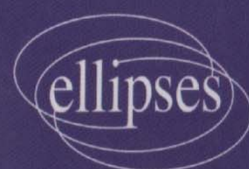


Formations & Techniques

# THERMIQUE DE L'INGÉNIEUR AVEC APPLICATIONS

Exercices et problèmes corrigés,  
rappels de cours

Bernard Castagnède  
Philippe Daniel





# Table des matières

## I. Rappels de cours

1- Introduction générale .....	11
1.1- Introduction .....	11
1.2- Introduction à la conduction .....	14
1.3- Introduction au rayonnement thermique .....	20
1.4- Introduction à la convection .....	21
2- Transferts thermiques par conduction .....	23
2.1- Equations générales pour les transferts de chaleur dans les solides .....	23
2.2- Solutions fondamentales de l'équation de la chaleur sans terme source .....	28
2.3- Transferts thermiques dans les murs et les surfaces planes .....	28
2.4- Analogie électro-acousto-thermique .....	35
2.5- Transferts thermiques dans une coque sphérique .....	37
2.6- Transferts thermiques dans un tuyau .....	39
2.7- Equation de la chaleur avec terme source (plan, cylindre, sphère) .....	40
2.8- Equation de la chaleur dans une plaque rectangulaire .....	43
2.9- Equation de la chaleur avec terme dépendant du temps .....	46
2.10- Applications au choc thermique (cas du solide semi-infini) .....	53
3- Transferts thermiques par convection (libre et forcée) .....	61
3.1- Equations générales pour les transferts de chaleur dans les fluides .....	61
3.2- Couplage entre écoulement du fluide et transfert de chaleur .....	67
3.3- Description des applications classiques (plaque, tube, barreau, ailette) .....	67
3.4- Théorie de la similitude, nombres caractéristiques .....	68
3.5- Théorie de la similitude, application aux couches limites .....	71
3.6- Equations fondamentales pour la convection libre .....	76
3.7- Transferts thermiques pour un fluide en écoulement dans un tuyau .....	80
3.8- Transferts thermiques pour un barreau immergé dans un fluide .....	81
3.9- Application à la thermique des ailettes (planes, cylindriques) .....	82



# Table des matières

## I. Rappels de cours

1- Introduction générale .....	11
1.1- Introduction .....	11
1.2- Introduction à la conduction .....	14
1.3- Introduction au rayonnement thermique .....	20
1.4- Introduction à la convection .....	21
2- Transferts thermiques par conduction .....	23
2.1- Equations générales pour les transferts de chaleur dans les solides .....	23
2.2- Solutions fondamentales de l'équation de la chaleur sans terme source .....	28
2.3- Transferts thermiques dans les murs et les surfaces planes .....	28
2.4- Analogie électro-acousto-thermique .....	35
2.5- Transferts thermiques dans une coque sphérique .....	37
2.6- Transferts thermiques dans un tuyau .....	39
2.7- Equation de la chaleur avec terme source (plan, cylindre, sphère) .....	40
2.8- Equation de la chaleur dans une plaque rectangulaire .....	43
2.9- Equation de la chaleur avec terme dépendant du temps .....	46
2.10- Applications au choc thermique (cas du solide semi-infini) .....	53
3- Transferts thermiques par convection (libre et forcée) .....	61
3.1- Equations générales pour les transferts de chaleur dans les fluides .....	61
3.2- Couplage entre écoulement du fluide et transfert de chaleur .....	67
3.3- Description des applications classiques (plaque, tube, barreau, ailette) .....	67
3.4- Théorie de la similitude, nombres caractéristiques .....	68
3.5- Théorie de la similitude, application aux couches limites .....	71
3.6- Equations fondamentales pour la convection libre .....	76
3.7- Transferts thermiques pour un fluide en écoulement dans un tuyau .....	80
3.8- Transferts thermiques pour un barreau immergé dans un fluide .....	81
3.9- Application à la thermique des ailettes (planes, cylindriques) .....	82



4- Le rayonnement thermique .....	89
4.1- Introduction .....	89
4.2- Notion de photométrie .....	91
4.3- Le rayonnement du corps noir .....	99
4.4- Introduction au rayonnement des surfaces réelles .....	108

## II. Exercices avec éléments de correction

5- Transferts thermiques par conduction – Solutions élémentaires .....	119
Exercice 1 : Transferts de chaleur dans une plaque isolante (A) .....	119
Exercice 2 : Isolation thermique d'un mur en briques (A) .....	119
Exercice 3 : Isolation thermique des parois d'un four (A) .....	120
Exercice 4 : Bilan thermique pour une plaque uniformément chauffée (A) .....	121
Exercice 5 : Isolation thermique d'un mur simple (A) .....	122
Exercice 6 : Transferts de chaleur dans une plaque de cuivre (A) .....	122
Exercice 7 : Transferts de chaleur dans un mur avec tirants d'acier (A) .....	123
Exercice 8 : Isolation thermique d'une fenêtre avec simple / double vitrage (B) .....	124
Exercice 9 : Thermique d'une tuyère de turboréacteur (A) .....	127
Exercice 10 : Calorifugeage d'une canalisation (B) .....	128
Exercice 11 : Transferts de chaleur pour le béton d'un petit barrage (A) .....	129
Exercice 12 : Transferts de chaleur dans une ligne à haute tension (B) .....	130
Exercice 13 : Etude thermique d'un thermomètre à résistance métallique (A) .....	132
Exercice 14 : Transferts de chaleur dans un mur double (B) .....	133
6- Transferts thermiques par conduction – Etude d'autres cas .....	137
Exercice 15 : Etude thermique d'un fer à repasser (B) .....	137
Exercice 16 : Etude thermique d'un four ayant une conductivité variable (B) .....	138
Exercice 17 : Conduction de la chaleur dans une plaque rectangulaire (B) .....	140
Exercice 18 : Conduction de la chaleur dans un tube en présence d'une source de chaleur (B) .....	143
Exercice 19 : Réciprocité des échanges thermiques dans un mur double (B) .....	145



Exercice 20 : Calorifugeage d'une conduite avec deux couches d'isolants thermiques (B) .....	146
Exercice 21 : Optimisation thermique d'un élément bicouche sphérique (B) .....	148
Exercice 22 : Conduction de la chaleur en régime dépendant du temps (B) .....	150
Exercice 23 : Transferts de chaleur dans un mur en béton au cours d'un incendie (B) .....	153
Exercice 24 : Choc thermique périodique / Notion de pseudo-onde thermique (B) ..	155
7- Transferts thermiques par convection (libre ou forcée) .....	159
Exercice 25 : Quelques questions à propos du nombre de Prandtl (A) .....	159
Exercice 26 : Quelques questions sur le nombre de Nusselt (A) .....	160
Exercice 27 : Nombres caractéristiques en convection forcée (A) .....	161
Exercice 28 : Convection libre et forcée pour une lampe ordinaire (B) .....	163
Exercice 29 : Convection forcée d'une conduite chauffée en surface (B) .....	164
Exercice 30 : Refroidissement en convection forcée de pompes industrielles (C).....	167
Exercice 31 : Champ de température d'une sphère immergée dans un fluide (B).....	171
Exercice 32 : Evolution de la température d'une bille immergée dans un fluide (B)..	173
Exercice 33 : Distribution des champs de vitesse et de température en convection forcée (C) .....	175
Exercice 34 : Convection forcée dans une conduite – Distribution spatiale du champ de température pour le fluide en écoulement (C) .....	180
8- Transferts thermiques mixtes (conduction et convection) – Problèmes divers .....	185
Exercice 35 : Transferts de chaleur dans un barreau encastré entre deux murs (C) ....	185
Exercice 36 : Transferts de chaleur dans un barreau composite (B) .....	187
Exercice 37 : Transferts de chaleur dans une ailette plane (B) .....	190
Exercice 38 : Transferts de chaleur dans une ailette cylindrique (B) .....	191
Exercice 39 : Manipulation d'objets dans un four à l'aide d'une tige (B) .....	193
Exercice 40 : Modélisation élémentaire d'un système de chauffage central et optimisation de la position du radiateur par rapport à la fenêtre (C) .....	195
Exercice 41 : Echanges thermiques dans un réacteur chimique sphérique (C) .....	198
Exercice 42 : Calcul de la durée de vie d'un marin tombé à l'eau à 10 °C sans protection, ou bien d'un homme enfermé dans un frigo (C) .....	202



Exercice 43 : Calcul de la durée de congélation (réfrigérateur usuel) et de surgélation (installation industrielle) pour des fruits (C) .....	205
Exercice 44 : Plasturgie pour pièces de géométrie cylindrique ou sphérique (C) .....	208
Exercice 45 : Thermodynamique du moulage et effets thermiques associés (C) .....	211
Exercice 46 : Bilan thermique global et isolation d'une maison (C) .....	215
Exercice 47 : Refroidissement d'un fil ou d'une bille d'acier plongée dans l'air (C)..	218
Exercice 48 : Calcul de la durée de fonte d'un glaçon (ou d'un glacier) et estimation de celle de l'antarctique .....	223
9- Transferts thermiques par rayonnement .....	227
Exercice 49 : Calcul d'angle solide (A) .....	227
Exercice 50 : Puissance lumineuse d'une source (A) .....	227
Exercice 51 : Emission d'un laser (A) .....	228
Exercice 52 : Intensité et luminance (A) .....	228
Exercice 53 : Eclairage produit par un laser (A) .....	228
Exercice 54 : Photométrie, système Terre - Soleil (B) .....	229
Exercice 55 : Chauffage par rayonnement (A) .....	230
Exercice 56 : Etude d'un corps noir (B) .....	230
Exercice 57 : Corps noir porté au rouge et à l'incandescence (A) .....	232
Exercice 58 : Emission spectrale du corps noir (A) .....	233
Exercice 59 : Lampe à filament de tungstène (B) .....	234
Exercice 60 : Température de surface du soleil (B) .....	235
Exercice 61 : Température de brillance d'un corps non noir (A) .....	236
Exercice 62 : Satellite en orbite (B) .....	237
Exercice 63 : Etude d'un four solaire (C) .....	237
Exercice 64 : Combinaison spatiale assimilable à un corps gris (B) .....	240
Exercice 65 : Etude de l'effet de serre (A) .....	241

### III. Éléments annexes

Tables de valeurs usuelles des paramètres thermiques pour divers matériaux .....	245
Bibliographie .....	259
Index .....	261