condensation de la vapeur	317
7.3	Ebullition.....	320
7.3.1	Présentation générale	320
7.3.2	Hydrodynamique de la formation des bulles	321
7.3.3	Flux et température imposés	322
7.3.4	Ebullition libre ou en vase (en grand volume de liquide)	323

	7.3.5	Relations de calcul du coefficient de transfert thermique lors de l'ébullition	325
	7.3.6	Facteurs d'influence de l'ébullition	329
	7.3.7	Effet VAPOTRON	330
	7.3.8	Ebullition en convection forcée	330
	7.4	Changement de phase liquide-solide	334
	7.4.1	Généralités.....	334
	7.4.2	Mise en équation d'un problème de solidification....	339
	7.5	Bibliographie	349
CHAPITRE 8	MÉTHODES NUMÉRIQUES EN THERMIQUE		
	8.1	Introduction	351
	8.2	Discrétisation du domaine	352
	8.3	Approximation nodale de la fonction $T(x, y, z, t)$	354
	8.3.1	Fonctions d'interpolation	354
	8.3.2	Exemple monodimensionnel.....	355
	8.4	Discrétisation de l'opérateur aux dérivées partielles spatiales. Méthodes des résidus pondérés	357
	8.5	Méthode des différences finies.....	357
	8.5.1	Formulation faible.....	357
	8.5.2	Méthodes par développements limités – exemples monodimensionnels.....	358
	8.5.3	Méthode par interpolation – exemples monodimensionnels.....	362
	8.5.4	Equation de la chaleur sous forme discrète.....	363
	8.6	Méthode des volumes finis.....	365
	8.6.1	Formulation faible.....	365
	8.6.2	Mise en œuvre pratique.....	366
	8.6.3	Exemple monodimensionnel.....	368
	8.6.4	Approximation de la condensation de masse	370
	8.7	Méthode des éléments finis	370
	8.7.1	Formulation intégrale par la méthode de Galerkin – forme faible	370
	8.7.2	Propriétés de l'équation de la chaleur sous forme discrète	372
	8.7.3	Mise en œuvre de la méthode des éléments finis	374
	8.7.4	Exemple monodimensionnel sur trois points	376
	8.7.5	Exemple monodimensionnel sur ni points	378
	8.8	Discrétisation temporelle.....	382
	8.8.1	Méthode des différences finies.....	383
	8.8.2	Méthode par intégration directe	384
	8.8.6	Schéma hybride ou «téta-schéma»	385
	8.9	Conduction stationnaire.....	385
	8.9.1	Généralités.....	385
	8.9.2	Exemple monodimensionnel avec sources –	

	distorsion numérique	386
8.10	Conduction instationnaire.....	389
8.10.1	Forme générique du système en conduction instationnaire	389
8.10.2	Nombre de Fourier de maille – précision des schémas temporels	390
8.10.3	Stabilité des schémas.....	393
8.11	Convection – diffusion	398
8.11.1	Echelles typiques du problème – nombres sans dimensions.....	398
8.11.2	Décentrage des termes de convection	399
8.11.3	Instabilités en convection instationnaire	403
8.12	Bibliographie	405
CHAPITRE 9	TRANSFERT THERMIQUE GLOBAL	
9.1	Introduction	407
9.2	Transfert thermique global	408
9.3	Intensification du transfert thermique par la croissance du coefficient de transfert thermique global.....	411
9.3.1	Influence de la résistance thermique conductive sur l'intensification du transfert thermique global.....	412
9.3.2	Influence des résistances thermiques superficielles sur l'intensification du transfert thermique global	412
9.4	Intensification du transfert thermique par augmentation de la surface de transfert.....	417
9.4.1	Nervures appliquées sur des surfaces planes	418
9.4.2	Ailettes appliquées sur des surfaces cylindriques	426
9.4.3	Surfaces nervurées	430
9.5	Autres méthodes d'intensification du transfert thermique ...	437
9.5.1	Effet Marangoni	437
9.5.2	Promoteurs de turbulence.....	443
9.5.3	Injection et absorption de la couche limite	445
9.5.4	Action du champ électrostatique	445
9.5.5	Action du champ électromagnétique	446
9.6	Isolation thermique	446
9.6.1	Isolation thermique des murs de bâtiments.....	446
9.6.2	Isolation thermique des conduites	450
9.7	Bibliographie	453
CHAPITRE 10	PROCÉDÉS THERMIQUES COMPLEXES	
10.1	Introduction	455
10.2	Echangeurs de chaleur.....	455
10.2.1	Généralités.....	455
10.2.2	Types constructifs et configuration d'écoulement des fluides.....	456

10.2.3	Eléments de calcul thermique	462
10.2.4	Méthodes pour le calcul thermique des échangeurs..	469
10.2.5	Calcul thermique des échangeurs de chaleur en régime de fonctionnement non stationnaire	483
10.3	Caloducs	488
10.3.1	Généralités.....	488
10.3.2	Principe de fonctionnement.....	489
10.3.3	Aspects fonctionnels hydrodynamiques et thermiques	495
10.3.4	Limitations en fonctionnement	498
10.3.5	Applications de caloducs.....	499
10.4	Fours industriels	506
10.4.1	Généralités.....	506
10.4.2	Fours à flammes	507
10.4.3	Utilisation de l'électricité.....	513
10.5	Bibliographie	529
	Nomenclature	531

ANNEXES

Annexe A.	Unités de mesure	
Annexe B.	Propriétés thermophysiques de certains gaz	
Annexe C.	Propriétés thermophysiques de quelques substances à l'état de saturation	
Annexe D.	Propriétés thermophysiques de quelques métaux	
Annexe E.	Propriétés thermophysiques de quelques solides (non-métalliques)	

Nomenclature	541
Index.....	545
Les auteurs.....	549