

Table des matières

Préface

Partie 1 - Généralités

1. Introduction - Exposé de notre objectif.....	13
2. Les outils de travail du thermicien.....	14
2.1. Qu'est-ce que la thermique ?.....	14
2.2. La chaleur	15
2.3. La température	15
2.4. Les unités	15
2.5. Premier principe : la "conservation de la chaleur"	17
2.6. Chaleur - Température : la chaleur spécifique.....	17
2.7. L'enthalpie	18
2.8. La chaleur latente de changement d'état.....	19
2.9. Flux de chaleur - Puissance.....	21
2.10. Les transferts de chaleur	23
2.11. Les modes de transfert de chaleur.....	24
2.12. Évolution thermique liée à un flux de chaleur.....	25
3. Quelques exemples.....	27
4. Conclusion - La boîte à outils du thermicien.....	29

Partie 2 - Génération de la chaleur

Partie 2a - La combustion et les combustibles.....31

1. Les réactions de combustion	31
--------------------------------------	----

1.1.	Rappels généraux.....	31
1.2.	Le pouvoir calorifique (PCI et PCS).....	37
1.3.	Le pouvoir comburivore.....	39
1.4.	Le pouvoir fumigène.....	40
1.5.	Les divers types de combustion.....	41
1.6.	Température de combustion.....	48
2.	Les combustibles.....	54
2.1.	Les combustibles élémentaires.....	54
2.2.	Les combustibles gazeux.....	55
2.3.	Les combustibles liquides.....	59
2.4.	Les combustibles solides.....	62
3.	Valeur d'usage des combustibles.....	63
3.1.	Rendement d'un four.....	63
3.2.	Choix d'un combustible.....	63
Partie 2b - L'électricité : l'effet Joule.....		65
1.	Effet Joule.....	65
2.	Conduction.....	65
2.1.	Température d'équilibre en régime permanent.....	66
2.2.	Echauffement d'une pièce en courant continu.....	67
2.3.	Echauffement d'une pièce en courant alternatif.....	69
3.	Résistances électriques.....	71
3.1.	Nappes de résistances dans une paroi de four.....	72
3.2.	Echange de chaleur entre des résistances et un fluide.....	74
3.3.	Résistances rayonnantes.....	75
4.	Induction.....	76
4.1.	Relations utilisées.....	77
4.2.	Déroulement d'un calcul.....	81
Partie 3 - Transfert de la chaleur		
✕	Partie 3a - Conduction.....	85
1.	Équation générale de la chaleur.....	85
1.1.	Transfert de chaleur par conduction.....	85
1.2.	Loi de Fourier.....	85
1.3.	Conduction en régime permanent.....	86
1.4.	Conduction en régime variable.....	87

2. Le coefficient de conductivité λ	89
2.1. Conductivité des corps solides	89
2.2. Conductivité des liquides	91
2.3. Conductivité des gaz	92
2.4. Influence de la température	93
3. Étude de quelques phénomènes stationnaires simples	94
3.1. Le problème du mur	94
3.2. La question des interfaces	99
3.3. Le problème du tuyau	103
3.4. Quelques exemples en régime permanent	110
3.5. Le problème en 2D ou en 3D	115
4. Résolution en régime variable	122
4.1. Exemple. Mise en régime d'un mur	123
4.2. Exemple. Trempe d'un barreau cylindrique	124
5. Conclusion	125

X Partie 3b - Convection

1. Généralités	127
1.1. Les principes de la convection	127
1.2. Le coefficient d'échange de chaleur h	128
1.3. Calcul de h	129
2. Échange de chaleur par convection forcée sans changement d'état	129
2.1. Fluide à l'intérieur d'une conduite cylindrique	129
2.2. Fluide à l'extérieur d'une conduite cylindrique et circulant perpendiculairement à celle-ci	147
2.3. Coefficient d'échange entre un fluide et une sphère	149
2.4. Coefficient d'échange entre un fluide et une plaque	150
3. Échange de chaleur par convection naturelle sans changement d'état	151
3.1. Description du phénomène	151
3.2. Résultats de l'analyse dimensionnelle	152
3.3. Expressions du nombre de Nusselt	153
3.4. Valeur du coefficient d'échange pour l'air	155
4. Échange de chaleur par convection avec changement d'état (condensation, ébullition)	156
4.1. Transfert avec condensation d'une vapeur	156
4.2. Transfert avec ébullition d'un liquide	159
5. Conclusion	161

Partie 3c - Rayonnement	163
1. Généralités	163
2. Le rayonnement des corps opaques	165
2.1. Le corps opaque en tant qu'émetteur de rayonnement.....	165
2.2. Le corps opaque en tant que récepteur de rayonnement.....	169
2.3. Les lois du rayonnement thermique (corps noir).....	170
2.4. Le rayonnement des corps opaques non noirs.....	173
2.5. Résumé	178
3. Le rayonnement des corps partiellement transparents.....	178
3.1. Généralités	179
3.2. Les gaz comme récepteurs de rayonnement.....	180
3.3. Les gaz comme émetteurs de rayonnement.....	180
3.4. Coefficients d'émission et d'absorption du gaz carbonique et de la vapeur d'eau.....	181
3.5. Les gaz chargés de particules.....	187
4. Calcul des échanges de chaleur par rayonnement.....	187
4.1. Généralités	187
4.2. Échanges par rayonnement entre deux surfaces noires opaques, séparées par un milieu parfaitement transparent	188
4.3. Facteurs d'angle.....	190
4.4. Exemples d'échanges radiatifs entre deux surfaces noires	209
4.5. Échanges par rayonnement entre deux surfaces grises opaques séparées par un milieu parfaitement transparent	210
4.6. Échanges par rayonnement entre une surface (grise) et plusieurs surfaces (grises) opaques formant une enceinte fermée	220
4.7. Échanges par rayonnement entre deux surfaces opaques séparées par un milieu semi-transparent.....	226
5. Quelques conclusions sur les échanges par rayonnement.....	233

Partie 4 - Utilisation de la chaleur

Partie 4a - Échauffement/Refroidissement d'un solide	235
1. Cas du "lump"	235
1.1. Hypothèse du lump.....	236
1.2. Solution du problème du lump (échange par convection)	237
1.3. Solution dans un échange avec rayonnement et convection.....	241

2. Milieux illimités : cas du massif semi-infini.....	243
2.1. Le choc thermique.....	243
2.2. Flux constant en surface.....	248
2.3. Coefficient d'échange en surface.....	248
3. Milieux limités.....	250
3.1. Géométries simples - Conditions initiales et conditions aux limites simplifiées.....	250
3.2. Géométries simples - C.I. et C. L. compliquées.....	256
3.3. Géométries compliquées - C.I. et C.L. simples ou compliquées.....	270
4. Conclusion.....	270
Partie 4b - Échauffement/Refroidissement d'un fluide.....	271
1. Introduction.....	271
2. Évolution de la température d'un volume donné de liquide ou de gaz.....	272
2.1. La température θ_p de la paroi est imposée.....	272
2.2. Le flux ϕ est connu.....	273
2.3. Superposition de flux divers.....	273
2.4. Dégagement (ou absorption) de chaleur.....	274
3. Évolution de la température d'un débit de liquide ou de gaz.....	275
3.1. Température θ_p imposée (par exemple régulée).....	275
3.2. Flux échangé imposé.....	278
3.3. Échange avec le milieu extérieur.....	279
3.4. Coefficients d'échange variables avec la température.....	283
4. Échange de chaleur entre deux fluides à travers une paroi Les échangeurs.....	284
4.1. Échangeurs à courants parallèles.....	285
4.2. Échangeurs à courants inverses.....	288
4.3. Échangeurs à courants croisés.....	291
4.4. Exemple de comparaison entre deux types d'échangeur.....	291
5. Échange de chaleur entre un débit de fluide et une charge.....	294
6. Conclusion.....	299

Partie 5 - Modélisation des échanges de chaleur

1. Introduction.....	301
2. Le logiciel de résolution de l'équation de chaleur - REQCHAL.....	303
3. Études de cas.....	303
3.1. Modélisation d'un four.....	303
3.2. Quelques problèmes de conduction.....	329
3.3. Quelques problèmes de rayonnement.....	339
3.4. Quelques problèmes de combustion.....	348
3.5. Problèmes de changement de phase.....	354
3.6. Divers.....	361
Appendice bibliographique.....	371