

Table des matières

Avant-propos	1
Introduction	3
Chapitre 1. Origine du rayonnement.	5
1.1. Introduction.	5
1.2. Le modèle de Niels Bohr	6
1.2.1. Illustration : excitation de l'atome du néon	7
1.2.2. Illustration : les lampes à vapeur de mercure	9
1.3. Nature de l'énergie rayonnante	11
1.3.1. Rappels sur la caractérisation des ondes électromagnétiques	11
1.3.2. Spectre électromagnétique et position du rayonnement thermique	12
Chapitre 2. Grandeurs utilisées en rayonnement	15
2.1. Introduction.	15
2.2. Grandeurs monochromatiques, totales, directionnelles et hémisphériques	15
2.3. Absorption, réflexion et transmission	17
2.3.1. Matériaux opaques	18
2.3.2. Matériaux transparents	18
2.4. Intensité totale d'une source dans une direction	19
2.5. Luminance totale d'une source dans une direction.	19
2.6. Éclairement d'une surface réceptrice.	20

2.7. Exemples de grandeurs monochromatiques et explication de l'effet de serre	20
2.7.1. Effet de serre terrestre, la transmissivité de l'atmosphère incriminée	22
2.7.2. Effet de serre terrestre, un régulateur naturel de la température	23
2.7.3. Effet de serre terrestre, un atout et un risque	23
2.8. Relations entre grandeurs.	24
2.8.1. Éclairement et luminance	24
2.8.2. Loi de Lambert	25
2.8.3. Émittance et luminance dans le cas d'émissions isotropes	26

Chapitre 3. Analyse des transferts radiatifs : rayonnement du corps noir

29

3.1. Introduction.	29
3.2. Définition du corps noir	29
3.3. Réalisation physique du corps noir	30
3.4. Rayonnement du corps noir	31
3.4.1. Loi de Planck	31
3.4.2. Loi de Stefan-Boltzmann	32
3.4.3. Illustration : calcul de l'énergie émise par une surface noire	34
3.4.4. Lois de Wien.	34
3.4.5. Illustration : émittances en fonction des longueurs d'onde.	36
3.4.6. Évaluation de l'émittance dans une bande de longueurs d'onde	38
3.4.7. Illustration : calcul de l'énergie rayonnée dans l'infrarouge	39
3.4.8. Spectre utile	40
3.4.9. Illustration : détermination d'un spectre utile	40

Chapitre 4. Propriétés rayonnantes des surfaces réelles

43

4.1. Introduction.	43
4.2. Émissivité d'une surface réelle	43
4.2.1. Émissivité totale.	44
4.2.2. Émissivité monochromatique	44
4.2.3. Données sur les émissivités	45
4.2.3.1. Émissivités des matériaux courants	45
4.2.3.2. Calcul des émissivités totales à partir des émissivités normales	47
4.3. Corps gris.	47

4.3.1. Densité du flux émis par un corps gris	47
4.3.2. Illustration : calcul de l'énergie émise par un chauffage électrique	47
4.4. Température effective d'une surface réelle	49
4.4.1. Calcul de la température effective d'une surface réelle	49
4.4.2. Illustration : calcul de la température effective d'une surface grise . .	49
4.5. Luminance d'une surface réelle	50
4.6. Loi de Kirchhoff	50
4.6.1. Conséquences pour les corps gris	50
4.6.2. Conséquences pour les corps noirs	50
4.6.3. Illustration : bilans radiatifs simples	51

Chapitre 5. Bilans radiatifs entre surfaces réelles séparées par un milieu transparent 53

5.1. Introduction	53
5.2. Le facteur d'angle	54
5.3. Expression du facteur de forme	55
5.4. Relations entre facteurs de forme	57
5.4.1. Relations de réciprocité	58
5.4.2. Fonction d'échange	58
5.4.3. Facteurs d'angle pour des surfaces convexes ou concaves	59
5.4.4. Propriété de la somme des facteurs de forme	59
5.5. Réduction du nombre de facteurs de forme à calculer	60
5.5.1. Réduction grâce à la symétrie	61
5.5.2. Illustration : facteurs de forme entre les surfaces d'un cylindre . .	62
5.5.3. Illustration : facteurs de forme des surfaces constituant un cube .	64
5.5.4. Illustration : utilisation des relations entre facteurs de forme . . .	66
5.6. Principe de superposition	69
5.6.1. Illustration : facteurs de forme de surfaces complémentaires . . .	70
5.7. Méthode des cordes croisées : surfaces de très grande longueur	72

Chapitre 6. Détermination pratique des facteurs de forme 75

6.1. Introduction	75
6.2. Les méthodes de détermination pratique des facteurs de forme	76
6.2.1. Surfaces en influence totale	76
6.2.2. Illustration : facteurs d'angle pour des sphères concentriques . . .	77
6.2.3. Illustration : cylindres coaxiaux infinis	77
6.2.4. Illustration : facteurs de forme pour une demi-sphère couvrant un disque	77

6.2.5. Illustration : demi-cylindre couvrant un plan rectangulaire	78
6.3. Facteurs de forme pour les configurations géométriques usuelles	78
6.3.1. Configuration 1 : deux plans parallèles axés et de même aire	78
6.3.2. Configuration 2 : deux plans infinis parallèles de même largeur et de même axe	79
6.3.3. Configuration 3 : deux plans infinis parallèles de largeur différente mais avec le même axe.	80
6.3.4. Configuration 4 : deux plans rectangulaires perpendiculaires ayant un côté commun	81
6.3.5. Configuration 5 : deux plans de même dimension ayant un côté commun	82
6.3.6. Configuration 6 : deux plans de dimension différente ayant un côté commun	82
6.3.7. Configuration 7 : deux rectangles perpendiculaires	83
6.3.8. Configuration 8 : deux rectangles parallèles désaxés de dimension quelconque	84
6.3.9. Configuration 9 : bande linéaire dont le plan est parallèle à un rectangle	85
6.3.10. Configuration 10 : bande linéaire dont le plan est perpendiculaire à un rectangle.	86
6.3.11. Configuration 11 : source linéaire dont le plan coupe un plan rectangulaire avec un angle θ	87
6.3.12. Configuration 12 : surface élémentaire placée sur la normale à un plan	88
6.3.13. Configuration 13 : surface élémentaire placée sur un plan perpendiculaire à un rectangle	89
6.3.14. Configuration 14 : deux disques parallèles ayant le même axe	90
6.3.15. Configuration 15 : source élémentaire placée sur la normale d'un disque	90
6.3.16. Configuration 16 : deux cylindres infinis à axes parallèles	91
6.3.17. Configuration 17 : deux cylindres coaxiaux infinis	91
6.3.18. Configuration 18 : cylindres coaxiaux finis	92
6.3.19. Configuration 19 : source élémentaire de longueur quelconque parallèle à un cylindre infini	93
6.3.20. Configuration 20 : source sphérique ponctuelle et sphère de rayon R	94
6.3.21. Configuration 21 : plan élémentaire et sphère de rayon R	94
6.3.22. Configuration 22 : plan élémentaire dont la tangente passe par le centre d'une sphère	95

6.3.23. Configuration 23 : sphère et disque ayant le même axe	95
6.3.24. Configuration 24 : prisme de longueur infinie et de section droite triangulaire.	96
6.3.25. Illustration : calcul des facteurs d'angle de deux plans se coupant à 45°.	97
6.3.26. Illustration : calcul des facteurs d'angle de disques parallèles . .	98
6.3.27. Illustration : plans parallèles, axés, ayant la même aire	99
6.3.28. Illustration : calcul du facteur d'angle pour deux plans rectangulaires perpendiculaires ayant un côté en commun.	101
6.3.29. Illustration : développement d'abaques pour des plans inclinés de différentes dimensions	103
Chapitre 7. Bilans des échanges radiatifs entre surfaces noires. . .	107
7.1. Introduction.	107
7.2. Établissement des équations de bilan.	108
7.3. Résolution des équations des bilans radiatifs entre surfaces noires . . .	109
7.3.1. Surfaces à flux imposés	110
7.3.2. Surfaces à températures imposées	110
7.3.3. Cas où certains flux et certaines températures sont imposés . . .	110
7.3.4. Illustration : échanges par rayonnement dans un four de boulangerie.	111
7.3.5. Illustration : conception d'un four industriel à températures imposées.	119
Chapitre 8. Bilans des échanges radiatifs entre surfaces grises. . .	129
8.1. Introduction.	129
8.2. Rappel des propriétés radiatives des surfaces réelles	129
8.3. La radiativité	130
8.4. Bilans sur surfaces grises.	131
8.4.1. Établissement du bilan sur S_i	131
8.4.2. Simplification de l'équation du bilan	133
8.5. Résolution des équations des bilans radiatifs entre surfaces grises . . .	133
8.5.1. Surfaces à flux imposés	134
8.5.2. Surfaces à températures imposées	135
8.5.3. Cas où certains flux et certaines températures sont imposés . . .	136
8.5.4. Illustration : four industriel à parois adiabatiques grises	138

Chapitre 9. Analogies électriques en rayonnement.	145
9.1. Introduction.	145
9.2. Analogies pour surfaces noires	145
9.2.1. Analogie électrique représentant les émittances.	146
9.2.2. Analogie électrique représentant les températures	147
9.2.3. Analogie électrique représentant la densité du flux échangé	147
9.2.4. Illustration : calcul de la densité du flux par analogie électrique	148
9.3. Analogies électriques pour les échanges entre surfaces grises	149
9.3.1. Analogie électrique représentant les radiosités	150
9.3.2. Analogie électrique représentant les températures	150
9.3.3. Illustration : détermination des flux nets dans un four industriel	153
9.4. Facteur de forme gris	156
9.5. Illustration : facteur de forme gris du four industriel à parois adiabatiques	157
 Chapitre 10. Réduction des échanges rayonnants par filtrage	 165
10.1. Introduction	165
10.2. Expression de la densité de flux pour un échange sans filtre	166
10.3. Réduction du flux par filtrage	168
10.4. Comparaison de q_0 et q_m	170
10.5. Cas où les plaques S_0 et S_n ont la même émissivité.	171
10.5.1. Situation sans filtre ($m = 0$)	171
10.5.2. Situation avec m filtres ($m \neq 0$) d'émissivités égales à ϵ	171
10.5.3. Illustration : réduction des transferts radiatifs par filtrage	172
 Chapitre 11. Transferts radiatifs dans des milieux semi-transparents	 175
11.1. Introduction	175
11.2. Rayonnement dans les gaz semi-transparents	176
11.2.1. Loi de Beer	177
11.2.2. Expression alternative de la loi de Beer	178
11.2.3. Transmissivité des gaz semi-transparents	179
11.2.4. Transmission d'énergie entre surfaces séparées par un milieu semi-transparent	179
11.2.4.1. Cas où S_j est une calotte sphérique.	180
11.2.4.2. Cas où S_j est quelconque.	181
11.2.4.3. Détermination pratique des chemins moyens	181

11.2.5. Absorptivité spectrale d'un gaz semi-transparent	182
11.2.6. Émissivité spectrale d'un gaz semi-transparent.	182
11.2.7. Détermination pratique des paramètres et des flux radiatifs des gaz semi-transparentes	183
11.2.8. Comportement radiatif d'un gaz optiquement épais	184
11.3. Illustration : calcul du flux rayonné par des gaz de combustion	185
11.4. Lecture : découverte de la loi de Stefan Boltzmann	186
Chapitre 12. Exercices et solutions	191
Annexe	257
Bibliographie	321
Index	335