

SCIENCES SUP

*Cours et exercices d'application*

L3 • Master • Écoles d'ingénieurs

# TRANSFERTS THERMIQUES

Introduction  
aux transferts d'énergie

4<sup>e</sup> édition

*Jean Taine  
Estelle Iacona  
Jean-Pierre Petit*

DUNOD

# Table des matières

|                     |      |
|---------------------|------|
| <b>PRÉFACE</b>      | iii  |
| <b>AVANT-PROPOS</b> | xi   |
| <b>NOTATIONS</b>    | xiii |

## PARTIE I

### PREMIÈRE APPROCHE DES TRANSFERTS THERMIQUES

|   |    |
|---|----|
| <b>CHAPITRE 1 • LES PRINCIPAUX MODES DE TRANSFERT D'ÉNERGIE</b> ..... | 3  |
| 1.1 Limitations physiques et objectifs.....                           | 3  |
| 1.2 Première notion de flux radiatif.....                             | 6  |
| 1.3 Transfert conductif.....  | 8  |
| 1.4 Flux convectif et conducto-convectif.....                         | 11 |
| 1.5 Conditions aux limites classiques.....                            | 17 |
| 1.6 Bilan d'énergie en régime stationnaire sans mouvement.....        | 20 |
| Problèmes d'application.....  | 21 |
| <b>CHAPITRE 2 • TRANSFERTS CONDUCTIFS LINÉAIRES</b> .....             | 25 |
| 2.1 L'analogie électrique et ses limites.....                         | 25 |
| 2.2 Ailettes et approximation de l'ailette.....                       | 32 |
| Problème d'application.....   | 42 |
| <b>CHAPITRE 3 • CONDUCTION INSTATIONNAIRE</b> .....                   | 49 |
| 3.1 Introduction et limitation de l'étude.....                        | 49 |

|   |   |            |
|---|---|------------|
| 3.2   | Théorèmes généraux.....   | 52         |
| 3.3   | Géométrie semi-infinie. Réponse après un intervalle de temps court.....           | 57         |
| 3.4   | Géométrie finie. Réponse d'un système à un instant quelconque .....               | 65         |
| 3.5   | Échelles de temps et de longueur.....   | 67         |
| <b>CHAPITRE 4 • INTRODUCTION AUX TRANSFERTS CONVECTIFS.....</b>                     |   | <b>71</b>  |
| 4.1   | Bilan d'énergie pour un système indéformable .....                                | 72         |
| 4.2   | Système fluide monophasique.....  | 76         |
| 4.3   | Applications simples : transferts dans une conduite ; échangeurs de chaleur ..... | 80         |
| 4.4   | Analyse dimensionnelle en convection forcée .....                                 | 83         |
| 4.5   | Convection forcée en régime laminaire .....                                       | 91         |
| 4.6   | Convection forcée en régime turbulent .....                                       | 97         |
| 4.7   | Notion sur la convection naturelle thermique .....                                | 105        |
|   | Problème d'application.....   | 114        |
| <b>CHAPITRE 5 • INTRODUCTION AUX TRANSFERTS RADIATIFS ENTRE CORPS OPAQUES .....</b> |   | <b>121</b> |
| 5.1   | Domaine du rayonnement thermique.....   | 122        |
| 5.2   | Expression d'un flux monochromatique.....   | 124        |
| 5.3   | Équilibre thermique et propriétés radiatives .....                                | 128        |
| 5.4   | Propriétés du rayonnement d'équilibre.....  | 132        |
| 5.5   | Modèles simples de transfert radiatif .....                                       | 134        |
| 5.6   | Métrologie radiative ; pyrométrie bichromatique .....                             | 140        |
|   | Problèmes d'application.....  | 142        |
| <b>PROBLÈMES DE SYNTHÈSE .....</b>  |   | <b>147</b> |
| <b>ANNEXE A • UTILISATION DE LA TRANSFORMATION DE LAPLACE .....</b>                 |   | <b>163</b> |
| <b>ANNEXE B • UTILISATION DE LA MÉTHODE DE SÉPARATION DES VARIABLES .....</b>       |   | <b>167</b> |

|                             |  |            |
|-----------------------------|--|------------|
| ANNEXE C •                  | <b>UTILISATION DE LA FONCTION DE GREEN EN CONDUCTION . . . .</b>         | <b>169</b> |
| <b>PARTIE II</b>            |  |            |
| <b>TRANSFERTS RADIATIFS</b> |  |            |
| CHAPITRE 6 •                | <b>TRANSFERTS RADIATIFS ENTRE CORPS OPAQUES . . . . .</b>                | <b>177</b> |
| 6.1                         | Le problème général des transferts radiatifs . . . . .                   | 177        |
| 6.2                         | La méthode des flux incident et partant . . . . .                        | 180        |
| 6.3                         | Propriétés des facteurs de forme . . . . .                               | 186        |
| 6.4                         | Généralisation de la méthode . . . . .                                   | 190        |
| CHAPITRE 7 •                | <b>RAYONNEMENT DES MILIEUX DENSES ET DES GAZ . . . . .</b>               | <b>195</b> |
| 7.1                         | Généralités . . . . .  | 197        |
| 7.2                         | Phénomènes volumiques d'absorption, d'émission et de diffusion . . . . . | 198        |
| 7.3                         | Équation de transfert du rayonnement . . . . .                           | 203        |
| 7.4                         | Transferts radiatifs en géométrie monodimensionnelle . . . . .           | 211        |
| 7.5                         | Cas limites de milieux optiquement minces ou optiquement épais . . . . . | 219        |
| 7.6                         | Méthode de dimensionnement : hémisphère équivalente de Hottel . . . . .  | 222        |
| 7.7                         | Exemples simples de transferts radiatifs avec diffusion . . . . .        | 226        |
| 7.8                         | Méthodes générales de transfert radiatif . . . . .                       | 231        |
| CHAPITRE 8 •                | <b>PROPRIÉTÉS RADIATIVES DES MILIEUX . . . . .</b>                       | <b>251</b> |
| 8.1                         | Propriétés radiatives des milieux denses . . . . .                       | 252        |
| 8.2                         | Propriétés radiatives des gaz . . . . .                                  | 266        |
| ANNEXE D •                  | <b>INTRODUCTION AU NON-ÉQUILIBRE . . . . .</b>                           | <b>283</b> |
| D.1                         | Rayonnement hors équilibre . . . . .                                     | 283        |
| D.2                         | Équilibre thermodynamique, loi de Planck . . . . .                       | 285        |
| D.3                         | Interprétation physique de la loi de Planck . . . . .                    | 285        |

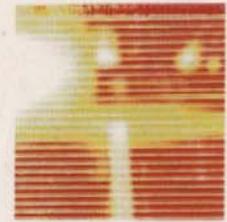
|  |  |     |
|--|--|-----|
| D.4  | Équation de transfert du rayonnement pour un gaz .....                       | 287 |
| D.5  | Champ de rayonnement, milieu matériel, équilibre, ETL et non équilibre ..... | 288 |
| <b>PARTIE III</b>  |  |     |
| <b>TRANSFERTS CONVECTIFS</b>   |  |     |
| <b>CHAPITRE 9 • ÉQUATIONS GÉNÉRALES DE LA CONVECTION (FLUIDE HÉTÉROGÈNE) .....</b> |  |     |
| 9.1  | Convection thermique (fluide homogène) .....                                 | 293 |
| 9.2  | Convection d'espèces et convection thermique (fluide hétérogène) .....       | 299 |
| 9.3  | Équations de bilan adimensionnées (transformations isovolumes) .....         | 304 |
| 9.4  | Analogie entre transferts thermiques et transferts massiques... ..           | 309 |
| <b>CHAPITRE 10 • CONVECTION EN RÉGIME LAMINAIRE .....</b>                          |  |     |
| 10.1   | Convection externe laminaire .....   | 313 |
| 10.2   | Convection forcée interne laminaire .....                                    | 319 |
| 10.3   | Convection naturelle interne laminaire .....                                 | 323 |
| <b>CHAPITRE 11 • TRANSFERTS TURBULENTS .....</b>                                   |  |     |
| 11.1   | Équations de bilan et échelles caractéristiques .....                        | 326 |
| 11.2   | Structure d'un écoulement turbulent dans un tube .....                       | 336 |
| 11.3   | Les différentes voies de modélisation .....                                  | 344 |
| <b>CHAPITRE 12 • NOTIONS SUR LES TRANSFERTS COUPLÉS .....</b>                      |  |     |
| 12.1   | Nature physique des couplages .....  | 354 |
| 12.2   | Quelques éléments bibliographiques .....                                     | 357 |
| <b>ANNEXE E • TENSEURS USUELS EN TRANSFERTS .....</b>                              |  |     |
| <b>ANNEXE F • CONDITIONS D'INTERFACE LIQUIDE-VAPEUR .....</b>                      |  |     |

## PARTIE IV DONNÉES DE BASE

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| SECTION A • | <b>CONVECTION FORCÉE INTERNE DIAGRAMME DE MOODY.....</b> | 371 |
| SECTION B • | <b>CONVECTION FORCÉE EXTERNE.....</b>                    | 390 |
| SECTION C • | <b>CONVECTION NATURELLE EXTERNE .....</b>                | 396 |
| SECTION D • | <b>CONVECTION NATURELLE INTERNE.....</b>                 | 402 |
| SECTION E • | <b>CONVECTION MIXTE EXTERNE.....</b>                     | 410 |
| SECTION F • | <b>CONVECTION MIXTE INTERNE .....</b>                    | 415 |
| SECTION G • | <b>RAYONNEMENT .....</b>                                 | 417 |
| SECTION H • | <b>TRANSFORMÉE DE LAPLACE, FONCTION ERREUR .....</b>     | 426 |
| SECTION I • | <b>PROPRIÉTÉS THERMOPHYSIQUES.....</b>                   | 429 |
| SECTION J • | <b>ÉQUATIONS DE LA CONVECTION .....</b>                  | 452 |
| SECTION K • | <b>FACTEURS DE CONVERSION .....</b>                      | 455 |
|             | <b>BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE</b>                            | 457 |
|             | <b>BIBLIOGRAPHIE DES DONNÉES DE BASE</b>                 | 465 |
|             | <b>INDEX</b>   | 473 |

SCIENCES SUP

Jean Taine  
Estelle Iacona  
Jean-Pierre Petit



4<sup>e</sup> édition

## TRANSFERTS THERMIQUES

### Introduction aux transferts d'énergie

Les transferts thermiques sont une **science clé du domaine de l'énergie**.

La quatrième édition de cet ouvrage a été l'occasion d'une refonte complète.

La première partie aborde tous les modes de transfert à un niveau **Licence 3**, en amont d'un cours de mécanique des fluides. Elle est illustrée de nombreux exercices d'application immédiate au fil du cours et de problèmes d'application en fin de chapitres. Des problèmes de synthèses représentatifs de la diversité des applications de la discipline sont également proposés.

Les deuxième et troisième parties de l'ouvrage, de niveau **Master**, ont été actualisées en fonction de l'état actuel des modèles physiques en rayonnement des gaz et des milieux denses et en transferts convectifs, en particulier turbulents.

La dernière partie, « Données de Base », constitue une mine, actualisée en cohérence avec le cours et complètement référencée, de données physiques indispensables au traitement de projets d'étudiants, d'ingénieurs, de chercheurs.

JEAN TAINÉ  
est professeur  
à l'École Centrale Paris.

ESTELLE IACONA  
est professeure  
à l'École Centrale Paris.

JEAN-PIERRE PETIT  
est ancien professeur  
à l'École Centrale Paris.

MATHÉMATIQUES

PHYSIQUE

CHIMIE

SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

INFORMATIQUE

SCIENCES DE LA VIE

SCIENCES DE LA TERRE



6656474

ISBN 978-2-10-051625-4



[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

