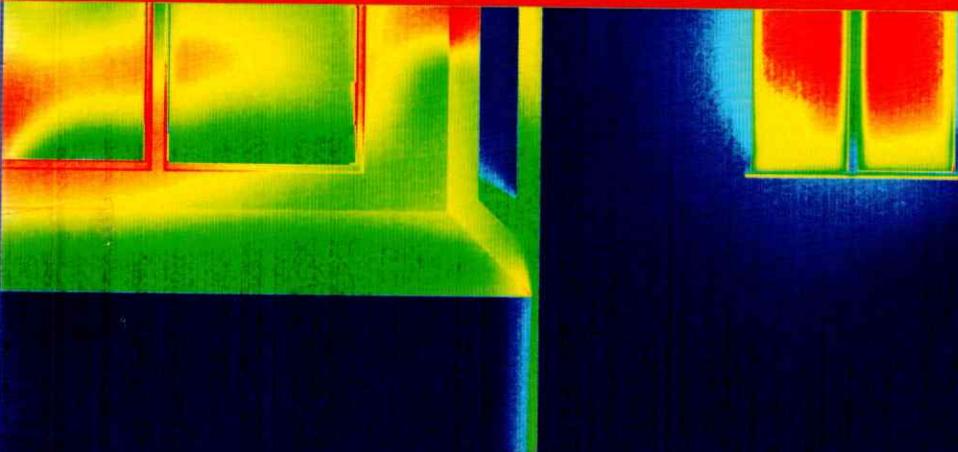


Coordonnateur
Jean-François Sacadura

Transferts thermiques

Initiation et approfondissement



Lavoisier
TEC & DOC

Table

Liste des auteurs	V
Avant-propos	XV
Principales abréviations	XVII
Principaux symboles	XXI

Chapitre 1

Initiation aux transferts thermiques

1. Thermodynamique et transferts thermiques	1
2. Les différents modes de transfert de la chaleur	2
2.1. Conduction	3
2.2. Rayonnement	3
2.3. Convection	4
2.4. Échange de chaleur lors d'un changement de phase. Combinaison des différents modes de transfert	4
3. Schéma de l'étude	5

Chapitre 2

Transferts de chaleur par conduction

1. Phénoménologie. Notions de base	8
1.1. Champ de température, lignes de flux, surfaces isothermes	8
1.2. Gradient de température	8
2. Loi de Fourier	9
2.1. Loi de Fourier pour un milieu isotrope	9
2.2. Vecteur densité de flux	11
2.3. Loi de Fourier en milieu anisotrope	11
2.4. Conductivité thermique. Ordres de grandeur. Évolution avec la température et la pression	12
3. Équation de diffusion de la chaleur (ou équation de la conduction)	14
3.1. Forme générale pour un milieu homogène et isotrope	14
3.2. Diverses formes de l'équation de la conduction	18
3.3. Conditions aux limites et condition initiale	20
4. Conduction stationnaire avec λ constante	25
4.1. Paroi plane avec génération volumique de chaleur	25
4.2. Paroi plane sans génération volumique de chaleur	25
4.3. Géométrie cylindrique monodimensionnelle	32
4.4. Sphère	37
4.5. Ailettes. Modèle de la barre	38
4.6. Milieu semi-infini : méthode des images	48

5. Conduction instationnaire	53
5.1. Épaisseur affectée thermiquement	54
5.2. Méthode du corps à température quasi-uniforme	55
5.3. Plaque plane, cylindre long, sphère : solutions analytiques monodimensionnelles	60
5.4. Milieu semi-infini	75
5.5. Milieu semi-infini en régime sinusoïdal	84
5.6. Méthode des quadripôles thermiques	88
5.7. Extension des solutions 1D aux cas multidimensionnels	92
6. Résolution numérique de problèmes de conduction par différences finies	95
6.1. Régime permanent	95
6.2. Régime instationnaire	104
Bibliographie	113
Exercices	115

Chapitre 3

Transferts convectifs

1. Introduction	127
2. Équations de la convection	130
2.1. Conservation de la masse	131
2.2. Conservation de la quantité de mouvement	134
2.3. Conservation de l'énergie	139
2.4. Conditions aux limites	144
2.5. Approximation à faible nombre de Mach	145
2.6. Approximation de Boussinesq	147
2.7. Nombres sans dimension en convection	149
2.8. Écoulements turbulents	154
3. Convection forcée externe	156
3.1. Écoulement de couche limite laminaire	158
3.2. Écoulement de couche limite turbulente	175
3.3. Écoulement autour d'un cylindre et d'une sphère	186
4. Convection forcée dans les conduites	191
4.1. Écoulement dans une conduite	192
4.2. Transferts thermiques en conduite en régime laminaire	198
4.3. Transferts thermiques en conduite en régime turbulent	213
4.4. Prise en compte des variations des propriétés du fluide	218
4.5. La transition laminaire-turbulent en conduite	220
4.6. Transferts convectifs en conduite pour les métaux liquides	222
5. Convection naturelle et mixte	223
5.1. Les équations adimensionnelles de convection revisitées	223
5.2. Convection naturelle sur une paroi verticale	226

Tables de corrélations	246
Bibliographie	256
Exercices	261

Chapitre 4

Rayonnement thermique

1. Introduction	265
1.1. Exemples choisis de problèmes : questions posées en rayonnement thermique	265
1.2. Nature du rayonnement thermique	267
2. Fondements et concepts : bases de la physique et de la description du rayonnement thermique	268
2.1. Flux radiatifs	268
2.2. Gain, perte et redistribution angulaire de puissance thermique sous forme radiative	275
2.3. Rayonnement thermique d'équilibre – corps noir	278
2.4. Modèles de transfert thermique radiatif	285
3. Modèle des échanges thermiques radiatifs entre corps opaques séparés par un milieu transparent	285
3.1. Modèle des corps opaques	285
3.2. Émission de rayonnement par des corps opaques	286
3.3. Réception du rayonnement par un corps opaque	291
3.4. Flux radiatif partant d'une surface	297
3.5. Flux net radiatif	298
3.6. Échanges radiatifs entre deux corps opaques : introduction du facteur de forme	299
3.7. Propriétés et évaluation des facteurs de forme	301
3.8. Flux net échangé entre deux surfaces	310
3.9. Évaluation des échanges dans une enceinte	310
3.10. Analogie électrique	314
4. Modèles des transferts thermiques radiatifs dans les milieux semi-transparents	319
4.1. Introduction à la semi-transparence	319
4.2. L'équation de Transfert Radiatif (ETR)	320
4.3. Flux net radiatif et source de puissance radiative	332
4.4. Conditions aux limites. Réflexion et réfraction à une interface entre deux milieux	334
4.5. Propriétés radiatives de milieux semi-transparents : quelques exemples	339
4.6. Résoudre un problème de rayonnement thermique en milieu semi-transparent. Éléments sur les méthodes de résolution de l'ETR	342
5. Conclusion	352

Chapitre 5

Transferts avec changement de phase fluide-fluide

1. Introduction – Rappels	359
1.1. Pression de vapeur saturante, température de saturation	360
1.2. Chaleur latente de vaporisation	360
1.3. Titre en vapeur	360
1.4. Tension superficielle	361
2. Ébullition	362
2.1. Ébullition en vase	363
Exercice	370
2.2. Ébullition convective	373
3. Condensation	375
3.1. Modèle fondamental : théorie de Nusselt pour la condensation en film sur une plaque plane verticale	385
Exercice	385
3.2. Condensation sur des surfaces cylindriques horizontales	389
3.3. Condensation intratubulaire	392
3.4. Condensation en gouttes	396
4. Application des transferts de chaleur avec changement de phase : exemple des caloducs	399
4.1. Technologie et principe de fonctionnement des caloducs	400
4.2. Exemple de dimensionnement d'un caloduc cylindrique	400
4.3. Exemple de dimensionnement d'une boucle capillaire	404
4.4. Conclusion	407
5. Transferts de chaleur et de masse par évaporation	410
5.1. Liens entre les transferts de masse et les transferts de chaleur	410
5.2. Introduction au transfert de masse	413
5.3. Transfert de masse par diffusion	418
5.4. Transfert de masse par convection	426
5.5. Flux de chaleur échangés	430
5.6. Application : tour de refroidissement	432
5.7. Conclusion	435
Bibliographie	436

Chapitre 6

Transferts par différents modes combinés, exemples

1. Introduction	440
2. Cas stationnaire	441
2.1. Exemple du double vitrage	441
2.2. Exemple d'un radiateur à circulation d'eau chaude	449
2.3. Exemple d'un câble électrique	457
3. Cas instationnaire	460

4. Conclusion	470
Bibliographie	470

Chapitre 7

Échangeurs de chaleur : notions

1. Principaux types d'échangeurs à fluides séparés	471
2. Classification selon les écoulements	474
3. Distribution des températures	475
4. Étude d'un échangeur	476
5. Évaluation des performances thermiques d'un échangeur en régime permanent	477
5.1. Équation de bilan d'échange local à travers un élément de paroi	477
5.2. Méthode DTML	477
5.3. Évaluation du coefficient d'échange global	482
6. Efficacité d'un échangeur	493
6.1. Efficacité d'un échangeur à co-courants	494
6.2. Expressions de E pour d'autres configurations d'écoulements	495
7. Méthode du nombre d'unités de transfert (NUT)	496
8. Exemple numérique	498
9. Comparaison des méthodes DTML et NUT	499
10. Exemple de synthèse : échangeur compact gaz-liquide	500
10.1. Évaluation des différentes caractéristiques géométriques	501
10.2. Recherche des propriétés physiques des fluides dans les tables	502
10.3. Nombres de Reynolds des écoulements : $Re = D_h G/\mu$	503
10.4. Nombres de Nusselt et de Stanton	503
10.5. Coefficients de convection fluides/parois	503
10.6. Évaluation du coefficient d'efficacité de la surface ailetée (côté air)	504
10.7. Évaluation du coefficient d'échange global rapporté à l'unité de surface d'échange du côté air	504
10.8. NUT et efficacité E	504
10.9. Calcul des températures de sortie T_{cs} et T_{fs}	505
11. Conclusion	505
Bibliographie	506
Autres références	506
Exercices	506

Chapitre 8

Métrologie thermique et méthodes inverses

1. Éléments de métrologie en transferts thermiques	509
1.1. Métrologie des températures par contact	510
1.2. Métrologie des températures sans contact	520

2.1 Introduction 537
 2.2 Estimation de températures et de flux surfaciques..... 539
 2.3 Description des méthodes de conduction inverse..... 544
 2.4 Méthode de spécification de fonction 545
 2.5 Conclusions sur l'estimation de la température et du flux surfacique 552
 2.6 Estimation de propriétés thermophysiques..... 553
 2.7 Méthodes stochastiques..... 564
 2.8. Conclusions..... 565
 Bibliographie..... 566

Chapitre 9

Transferts thermiques aux petites échelles

1. Conduction thermique à l'échelle nanométrique 570
 1.1. Introduction 570
 1.2. Conduction thermique dans les gaz..... 576
 1.3. Conduction thermique dans les solides ordonnés..... 594
 1.4. Matériaux amorphes, polymères et désorganisés..... 623
 1.5. Pour aller plus loin..... 624
 2. Rayonnement thermique aux échelles sub-longueur d'onde 625
 2.1. Introduction 625
 2.2. Approche électromagnétique du rayonnement thermique 627
 2.3. Rayonnement thermique d'un corps semi-infini 642
 2.4. Échange de rayonnement thermique par des corps en champ proche 653
 2.5. Rayonnement thermique d'un corps sub-longueur d'onde 663
 2.6. Autres géométries, perspectives et applications..... 666
 3. Transferts convectifs en microcanaux et nanofluidique..... 668
 3.1. Introduction 668
 3.2. Transfert monophasique 669
 3.3. Transfert avec changement de phase..... 673
 3.4. Nanofluides..... 687
 3.5. Conclusions et perspectives..... 690
 Bibliographie..... 691

Annexes

Annexe 1 : Fonctions Erf, Erfc et fonctions de Bessel de 1^{re} espèce, J0 et J1. 702
 Annexe 2 : Unités et conversions..... 704
 Annexe 2.1 : Système international d'unités (S.I.) 704
 Annexe 2.2 : Conversions entre les unités du système international (S.I.) et celles de l'ancien système dit « technique » 704
 Annexe 2.3 : Conversions d'unités anglo-américaines et autres en unités S.I. 705

Annexe 3.2 : Propriétés de solides non métalliques..... 707
 Annexe 3.3 : Propriétés de quelques liquides sous pression de saturation 711
 Annexe 3.4 : Propriétés de la vapeur d'eau surchauffée 713
 Annexe 3.5 : Propriétés de quelques gaz à la pression atmosphérique normale 714
 Annexe 4 : Fonction $F_{0, \lambda T}(\Delta T)$ 717
 Annexe 5 : Émissivités..... 721
 Annexe 5.1 : Émissivités totales normales 721
 Annexe 5.2 : Émissivités totales hémisphériques 724
 Bibliographie..... 725
 Index 727



Cet ouvrage est destiné à prendre le relais du livre *Initiation aux transferts thermiques*. Conçu comme un ouvrage de formation continue dans le cadre du Centre d'Actualisation Scientifique et Technique (le CAST, fondu depuis dans INSAVALOR), à l'INSA de Lyon, *Transferts thermiques* demeure le recueil de base pour la formation initiale et continue en thermique d'un très grand nombre d'ingénieurs et de techniciens dans les pays francophones.

Dans la suite du premier, ce nouveau livre est un ouvrage collectif d'enseignants-chercheurs et de chercheurs spécialistes des différents sujets abordés. **La cible de l'ouvrage s'est élargie : aux ingénieurs et techniciens de l'industrie s'ajoutent les chercheurs, la thermique étant désormais reconnue comme un domaine incontournable de la recherche scientifique.** Comprendre la physique des transferts de chaleur, acquérir des outils et des méthodologies pour analyser, modéliser, dimensionner, prédire, en faisant la part toujours belle aux méthodes analytiques, tels sont les objectifs de cet ouvrage.

Transferts thermiques vise non seulement à **guider les débuts dans la thermique**, mais aussi à **aider dans la progression**. Il apporte notamment **une ouverture sur des sujets comme la micro- et nanothermique** ou les **méthodes inverses en thermique**, domaines récents et en constante progression. Le premier ouvre des perspectives prometteuses sur de nouvelles technologies, tandis que le second a redessiné les contours de la métrologie thermique et de la conception des expériences en thermique. L'ouvrage est illustré par de nombreux exemples traités de manière détaillée dans le texte et des exercices avec réponses sont disponibles à la fin de la plupart des chapitres.

Jean-François Sacadura, Professeur émérite des Universités à l'INSA de Lyon, a consacré sa carrière à l'enseignement et à la recherche dans le domaine des transferts de chaleur et de la thermophysique.

Les auteurs sont des enseignants-chercheurs et chercheurs rattachés, ou l'ayant été, au CETHIL, le Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon, et à l'INSA de Lyon, à l'Université Claude Bernard Lyon 1 ou au CNRS. Deux d'entre eux sont depuis à l'Université Savoie - Mont Blanc et dans l'industrie.

editions.lavoisier.fr



978-2-7430-1993-8