

# Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	1
<b>Chapitre 1. Généralités sur les transferts de chaleur</b> . . . . .	3
1.1. Introduction . . . . .	3
1.2. Définitions . . . . .	3
1.2.1. Champ de température . . . . .	3
1.2.2. Gradient de température . . . . .	4
1.2.3. Flux de chaleur . . . . .	4
1.3. Formulation d'un problème de transfert de chaleur . . . . .	5
1.3.1. Bilan d'énergie . . . . .	5
1.3.2. Expression des flux d'énergie. . . . .	5
1.3.2.1. Conduction . . . . .	6
1.3.2.2. Convection . . . . .	7
1.3.2.3. Rayonnement . . . . .	8
1.3.2.4. Flux de chaleur lié à un débit massique. . . . .	8
1.3.2.5. Stockage d'énergie. . . . .	9
1.3.2.6. Génération d'énergie. . . . .	9
<b>Chapitre 2. Transfert de chaleur par conduction en régime permanent</b> . . . . .	11
2.1. L'équation de la chaleur . . . . .	11
2.2. Transfert unidirectionnel . . . . .	13
2.2.1. Mur simple. . . . .	13
2.2.2. Mur multicouche . . . . .	15
2.2.3. Mur composite. . . . .	17

---

2.2.4. Cylindre creux long (tube) . . . . .	18
2.2.5. Cylindre creux multicouche . . . . .	19
2.2.6. Cas général . . . . .	20
2.2.7. Prise en compte des transferts radiatifs . . . . .	21
2.3. Transfert multidirectionnel . . . . .	21
2.3.1. Méthode de séparation des variables . . . . .	22
2.3.2. Méthode du coefficient de forme . . . . .	26
2.3.3. Méthodes numériques . . . . .	27
2.3.3.1. Expression de l'équation de Laplace en différences finies . . . . .	27
2.3.3.2. Expression des conditions aux limites en différences finies . . . . .	29
2.3.3.3. Méthode de résolution numérique . . . . .	31
2.3.3.4. Critère de convergence . . . . .	31
2.4. Les ailettes . . . . .	32
2.4.1. L'équation de la barre . . . . .	32
2.4.2. Flux extrait par une ailette . . . . .	33
2.4.2.1. Ailette rectangulaire longue de section constante . . . . .	34
2.4.2.2. Ailette rectangulaire de section constante isolée à l'extrémité . . . . .	35
2.4.2.3. Ailette rectangulaire de section constante avec transfert de chaleur à l'extrémité . . . . .	35
2.4.2.4. Ailette circulaire de section rectangulaire . . . . .	36
2.4.3. Efficacité d'une ailette . . . . .	38
2.4.4. Analogie électrique . . . . .	39
2.4.4.1. Ailette en contact avec une température extérieure . . . . .	39
2.4.4.2. Ailette en contact avec deux températures extérieures . . . . .	42
2.4.5. Choix des ailettes . . . . .	44
2.5. Exercices corrigés . . . . .	44
2.5.1. Apport de chaleur dans une pièce climatisée . . . . .	44
2.5.2. Pertes thermiques d'un oléoduc . . . . .	47
2.5.3. Épaisseur critique d'isolation . . . . .	48
2.5.4. Anémométrie à fil chaud . . . . .	49
2.5.5. Calcul d'une ailette . . . . .	52
2.5.6. Température des anses de théières . . . . .	53
2.5.7. Résistance thermique d'un tube aileté . . . . .	56
2.5.8. Apports thermiques dans une chambre froide . . . . .	59
2.5.9. Isolation d'une conduite . . . . .	60
2.5.10. Déperditions thermiques d'une canalisation . . . . .	61
2.5.11. Effet d'ailette et du rayonnement sur un thermocouple . . . . .	63

2.5.12. Transfert de chaleur interne dans une conduite . . . . .	67
2.5.13. Tubes enterrés . . . . .	70
2.5.14. Mesure de la conductivité thermique d'une roche . . . . .	72

### **Chapitre 3. Transfert de chaleur par conduction en régime variable . . . . .**

81

3.1. Conduction unidirectionnelle en régime variable sans changement d'état . . . . .	81
3.1.1. Milieu à température uniforme . . . . .	81
3.1.2. Milieu semi-infini . . . . .	83
3.1.2.1. Température constante imposée en surface . . . . .	83
3.1.2.2. Flux imposé . . . . .	85
3.1.2.3. Coefficient de transfert imposé. . . . .	86
3.1.2.4. Température sinusoïdale imposée en surface, régime périodique établi. . . . .	88
3.1.2.5. Contact brusque entre deux milieux semi-infinis . . . . .	90
3.1.3. Transfert unidirectionnel dans des milieux limités : plaque, cylindre, sphère . . . . .	93
3.1.3.1. Plaque infinie . . . . .	93
3.1.3.2. Cylindre infini . . . . .	107
3.1.3.3. Sphère . . . . .	114
3.1.4. Systèmes complexes : méthode des quadripôles. . . . .	120
3.1.4.1. Écoulement unidirectionnel dans des murs plans . . . . .	120
3.1.4.2. Transfert radial . . . . .	126
3.1.5. Régime périodique établi . . . . .	128
3.1.6. Systèmes avec propriétés thermiques thermodépendantes . . . . .	130
3.2. Conduction multidirectionnelle en régime variable . . . . .	133
3.2.1. Théorème de Von Neumann . . . . .	133
3.2.2. Transformations intégrales et séparation des variables . . . . .	134
3.3. Exercices corrigés . . . . .	138
3.3.1. Âge de la Terre : « ambiguïté de Kelvin » (1864). . . . .	138
3.3.2. Variation périodique de la température dans le sol . . . . .	140
3.3.3. Mesure de la diffusivité thermique par excitation sinusoïdale. . . . .	141
3.3.4. Gel d'un lac . . . . .	143
3.3.5. Gel des conduites d'eau dans un sol sec. . . . .	145
3.3.6. Gel des conduites d'eau dans un sol humide . . . . .	145
3.3.7. Paroi coupe-feu . . . . .	149
3.3.8. Incendie d'une poutre en bois. . . . .	150

3.3.9. Méthode Flash . . . . .	151
3.3.10. Traitement thermique d'un train d'atterrissage . . . . .	156
3.3.11. Traitement thermique d'un bloc de carbone . . . . .	157
3.3.12. Traitement thermique d'une couche mince . . . . .	160
3.3.13. Trempe d'une bille . . . . .	162
3.3.14. Échauffement de plaquettes de frein . . . . .	167
3.3.15. Méthode du plan chaud . . . . .	170
3.3.16. Mesure de la diffusivité thermique d'une plaque mince . . . . .	175
3.3.17. Méthode du régime régulier . . . . .	176
3.3.18. Modélisation du fil chaud . . . . .	179
3.3.19. Chauffage intermittent d'un chalet . . . . .	182
3.3.20. Déperditions thermiques par le sol d'une maison . . . . .	190
3.3.21. Variation périodique de température dans un local non climatisé . . . . .	197
3.3.22. Variation périodique de flux dans un local climatisé . . . . .	201

## **Chapitre 4. Transfert de chaleur par convection . . . . . 205**

4.1. Rappels sur l'analyse dimensionnelle . . . . .	205
4.1.1. Dimensions fondamentales . . . . .	205
4.1.2. Principe de la méthode . . . . .	205
4.1.3. Exemple d'application . . . . .	206
4.1.3.1. Détermination des grandeurs physiques . . . . .	207
4.1.3.2. Équation dimension de chaque grandeur . . . . .	207
4.1.3.3. Détermination des groupements $\pi$ . . . . .	208
4.1.3.4. Signification physique de ces groupements . . . . .	208
4.1.4. Avantages de l'utilisation des grandeurs réduites . . . . .	209
4.1.4.1. Quelques groupements sans dimensions . . . . .	210
4.2. Convection sans changement d'état . . . . .	210
4.2.1. Généralités et définitions . . . . .	210
4.2.1.1. Convection naturelle et forcée . . . . .	210
4.2.1.2. Régime d'écoulement . . . . .	210
4.2.2. Expression du flux de chaleur . . . . .	211
4.2.2.1. Analogie de Reynolds . . . . .	211
4.2.2.2. Couches limites dynamique et thermique . . . . .	212
4.2.2.3. Expression du flux . . . . .	213
4.2.3. Calcul du flux de chaleur en convection forcée . . . . .	214
4.2.3.1. Calcul analytique . . . . .	214
4.2.3.2. Calcul approché . . . . .	220

---

4.2.4. Calcul du flux de chaleur en convection naturelle . . . . .	221
4.2.4.1. Mécanisme de la convection naturelle . . . . .	221
4.2.4.2. Signification physique du nombre de Grashof . . . . .	222
4.2.4.3. Calcul du flux de chaleur en convection naturelle . . . . .	223
4.3. Convection avec changement d'état . . . . .	223
4.3.1. Condensation . . . . .	223
4.3.1.1. Phénomènes . . . . .	223
4.3.1.2. Valeur du coefficient $h$ pour la condensation en film . . . . .	224
4.3.2. Ébullition . . . . .	228
4.3.2.1. Formation des gouttelettes et des bulles . . . . .	228
4.3.2.2. Les différents régimes d'ébullition . . . . .	229
4.3.2.3. Zone AB . . . . .	229
4.3.2.4. Zone BC . . . . .	229
4.3.2.5. Point C . . . . .	231
4.3.2.6. Zone CD . . . . .	231
4.3.2.7. Zone DE . . . . .	231
4.3.2.8. Intérêt du transfert de chaleur par ébullition . . . . .	232
4.4. Exercices corrigés . . . . .	232
4.4.1. Convection forcée dans et autour d'un tube . . . . .	232
4.4.2. Écoulement d'eau dans un tube chauffant . . . . .	234
4.4.3. Refroidissement de l'air dans un conduit . . . . .	236
4.4.4. Isolation perméodynamique d'une maison . . . . .	239
4.4.5. Convection dans une cheminée . . . . .	241
4.4.6. Modélisation de la convection naturelle dans un double vitrage . . . . .	243
4.4.7. Calcul des échanges par convection dans un double vitrage . . . . .	250
4.4.8. Étude d'une bouilloire électrique . . . . .	254
<b>Annexes . . . . .</b>	<b>259</b>
<b>Nomenclature . . . . .</b>	<b>299</b>
<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>303</b>
<b>Index . . . . .</b>	<b>307</b>
<b>Sommaire de <i>Transfert de chaleur 2</i> . . . . .</b>	<b>311</b>