



Jean Taine
Franck Enguehard
Estelle lacona

Transferts thermiques

Introduction aux transferts d'énergie

5^e édition

◆ Cours
◆ Exercices corrigés

Master
Écoles d'ingénieurs

DUNOD

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	XIII
Index des notations	XV
PARTIE 1	
PREMIÈRE APPROCHE DES TRANSFERTS THERMIQUES	
Chapitre 1. Les principaux modes de transfert d'énergie	3
1.1 Limitations physiques et objectifs	3
1.1.1 Le système	3
1.1.2 Déséquilibre thermique et équilibre thermodynamique local (E.T.L.)	4
1.1.3 Objectifs des transferts thermiques – Conventions sur les flux	5
1.2 Première notion de flux radiatif	6
1.3 Transfert conductif	8
1.3.1 Flux conductif	8
1.3.2 Ordres de grandeur des conductivités thermiques	10
1.3.3 Systèmes à conductivité apparente très élevée : caloducs	11
1.4 Flux convectif et conducto-convectif	11
1.4.1 Le phénomène de convection	11
1.4.2 Flux surfacique conductif à une paroi, couplé au phénomène de convection	14
1.4.3 Application aux caloducs	16
1.5 Conditions aux limites classiques	18
1.5.1 Exemple 1 : milieu opaque et milieu transparent	18
1.5.2 Exemple 2 : deux milieux opaques	19
1.5.3 Exemple 3 : un milieu (semi-)transparent et un milieu transparent	19
1.5.4 Exemple 4 : contact thermique	19
1.5.5 Exemple 5 : interface entre deux phases	20
1.6 Bilan d'énergie en régime stationnaire sans mouvement	20
1.6.1 Formulation générale du bilan d'énergie	20
1.6.2 Méthodologie de résolution d'un problème de transfert thermique	21
1.6.3 Exercices d'application	22
Exercice 1.1. Chauffage en volume	22
Exercice 1.2. Crayon fissile	24
Chapitre 2. Transferts conductifs stationnaires linéaires	27
2.1 L'analogie électrique et ses limites	27
2.1.1 Principe	27
2.1.2 Exercices d'application	30
Exercice 2.1. Résistances thermiques	30
Exercice 2.2. Le paradoxe de l'isolant, en géométrie cylindrique	31

Transferts thermiques. Introduction aux transferts d'énergie

Exercice 2.3. Résistance thermique d'un élément d'échangeur plan ; coefficient d'échange global	32
2.2 Ailettes et approximation de l'ailette	34
2.2.1 Approximation de l'ailette	35
2.2.2 Calcul de l'efficacité d'une ailette	36
2.2.3 Ailette idéale (isotherme)	38
2.2.4 Ailette infinie	39
2.2.5 Résultats pour diverses géométries d'ailettes	39
2.2.6 Validité de l'approximation de l'ailette au sens du profil de température	39
2.2.7 Résolution générale du problème de l'ailette (conduction stationnaire à plusieurs dimensions)	40
2.2.8 Validité de l'approximation de l'ailette au sens du flux global	42
2.2.9 Exercices d'application	43
Exercice 2.4. Ailette en acier : conditions pratiques de l'approximation de l'ailette	43
Exercice 2.5. Bilan énergétique simplifié d'un appartement	43
Chapitre 3. Conduction instationnaire	49
3.1 Introduction	49
3.2 Théorèmes généraux	52
3.2.1 Théorème de superposition	52
3.2.2 Analyse dimensionnelle – Théorème II	54
3.3 Géométrie semi-infinie. Réponse après un intervalle de temps court	57
3.3.1 Réponse d'un système après un intervalle de temps court	57
3.3.2 Réponse d'un système à une condition extérieure périodique	60
3.3.3 Exercice d'application	63
Exercice 3.1. Contact thermique	63
3.4 Géométrie finie. Réponse d'un système à un instant quelconque	66
3.4.1 Réponse à une perturbation brutale	66
3.4.2 Réponse à un régime forcé	68
3.5 Échelles de temps et de longueur	68
3.5.1 Temps caractéristiques	68
3.5.2 Nombre de Biot	70
3.5.3 Nombre de Fourier	71
3.5.4 Exercices d'application	71
Exercice 3.2. Temps de réponse d'un thermocouple	71
Exercice 3.3. Pont thermique	72
Chapitre 4. Transferts radiatifs entre corps opaques	75
4.1 Domaine du rayonnement thermique	76
4.2 Expression d'un flux monochromatique	78
4.2.1 Flux monochromatique directionnel	78
4.2.2 Expression générale du flux monochromatique hémisphérique	79
4.2.3 Expression du flux monochromatique hémisphérique dans le cas d'un rayonnement isotrope	80
4.2.4 Flux radiatif ; vecteur flux radiatif	81
4.3 Équilibre thermique et propriétés radiatives	82

4.3.1	Absorptivité et réflectivité monochromatiques directionnelles	82
4.3.2	Rayonnement d'équilibre	83
4.3.3	Émissivité monochromatique directionnelle	84
4.3.4	Loi fondamentale du rayonnement thermique	85
4.3.5	Cas particuliers usuels	85
4.4	Propriétés du rayonnement d'équilibre	87
4.5	Modèles simples de transfert radiatif	89
4.5.1	Corps opaque convexe isotherme entouré par un corps noir isotherme	89
4.5.2	Corps opaque convexe de petite dimension et isotherme placé dans une enceinte en équilibre thermique	90
4.5.3	Conditions de linéarisation du flux radiatif	91
4.5.4	Extension au cas de milieux transparents par bandes	92
4.5.5	Exercices d'application	94
	Exercice 4.1. Mesure par thermocouple de la température d'un gaz	94
	Exercice 4.2. Étude thermique d'une ampoule à incandescence	96
4.6	Métrologie radiative; pyrométrie bichromatique	99
4.7	Méthode générale de traitement du transfert radiatif entre corps opaques	101
4.7.1	Expression du flux radiatif	101
4.7.2	Exemple de calcul direct : intérêt des écrans radiatifs	103
4.7.3	La méthode des flux incidents et partants	104
4.7.4	Exercice d'application	107
	Exercice 4.3. Étalon de luminance – corps noir	107
4.7.5	Propriétés des facteurs de forme	110
4.7.6	Exercice d'application	112
	Exercice 4.4. Structure isolante en cryogénie	112
4.8	Généralisation de la méthode	114
4.8.1	Généralisation au cas de parois partiellement transparentes	114
4.8.2	Généralisation au cas de rayonnement(s) incident(s) directionnel(s)	117
Chapitre 5. Introduction aux transferts convectifs		119
5.1	Bilan d'énergie pour un système indéformable	120
5.1.1	Système matériel	120
5.1.2	Premier exemple d'application : une filière	120
5.1.3	Système ouvert à frontières fixes en régime stationnaire	122
5.1.4	Retour sur l'exemple de la filière	123
5.1.5	Exemple 2 : interface solide-liquide, front de fusion	123
5.2	Bilan d'énergie pour un système fluide monophasique	125
5.2.1	Théorèmes de transport	125
5.2.2	Bilan d'énergie (approche simplifiée)	127
5.3	Applications simples : transferts dans une conduite ; échangeurs de chaleur	130
5.3.1	Hypothèses simplificatrices	130
5.3.2	Bilan d'énergie en régime stationnaire	131
5.3.3	Exercice d'application	133
	Exercice 5.1. Performances comparées d'échangeurs de chaleur	133
5.4	Analyse dimensionnelle en convection forcée	138
5.4.1	Notion élémentaire de viscosité	139
5.4.2	Nombres caractéristiques clés	140

Transferts thermiques. Introduction aux transferts d'énergie

5.4.3	Interprétation physique des nombres caractéristiques	142
5.4.4	Notion de similitude en convection forcée	145
5.4.5	Transition entre régimes laminaire et turbulent	145
5.5	Convection forcée externe	148
5.5.1	Convection forcée externe laminaire	148
5.5.2	Convection forcée externe turbulente	151
5.5.3	Exercice d'application	155
	Exercice 5.2. Refroidissement d'une plaque	155
5.6	Convection forcée interne	156
5.6.1	Convection forcée interne laminaire	156
5.6.2	Convection forcée interne turbulente	160
5.6.3	Comparaison entre les transferts turbulents le long d'une plaque et dans un tube	162
5.6.4	Autres écoulements internes ; notion de diamètre hydraulique	165
5.6.5	Exercice d'application	166
	Exercice 5.3. Écoulement dans un tube	166
5.7	Convection naturelle externe	167
5.7.1	Analyse dimensionnelle en convection naturelle externe le long d'une plaque verticale	169
5.7.2	Transition entre régimes laminaire et turbulent le long d'une plaque verticale	172
5.7.3	Principaux résultats pratiques de convection naturelle externe	173
5.7.4	Exercice d'application	175
	Exercice 5.4. Chauffage d'une pièce	175
5.8	Convection naturelle interne	176
5.8.1	Exercice d'application	176
	Exercice 5.5. Lame d'air d'un double vitrage	176
5.9	Convection mixte : compétition entre convection forcée et convection naturelle	177
	Problèmes de synthèse de la partie 1	179
1	Circuit de refroidissement d'un moteur fusée cryogénique	179
2	Thermique élémentaire d'un réacteur à neutrons rapides	182
3	Dimensionnement d'un capteur solaire thermique	187
4	Effet de serre atmosphérique	193

PARTIE 2

TRANSFERTS THERMIQUES AVANCÉS

Chapitre 6. Rayonnement des milieux denses et des gaz	199	
6.1	Généralités	201
6.2	Phénomènes volumiques d'absorption, d'émission et de diffusion	202
6.2.1	Absorption	202
6.2.2	Émission	203
6.2.3	Diffusion	205
6.3	Équation de transfert du rayonnement	207

6.3.1	Formulation locale de l'équation de transfert	207
6.3.2	Couplage avec l'équation de bilan d'énergie	209
6.3.3	Formulation intégrale de l'équation de transfert	210
6.3.4	Conditions aux limites de l'équation de transfert	212
6.3.5	Échelles caractéristiques du rayonnement	214
6.4	Transferts radiatifs en géométrie monodimensionnelle	216
6.4.1	Mur plan homogène et isotherme (sans diffusion)	217
6.4.2	Exercice d'application	219
	Exercice 6.1. Sphère homogène et isotherme (non diffusante)	219
6.4.3	Mur plan non diffusant hétérogène et anisotherme	220
6.5	Cas limites de milieux optiquement minces ou optiquement épais	224
6.5.1	Milieu hétérogène et anisotherme optiquement mince : moyenne de Planck	224
6.5.2	Milieu hétérogène et anisotherme optiquement épais : loi de Fourier radiative ; moyenne de Rosseland	225
6.6	Méthode de dimensionnement : hémisphère équivalente de Hottel	227
6.6.1	Principe de la méthode	227
6.6.2	Exercice d'application	231
	Exercice 6.2. Transferts radiatifs dans un tube	231
6.7	Exemples simples de transferts radiatifs avec diffusion	232
6.7.1	Conductivité radiative d'un milieu diffusant et absorbant optiquement épais	232
6.7.2	Exercice d'application	234
	Exercice 6.3. Caractérisation d'un milieu poreux diffusant	234
6.8	Méthodes générales de transfert radiatif	236
6.8.1	Méthode de tracés de rayons	237
6.8.2	Méthodes d'interpolation et d'ordonnées discrètes	241
6.8.3	Principe de réciprocité, méthode des zones	243
6.8.4	Méthode de Monte-Carlo appliquée aux transferts	246
6.8.5	Approximation différentielle : méthodes $P_1, P_3, \dots, P_{2n+1}$	253
Chapitre 7. Propriétés radiatives des milieux		257
7.1	Propriétés radiatives des milieux denses	258
7.1.1	Milieux denses non diffusants dans des conditions de laboratoire	258
7.1.2	Propriétés radiatives d'une assemblée de particules	261
7.1.3	Matériaux réels	267
7.2	Propriétés radiatives des gaz	274
7.2.1	Approche raie par raie	275
7.2.2	Les phénomènes de corrélations spectrales	278
7.2.3	Modèle statistique à bandes étroites	281
7.2.4	Modèle CK	286
7.2.5	Modèles globaux	289
7.2.6	Comparaison entre modèles approchés	291
7.2.7	Abaques de Hottel	292

Transferts thermiques. Introduction aux transferts d'énergie

Chapitre 8. Équations générales de la convection (fluide monophasique)	293
8.1 Équations de bilan pour un fluide homogène	293
8.1.1 Dépendance en température et pression des grandeurs thermophysiques	293
8.1.2 Bilan de quantité de mouvement	294
8.1.3 Bilan d'énergie	296
8.2 Équations de bilan pour un fluide hétérogène	299
8.2.1 Bilan de masse d'une espèce	300
8.2.2 Bilan d'une grandeur relative à une espèce s	302
8.2.3 Bilan d'énergie d'un fluide monophasique hétérogène	302
8.3 Équations de bilan adimensionnées (transformations isovolumes)	304
8.3.1 Convection thermique	304
8.3.2 Convection avec transfert de masse	307
8.4 Analogie entre transferts thermiques et transferts massiques	309
8.4.1 Grandeurs et échelles caractéristiques en diffusion d'espèces	309
8.4.2 Principaux nombres caractéristiques en convection	310
8.4.3 Conclusion : usage des analogies en convection	312
8.5 Couches limites en convection forcée externe laminaire	313
8.5.1 Approximation de la couche limite	313
8.5.2 Solution par la méthode intégrale	315
8.6 Couches limites en convection naturelle externe laminaire	317
8.7 Convection forcée interne laminaire	318
8.7.1 Établissement du régime mécanique dans une conduite	319
8.7.2 Établissement du régime thermique dans une conduite	321
8.8 Convection naturelle interne laminaire	324
Chapitre 9. Transferts turbulents	325
9.1 Équations de bilan et échelles caractéristiques	326
9.1.1 Équations locales instationnaires de bilan	326
9.1.2 Équations statistiques de bilan en turbulence	327
9.1.3 Échelles mécaniques caractéristiques de la turbulence	330
9.1.4 Échelles caractéristiques thermiques et scalaires	335
9.1.5 Cascade énergétique	336
9.2 Écoulement turbulent au voisinage d'une paroi	337
9.2.1 Contrainte totale τ_{tot}	339
9.2.2 Flux surfacique thermique radial total	340
9.2.3 Structure de l'écoulement	342
9.2.4 Cas d'un fluide de masse volumique variable	348
9.2.5 Couplages avec le rayonnement	348
9.2.6 Structure d'un écoulement turbulent dans une autre géométrie	349
9.3 Les différentes voies de modélisation	349
9.3.1 Simulation numérique directe de la turbulence	350
9.3.2 Méthodes fondées sur des équations statistiques de bilan et la diffusion turbulente	352
9.3.3 Simulation des grandes échelles de la turbulence	359

Chapitre 10. Bases physiques des transferts thermiques	361
10.1 Fonction de distribution des vitesses, Luminance, Flux	362
10.1.1 Fonctions de distribution des vitesses	363
10.1.2 Vitesses et énergies macroscopiques	364
10.1.3 Flux de diffusion	365
10.1.4 Flux radiatif et luminance	369
10.2 Équilibre Thermodynamique Parfait	370
10.2.1 Équilibre thermodynamique parfait du système matériel	371
10.2.2 Équilibre thermodynamique parfait du champ de rayonnement, loi de Planck	372
10.2.3 Interprétation physique de la loi de Planck (modèle d'Einstein)	373
10.3 Équations d'évolution	375
10.3.1 Équation d'évolution de la distribution des vitesses	375
10.3.2 Équation de transfert du rayonnement pour un gaz	382
10.4 Équilibre Thermodynamique Local et flux de diffusion	384
10.4.1 Système matériel	385
10.4.2 Exercice d'application	390
Exercice 10.1. Modèle grossier de viscosité et conductivité thermique	390
10.4.3 ETL et solution de perturbation pour le champ de rayonnement	393
10.5 Non équilibre du système matériel : nanosystèmes et milieux raréfiés	394
10.5.1 Conditions de Non équilibre	394
10.5.2 Exercice d'application	396
Exercice 10.2. Régime ballistique d'une assemblée de particules	396
Complément A. Quelques méthodes mathématiques de la diffusion	401
A.1 Utilisation de la transformation de Laplace	401
A.2 Utilisation de la méthode de séparation des variables	405
A.3 Utilisation de la fonction de Green en conduction	406
Complément B. Fonctions et équations usuelles	413
B.1 Fonctions d'erreur (conduction instationnaire)	413
B.2 Fonctions intégréo-exponentielles (rayonnement)	414
B.3 Tenseurs usuels en transferts (convection)	414
B.4 Équations utiles en convection (coordonnées cartésiennes et cylindriques)	420
Complément C. Corrélations de convection	423
C.1 Convection forcée externe	423
C.1.1 Écoulement parallèle à une <i>paroi plane</i> (ou à une paroi de faible courbure)	423
C.1.2 Écoulement perpendiculaire à l'axe d'un cylindre de section circulaire	425
C.1.3 Écoulement impactant une sphère	425
C.1.4 Autres configurations	425
C.2 Convection forcée interne	425
C.2.1 Tube de section circulaire	425

Transferts thermiques. Introduction aux transferts d'énergie

C.2.2	Plaques parallèles	428
C.2.3	Autres cas	429
C.3	Convection naturelle externe	429
C.3.1	Paroi verticale plane	429
C.3.2	Paroi plane inclinée	431
C.3.3	Paroi horizontale plane	431
C.3.4	Cylindre isotherme vertical	432
C.3.5	Cylindre horizontal	432
C.3.6	Sphère	432
C.3.7	Autres cas	432
C.4	Convection naturelle interne	432
C.4.1	Enceinte rectangulaire bi-dimensionnelle, infinie dans une direction horizontale	432
C.4.2	Autres cas	433

Complément D. Quelques propriétés thermophysiques (conduction et convection) 435

D.1	Gaz à pression atmosphérique	435
D.2	Liquides	439
D.3	Solides	442

Complément E. Quelques données radiatives 445

E.1	Rayonnement d'équilibre	445
E.2	Quelques facteurs de forme	447
E.3	Emissivités totales des gaz	448

Complément F. Données diverses 451

F.1	Conversions d'échelles de température	451
F.2	Conversions d'unités diverses	451

Bibliographie 453

Index 461

Jean Taine
Franck Enguehard
Estelle Iacona

Transferts thermiques

Introduction aux transferts d'énergie

Les transferts thermiques sont une **science clé de l'énergie**. Destiné en priorité aux étudiants en Master et aux élèves ingénieurs, cet ouvrage aborde les principaux modes de transferts d'énergie : la **conduction**, le **rayonnement** et la **convection**.

Ces phénomènes très différents, mais pouvant interagir, doivent être connus de l'étudiant qui sera confronté un jour ou l'autre à un problème de transfert thermique. Il trouvera dans ce cours de nombreuses **applications concrètes** (centrales nucléaires, panneaux solaires, propulseur Vulcain...) ainsi que de nombreux **exercices corrigés**.

Dans cette **5^e édition entièrement actualisée**, la priorité est donnée à la compréhension physique des phénomènes et à l'apprentissage de la modélisation physique. Le chapitre sur les transferts turbulents a été entièrement refondu pour intégrer des avancées récentes en modélisation. Un nouveau chapitre « Bases physiques des transferts » constitue une introduction à la nanothermique.

5^e édition

Jean Taine,
Franck Enguehard
et Estelle Iacona
sont professeurs à
l'École Centrale Paris.



9 782100 710140

8333317

ISBN 978-2-10-071014-0



Les actus

du savoir


DUNOD
dunod.com