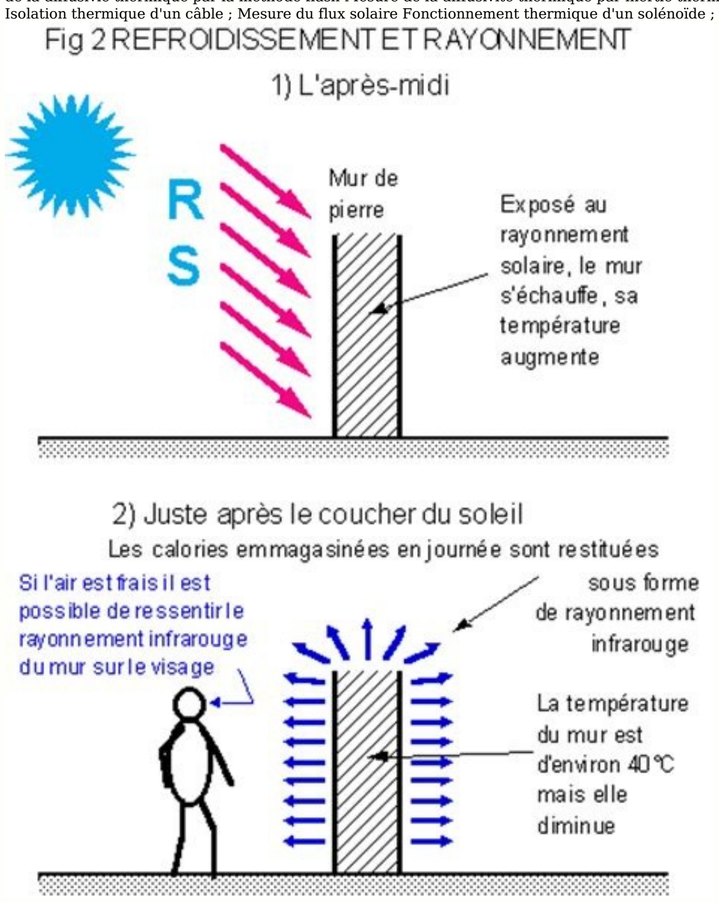
I'm not robot
reCAPTCHA
Continue

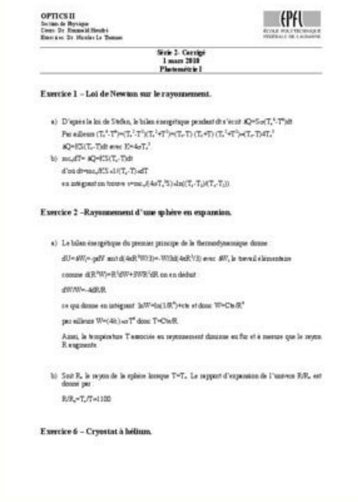
Exercice corrigé rayonnement thermique pdf

Exercice corrigé sur le transfert thermique par rayonnement pdf.

EXERCICES DE TRANSFERTS THERMIQUES Auteur : Claude SAINT-BLANQUET Racine Joindre l'auteur Exercices d'application directe des cours de conduction de la chaleur et de rayonnement thermique Expressions du Laplacien Murs thermiques Lame d'air Milieu composite Ailette Constantes de temps de milieux conductifs Flux emis par rayonnement Récepteur de rayonnement Serre Problèmes Dissipation de chaleur dans un système électronique Echangeur cylindrique Analyse thermique d'un système de type "casserole" Echauffement par frottement Mesure de la conductivité et de la diffusivité thermiques Température d'équilibre du Soleil et de la Terre Analyse thermique d'une lampe à ruban de tungstène Etude thermique d'une cheminée de logement Ecran thermique Etude d'un capteur solaire Echauffement d'une feuille de Nickel Echauffement du coeur d'un réacteur nucléaire Echauffement d'une plaque par infrarouges Echauffement d'une plaque par infrarouges (premiers instants) Etude thermique d'une barre Mesure de la diffusivié thermique par la méthode flash Mesure de la diffusivité thermique par inertie thermique Temérature au contact de deux matériaux Glaciation Examens (niveau L3) Mesure d'un flux rayonnant Confort thermique de l'être humain Fonctionnement thermique d'un microprocesseur Erreur de mesure de la température par thermocouple Isolation thermique d'un câble ; Mesure du flux solaire Fonctionnement thermique d'un solénoïde ; Températures d'équilibre du Soleil et de la Terre You're Reading a Free Preview Pages 8 to 11 are not shown in this preview.



You're Reading a Free Preview Pages 15 to 19 are not shown in this preview. You're Reading a Free Preview Pages 23 to 38 are not shown in this preview. You're Reading a Free Preview Page 42 is not shown in this preview. Academia.edu uses cookies to personalize content, tailor ads and improve the user experience. By using our site, you agree to our collection of information through the use of cookies. To learn more, view our Privacy Policy. Thème2 : Comprendre. Lois et modèles. Energie et développement durable P : 1 EXERCICES du Ch.14.



OPTICS II

Série 2: Corrigé

1 mars 2010

Photométrie I

Exercice 1 – Loi de Newton sur le rayonnement.

a) D'après la loi de Stefan, le bilan énergétique pendant dt s'écrit $dQ=S\sigma(T_e^4-T^4)dt$

Par ailleurs $(T_e^2-T^2)=(T_e^2-T^2)(T_e^2+T^2)=(T_e-T)(T_e+T)(T_e^2+T^2)=(T_e-T)4T_e^3$

$dQ=ES(T_e-T)dt$ avec $E=4\sigma T_e^3$

b) $m_{eau}dT=dQ=ES(T_e-T)dt$

d'où $dt=m_{eau}E/S\times1/(T_e-T)\times dT$

en intégrant on trouve $\tau=m_{eau}E/4\sigma T_e^3S)\times\ln((T_e-T_0)/(T_e-T_f))$

Exercice 2 –Rayonnement d'une sphère en expansion.

a) Le bilan énergétique du premier principe de la thermodynamique donne :

$dU=dW(=-pdV$ soit $d(4\pi R^3/3)(=-3V/3)d(4\pi R^3/3)$ avec dW, le travail élémentaire

comme $d(R^3)=R^2(dV+3VR^2/dR$ on en déduit :

$dW/W=-4dR/R$.

ce qui donne en intégrant $\ln W=\ln(1/R^4)+cte$ et donc $W=Cte/R^4$

par ailleurs $W=(4\pi)\sigma T^4$ donc $T=Cte/R$.

Ainsi, la température T associée au rayonnement diminue en fin et à mesure que le rayon R augmente

b) Soit R_0 le rayon de la sphère lorsque $T=T_0$. Le rapport d'expansion de l'univers R/R_0 est donné par :

$R/R_0=T_0/T=1/100$

Exercice 6 – Cryostat à hélium.

Transferts macroscopiques d?nergie EXERCICES CORRIGES p : 365 n°14 ² 15 ² 16 ² 18. Ch.14. TRANSFERTS 0$F526F23H48(6 G·(1(5*H(B Comment s'effectuent les transferts thermiques ? N°14 p : 365 : Identifier des modes de transferts thermiques Certaines douches solaires sont constituées d'un sac plastique noir dans lequel on place de l'eau et que l'on expose au Soleil. Identifier le mode de transfert thermique : a. du Soleil vers le sac plastique; b. du sac plastique vers l'eau qu'il contient; c.

RAYONNEMENT ET CONVECTION NATURELLE

Buts du T.P. : Objectifs

On se propose de mettre en évidence le transfert de puissance par rayonnement thermique et par convection naturelle. On déterminera l'exposant de la loi de Stefan, la valeur de la constante de Stefan ou l'émissivité d'un corps gris ainsi que la valeur du coefficient d'échange de surface par convection.

Le petit dessin (Ø⊕) signifie « Allez consulter le document annexe ».

I. - Modes de transfert de chaleur

Les échanges thermiques sont des phénomènes de transfert d'énergie sous forme de chaleur. Ils peuvent se faire selon 3 modes : la conduction, la convection et le rayonnement. Seules les notions fondamentales nécessaires à ce TP seront présentées. Pour plus de détails, consulter le document "Modes de transmission de la chaleur".

I.1 - Transfert de chaleur par conduction

La conduction est un transfert de chaleur dans un milieu matériel (solide ou fluide) sans mouvement de matière. C'est le seul mode de transfert de chaleur à l'intérieur d'un solide.

Le transfert de chaleur par conduction s'appuie sur la loi de Fourier $\vec{q}=-k\,\overrightarrow{grad}\,T$ qui relie la densité de puissance (unité $W.m^{-2}$) et le gradient local de température. k est la conductivité thermique du matériau considéré (unité $W.m^{-1}.K^{-1}$).

En faisant le bilan thermique sur un volume dV d'un solide, on obtient l'équation de la chaleur $\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=div(k\,\overrightarrow{grad}\,T)+q_v$. Dans le cas simple où le milieu est homogène ($\overrightarrow{grad}\,k=0$), incompri ($k_x=k_y=k_z=k$) et sans source volumique de chaleur ($q_v=0$), on est ramené à l'équation de Laplace $\Delta T=0$.

Si l'on peut considérer le problème comme unidimensionnel (*"écoulement"* de la chaleur dans une seule direction), on alors en coordonnées cartésiennes $\frac{d^2T}{dx^2}=0$ ce qui conduit à une répartition linéaire de la température en fonction de la distance $T=T_1-\frac{T_1-T_2}{l}x$. On obtient ainsi une relation simple $\boxed{P=k\frac{S}{l}(T_1-T_2)}$ qui relie la puissance transférée par conduction à la différence de température entre les extrémités du solide.

dans l'eau contenue dans le sac plastique. a. Le transfert thermique du Soleil vers le sac se fait par rayonnement. b. c. se fait par convection. N°15 p : 365 : Illustrer des modes de transferts thermiques En été et par beau temps, l'eau d'une piscine est à la température de 25 °C. La température de l'air est de 30 °C et celle du sol qui entoure la piscine est de 17 °C. Dans cette situation, donner un exemple où un transfert thermique a lieu : a. par conduction ; b. par convection ; . par rayonnement.

son contact. b. c. Il y a des transferts thermiques par rayonnement entre le Soleil et la piscine, et entre le Soleil et le sol. N°16 p : 365 : Reconnaître un mode de transfert Lors de la découpe d'une plaque métallique à l'aide d'une scie à métaux, on constate un échauffement important de la plaque et de la scie. 1. Comment varie l'énergie interne de la plaque métallique lors du découpage? 2. Par quel mode de transfert subit-elle cette variation d'énergie interne? 1. La température de la plaque augmente, son énergie interne également. 2. La plaque reçoit un travail mécanique de la force de frottement de la scie sur la plaque. Ce travail augmente localement la température de la plaque. Il y a ensuite un transfert thermique par conduction dans toute la plaque.

N°17 p : 365 : Calculer et exploiter un flux thermique On peut trouver sur le marché des casseroles en aluminium et d'autres en cuivre. Pour déterminer lequel de ces deux matériaux est celui qui transfère l'énergie thermique le plus rapidement, Marc utilise deux plaques de mêmes dimensions, l'une en cuivre et l'autre en aluminium. Il maintient un écart de température constant et égal à 5,0 °C entre les deux faces planes et parallèles de la plaque de cuivre. Le transfert thermique, pendant une durée de 15 min, entre les deux faces est QCu = 4,4 x 106 J. Ensuite, il procède de même avec la plaque d'aluminium dont la résistance thermique est Rth Al = 1,7 x 10-2 K.W-1. Donnée : Le flux thermique a pour expression : = Q = |T1 T2| t Rth 1. Quel est le flux thermique qui traverse : a.

la plaque de cuivre ? b. la plaque d'aluminium ? 2. Pour des dimensions identiques, quel est le matériau qui transfère le plus rapidement l'énergie thermique ? 1.

a. Le flux thermique qui traverse la plaque de cuivre est: Cu = Q Cu = 4,4 x 106 = 4,9x103 W t 15 x 60 b. nium est : Al = |T| = 5,0 = 2,9 x 102 W Rth_Al 1,7 x 10-2 2. tant que celui qui traverse une plaque de cuivre. e le *N°18 p : 365 : Calculer une énergie thermique transférée La fenêtre d'une chambre est constituée d'un simple vitrage. La température de la chambre est Ti = 19 °C et la température extérieure Te = -1 °C. Ces températures sont considérées constantes. 1. Schématiser la situation en précisant le sens du transfert thermique à travers la vitre. 2. Calculer la valeur du flux thermique à travers la vitre.

3. Quelle est l'énergie thermique transférée en 1,25 h? Données: Le flux thermique s'écrit = Q = |T1 T2| ; La résistance thermique de cette vitre est : Rth = 5,0 x 10-3 K.W-1. t Rth 1. 2. = T1 Te | = (19 (1)) = 20 soit = 4,0 x 103 W Rth_vitre 5,0 x 103 5,0 x 103 Le flux thermique à travers la vitre est de 4,0 x 103 W. 3. = ? ? soit Q = ·t avec t exprimé en seconde. En 1,25 h, elle a pour valeur : Q = 4,0 x 103 x 1,25 x 3 600 = 1,8 x 10 7 J. Ti = 19°C Tf = -1°C transfert de chaleur par convection exercices corrigés pdfexercices avec corrigés de transfert thermique pdfconvection conduction rayonnement+exercices corrigés pdfexercice corrigé sur le transfert thermique par rayonnement pdfexercices rayonnement thermiqueexercice corrigé echangeur de chaleurexercices de phénomènes de transfert de chaleurexercices corrigés de rayonnement electromagnétique Page 2 PDFprof.com Search Engine Report CopyRight Search conjugaison japonaise tableaucours japonais gratuit pdfverbes japonais pdfle japonais tout de suite pdf(pdf) vocabulaire japonaisdictionnaire japonais pdf40 leçons pour parler japonais pdfle japonais pour les nuls pdf gratuit fiche vocabulaire japonais pdfverbes japonais pdfle japonais tout de suite pdfvocabulaire japonais courantvocabulaire japonais par themeconjugaison japonaise pdf100 fiches de vocabulaire japonais pdfverbes japonais tableau Politique de confidentialité -Privacy policy « Rayonnement thermique » Problèmes de rayonnement Exercice 1 : Flux radiatif et intégrale de la courbe de Planck Quelle est la fraction du flux émise par 1 m^2 de surface noire à 1000 °K entre 3 et 5 µm ? Solution : Le flux recherché représente l'intégrale de la courbe de Planck à 1000 °K sur la bande de 3 – 5 µm. Pour 4 µm on lit Eλ = 104 W/m^2 µm Donc E3-5 = 104.Δλ = 20 kW/m^2 (valeur approchée de l'intégrale). Exercice 2 : Surfaces exposées aux radiations solaires. Le rayonnement incident diffus Gd et direct GD sur une surface horizontale de la terre est représenté schématiquement sur la figure ci-après : Rayonnement solaire diffus r n Gd (W/m^2) Surface horizontale de la Rayonnement solaire direct θ GD (W/m^2) terre → L'énergie solaire incidente totale par unité de surface horizontale sur la terre s'écrit : G solaire = G D cos θ + Gd r où θ est l'angle d'incidence que fait le rayonnement solaire direct avec la normale n à la surface. La surface exposée au soleil et au rayonnement atmosphérique, est soumise aux interactions radiatives selon le schéma : 2 Problèmes de rayonnement « Rayonnement thermique » Atmosphère, Tatm Gsolaire Gatm = εσT4atm Eémi Ts = T° de surface α s G solaire εG solaire 144424443 E absorbé tel que le flux de chaleur net rayonnée s'écrit q& net ray = ∑ E absorbé − ∑ E émis = E solaire absorbée + E atm absorbé − E émis Avec 4 4 E atm absorbé = αGatm = ασTatm = εσTatm Tatm étant la température effective de l'atmosphère traitée comme un corps noir émettant une quantité d'énergie rayonnée équivalente. Soit une surface exposée au rayonnement solaire telle que GD = 400 W/m^2, Gd = 300 W/m^2, θ = 20°, Ts = 320 °K, Tatm = 260 °K, σ = 5.67×10-8 W/m^2 °K4 1. Déterminer le flux de chaleur net rayonnée pour les cas suivants : ε 0,9 Absorbeur à surface grise α s = 0,9 et ε = 0,9 (a) ε λ Réflecteur à surface grise α s = 0,1 et ε = 0,1 0,1 (b) λ 3 « Rayonnement thermique » Problèmes de rayonnement ε Absorbeur à surface sélective α s = 0,9 et ε = 0,1 0,9 0,1 (c) λ 3 µm ε 0,9 Réflecteur à surface sélective α s = 0,1 et ε = 0,9 0,1 (d) 3 µm λ 2.

Commenter les résultats obtenus. Solution : 1. G solaire = G D cos θ + Gd = 400. cos 20° + 300 G solaire = 675,9 W / m^2 d'où q net ray = E solaire absorbé + E atm absorbé − E émis 4 − εσTs4 q net ray = α s G solaire + εσTatm (4 − Ts4 q net ray = α s G sol + εσ Tatm) a) Cas de l'absorbeur à surface grise α s = 0,9 et ε = 0,9 (q net ray = 0,9 × 675,9 + 0,9 × 5,67.10 −8 260 4 − 320 4) q net ray = 306,5 W / m^2 b) Cas du réflecteur à surface grise α s = 0,1 et ε = 0,1 4 « Rayonnement thermique » ( ) ( ) ( ) q net ray = 0,1 × 675,9 + 0,1 × 5,67.10 −8 260 4 − 320 4 Problèmes de rayonnement q net ray = 34,1 W / m^2 c) Cas de l'absorbeur à surface sélective α s = 0,9 et ε = 0,1 q net ray = 0,9 × 675,9 + 0,1 × 5,67.10 −8 260 4 − 320 4 q net ray = 574,8 W / m^2 d) Cas du réflecteur à surface sélective α s = 0,1 et ε = 0,9 q net ray = 0,1 × 675,9 + 0,9 × 5,67.10 −8 260 4 − 320 4 q net ray = −234,3 W / m^2 2. Commentaires : Lorsque la surface est recouverte d'un matériau sélectif, elle a la même réflectivité pour le rayonnement solaire mais une haute émissivité pour l'infrarouge et perd plutôt 234,3 W/m^2.

On notera donc, après les cas étudiés, que la surface à matériau ordinaire gris à haute absorptivité gagne de la chaleur sous un flux de 306,5 W/m^2.

Ce gain de chaleur augmente pour atteindre 574,8 W/m^2 lorsque la surface est recouverte avec un matériau sélectif qui à la même absorptivité pour le rayonnement solaire mais une faible émissivité pour l'infrarouge. Aussi on remarque que la surface à matériau ordinaire gris à haute réflectivité gagne quand même un flux de chaleur de 34,1 W/m^2.

Exercice 3 : Flux absorbé par un corps à rayonnement incident Si la transmitivité τ = 0,386 à partir d'un rayonnement total incident sur un corps, égal à 2200 W/m^2, trouver le flux absorbé par ce corps.

On estime le flux réfléchi égal à 450 W/m^2. Solution : G = ρG + αG + τG = G (ρ + α + τ) C'est-à-dire ρ +α +τ = 1 5 Problèmes de rayonnement « Rayonnement thermique » Ainsi G (ρ + α + τ) = G s'écrira : αG = G − ρG − τG ou bien α = 1− ρG G − τ ou aussi αG = G − ρG − τG αG = 2200 − 450 − 0,386.2200 = 2200 − 450 − 849,2 αG = 900,8 W / m^2 Exercice 4 : Facteur de vue associés à deux sphères concentriques La règle de la sommation des facteurs de vue pour une enceinte à partir de la surface i sur toutes les N surfaces de cette enceinte s'écrit : N ∑F j =1 ia j =1 où le nombre de facteurs de vue à déterminer directement vaut 1 N (N − 1) . 2 Déterminer les facteurs de vue associés à une enceinte formée par deux sphères concentriques selon le schéma ci-après : r1 r2 1 2 Solution : La surface extérieure (1) et la surface intérieure (2) forment une enceinte à double surface c'est-à-dire N = 2. Cette enceinte comporte N^2 = 4 facteurs de vue qui sont F11 , F12 , F21 et F22 On a besoin dans ce cas de déterminer directement un seul facteur de vue car 1 1 N (N − 1) = .2(2 − 1) = 1 2 2 Les 3 autres restants peuvent être déterminés par les règles de sommation et de réciprocité. Même si on peut vérifier directement pour deux de ces facteurs que 6 « Rayonnement thermique » Problèmes de rayonnement F11 = 0 , pas de rayonnement partant de surface (1) sur elle même F12 = 1 , tout le rayonnement partant de la surface (1) atteint la surface (2). Ces relations permettent de déterminer l'autre facteur de forme par la somme : F11 + F12 = 1 Le facteur F21 est déterminé par l'application de la règle de réciprocité de la surface (1) à la surface (2). A1 F12 = A2 F21 F21 = A1 4πr12 F12 = .1 A2 4πr22 r F21 = 1 r2 2 Finalement le facteur F22 est déterminé par la règle de la sommation de la surface (2). F21 + F22 = 1 F22 = 1 − F21 r F22 = 1 − 1 r2 2 Exercice 5 : Facteur de vue entre deux disques parallèles et règle de superposition. Le schéma suivant montre que le facteur de vue d'une surface vers une autre, composée, est égal à la somme des facteurs de vue à partir de cette surface vers les parties qui la composent, d'après la règle de superposition : 3 3 + = 2 2 1 1 1 F1→ (2,3) = F1→2 + F1→3 1. Montrer grâce à la règle de réciprocité que : F(2,3)→1 = A2 F2→1 + A3 F3→1 A2 + A3 7 Problèmes de rayonnement « Rayonnement thermique » 2. Soit une cavité formée à partir de deux surfaces cylindriques concentriques de rayons respectifs r1 = 10 cm ; r2 = 5 cm ; r3 = 8 cm et de longueur L = 10 cm comme le montre le schéma ci après : 3 r2 = 5 cm r3 = 8 cm Aire annulaire L = 10 cm base Déterminer la fraction de rayonnement F1→anneau issu de la base de cette cavité annulaire et s'échappant jusqu'à la surface supérieure et ce, en utilisant l'abaque des facteurs de vue entre deux disques coaxiaux parallèles. 8 « Rayonnement thermique » Problèmes de rayonnement Solution : 1. Selon la règle de superposition F1→(2,3) = F1→2 + F1→3 Pour obtenir F(2,3)→1, multiplions cette équation par A1. A1 F1→(2,3) = A1 F1→2 + A1 F1→3 En appliquant la règle de réciprocité à chaque terme, on obtient : (A2 + A3)F(2,3)→1 = A2 F2→1 + A3 F3→1 C'est-à-dire F(2,3)→1 = A2 F2→1 + A3 F3→1 A2 + A3 Le facteur F1→anneau ne peut être déterminé directement car on n'a pas d'expression analytique ou une abaque pour les facteurs de vue entre une aire circulaire et un anneau coaxial. L'abaque donnant ces facteurs entre 2 disques coaxiaux parallèles proposés est une bonne approximation pour le cas étudié.

On a alors d'après le schéma : S1 = Surface de base de rayon r1 = 10 cm S2 = Aire circulaire de rayon r2 = 5 cm, en haut du schéma S3 = Aire circulaire de rayon r3 = 8 cm La règle de superposition permet d'écrire le facteur de vue de S1 vers S2 comme : F1→3 = F1→2 + F1→anneau puisque S3 est la somme de S2 et de l'aire annulaire. Les facteurs de vues F1→2 et F1→3 sont déterminés grâce à l'abaque correspondante, c'est-à-dire : L 10 cm = =1 r1 10 cm r2 5 cm = = 0,5 L 10 cm L 10 cm = =1 r1 10 cm r3 8 cm = = 0,8 L 10 cm Abaque → F1→2 = 0,11 Abaque → F1→3 = 0,28 9 « Rayonnement thermique » Problèmes de rayonnement Ainsi F1→anneau = F1→3 − F1→2 = 0,28 − 0,11 F1→anneau = 0,17 On notera que F1→2 et F1→3 représentent les fractions de rayonnement issus de la base atteignant les surfaces S2 et S3 respectivement ; leur différence donnant la fraction qui atteint l'aire annulaire. Exercice 6 : Règle de symétrie et facteurs de vue associés à un tétragone. La détermination des facteurs de vue peut être simplifiée pour une géométrie présentant des symétries. Le schéma ci-après montre que pour les surfaces j et k symétriques par rapport à la surface i, selon la règle de symétrie : j k i Fi → j = Fi →k et selon la règle de réciprocité F j →i = Fk →i On se propose de déterminer les facteurs de vue à partir de la base vers chacune des 4 faces de la pyramide schématisée comme suit : 3 4 5 2 1 Les 4 faces sont des surfaces isocèles et la base est une surface carrée. 10 « Rayonnement thermique » Problèmes de rayonnement Solution : La base de la pyramide (S1) et ses quatre faces (S2, S3, S4 et S5) forment une cavité à 5 surfaces dont 4 sont symétriques. La règle de symétrie permet d'écrire : F12 = F13 = F14 = F15 La règle de sommation appliquée à S1 donne : 5 ∑F j =1 1j = F11 + F12 + F13 + F14 + F15 = 1 Puisque la base S1 est une surface plate F11 = 0 Ainsi, à partir des deux relations précédentes on obtient : F12 = F13 = F14 = F15 = 0,25 Chacune des 4 faces de la pyramide reçoit le quart du rayonnement total issu de sa base. Exercice 7 : Facteurs de vue associés à un canal triangulaire infiniment long Déterminer le facteur de vue à partir de chaque face vers chacune des autres faces d'une conduite triangulaire infiniment longue dont la section est représentée par le schéma suivant : (3) L3 (2) L2 (1) L1 où L1, L2 et L3 désignent les cotés de cette section. Solution : Cette conduite étant infiniment longue, on néglige l'influence des extrémités et donc la fraction de rayonnement, issu de chaque face, qui s'y échappe. Ainsi , on peut considérer ce système comme une cavité avec N = 3 Cette cavité implique N^2 = 3^2 = 9 facteurs de vue, mais il est nécessaire de déterminer seulement 11 « Rayonnement thermique » Problèmes de rayonnement 1 1 N (N − 1) = .3(3 − 1) = 3 2 2 de ces facteurs directement, en remarquant que trois de ces facteurs, pour les trois surfaces planes sont nuls. F11 = F22 = F33 = 0 Les 6 autres restants peuvent être déterminés par application des règles de sommation et de réciprocité. En appliquant la règle de la sommation à chacune des 3 surfaces, on obtient F11 + F12 + F13 = 1 F21 + F22 + F23 = 1 F31 + F32 +F33 = 1 En multipliant la 1ère équation par A1, la seconde par A2 et la 3ème par A3 il vient : A1F12 + A1F13 = A1 A2F21 +A2F23 = A2 A3F31 + A3F32 = A3 Finalement en appliquant les règles de réciprocité A1F12 = A2F21 A1F13 = A3F31 A2F23 = A3F32 Il vient : A1F12 + A1F13 = A1 A1F12 + A2F23 = A2 A1F13 + A2F23 = A3 C'est un système de 3 équations algébriques à 3 inconnues dont la résolution donne : F12 = A1 + A2 − A3 L1 + L2 − L3 = 2 A1 2 L1 F13 = A1 + A3 − A2 L1 + L3 − L2 = 2 A1 2 L1 F23 = A2 + A3 − A1 L2 + L3 − L1 = 2 A2 2 L2 12 Problèmes de rayonnement « Rayonnement thermique » Exercice 8 : Facteurs de vue associés à deux plaques planes et parallèles Pour des géométries infiniment longues et pouvant être irrégulières comme pour les canaux et les conduites, Hottel détermine le facteur de vue entre deux plaques planes et parallèles selon le schéma suivant, par la relation C b = L2 = 5 cm 2 D L6 L3 L4 L5 c = 6 cm A F1→2 = 1 a = L1 = 12 cm B ∑ (cordes croisées) − ∑ (cordes non croisées) = (L 2 × (corde sur la surface 1) 5 + L 6) − (L 3 + L 4) 2L 1 où L1 = a = 12 cm L2 = b = 5 cm L3 = c = 6 cm 1. Calculer le facteur de vue F1→2 de la surface (1) vers la surface (2) 2. En utilisant les relations pour les facteurs de vue entre faces de triangles, déduire une relation par la méthode d'Hottel, pour la géométrie proposée. Solution : 1. Calcul de F1→2 par la méthode d'Hottel F1→2 = (L5 + L6) − (L3 + L4) 2L1 Géométriquement les valeurs de L4, L5 et L6 sont : L4 = 7^2 + 6^2 = 9,22 cm L5 = 5^2 + 6^2 = 7,81 cm L6 = 12^2 + 6^2 = 13,42 cm 13 « Rayonnement thermique » Problèmes de rayonnement D'où F1→2 = (7,81 + 13,42) − (6 + 9,22) 2.12 F1→2 = 0,250 2. La géométrie est infiniment longue dans la direction perpendiculaire au plan du schéma. Les 2 plaques (S1 et S2) et les deux ouvertures (surfaces imaginaires S3 et S4) forment une cavité à 4 surfaces. L'application de la règle de la sommation à S1 donne F11 + F12 + F13 + F14 = 1 S1 étant plane, F11 = 0 Ainsi F12 = 1 − F13 − F14 F13 et F14 peuvent être déterminés en considérant les triangles ABC et ABD respectivement et en appliquant les relations donnant les facteurs de vue entre faces de triangles. On obtient F13 = L1 + L3 − L6 2 L1 F14 = L1 + L4 − L5 2 L1 En substituant, il vient L1 + L 3 − L 6 L1 + L 4 − L 5 − 2L 1 2L 1 F12 = 1 − F12 = (L 5 + L 6) − (L 3 + L 4) 2L 1 Exercice 9 : Transfert radiatif dans un four cubique à trois surfaces noires Le transfert radiatif entre une surface noire A1 vers une autre surface noire A2, maintenue respectivement à des températures uniformes T1 et T2 selon le schéma ci-après s'écrit : T1 A1 (1) Q& 12 T2 A2 (2) 14 « Rayonnement thermique » (Q& 1→2 = A1 F1→2σ T14 − T24) Problèmes de rayonnement (1) En considérant une cavité de N surfaces noires maintenues à des températures indiquées, la quantité radiative nette transférée à partir de chaque surface i de cette cavité vers chacune des surfaces qui la compose est alors déterminée par la relation généralisée : Q& i = ∑ Q& i → j = ∑ Ai Fi → j σ (Ti 4 − T j4) N N j =1 j =1 (2) Soit un four cubique de 5 m de côté et dont les surfaces sont considérées comme noires à températures uniformes comme indiquées sur le schéma suivant : T2 = 1500 °K (2) T3 = 500 °K (3) T1 = 800 °K (1) 1. Déterminer la quantité de chaleur rayonnée Q'1→3 entre la base de ce four et ses faces latérales ←W→ A2 A1 ↕L2 L1 On rappelle que le facteur de forme entre 2 rectangles parallèles et égaux est donné par l'abaque ci-dessus. 15 « Rayonnement thermique » Problèmes de rayonnement ' 2. Déterminer la quantité de chaleur rayonnée Q1→2 entre la base de ce four et la face de dessus. 3. En déduire la quantité de chaleur rayonnée à partir de la base de ce four Solution : 1. Pour déterminer Q'1→3 , on applique la relation (1) en remplaçant l'indice 2 par 3 (Q& 1→3 = A1 F1→3σ T14 − T34) Calculons le facteur de vue F1→3 . La règle de la sommation appliquée à la surface 1 donne F1→1 + F1→2 + F1→3 = 1 C'est-à-dire F1→3 = 1 − F1→1 − F1→2 Avec F1→1 = 0 puisque la surface 1 est plane L'abaque donne F1→2 = 0,2 car L1 L = 1 et 2 = 1 W W D'où F1→3 = 1 − 0 − 0,2 = 0,8 Ce qui donne (Q'1→3 = 5^2.0,8.5,67.10 −8 800 4 − 500 4) Q '1→3 = 393,611 kW ' 2. On applique la même relation (1) pour déterminer Q1→2 (Q1'→ 2 = A1 F1→2σ T14 − T24 ( ) Q1'→ 2 = 5^2.0,2.5,67.10 −8 800 4 − 1500 4) Q1'→ 2 = −1319,097 kW Le signe négatif indique que le transfert s'opère de la surface 2 vers la surface 1 3. Pour déterminer Q& 1 on utilise la relation généralisée (2) en remplaçant l'indice i par 1 et en prenant N = 3 3 Q& 1 = ∑ Q& 1→ j j =1 Q& 1 = Q& 1→1 + Q& 1→2 + Q& 1→3 16 Problèmes de rayonnement « Rayonnement thermique » Q& 1 = 0 + (− 1319,097) + 393,611 Q& 1 = −925,486 kW Le signe négatif indique que le transfert s'opère vers la surface 1 c'est-à-dire que c'est la base du four qui gagne environ 925 kW en puissance rayonnée. Exercice 10 : Facteur de vue associé à deux disques parallèles On se propose de calculer le facteur de vue F12 sous lequel S1 voit S2 selon le schéma ci-dessous : dS2 T2 S2 r R β1 h T1 d β2 dS1 S2 étant un disque au dessus d'un élément de surface parallèle dS1, le facteur de vue s'écrit : cos β1 cos β 2 dS 2 πd ^{2} 0 R F12 = ∫ En déduire le flux Φ 12 échangé entre deux surfaces noires, si S1 = S2 (F12 = F21) en fonction des grandeurs géométriques R et h et en fonction des températures des deux surfaces. Que devient le facteur de vue lorsque R tend vers l'infini ? Solution : cos β1 cos β 2 dS 2 πd ^{2} 0 R F12 = ∫ avec cos β1 = cos β 2 = h / d d ^{2} = r ^{2} + h^2 dS 2 = 2πrdr R F12 = ∫ 0 h ^{2}2πrdr π (r ^{2} + h^2) 2 = R^2 h^2 + R ^{2} 17 Problèmes de rayonnement « Rayonnement thermique » si S1 = S 2 → F12 = F21 Φ 12 = σ (T14 − T24) si R → ∞ et ( ) ( ) Φ 12 = σ T14 − T24 S1 F12 = σ T14 − T24 S 2 F21 πR 4 h2 + R2 F12 → 1 Exercice 11 : Flux radiatif reçu par un cylindre plein Calculer la quantité de chaleur que reçoit par rayonnement un cylindre plein en laiton oxydé (100 mm de diamètre intérieur et 500 mm de hauteur) à T = 200 °C, contenu dans une chambre en briques à T' = 1000 °C de très grandes dimensions par rapport à celles du cylindre. Le coefficient d'absorption du laiton à 200 °C vaut ε = a1 = 0,6 Solution : 1 1 A1 F12 = 1 + − 1 + 1 − 1 = ε = a 1 et A2 ε2 F12 ε 1 A1 →0 A2 car A2 >> A1 ⇒ F12 = 1 d'où F12 = ε = a1 = 0,6 et Φ kW = σF12 T14 − T24 = 5,67 × 10 −8 × 0,6 1273 4 − 473 4 = 87,64 A m2 ( ) ( ) 2πD 2 Φ = + πDL .87,64 = 15,13 kW 4 Exercice 12 : Radiation émise d'une lampe à incandescence La température du filament d'une lampe à incandescence est de 2500 °K 1. Si le filament est considéré comme un corps noir, déterminer la fraction de l'énergie radiante qu'il émet pour qu'elle coïncide avec le domaine du visible. 2. Déterminer la longueur d'onde correspondante au maximum d'énergie rayonnée par le filament. On rappelle que le domaine du visible dans le spectre électromagnétique s'étend de λ1 = 0,4 µm à λ2 = 0,76 µm. Ainsi, les fonctions fλ du rayonnement pour le corps noir, sont données par le tableau correspondant suivant : 18 Problèmes de rayonnement « Rayonnement thermique » λT (µm.°K) fλ 200 0,000000 400 0,000000 600 0,000000 800 0,000016 1000 0,000321 1200 0,002134 1400 0,007790 1600 0,019718 1800 0,039341 2000 0,066728 Solution : 1. Détermination de la fraction de l'énergie radiante émise par le filament dans le domaine du visible : λ 1 T = 0,40 × 2500 = 1000 µm.°K → f λ1 = 0,000321 λ 2 T = 0,76 × 2500 = 1900 µm.°K → f λ 2 = 0,053035 f λ1 − λ 2 = f λ 2 − f λ1 = 0,053035 − 0,000321 = 0,0527135 EbλEb f 0, 4→0, 76 = f 0→0,76 − f 0→0, 4 0,4 0,76 1,16 λ, µm Ce qui représente environ 5 % du rayonnement émis par le filament de la lampe dans le domaine du visible. Les 95 % qui restent apparaissent dans l'infrarouge sous forme de chaleur rayonnée « non visible ». Ce n'est donc pas la meilleure façon de convertir 19 « Rayonnement thermique » Problèmes de rayonnement l'énergie électrique en lumière. Les tubes fluorescents sont les plus indiqués pour l'éclairage.

2. La longueur d'onde qui correspond au maximum d'énergie rayonnée par le filament est déduite de la loi de déplacement de Wien (λT)max λmax = = 2897,8 µm ° K 2897,8 = 1,16 µm 2500 Cette valeur est dans le domaine de l'infrarouge. Exercice 13 : Emissivité moyenne sur une surface et pouvoir émissif La fonction de l'émissivité spectrale d'une surface opaque à la température de 800 °K est donnée approximativement selon la figure suivante ελ 1,0 0,8 0,3 0,1 0 3 7 λ, µm Déterminer l'émissivité moyenne de la surface et son pouvoir émissif. Les fonctions fλ du rayonnement pour le corps noir sont données par le tableau correspondant suivant : 20 « Rayonnement thermique » λT (µm.°K) fλ 2200 0,100888 2400 0,140256 2600 0,183120 2800 0,227897 3000 0,273232 3200 0,318102 3400 0,361735 3600 0,403607 3800 0,443382 4000 0,480877 4200 0,516014 4400 0,548796 4600 0,579280 4800 0,607559 5000 0,633747 5200 0,658970 5400 0,680360 5600 0,701046 5800 0,720158 6000 0,737818 Problèmes de rayonnement Solution : La variation de l'émissivité d'une surface est donnée par la fonction escalier dont les 3 domaines telle que : λ1 ε(T) = ε1 ∫ E bλ (T)dλ 0 σT 4 λ2 + ε 2 ∫ E bλ (T)dλ λ1 σT 4 ∞ + ε 3 ∫ E bλ (T)dλ λ2 σT 4 = ε 1f 0→λ1 (T) + ε 2 f λ1→λ 2 (T) + ε 3 f λ 2→∞ (T) = ε 1f λ1 + ε 2 (f λ 2 − f λ1) + ε 3 (1 − f λ 2) où fλ1 et fλ2 sont les fonctions du rayonnement pour le corps noir correspondant à λ1T et λ2T. 21 « Rayonnement thermique » λ1T = 3 × 800 = 2400 µm ° K → f λ1 = 0,140256 λ2T = 7 × 800 = 5600 µm ° K → f λ 2 = 0,701046 Problèmes de rayonnement On notera que f 0→λ 1 = f λ 1 − f 0 = f λ 1 ; f0 = 0 f λ 2→∞ = f ∞ − f λ 2 = 1 − f λ 2 ; f∞ = 1 En substituant, on a ε = 0,3 × 0,140256 + 0,8(0,701046 − 0,140256) + 0,1(1 − 0,701046) ε = 0,521 La surface émet une énergie radiante à 800 °K comme une surface grise ayant une émissivité ε = 0,521 . Le pouvoir émissif de cette surface s'écrit : E = εσT 4 E = 0,521 × 5,67.10 −8 (800) = 12100 W / m^2 4 Cette surface émet 12100 Joule d'énergie rayonnée par seconde par m^2 de surface.

Exercice 14 : Emission radiative d'une sphère noire Soit une balle sphérique de diamètre D = 20 cm à la température uniforme T = 800 °K, suspendue dans l'air.

En supposant que la balle est comme un corps noir : 1. Déterminer le pouvoir émissif total Eb pour cette balle. 2. Calculer en kJ l'énergie radiative émise en 5 minutes par cette balle. 3. Calculer le pouvoir émissif spectral Ebλ pour ce corps noir à la longueur d'onde λ = 3 µm . 800 °K 20 cm Balle 22 « Rayonnement thermique » Problèmes de rayonnement On donne pour la loi de Planck : C1 = 3,742.10 8 Wµm 4 / m^2 et C 2 = 1,439.10 4 µm ° K Solution : 1. Le pouvoir émissif total pour cette balle s'écrit alors selon la loi de Stefan- Boltzmann : Eb = σT 4 Eb = 5,67.10 −8.800 4 = 2,3224.10 4 W / m^2 Cette balle émet 23224 Joules d'énergie sous forme de radiation électromagnétique par seconde et par mètre carré de surface. 2.

L'énergie émise de toute la balle en 5 minutes s'écrit : q ray = Eb AΔt Avec A = πD 2 = π (0,2) = 0,1257 m 2 2 et Δt = 300 s q ray = 23224.0,1257.300 = 875,777.10 3 J q ray ≈ 875,8 kJ 3. Le pouvoir émissif pour la longueur d'onde de 3 µm est déterminé par la loi de Planck : Ebλ = Ebλ = Ebλ C1 C λ5 exp 2 − 1 λT , λ en µm et T en °K 3,743.10 8 (3)5 exp 1,4387.10 3.800 = 3848,4 W / m^2 µm 4 − 1 Exercice 15 : Radiosité d'une surface noire Montrer que la radiosité d'un corps noir est égale à son pouvoir émissif. 23 « Rayonnement thermique » Problèmes de rayonnement Solution : La radiosité représente la somme de l'énergie rayonnée émise et réfléchie par une surface. Radiosité J Radiation incidente Radiation réfléchie ρG G Radiation émise εEb Surface Pour une surface i grise et opaque εi = αi et α i + ρi = 1 C'est-à-dire, d'après le schéma J i = ε i Ebi + ρ i Gi en W/m^2 J i = ε i Ebi + (1 − ε i)Gi où Ebi = σTi 4 qui est le pouvoir émissif de la surface noire i et Gi étant l'irradiation (énergie rayonnée incidente sur la surface i par unité de surface et de temps) Pour une surface noire εi = 1. On en déduit que la radiosité Ji est bien égale au pouvoir émissif de la surface noire puisque : J i = Ebi = σTi 4 Exercice 16 : Flux de chaleur rayonné et analogie électrique On se propose de faire l'analogie électrique du flux de chaleur rayonnée Q& i à partir d'une surface i grise et opaque d'aire Ai sur la base de la loi de la radiosité Ji .

1. Ecrire la loi donnant Q& i = f (Ai , J i , et Gi) où Gi est l'énergie rayonnée incidente sur cette surface par unité de temps et d'aire. 24 « Rayonnement thermique » Problèmes de rayonnement 2. Déduire la loi Q& i = f (Ri) où Ri est la résistance de surface au passage du rayonnement 3. Faire un schéma électrique pour cette analogie et discuter les directions que prendra le flux de chaleur rayonnée par rapport à la surface i. Solution : 1. Le flux de chaleur rayonnée Q& i à partir d'une surface i d'aire Ai est égale à la différence entre l'énergie issue de toute la surface i et celle incidente sur celle-ci. Q& i = J i − Gi Ai en W/m^2 La loi de la radiosité Ji permet d'écrire pour une surface grise et opaque : J i = ε i Ebi + (1 − ε i)Gi ou bien Gi = J i − ε i Ebi 1− εi Ce qui donne : J − ε i Ebi Q& i = J i − i Ai 1− εi J i (1 − ε i) − (J i − ε i Ebi) = 1− εi Q& i ε i (Ebi − J i) = Ai 1− εi 2. Aε E − Ji Q& i = i i (Ebi − J i) = bi 1− εi Ri où Ri = 1− εi Ai ε i est la résistance de surface au passage du rayonnement 3.

Pour l'analogie électrique, la quantité (Ebi – Ji) correspond à la différence de potentiel et le flux net de chaleur rayonnée Q& i correspond au courant électrique. Q& i Ebi Surface i 1− εi Ri = Ai ε i Ji 25 « Rayonnement thermique » Problèmes de rayonnement Si Ebi > Ji , Q& i est dirigé à partir de la surface i Si Ji > Ebi , Q& i est dirigé vers la surface i Une valeur négative de Q& i indique que le transfert s'opère vers la surface i. Exercice 17 : Analogie électrique de la résistance spatiale au rayonnement Soient deux surfaces grises, diffuses et opaques de formes quelconques maintenues à des températures uniformes. 1. Utiliser la loi des radiosités et la loi de réciprocité pour déterminer Rij, la résistance spatiale au passage du rayonnement entre les surfaces i et j ci-dessous représentées : Ebj surface j Q& ij Jj Ji Rj Rij Ri surface i Ebi 2. Généraliser cette loi, pour une cavité à N surfaces et faire une représentation du réseau analogue électriquement. Solution : 1. Le flux de chaleur radiatif net de la surface i vers la surface j s'exprime par la relation Q& i → j = Ai J i Fi → j − A j J j F j →i La loi de réciprocité permet d'écrire Ai Fi → j = A j F j →i D'où Q& i → j = Ai Fi → j (J i − J j) qui est analogue à la loi d'Ohm Q& i → j = Ji − J j Ri → j 26 « Rayonnement thermique » Problèmes de rayonnement où Ri → j = 1 Ai Fi → j est la résistance spatiale au passage du rayonnement de Si vers Sj. 2. Pour une cavité à N surfaces, le principe de conservation de l'énergie requiert que le flux de chaleur net Q& i transféré à partir de Si est égal à la somme des flux nets transférés de Si vers chacune des N surfaces de cette cavité. Il vient donc, lorsque les surfaces sont à flux établis : Q& i = ∑ Q& i → j = ∑ Ai Fi → j (J i − J j) N N j =1 j =1 N Ji − J j j =1 Ri → j Q& i = ∑ (1) Afin d'établir l'analogie électrique, on sait que & = E bi − J i Q i Ri où (E bi − J i) est la différence de potentiel, Q& i le courant électrique et Ri la résistance de surface au passage du rayonnement. Il vient alors, lorsque les surfaces sont à des températures spécifiées : N J − J Ebi − J i i j =∑ Ri j =1 Ri → j (2) dont la représentation électrique est donnée comme suit : J1 Ri1 Ebi Ri2 Q& i Ri(N-1) Ri Surface i J2 RiN JN-1 JN Ainsi, le flux net de chaleur radiatif à partir d'une surface à travers ses résistances de surface est égal à la somme des flux issus de cette surface vers les autres à travers les résistances spatiales (au passage du rayonnement) correspondantes. Remarque : 27 Problèmes de rayonnement « Rayonnement thermique » On utilisera l'équation (1) lorsque les surfaces sont à flux imposé. On utilisera l'équation (2) lorsque les surfaces sont à températures imposées L'équation (2) peut être réarrangée. D'après l'exercice précédent, on sait que : Qi ε = i (Ebi − J i) et que Ebi = σTi 4 Ai 1 − ε i Comme l'équation (1) donne N Qi = ∑ Fi → j (J i − J j) Ai j =1 qu'on substitue ∑ F (J N j =1 i→ j i − J j)= εi (Ebi − J i) 1− εi Avec (2) on a, lorsque les surfaces sont à températures imposées σTi 4 = J i + 1− εi εi ∑ F (J j =1 i→ j i − J j) → ε iσTi 4 = J i − (1 − ε i)∑ Fij J j N N i j =1 Exercice 18 : Transfert radiatif entre deux plaques parallèles assez longues On rappelle que pour une cavité à 2 surfaces grises, opaques A1 et A2 d'émissivités ε1 et ε2 et aux températures uniformes T1 et T2, la quantité nette de chaleur radiative entre les 2 surfaces s'écrit d'après l'analogie électrique (méthode des réseaux) : ε1 A1 T1 (1) Q& 12 ε2 A2 T2 J1, J2 = radiosités Eb1- Eb2 = différence de potentiel R1 + R12 + R2 = résistance spatiale totale au passage du rayonnement Eb1 Q& 12 J1 J2 Q& 2 Eb2 (2) R1 = Q& 12 = Q& 1 1 − ε1 A1ε 1 (R12 = 1 A1 F12 R2 = 1− ε2 A2 ε 2) Eb1 − Eb 2 σ T14 − T24 = 1− ε2 1 R1 + R12 + R2 1 − ε 1 + + A1ε 1 A1 F12 A2 ε 2 28 « Rayonnement thermique » Problèmes de rayonnement Soient deux plaques parallèles, infiniment longues, maintenues aux températures uniformes T1 = 800 °K et T2 = 500 °K et qui ont respectivement pour émissivités ε1 = 0,2 et ε2 = 0,7 comme le montre la figure ci-après : A1 (1) ε1 = 0,2 T1 = 800 °K Q& 12 ε2 = 0,7 T2 = 500 °K (2) Déterminer le flux de chaleur radiatif net A2 & Q 12 entre les deux plaques en W/m^2, par la A méthode des réseaux. Solution : Pour 2 plaques parallèles infiniment grandes A1 = A2 = A F12 = 1 C'est-à-dire & = Q 12 σ(T14 − T24) σ(T14 − T24) = 1 − ε1 1 − ε 2 1 − ε1 1 1 − ε 2 1 + + + + A 1ε 1 A 1 F12 A 2 ε 2 A 2 A ε 2 A ε 1 A Aε 2 qui s'écrit : ( ) Q& 12 σ T14 − T24 = q&12 = 1 1 A + −1 ε1 q&12 = ε2 ( ) 5,67.10 −8 800 4 − 500 4 ≈ 3625 W / m^2 1 1 + −1 0,2 0,7 C'est le flux de chaleur radiatif net transféré de la plaque (1) vers la plaque (2) par m^2 de surface de plaque. 29 « Rayonnement thermique » Problèmes de rayonnement Exercice 19 : Chaleur rayonnée dans un four cylindrique Soit un four cylindrique de rayon r0 et de hauteur H tels que r0 = H = 1 m. La surface S1 de dessus et S2 la surface de base, d'émissivités respectives ε1 = 0,8 et ε2 = 0,4 sont maintenues aux températures uniformes respectives T1 = 700 °K et T2 = 500 °K. La surface latérale, considérée comme celle d'un corps noir est maintenue à la température T3 = 400 °K On se propose de déterminer en régime stationnaire, le flux de chaleur net, rayonné pour chacune des surfaces, sachant que le facteur de vue F12 est donné par l'abaque ci-jointe T1 = 700 °K ε1 = 0,8 (1) r0 (3) T3 = 400 °K Surface latérale noire H T2 = 500 °K ε2 = 0,4 (2) 1. Déterminer les facteurs de vue par la méthode directe 2. Utiliser l'équation générale pour les surfaces avec températures imposées : σTi 4 = J i + 1− εi εi ∑ F (J N j =1 i→ j i −Jj) pour déterminer les radiosités relatives aux 3 surfaces 3.

Déterminer les flux de chaleur nets rayonnés pour chacune des surfaces en utilisant l'équation générale pour les surfaces avec flux de chaleur imposé : Q& i = Ai ∑ Fi → j (J i − J j) N j =1 4. Comment peut-on maintenir ces surfaces à des températures imposées ? 30 « Rayonnement thermique » Problèmes de rayonnement Solution : 1. Le four cylindrique peut être considéré comme une cavité à 3 surfaces telles que : A1 = A2 = πr02 = π .1^2 = 3,14 m^2 A3 = 2πr0 H = 2π .1.1 = 6,28 m^2 Le facteur de vue de la base vers la surface de dessus est déterminé par l'abaque correspondante, avec L r2 = = 1, r1 L tel que : F12 = 0,38 Avec la règle de la sommation, on détermine le facteur de vue de la base vers la surface latérale. On a : F11 + F12 + F13 = 1 F13 = 1 − F11 − F12 = 1 − 0 − 0,38 F13 = 0,62 La surface de base est plane et donc F11 = 0 Notons que les surfaces de base et de dessus, étant symétriques par rapport à la surface latérale, il vient F21 = F12 = 0,38 et F23 = F13 = 0,62 La règle de réciprocité donnera le facteur de vue F31 A1 F13 = A3 F31 C'est-à-dire F31 = F13 A1 0,314 = 0,62. A3 0,628 F31 = 0,31 Aussi, par symétrie F32 = F31 = 0,31 2. Calculons les radiosités J1, J2 et J3 relatives aux 3 surfaces.

Surface de dessus Si = S1 σT14 = J 1 + 1 − ε1 ε1 [F1→2 (J 1 − J 2) + F1→3 (J 1 − J 3)] 31 « Rayonnement thermique » Problèmes de rayonnement Surface de base Si = S2 σT24 = J 2 + 1− ε2 ε2 [F2→1 (J 2 − J 1) + F2→3 (J 2 − J 3)] Surface latérale Si = S3. σT34 = J 3 + 0 (0 car la surface S3 est noire et ε3 = 1) On obtient alors numériquement le système : 5,67.10 −8.700 4 = J 1 + 1 − 0,8 [0,38(J 1 − J 2) + 0,68(J 1 − J 3)] 0,8 5,67.10 −8.500 4 = J 2 + 1 − 0,4 [0,28(J 2 − J 1) + 0,68(J 2 − J 3)] 0,4 5,67.10 −8.400 4 = J 3 La résolution du système donne : J 1 = 11418 W / m^2 J 2 = 4562 W / m^2 J 3 = 1452 W / m^2 3. Les flux de chaleur nets rayonnés pour les 3 surfaces sont déterminés par l'équation Q& i = Ai ∑ Fi → j (J i − J j) N j =1 C'est-à-dire Q& 1 = A1 [F1→2 (J 1 − J 2) + F1→3 (J 1 − J 3)] Q& 2 = A2 [F2→1 (J 2 − J 1) + F2→3 (J 2 − J 3)] & = A [F (J − J) + F (J − J)] Q 3 3 3→1 3 1 3→ 2 3 2 ou numériquement Q& 1 = 3,14[0,38(11418 − 4562) + 0,62(11418 − 1452)] Q& 1 = 27582 W Q& 2 = 3,14[0,38(4562 − 11418) + 0,62(4562 − 1452)] Q& 2 = −2126 W & = 6,28[0,31(1452 − 11418) + 0,31(1452 − 4562)] Q 3 & = −25456 W Q 3 32 « Rayonnement thermique » Problèmes de rayonnement Le flux de chaleur rayonné est issu de la surface de dessus vers la base et la surface latérale. On notera bien que Q& 1 + Q& 2 + Q& 3 = 27582 − 2126 − 25456 = 0 4. Pour maintenir les surfaces à des températures imposées, on doit alimenter en continu, la surface de dessus S1 avec une quantité de chaleur de 27582 W pendant que S2 et S3 continuent à dissiper respectivement 2126 W et 25456 W. Exercice 20 : Transfert radiatif dans un four à section triangulaire Soit un four à surfaces opaques, diffuses et grises dont la section a la forme d'un triangle équilatéral de 1 m de côté. La surface de base d'émissivité ε1 = 0,7 est maintenue à la température uniforme de 600 °K.

La surface latérale gauche S2 considérée comme noire est maintenue à T2 = 1000°K. La surface latérale droite est bien isolée. Si le four est supposé comme la cavité à 3 surfaces d'un conduit infiniment long et que les effets d'extrémités sont négligeables, déterminer en kW le flux de chaleur rayonnée nécessaire à la face S2 pour que les conditions opératoires restent maintenues en établissant le schéma analogue électriquement pour ce four.

(2) (3) surface isolée T2 = 1000°K Surface noire (1) Solution : ε1 = 0,7 T1 = 600 °K Le facteur de vue à partir de chaque surface dans la cavité est égal à 0,5 à cause de la symétrie F12 = F13 = F23 = 0,5 Sur la surface S3, du fait de l'isolation Q& 3 = 0 Ce qui donne : Q& 1 + Q& 2 + Q& 3 = 0 Q& = −Q& 1 2 33 Problèmes de rayonnement « Rayonnement thermique » Toute la chaleur perdue par S1 est gagnée par S2.

Le schéma électrique équivalent est le suivant : R1 Q& 1 Eb1 R12 E = J2 b2 J1 R13 & = −Q & Q 2 1 R23 Eb3 = J3 & Q 3 Pour une simple connection série-parallèle, la méthode des réseaux permet d'écrire : Q& 1 = Eb1 − Eb 2 Eb1 − Eb 2 = 1 R1 + 1 1 1 − ε1 1 + + A1 F12 + R12 R13 + R23 1 1 A1ε 1 + A1 F13 A2 F23 −1 où A1 = A2 = A3 = 1 × 1 = 1 m^2 par unité de longueur de conduit F12 = F13 = F23 = 0,5 Eb1 = σT14 = 5,67.10 −8 × 600 4 = 7348 W / m^2 Eb 2 = σT24 = 5,67.10 −8 × 1000 4 = 56700 W / m^2 C'est-à-dire Q& 1 = 56700 − 7348 1 − 0,7 1 + 1.0,5 + 1 1 1.0,7 + 1.0,5 1.0,5 −1 Q& 1 = 28 kW C'est le flux de chaleur nécessaire pour que les températures soient maintenues uniformes. Exercice 21 : Ecrans radiatifs et loi généralisée Le schéma suivant représente l'équivalence électrique du flux de chaleur radiatif Q& 1→2 transféré entre deux plaques planes et parallèles séparées par un écran radiatif d'épaisseur négligeable. 34 Problèmes de rayonnement « Rayonnement thermique » Plaque (2) Ecran Plaque (1) ε3,1 T3 A1 ε1 T1 Q& 12 1 A1 F13 1 − ε1 ε 1 A1 A3 ε3,2 T3 1 − ε 3,1 ε 3,1 A3 Q& 12 1 − ε 3, 2 ε 3, 2 A3 Q& 12 A2 ε2 T2 1 A3 F32 1− ε2 ε 2 A2 Eb1 Eb2 1. Montrer que Q& 1→2 avec un écran s'écrit à surfaces égales Q& 1→2 1e = ( ) Aσ T14 − T24 1 1 1 1 + − 1 + + − 1 ε1 ε 2 ε 3,1 ε 3, 2 2. Généraliser cette relation pour N écrans, à surfaces identiques avec celles des plaques. 3. En déduire une relation simplifiée lorsque toutes les émissivités sont partout égales, en fonction de Q& 1→2 , sans écran qui pour rappel s'écrit : Aσ(T14 − T24) & = Q 12 , sans écran 1 1 + −1 ε1 ε 2 Solution : 1. Le schéma électrique permet d'écrire Q& 12 = 1e Eb1 − Eb 2 1 − ε 3,1 1 − ε 3, 2 1 − ε1 1− ε2 1 1 + + + + + A1ε 1 A1 F13 A3ε 3,1 A3ε 3, 2 A3 F32 A2 ε 2 Notons que : F13 = F23 = 1 et A1 = A2 = A3 = A pour des plaques parallèles. 35 « Rayonnement thermique » Problèmes de rayonnement Cette équation se simplifie et devient : & Q 12 = 1e Aσ(T14 − T24) 1 1 1 1 + − 1 + + − 1 ε1 ε 2 ε 3,1 ε 3, 2 Le 2ème terme entre parenthèses dans le dénominateur représente la résistance additionnelle introduite par l'écran. 2. Pour N écrans entre les 2 plaques, la relation généralisée s'écrira de même : & Q 12 Aσ(T14 − T24) = 1 1 1 1 + K + 1 + 1 − 1 + − 1 + + − 1 ε ε1 ε 2 ε 3,1 ε 3, 2 N ,1 ε N , 2 Ne 3. Si les émissivités pour toutes les surfaces sont égales cette équation se réduit à Q& 12 (Ne) Aσ T14 − T24 1 & = = Q12 (sans écran) 1 N +1 1 (N + 1) + − 1 ε ε Exercice 22 : Ecran d'aluminium entre 2 plaques planes et parallèles Un écran fin d'aluminium d'émissivité ε3 = 0,1 sur les 2 faces est placé entre 2 grandes plaques planes et parallèles maintenues à des températures uniformes T1 = 800 °K et T2 = 500 °K et ayant respectivement pour émissivités ε1 = 0,2 et ε2 = 0,7. Les surfaces sont opaques, diffuses et grises.

(1) (2) (3) ε1 = 0,2 T1 = 800 °K ε2 = 0,7 T2 = 500 °K ε3 = 0,1 q&12 Déterminer le flux de chaleur radiatif transféré entre les 2 plaques par unité de surface de ces plaques et comparer le résultat avec celui obtenu sans écran. 36 « Rayonnement thermique » Problèmes de rayonnement Solution : q&12,1e = q&12,1e = Q& 12,1e A = σ (T14 − T24) 1 1 1 1 + + − 1 − 1 + ε1 ε 2 ε 3,1 ε 3, 2 5,67.10 −8 (800 4 − 500 4) = 805,6 W / m^2 1 1 1 1 + − 1 + + − 1 0,2 0,7 0,1 0,1 q&12, sans écran = q&12, sans écran = σ (T14 − T24) 1 1 + − 1 ε1 ε 2 5,67.10 −8 (800 4 − 500 4) = 3625 W / m^2 1 1 + − 1 0,2 0,7 L'écran a réduit le flux transféré entre les 2 plaques d'environ 4,5 fois. Exercice 23 : Transfert thermique à travers un collecteur solaire tubulaire Un collecteur solaire consiste en un tube horizontal en aluminium ayant un diamètre extérieur D1 = 5 cm. Ce tube est à l'intérieur d'un tube, en verre, à mince paroi de diamètre D2 = 10 cm. L'eau chauffée, circule à l'intérieur du tube d'aluminium et l'espace annulaire entre les deux tubes est rempli d'air à la pression atmosphérique.

La pompe de circulation de l'eau tombe en panne durant une journée d'ensoleillement et la température de l'eau commence à s'élever. Le tube en aluminium absorbe les radiations solaires Q& solaire en quantité de 27 W par mètre de longueur de tube et la température de l'air ambiant est de 294 °K. Les émissivités des tubes en aluminium et en verre sont respectivement ε1 = 0,95 et ε2 = 0,9. En prenant la température effective du ciel atmosphérique égale à Tciel = 283 °K, déterminer la température T1 du tube en aluminium en régime stationnaire c'est-à-dire, à l'équilibre thermique, par mètre de longueur du tube Q& (tube en aluminium- tube en verre) = Q& (tube en verre – ambiance) = Q& (gain solaire) = 27 W 37 Problèmes de rayonnement « Rayonnement thermique » Couverture en verre ε2 = 0,9 A2 T2 = 298 °K Rayons solaires 294 °K Tciel = 283 °K D1 = 5 cm Air D2 = 10 cm Tube en aluminium ε1 = 0,95 A1 T1 ? Eau On vérifiera que la température T2 de la couverture en verre est de 298 °K et que celle du tube en aluminium ne dépasse pas 320 °K dans ces conditions.

On donne pour l'air autour de 300 °K λ = 26,3 10-3 W/m °K ; υ = 15,89.10-6 m^2/s Pr = 0,707 et β = 1/300 °K = 0,0033 °K-1 Solution : Dans ce problème on aura à calculer des flux convectifs et des flux radiatifs. Calculons A2, la surface d'échange de la couverture en verre A2 = Atube en verre = (πD2 L)tube en verre = π × 0,1 × 1 = 0,314 m^2 A2 = 0,314 m^2 par mètre de longueur de tube Le coefficient de convection naturelle entre la couverture en verre et l'ambiance est déterminé en calculant le nombre de Rayleigh Ra D 2 gβ(Ts − T∞)D 32 9,81 × 0,0033(298 − 294)0,13 Pr = = 0,707 ν2 (15,89.10 −6)2 Ra D 2 = 3,62.10 5 Pour RaD2 ≤ 1012, la loi de Churchill et Chu est recommandée dans le cas de la convection autour d'un cylindre infiniment long : N u D2 = 0,6 + 0,387 Ra 1D/ 6 8 / 27 0,559 9 / 16 1 + Pr 2 38 « Rayonnement thermique » Nu D 2 = 0,6 + 1/ 6 0,387(3,62.10 5) 8 / 27 0,559 9 / 16 1 + 0,707 Problèmes de rayonnement 2 N u D2 = 10,88 λ h= D2 N u D2 = 26,3.10 −3 .10,88 0,1 h = 2,86 W / m^2 ° K D'où Q& 2,conv = hA2 (T2 − T∞) = 2,86 × 0,314(298 − 294) Q& 2,conv = 3,59 W Aussi 4) = 0,9 × 5,67.10 −8 × 0,314(298 4 − 2834) Q& 2,ray = ε 2σA2 (T24 − Tciel Q& 2,ray = 23,58 W C'est-à-dire & & & Q 2 , total = Q 2 , conv + Q 2 , ray = 3,59 + 23,58 & Q 2 , total = 27,17 W ≈ 27 W Puisque Q& 2,total est sensiblement égal à Q& solaire , la température estimée T2 de la couverture en verre est bien égale à 298 °K.

Dans le cas contraire, on l'aurait obtenue par itérations successives. La température dans le tube en aluminium est déterminée de la même manière, en utilisant les relations de convection et de rayonnement pour deux cylindres horizontaux concentriques. La longueur caractéristique dans ce cas est la distance entre les tubes cylindriques qui est : δ= 1 (D2 − D1) = 1 (0,1 − 0,05) = 0,025 m 2 2 D'où A1 = Atube en alum = (πD1 L)tube en alum = π × 0,05 × 1 = 0,157 m ^{2} A1 = 0,157 m^2 par mètre de longueur de tube Calculons Ra en supposant la température du tube en aluminium égale au maximum à 320 °K 39 Problèmes de rayonnement « Rayonnement thermique » gβ(T1 − T2)δ 3 9,81 × 0,0033(320 − 298)(0,025) Ra δ = Pr = 0,707 2 ν (15,89.10 −6)2 3 Ra δ = 3,1.10 4 Nu = 0,11Ra 0, 29 = 0,11(3,1.10 4) Nu = 2,21 T − T2 Q& 1,conv = λNuA 1 0 , 29 δ avec A étant la section équivalente d'une configuration à cylindres coaxiaux A= πL(D2 − D1) ln (D2 / D1) = π × 1 × (0,1 − 0,05) ln (0,1 / 0,05) A = 0,226 m^2 d'où 320 − 298 −3 & Q × 2,21 × 0,226 × 1, conv = 26,3.10 0,025 Q& 1,conv = 11,56 W Aussi Q& 1,ray = Q& 1,ray = σA1 (T14 − T24) 1 1 − ε 2 D1 + ε1 ε 2 D2 (5,67.10 −8 × 0,157 320 4 − 298 4) 1 1 − 0,9 0,05 + 0,95 0,9 0,10 Q& 1,ray = 20,89 W C'est-à-dire Q& 1,total = Q& 1,conv + Q& 1,ray = 11,56 + 20,89 Q& 1,total = 32,45 W Ce flux est supérieur à Q& solaire = 27 W On doit réévaluer la température T1 du tube en aluminium en dessous de la valeur maximale utilisée pour le calcul précédent. Fixons T1 = 318 °K Ce qui donne 40 « Rayonnement thermique » Problèmes de rayonnement Q& 1,conv = 10,5 W Q& 1,ray = 18,8 W Q& 1,total = Q& 1,conv + Q& 1,ray = 10,5 + 18,8 Q& 1,total = 29,3 ≥ 27 W Soit T1 = 316 °K Q& 1,conv = 9,46 W Q& 1,ray = 16,76 W Q& 1,total = 26,22 W ≤ 27 W La température d'équilibre du tube en aluminium est donc comprise entre 316 et 318 °K, lorsque la pompe de circulation s'arrête, soit : T1 = 317 °K Exercice 24 : Température de plaque traversée par un flux radiatif Deux plaques métalliques rapprochées sont traversées par un flux de thermique de 115 W/m^2.

Les températures extérieures sont T1 et T2. Si l'émissivité de chaque plaque vaut ε1 = ε2 = 0,023 et la température T1 = 383 °C, quelle serait la valeur de T2 ? Solution : ( ) ( ) q1→ 2 σ T14 − T24 5,67.10 −8 656 4 − T24 = = = 115 W / m^2 1 1 1 1 A + −1 + −1 ε1 ε 2 0,023 0,023 1743,5.10 8 = 656 4 − T24 → T24 = 1,85.1011 − 1,74.1011 T24 = 0,11 × 1011 = 11.10 9 → T2 = 324 ° K Exercice 25 : Emissivité d'un écran entre deux plaques planes et parallèles La quantité de chaleur transmise par rayonnement entre 2 surfaces planes et & . parallèles est Q ech 1.

Calculer le coefficient d'émissivité de l'écran qui doit être situé entre ces deux surfaces pour diminuer 3 fois la quantité de chaleur transmise. On donne : ε1 = ε2 = 0,8 ; T1 = 1500 °K, T2 = 1000 °K 41 « Rayonnement thermique » Problèmes de rayonnement Solution : ε 1 = ε 2 ⇒ ε e1 = ε e 2 ( ) (1 Q& ech,1e = Q& 12,ech ⇒ σAε 1e T14 − Te4 = σAε e 2 Te4 − T24 3 4 4 2Te4 = T14 − T24 → Te = 1193,8 ° K) Et ε 12 = 1 1 ε1 + 1 1 ε2 = 0,667 −1 Calcul de ε 1e 1& & Q Q ech ,12 = σAε1e (T14 − Te4) ech ,1e = 3 σA = ε 12 (T14 − T24) 3 T14 − T24 3 T14 − Te4 1 ε1 + 1 1 = 0,667 1500 4 − 1000 4 . = 0,3 3 1500 4 − 1193,8 4 = 0,3 εe −1 d'où ε e = 0,5 Exercice 26 : Effet radiatif sur les mesures de température Un thermocouple utilisé pour mesurer la température d'un écoulement d'air chaud dans une conduite dont les parois sont maintenues à Tw = 400 °K indique une température lue Tth = 650 °K. En supposant l'émissivité de la jonction du thermocouple ε = 0,6 et le coefficient de transfert convectif h = 80 W/m^2 °C, déterminer la température Tf de l'air chaud dans la conduite si les surfaces sont considérées comme opaques, diffuses et grises. Tth = 650 °K Tf Tw q&conv q& ray Tf Tw = 400 °K 42 Problèmes de rayonnement « Rayonnement thermique » Solution : L'équilibre sera établi et la lecture du thermomètre sera stabilisée lorsque le gain de chaleur par convection arrivant à la sonde est égal aux pertes par rayonnement et inversement. Ainsi, on écrit cette égalité par unité de surface : q& conv = q& ray h(T f − Tth) = ε thσ (Tth4 − Tw4) T f = Tth + ε thσ (Tth4 − Tw4) h 0,6 × 5,67.10 −8 650 4 − 400 4 T f = 650 + = 715 ° K 80 ( ) Le transfert radiatif cause une différence de 65 °C (ou en °K) dans l'indication de la température donnée par le thermomètre. Exercice 27 : Températures dans un capteur solaire Un capteur plan d'énergie solaire (1 m × 5 m) comprend une couche isolante, une plaque noircie sous laquelle sont soudés des tubes dans lesquels circule de l'eau, et deux plaques de verre (le verre est supposé parfaitement transparent dans le visible et parfaitement absorbant dans l'infrarouge).

Le flux solaire normal au capteur vaut 0,8 kW/m^2. Ø Te Ti Tc isolation La circulation d'eau étant arrêtée et en négligeant les échanges par conduction et par convection, calculer : Les températures Tc de la plaque, Ti du verre intérieur et Te du verre extérieur. 43 Problèmes de rayonnement « Rayonnement thermique » Solution : A l'équilibre thermique, pour chaque composant du capteur, les énergies rayonnantes reçues et absorbées sont égales à l'énergie émise. Etablissons les bilans pour : • le capteur ΦS + σSTi 4 = σSTc4 (1) • pour la vitre intérieure σSTc4 + σSTe4 = 2σSTi 4 (2) • pour la vitre extérieure σSTi 4 = 2σSTe4 (3) Calcul des températures : La 3ème équation donne : Ti 4 = 2Te4 D'où Ti = 21 / 4.Te La 1ère équation donne ΦS + 2σSTe4 = σSTc4 La 2ème équation donne σSTc4 + σSTe4 = 4σSTe4 Leur différence donne (en éliminant Tc) ΦS + 2σSTe4 + σSTe4 = 4σSTe4 qu'on divise par σS Φ Φ + 3Te4 − 4Te4 = 0 → = Te4 σ σ Φ Te = σ 1/ 4 800 = −8 5,67.10 1/ 4 Te = 344,65 ° K = 71,65 °C Ce qui permet de calculer Ti = 21 / 4 Te = 409,86 ° K = 136,86 °C La 1ère équation s'écrit (avec Ti4 = 2Te4) ΦS + 2σSTe4 = σSTc4 qu'on divise par σS 44 « Rayonnement thermique » Φ σ Φ σ Problèmes de rayonnement + 2Te4 = Tc4 +2 Φ σ = Tc4 Φ = 3Te4 σ Tc = 31 / 4 Te Tc4 = 3 Tc = 453,58 ° K Tc = 180,58 °C Ainsi : Ti = 136,86 °C ; Te = 71,65 °C et Tc = 180,58 °C Exercice 28 : Flux radiatif pour une ampoule en verre Dans une ampoule en verre, le filament de tungstène est porté à 3000 °C. Déterminer : 1. Le flux émis par rayonnement par le filament (en watts) 2. L'épaisseur du verre constituant l'ampoule 3.

Montrer que la distribution de la température de paroi externe de l'ampoule vérifie la loi 23T + 5,33.10-8T4 − 1477 = 0 Données : Température de la pièce : 20 °C Diamètre de l'ampoule : 5 cm Diamètre du filament : 2/10 mm Longueur du filament : 37,5 mm Coefficient d'émissivité du tungstène εt = 0,39 Coefficient d'émissivité du verre εv = 0,93 Coefficient de conductivité thermique du verre : λ = 1,15 W/m °C Ecart de température entre les deux parois de l'ampoule : 1 °C Coefficient de convection à l'extérieur : h = 23 W/m^2°C. Solution : 1. 4 q& = ε t σT 4 = 0,39 × 5,67.10 −8 (3273) = 2,5.10 6 W / m ^{2} Le filament a une puissance 45 « Rayonnement thermique » Problèmes de rayonnement q& × πDL = 2,5.10 6 × π × 0,2.10 −3 × 37,5.10 −3 = 60 Watts 2. Par conduction à travers la paroi de l'ampoule : Q= e= λS e Δθ avec S = πD 2 (1,15 × π × 5.10 −2 60) 2 ×1 = 0,15mm 3. Dans le milieu ambiant, la chaleur est transférée par convection et par rayonnement : (Q = hc (T − 293) + ε vσ T 4 − 293 4 S) Numériquement 60 π (5.10) −2 2 = 23(T − 293) + 0,93 × 5,67.10 −8 (T 4 − 293 4) La distribution de la température vérifie l'équation 23T + 5,33.10-8T4 − 1477 = 0 46