

TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

THERMIQUE

Thermique industrielle

Lois fondamentales et études industrielles

Bruno CHÉRON



La côte de l'ouvrage : 2-621-827

Table des matières

THERMIQUE ET THERMODYNAMIQUE	7
BREF APERÇU HISTORIQUE DE LA THERMIQUE	7
PREMIERE PARTIE : RESUME DE COURS	
BILAN THERMIQUE	11
1. TEMPERATURE	11
2. FLUX ET DENSITE DE FLUX THERMIQUE	12
3. PRODUCTION ET STOCKAGE DE L'ENERGIE THERMIQUE	13
4. EQUATION FONDAMENTALE DE LA THERMIQUE	15
5. EXEMPLES D'APPLICATION	16
1. <i>Temps de réponse d'un fusible</i>	16
2. <i>Débit de vapeur d'une tranche de centrale nucléaire PWR</i>	17
TRANSFERTS THERMIQUES PAR CONDUCTION ET CONVECTION	19
1. CONDUCTION THERMIQUE	19
1. <i>Mécanismes du transfert conductif</i>	19
2. <i>Aspect phénoménologique : loi de Fourier</i>	19
3. <i>Equation de propagation de l'énergie thermique par conduction</i>	21
2. CONVECTION THERMIQUE	22
1. <i>Ecoulement laminaire, écoulement turbulent</i>	22
2. <i>Convection forcée, convection libre</i>	23
3. <i>Coefficient d'échange convectif : loi de Newton</i>	23
4. <i>Théorie de la similitude</i>	24
5. <i>Analyse dimensionnelle</i>	28
3. EXEMPLES D'APPLICATION	29
1. <i>Emballage de packs de bouteilles dans une fardeleuse</i>	29
2. <i>Influence de la température sur la résistivité électrique du nichrome</i>	30
3. <i>Vérification de la loi de Wiedemann-Franz</i>	32
4. <i>Temps d'inertie d'une thermistance CTN</i>	33
TRANSFERT THERMIQUE PAR RAYONNEMENT	36
1. RAYONNEMENT THERMIQUE ET FLUORESCENCE	36
2. GRANDEURS PHOTO-ENERGETIQUES	37
2.1. <i>Luminance d'une source</i>	37
2.2. <i>Exitance (ou émittance) d'une source</i>	38
2.3. <i>Eclairement d'un récepteur</i>	39
2.4. <i>Radiosité totale d'une surface</i>	39
3. L'ETALON DE RAYONNEMENT : LE CORPS NOIR	40
3.1. <i>Loi de Planck : luminance et exitance spectrales du corps noir</i>	41
3.2. <i>Loi de déplacement de Wien</i>	42
3.3. <i>Loi de Stefan : exitance totale du corps noir</i>	43
3.4. <i>Fraction d'exitance du corps noir : $F(x)$</i>	43
4. EMISSIVITE SPECTRALE, EMISSIVITE TOTALE	44
5. REFLECTIVITE, TRANSMITTIVITE ET ABSORPTIVITE	46
6. LOI DE KIRCHHOFF	49
7. COEFFICIENT D'ECHANGE « CONVECTO-RADIATIF »	49
8. TEMPERATURES CARACTERISTIQUES DU RAYONNEMENT	50
8.1. <i>Température de luminance totale (ou « de corps noir ») T_N</i>	50
8.2. <i>Température de luminance spectrique $T_{\lambda p}$</i>	50
8.3. <i>Température de couleur T_C</i>	51
9. EXEMPLES D'APPLICATION	51

9.1.	<i>L'expérience de M. de Buffon</i>	51
9.2.	<i>Dimensionnement du filament d'une lampe halogène</i>	53
9.3.	<i>Chauffage du scaphandre d'un astronaute</i>	55
9.4.	<i>Arc de soudage, coup d'arc</i>	58
ECHANGES RADIATIFS ENTRE SURFACES OPAQUES.....		60
1.	FACTEURS DE FORME	60
1.1.	<i>Définition et expression</i>	60
1.2.	<i>Règles de réciprocité et de complémentarité</i>	62
2.	FLUX RADIATIF NET	62
3.	ECHANGES RADIATIFS ENTRE SURFACES GRISES SEPARÉES PAR UN MILIEU TRANSPARENT	63
3.1.	<i>Calcul des radiosités, températures et flux radiatifs nets</i>	63
3.2.	<i>Facteur de forme gris. Analogie électrique</i>	65
4.	ECHANGES RADIATIFS ENTRE SURFACES GRISES SEPARÉES PAR UN MILIEU SEMI-TRANSPARENT	67
5.	EXEMPLES D'APPLICATION	68
5.1.	<i>Cryostat à azote liquide</i>	68
5.2.	<i>Coût énergétique d'un recuit d'homogénéisation</i>	71
5.3.	<i>Vitrification de déchets d'incinération</i>	73
RESISTANCES THERMIQUES.....		79
1.	ANALOGIE ENTRE LA LOI DE FOURIER ET LA LOI D'OHM	79
2.	VALIDITE DES SCHEMAS ELECTRIQUES EQUIVALENTS	80
3.	EXPRESSION DE QUELQUES RESISTANCES THERMIQUES	80
4.	EXEMPLES D'APPLICATION	81
4.1.	<i>Chauffage « basse température » par le sol</i>	81
4.2.	<i>Maintien du sodium en phase liquide</i>	82
4.3.	<i>Encrassement d'un élément de combustible nucléaire</i>	83
AILETTES ET SURFACES AILETTÉES		86
1.	GENERALITES	86
2.	EQUATION FONDAMENTALE DES AILETTES.....	87
3.	RESISTANCE ET EFFICACITE DES AILETTES.....	88
4.	EXEMPLES D'APPLICATION	92
4.1.	<i>Protection mécanique et thermique d'un transistor</i>	92
4.2.	<i>Radiateur tubulaire à ailettes</i>	93
4.3.	<i>Implantation d'ailettes dans un échangeur eau/air</i>	95
4.4.	<i>Refroidissement d'un ordinateur sous capot</i>	96
CONDUCTION THERMIQUE EN REGIME INSTATIONNAIRE.....		99
1.	MILIEUX THERMIQUEMENT MINCES : $Bi < 0,1$	99
1.1.	<i>Critère de Biot</i>	99
1.2.	<i>Relaxation thermique d'un système mince</i>	101
2.	MILIEUX THERMIQUEMENT EPAIS : $Bi > 0,1$	101
2.1.	<i>Trempe d'une plaque</i>	102
2.2.	<i>Trempe d'un cylindre de grande longueur</i>	105
2.3.	<i>Trempe d'une sphère</i>	106
2.4.	<i>Trempe de systèmes simples 2D et 3D</i>	106
3.	MILIEUX SEMI-INFINIS	107
3.1.	<i>Modèle du milieu semi-infini</i>	107
3.2.	<i>Transformée de Laplace de l'« équation de la chaleur »</i>	108
3.3.	<i>Chocs thermiques</i>	109
3.4.	<i>Propagation de signaux thermiques périodiques</i>	113
4.	EXEMPLES D'APPLICATION	114
4.1.	<i>Stérilisation d'une boîte de conserve</i>	114
4.2.	<i>Fermentation d'une couche de compost</i>	116
4.3.	<i>Double choc thermique</i>	120
4.4.	<i>Préchauffage du sable à l'entrée d'un four de verrier</i>	121

LES ECHANGEURS THERMIQUES.....	125
1. ENTHALPIE MASSIQUE D'UN FLUIDE.....	125
2. DEBIT CALORIFIQUE ET COEFFICIENT D'ECHANGE GLOBAL	126
3. ENCRASSEMENT : « FOULING FACTOR »	127
4. ECHANGEUR DE REFERENCE	127
4.1. <i>Écoulements de même sens (co-courant)</i>	128
4.2. <i>Écoulements de sens contraires (contre-courant)</i>	130
5. EFFICACITE D'UN ECHANGEUR.....	131
6. METHODE DU NTU (NUMBER OF TRANSFER UNITS).....	132
7. DIFFERENCE DE TEMPERATURE MOYENNE LOGARITHMIQUE (LMTD).....	133
8. EXEMPLES D'APPLICATION	134
8.1. <i>Régulation thermique d'un transformateur industriel</i>	134
8.2. <i>Préchauffage du fuel</i>	136
8.3. <i>Economiseur d'une chaudière industrielle</i>	137
8.4. <i>Refroidissement d'un moteur à combustion interne</i>	139
 SECONDE PARTIE : PROBLEME DE THERMIQUE EN MILIEU INDUSTRIEL	
 P1. TRANSISTOR DE PUISSANCE EN REGIME IMPULSIONNEL.....	143
P2. DIMENSIONNEMENT D'UN RECHAUFFEUR A AIR INDUSTRIEL	147
P3. RESISTANCE AU FEU DE STRUCTURES EN ACIER	152
P4. MODELE THERMIQUE D'UN COMPRESSEUR ELECTRIQUE	156
P5. ABSORPTION D'UN FLUX DE NEUTRONS RAPIDES.....	161
P6. CARACTERISATION D'UNE SONDE A HUILE	166
P7. REFROIDISSEMENT DE LA CATHODE D'UN ARC DE SOUDAGE	173
P8. MODELISATION D'UN CAPTEUR PHOTOVOLTAÏQUE HYBRIDE	178
P9. REGULATION DU REFROIDISSEMENT D'UNE PLAQUE DE VERRE	185
P10. PRECHAUFFAGE D'UNE PILE A COMBUSTIBLE.....	190
P11. FREIN A DISQUES AILETTES	196
P12. MONTEE EN TEMPERATURE D'UNE LIGNE D'ÉCHAPPEMENT	201
P13. COMBUSTION DE DECHETS ENFOUIS	208
P14. EMPRISONNEMENT DU RAYONNEMENT ENTRE DEUX AILETTES.....	214
P15. RISQUE D'AUTO-INFLAMMATION SOUS CAPOT AUTOMOBILE.....	220
P16. TREMPE DU CLINKER DANS UN REFROIDISSEUR A GRILLE.....	225
P17. ECHAUFFEMENT DU CARBURANT D'UN VEHICULE HYBRIDE	229
P18. CHAUFFAGE DE FERRAILLES DANS UN FOUR ELECTRIQUE	234
P19. ENCRASSEMENT D'UNE CHAUDIERE D'INCINERATION	240
P20. DECOUPAGE LASER D'UNE PLAQUE EN ALUMINIUM	246

ANNEXES**Annexe A : Propriétés physiques**

A.1 PROPRIETES PHYSIQUES DE SOLIDES METALLIQUES	253
A.2 PROPRIETES PHYSIQUES DE SOLIDES NON-METALLIQUES	254
A.3 PROPRIETES PHYSIQUES DE L'EAU LIQUIDE SATUREE	255
A.4 PROPRIETES PHYSIQUES DE LA VAPEUR D'EAU SATUREE	256
A.5 PROPRIETES PHYSIQUES DE L'AIR SEC A LA PRESSION ATMOSPHERIQUE	257

Annexe B : Relations et fonctions mathématiques

B.1 COEFFICIENTS DE FOURIER.....	258
B.2 FONCTIONS DE BESSEL DE PREMIERE ESPECE.....	259
B.3 TABLE DE TRANSFORMEES DE LAPLACE.....	260
B.4 FONCTION « ERREUR » ET SA COMPLEMENTAIRE	261
B.5 FONCTIONS HYPERBOLIQUES	262
B.6 METHODES DE RUNGE-KUTTA.....	263

Annexe C : Tables numériques

C.1 : FRACTION D'EXITANCE DU CORPS NOIR	264
C.2 : TREMPE D'UNE PLAQUE D'EPAISSEUR 2δ	265
C.3 : TREMPE D'UN LONG CYLINDRE DE RAYON R.....	266
C.4 : TREMPE D'UNE SPHERE DE RAYON R.....	267
C.5 : FONCTIONS DE BESSEL DE 1 ^{ERE} ESPECE, D'ORDRES 0 ET 1	268
C.6 : FONCTION « ERREUR » ET SA COMPLEMENTAIRE	269

Annexe D : Corrélations entre nombres adimensionnels

D.1 CONVECTION LIBRE EXTERNE.....	270
D.2 CONVECTION FORCEE EXTERNE	271
D.3 CONVECTION FORCEE INTERNE	271

Annexe E : Références bibliographiques

E. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	272
--------------------------------------	-----

INDEX.....	273
-------------------	------------