

Table des matières

I	Résumé de cours	9
1	Bilan thermique	11
1.1	Flux thermique et densité de flux thermique	11
1.2	Production d'énergie thermique	12
1.3	Equation de bilan thermique	12
2	Conduction thermique: généralités	15
2.1	Mécanismes du transfert conductif	15
2.2	Aspect phénoménologique de la conduction thermique: loi de Fourier	15
2.3	Equation de propagation de l'énergie thermique par conduction . . .	17
2.4	Conditions aux limites	18
2.4.1	Contact entre deux milieux macroscopiquement immobiles . .	18
2.4.2	Contact entre un milieu immobile et un fluide en mouvement .	19
2.5	Nombres adimensionnels caractéristiques de la conduction thermique	21
3	Convection thermique: généralités	23
3.1	Écoulement laminaire, écoulement turbulent	23
3.2	Convection forcée, convection libre	24
3.3	Théorie de la similitude appliquée à la convection	24
3.4	Analyse dimensionnelle	28
3.5	Corrélations entre nombres adimensionnels	30
	Conduction thermique en régime stationnaire	31
4.1	Plaque de températures pariétales imposées	31
4.2	Plaque placée entre deux fluides de températures imposées	32
4.3	Tube de températures pariétales imposées	33
4.4	Coquille sphérique	35
4.5	Systèmes bidimensionnels	36
4.6	Théorie des ailettes	36
4.6.1	Généralités	36
4.6.2	Ailettes de section uniforme	38
4.6.3	Ailettes triangulaires de section rectangulaire	40
4.7	Bilan thermique d'un fluide en écoulement stationnaire	42
4.7.1	Généralités	42
4.7.2	Application: équation fondamentale des échangeurs	42

5	Conduction thermique en régime instationnaire	45
5.1	Milieux thermiquement minces: $Bi < 0,1$	45
5.1.1	Critère de Biot	45
5.1.2	Evolution de la température d'un système mince	47
5.2	Milieux thermiquement épais de dimensions finies: $Bi > 0,1$	47
5.2.1	Relaxation d'un échelon de température appliqué à une plaque	47
5.2.2	Relaxation d'un échelon de température appliqué à un cylindre de grande longueur	50
5.2.3	Relaxation d'un échelon de température appliqué à une sphère	51
5.2.4	Echelon de température appliqué à des systèmes 2 ou 3D . . .	52
5.3	Milieux thermiquement semi-infinis soumis à des chocs thermiques . .	53
5.3.1	Méthode de transformation de Laplace appliquée à la propa- gation thermique	54
5.3.2	Milieu semi-infini, température imposée en $x = 0$	54
5.3.3	Milieu semi-infini, flux imposé en $x = 0$	56
5.3.4	Milieu semi-infini, flux convectif en $x = 0$	57
5.4	Milieux thermiquement semi-infinis en oscillation forcée	58
6	Rayonnement : généralités	61
6.1	Rayonnement thermique et fluorescence	61
6.2	Caractérisation du rayonnement : éléments de spectroscopie	62
6.3	Grandeurs associées aux sources de rayonnement	63
6.3.1	Luminance spectrique d'une source $L_\lambda(\vec{r}, \vec{\Omega})$	64
6.3.2	Luminance totale d'une source $L(\vec{r}, \vec{\Omega})$	65
6.3.3	Exitance spectrique d'une source $M_\lambda(\vec{r})$	66
6.3.4	Exitance totale d'une source $M(\vec{r})$	66
6.4	Grandeurs caractéristiques des récepteurs de rayonnement	67
6.4.1	Eclairement spectrique d'un récepteur $E_\lambda(\vec{r})$	67
6.4.2	Eclairement total d'un récepteur $E(\vec{r})$	67
7	Rayonnement thermique	69
7.1	L'étalon de rayonnement : le "corps noir"	69
7.2	Lois de rayonnement "corps noir"	70
7.2.1	Loi de Planck: $L_{\lambda,T}^0$, luminance spectrique du corps noir . . .	70
7.2.2	Lois de Wien: évolution de $L_{\lambda,T}^0$ avec la longueur d'onde . . .	71
7.2.3	Loi de Stefan: exitance totale du corps noir M_T^0	72
7.2.4	Fraction d'exitance du corps noir $F(\lambda)$	72
7.3	Rayonnement de corps opaques non noirs	72
7.3.1	Absorptivité et réflectivité spectrales directionnelles	73
7.3.2	Emissivité spectrale directionnelle $\epsilon_\lambda(\vec{r}, \vec{\Omega})$	74
7.3.3	Loi de Kirchhoff-Draper	74
7.3.4	Emissivité spectrale hémisphérique $\epsilon_\lambda(\vec{r})$	74
7.3.5	Emissivité totale hémisphérique $\epsilon(\vec{r})$	75
7.3.6	Absorptivité spectrale hémisphérique $\alpha_\lambda(\vec{r})$	75
7.3.7	Absorptivité totale hémisphérique $\alpha(\vec{r})$	75
7.3.8	Modèles des corps "gris" et des corps "gris par morceaux" . .	76
7.4	Températures caractéristiques du rayonnement	76
7.4.1	Température de luminance totale T_N	77

7.4.2	Température de luminance spectrique T_{λ_p}	77
7.4.3	Température pyrométrique dite "température de couleur" T_c	77
7.5	Rayonnement entre surfaces noires séparées par un milieu transparent	78
7.5.1	Facteur de forme ("view factor") F_{ij}	78
7.5.2	Puissance radiative nette	80
7.6	Rayonnement entre surfaces grises séparées par un milieu transparent	81
7.6.1	Radiosité	82
7.6.2	Flux radiatif net d'une surface grise	82
7.6.3	Calcul de la radiosité des surfaces grises constituant une enceinte	82
7.6.4	Analogie électrique, facteurs de forme gris	84
7.7	Rayonnement entre surfaces séparées par un milieu semi-transparent	86
7.7.1	Coefficient d'absorption spectral k_λ	86
7.7.2	Equation de transfert radiatif	88
7.7.3	Caractéristiques spectrales d'un milieu isotherme	90
7.7.4	Demi-sphère équivalente au volume étudié	91
7.7.5	Calcul de la radiosité des surfaces d'une enceinte contenant un milieu semi-transparent	92
8	Rayonnement de fluorescence	95
8.1	Coefficients d'Einstein	95
8.1.1	Emission spontanée: $M_j \rightarrow M_i + h\nu_{ij}$	95
8.1.2	Absorption: $M_i + h\nu_{ij} \rightarrow M_j$	96
8.1.3	Emission induite (ou stimulée): $M_j + h\nu_{ij} \rightarrow M_i + h\nu_{ij} + h\nu_{ij}$	96
8.1.4	Relations entre les coefficients d'Einstein	97
8.2	Emission et absorption d'une raie d'un milieu semi-transparent	98
8.2.1	Elargissement propre des raies atomiques	98
8.2.2	Elargissement introduit par le dispositif expérimental	100
8.2.3	Forme et largeur des raies enregistrées	101
8.3	Force de raie	101
8.4	Mesure de la population des niveaux excités	103
8.4.1	Mesure de la population du niveau supérieur d'une transition	103
8.4.2	Mesure de la population du niveau inférieur d'une transition	103
8.4.3	Mesure de la température d'excitation	103
II	Problèmes et corrigés	107
1	Protection thermique d'un vaisseau spatial	109
2	Collecteur solaire	113
3	Isolation d'une conduite de vapeur	117
4	Bobinage d'un transformateur	120
5	Bilan géothermique de la Terre	125
6	Matériau de conductivité variable $k = k(T)$	128
7	Vaporisation d'une gouttelette	131
8	Refroidissement de gaz de combustion	134
9	Modèle d'un front de flamme laminaire	136
10	Fibre optique en cours de tirage	140
11	Anémomètre à fil chaud	143
12	Chauffage d'un tapis de billard	147

13	Propriétés thermiques du sodium liquide	151
14	Céramique chauffée par effet Joule	154
15	Onde thermique émise par un point source	157
16	Fluxmètre cuivre-constantan	159
17	Formation de la glace dans un espace confiné	164
18	Aspect thermique de la prise du béton	168
19	Simulation d'un incident nucléaire	172
20	Chauffage d'une maison	176
21	Etude d'un fluxmètre axial	180
22	Réacteur de Grignard	185
23	Formation d'une plaque de glace sur un lac	191
24	Freinage d'une formule 1	196
25	Archimède et le siège de Syracuse	200
26	Capsule sphérique lancée vers le Soleil	202
27	Bilan thermique de Mars	204
28	Lampe à ruban de tungstène	206
29	Bilan radiatif d'une cheminée d'agrément	208
30	Pyromètre à aspiration	210
31	Evolution thermique d'un satellite	212
32	Préchauffage de particules de charbon	215
33	Panneaux solaires du satellite TDF1	216
34	Emissivité mesurée par thermographie	219
35	Stockage et mesure de la diffusivité du <i>GNL</i>	225
36	Rayonnement d'un pot catalytique	228
37	Régimes transitoires d'un écran	231
38	Isolation à haute température	234
39	Grenier chauffé par le Soleil	236
40	Rayonnement entre sphères concentriques	239
41	Café dans une bouteille "isotherme"	242
42	Puissance consommée par un petit four	245
43	Nappe d'eau exposée au rayonnement solaire	250
44	Injection d'un faisceau laser dans une fibre	256
45	Sonde pyrométrique	261
46	Absorption d'ondes centimétriques	266
47	Taux de CO_2 et réchauffement de la Terre	270
48	Répartitions d'éclairement sur un plan	272
49	Fluorescence induite par laser	276
50	Mesures de la température de flammes	280
51	Pompage optique du césium	285
52	Fluorescence prédissociée de l'oxygène	289
53	Plaque refroidie plongée dans une flamme	293
54	Convection libre le long d'un plan vertical	296

Annexes

301

A.1	Références bibliographiques	301
A.2	Propriétés thermiques	302
A.3	Convection : corrélations entre nombres adimensionnels	303

A.4	Table numérique des fonctions de Bessel	304
A.5	Table numérique: $\omega_j, A_j, B_j, C_j = f(\text{Biot})$	305
A.6	Table de transformées de Laplace	308
A.7	Fonction "erreur" et fonctions associées	309
A.8	Fraction d'existance du corps noir	310
A.9	Table numérique de la fonction intégr-exponentielle E_3	311