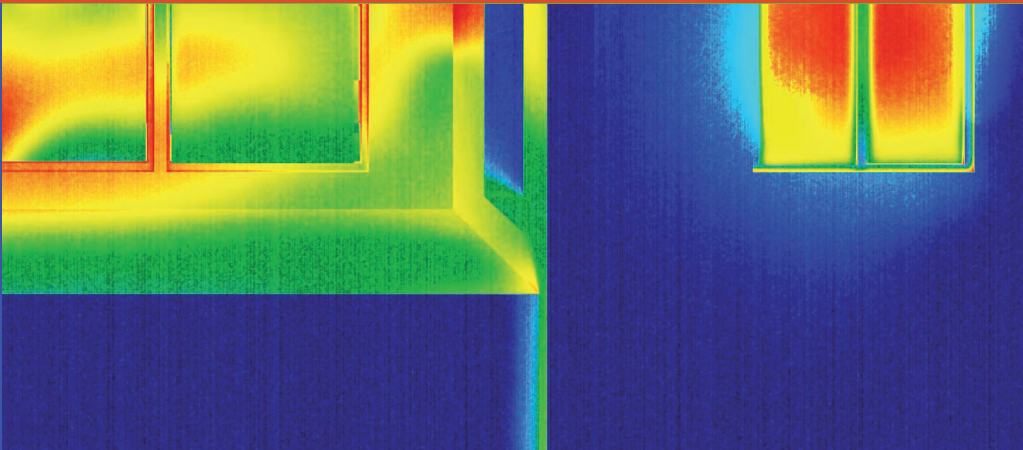


Coordonnateur
Jean-François Sacadura

Transferts thermiques

Initiation et approfondissement



Lavoisier
TEC & DOC

Transferts thermiques

Initiation et approfondissement

Chez le même éditeur :

Géostructures énergétiques

Collection « Génie civil »

L. Lalaoui, A. Di Donna, 2014

Systèmes diphasiques : éléments fondamentaux et applications industrielles

Collection « Science et ingénierie des matériaux »

J. Woillez, 2014

Modélisation des écoulements multiphasiques turbulents hors d'équilibre

Collection « Mécanique des fluides »

R. Borghi, F. Anselmet, 2014

*Chocs et impacts sur les matériaux et les structures :
de la théorie aux méthodes de l'ingénieur*

Collection « Génie civil »

P. Bailly, 2013

Direction éditoriale : Fabienne Roulleaux
Édition : Céline Bénard, Solène Le Gabellec
Fabrication : Estelle Perez
Couverture : Isabelle Godenèche
Composition : STDI, Lassay-les-Châteaux
Impression : Laballery, Clamecy

© 2015, Lavoisier, Paris
ISBN : 978-2-7430-1993-8

Transferts thermiques

Initiation et approfondissement

Coordonnateur
Jean-François Sacadura

Professeur des Universités émérite à l'INSA de Lyon
Membre fondateur et ancien directeur du CETHIL
Co-rédacteur en chef de *High Temperatures – High Pressures*


TEC & DOC

editions.lavoisier.fr

Liste des auteurs

Jocelyn BONJOUR

Professeur des universités, INSA de Lyon
Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon (CETHIL)

Pierre-Olivier CHAPUIS

Chargé de recherche, CNRS
Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon (CETHIL)

Agnès DELMAS

Maître de conférences, INSA de Lyon
Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon (CETHIL)

Ronnie KNIKKER

Maître de conférences, INSA de Lyon
Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon (CETHIL)

Frédéric LEFÈVRE

Professeur des universités, INSA de Lyon
Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon (CETHIL)

Stéphane LIPS

Maître de conférences, INSA de Lyon
Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon (CETHIL)

Hervé PABIOU

Chargé de recherche, CNRS
Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon (CETHIL)

Martin RAYNAUD

Professeur des universités, INSA de Lyon.
Expert Thermique, Thales Communications & Security

Rémi REVELLIN

Maître de conférences, INSA de Lyon
Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon (CETHIL)

Jean-François SACADURA

Professeur émérite, INSA de Lyon
Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon (CETHIL)

Valérie SARTRE

Maître de conférences, INSA de Lyon
Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon (CETHIL)

Rodolphe VAILLON

Directeur de recherche, CNRS
Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon (CETHIL)

Monika WOLOSZYN

Professeur des universités, Université Savoie Mont Blanc
Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement (LOCIE)

Le CETHIL est une Unité Mixte de Recherche (UMR 5008) de l'INSA de Lyon, de l'Université Claude Bernard Lyon 1 et du CNRS.

Le LOCIE est une Unité Mixte de Recherche (UMR 5271) de l'Université Savoie-Mont-Blanc et du CNRS.

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	225
5.3. Autres configurations de convection naturelle externe	234
5.4. Convection mixte	239

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
Bibliographie	352
Exercices	353

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
Exercice	373
2.2. Ébullition convective	375
3. Condensation	385
3.1. Modèle fondamental : théorie de Nusselt pour la condensation en film sur une plaque plane verticale	385
Exercice	389
3.2. Condensation sur des surfaces cylindriques horizontales	392
3.3. Condensation intratubulaire	396
3.4. Condensation en gouttes	399
4. Application des transferts de chaleur avec changement de phase : exemple des caloducs	400
4.1. Technologie et principe de fonctionnement des caloducs	400
4.2. Exemple de dimensionnement d'un caloduc cylindrique	404
4.3. Exemple de dimensionnement d'une boucle capillaire	407
4.4. Conclusion	410
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
3.1. Résolution	465
3.2. Exemple numérique	466

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
1.3. Mesure de densité de flux de chaleur.....	529
2. Méthodes inverses.....	537

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, J ₀ et J ₁	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 : Propriétés thermophysiques (autres que radiatives)	706
Annexe 3.1 : Propriétés de solides métalliques	706

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 $F_{0-\lambda T}(\lambda T)$	717
Annexe 5 : Émissivités	721
Annexe 5.1 : Émissivités totales normales	721
Annexe 5.2 : Émissivités totales hémisphériques	724
Bibliographie	725
Index	727

Avant-propos

Cet ouvrage est une nouvelle édition presque totalement réécrite du livre *Initiation aux transferts thermiques*, paru initialement en 1980, à une époque où l'on trouvait très peu d'ouvrages en langue française sur ce sujet, surtout écrits pour des ingénieurs et par des universitaires qui étaient aussi des ingénieurs et avaient en outre l'expérience de la formation continue d'ingénieurs et techniciens de l'industrie.

C'était aussi une époque où, l'énergie étant peu coûteuse, les aspects thermiques étaient peu ou mal pris en considération dans la plupart des secteurs industriels et économiques, hormis ceux où la thermique était déjà identifiée comme une barrière technologique, notamment dans les domaines aérospatial et nucléaire. Corrélativement, les transferts thermiques étaient peu enseignés dans les formations techniques, où la distinction n'était pas toujours faite entre thermique et thermodynamique. Certains même considéraient la thermique comme faisant partie d'autres disciplines telles que la mécanique des fluides ou le génie des procédés !

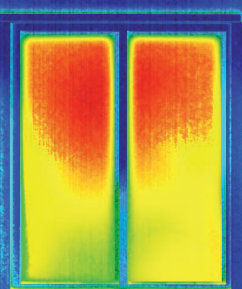
Depuis, la situation a bien changé et les transferts thermiques ont totalement émergé pour devenir une discipline clé des sciences de l'ingénieur. Le mouvement est venu de l'industrie et a gagné progressivement tous ses secteurs, même les plus traditionnels, comme le bâtiment. Notre livre, en étant présent sur les bureaux des ingénieurs et techniciens ayant des préoccupations en thermique, a accompagné et, nous l'espérons aussi, contribué à cette évolution.

Dès la première édition, le parti avait été pris d'un ouvrage collectif, présentant l'avantage que les différents sujets soient traités par des auteurs qui sont des enseignants et aussi des chercheurs dans les différents domaines abordés, apportant ainsi la valeur ajoutée de leur expérience et de leur contribution personnelle au domaine. L'équipe initiale, à laquelle nous rendons hommage, étant aujourd'hui à la retraite, c'est une nouvelle équipe qui a été réunie autour de ce projet, formée d'enseignants et chercheurs rattachés, ou l'ayant été, au Centre d'énergétique et de thermique de Lyon (CETHIL), à l'INSA de Lyon, à l'Université Claude Bernard de Lyon ou au CNRS. L'esprit initial est conservé, mais la cible est élargie, puisqu'à la formation d'ingénieurs et de techniciens de l'industrie s'ajoute celle des chercheurs, la thermique étant désormais également reconnue comme un domaine incontournable de la recherche scientifique.

Comprendre la physique, apporter les outils et méthodologies d'analyse, modélisation, dimensionnement, prédiction, en faisant la part toujours belle aux méthodes analytiques qui permettent, moyennant des simplifications, d'obtenir de manière assez immédiate des ordres de grandeur préalables à des modélisations numériques, tels sont les objectifs de cet ouvrage. Son contenu commence

toujours par la présentation des trois modes fondamentaux de transfert thermique : conduction, convection, rayonnement. Dans le chapitre sur les transferts convectifs, le lecteur trouvera une description des équations de conservation où la physique est très présente. Après la présentation des solutions analytiques, les diverses corrélations permettant de traiter les problèmes pratiques ont été révisitées, pour la plupart à partir de leur publication d'origine, et sont commentées, de manière à éviter l'écueil trop fréquent en la matière du « catalogue de corrélations ». La présentation des transferts radiatifs, dépourvue de la traditionnelle dichotomie entre le rayonnement des surfaces et celui des milieux semi-transparents, est innovante. Viennent ensuite : les transferts avec changement de phase liquide-vapeur, illustrés par des applications (caloducs, aérorefrigérants, etc.), les transferts mettant en jeu différents modes, des notions sur les échangeurs thermiques, domaine industriel toujours très important et excellente illustration des transferts thermiques. Comme dans l'édition précédente, un chapitre est dédié à la métrologie thermique. De nouveaux sujets ont été ajoutés, correspondant à des développements majeurs observés en thermique au cours des dernières décennies. Il s'agit notamment de la micro- et de la nano-thermique et des méthodes inverses en thermique. Ce sont des sujets qui, à eux seuls, donnent lieu à des ouvrages spécialisés, généralement d'un certain niveau de complexité. Les aborder revient souvent à déplacer les frontières traditionnelles de la thermique vers la physique. Nous nous limitons ici à apporter une ouverture sur ces sujets prometteurs et en évolution permanente, fournissant au lecteur intéressé des pistes « pour en savoir plus ». L'ouvrage est illustré tout au long par de nombreux exemples traités de manière détaillée et des exercices avec réponses sont disponibles à la fin des principaux chapitres.

Nous espérons ainsi que cet ouvrage prendra tout naturellement le relais de *Initiation aux transferts thermiques*, en répondant aux attentes des lecteurs.



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.

