Numéro :

Corrigé

PAGE DE GARDE – SUJET D'EXAMEN
Année universitaire 2016-2017

Classe :	**Aéro-3**
Type d'examen :	**PARTIEL**
Matière : Transfert thermique	
Code matière : En 311tc	
Date : 25 janvier 2017	
Horaire :	
Durée : 2 h	
Enseignant : Bouguechal / Bertossi / Gomit	
Documents autorisés : NON	
Calculatrices autorisées : NON Programmables	

CADRE RÉSERVÉ A L'ENSEIGNANT :

Si au cours de l'épreuve, vous repérez ce qui vous parait être une erreur ou un oubli dans l'énoncé, vous le signalez clairement dans votre copie et vous poursuivez l'examen en proposant une solution.
Le barème est donné à titre indicatif.
Pour les QCM, chaque question comporte une ou plusieurs réponses.
Lorsque l'étudiant ne répond pas à une question ou si la réponse est fausse, la note attribuée sera égale à zéro.
Rédigez directement sur la copie.
Il sera tenu compte du soin apporté à la rédaction.

Exercice 1 : /12	**Exercice 2 : /6**	**Exercice 3 : /6**	**Formulaire**

CADRE RÉSERVÉ A L'ETUDIANT(E) :

Merci de compléter ce cadre et ***votre numéro*** *en haut de page à gauche :*

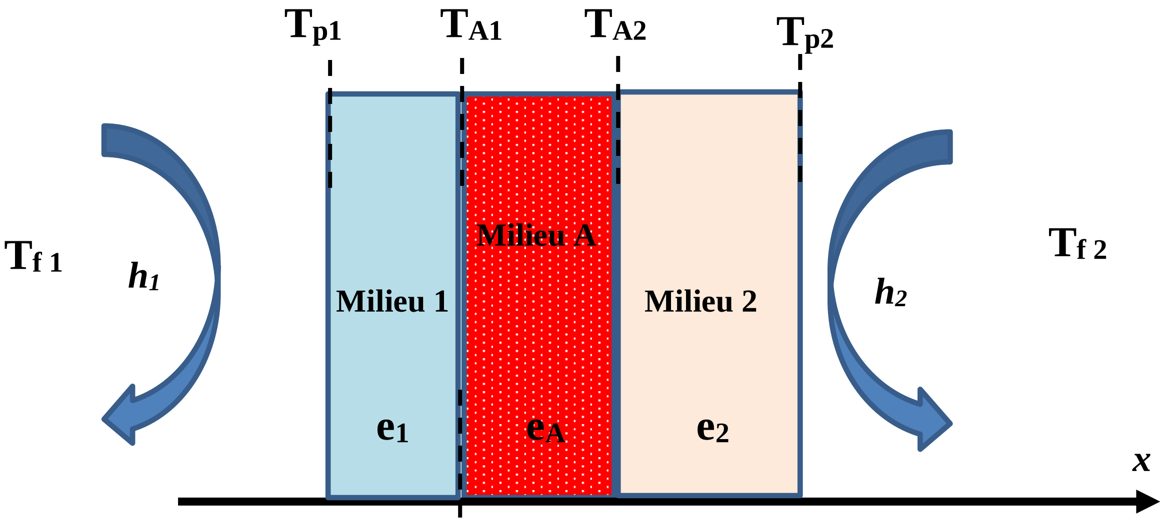
NOM :

Prénom :

Classe :

Exercice 1 : Conduction, convection avec source de chaleur (12 points)

On considère une paroi composite constituée de trois milieux différents et homogènes 1 et 2 de conductivités λ_1 et λ_2 et d'épaisseurs respectives e_1 et e_2 et d'un milieu A d'épaisseur e_A, de conductivité λ_A au sein duquel une réaction exothermique dégage une puissance volumique notée Q_V.
Le contact des milieux est supposé parfait.
Le coefficient d'échange par convection entre le milieu 1 et le milieu extérieur est appelé h_1 et la température du fluide loin de la paroi est notée T_{f1}.
Le coefficient d'échange par convection entre le milieu 2 et le milieu extérieur est appelé h_2 et la température du fluide loin de la paroi est notée T_{f2}.
Les températures de parois extérieures ainsi que des interfaces sont notées sur la figure.



I. 1ère Partie :

Aucune application numérique n'est demandée.

a) **Etablir l'expression de la température $T_A(x)$ dans le milieu A en fonction de Q_V, λ_A, e_A, T_{A1} et T_{A2}.**
b) **Etablir l'expression de la densité de flux $\varphi(x)$ dans le milieu A en fonction de Q_V, λ_A, e_A, T_{A1} et T_{A2}.**
c) **Déterminer la densité de flux dans le milieu 1 en fonction des températures T_{f1} et T_{A1}. On utilisera les résistances thermiques de conduction et convection correspondantes.**
d) **Déterminer la densité de flux dans le milieu 2 en fonction des températures T_{f2} et T_{A2}. On utilisera les résistances thermiques de conduction et convection correspondantes.**
e) **En exprimant la continuité de la densité de flux à l'abscisse $x = 0$, établir la formule qui lie T_{A1} et T_{A2} en fonction des données, on l'écrira sous la forme $aT_{A1} + b\,T_{A2} = c$**
f) **En exprimant la continuité de la densité de flux à l'abscisse $x = e_A$, établir la formule qui lie T_{A1} et T_{A2} en fonction des données. on l'écrira sous la même forme que la question précédente.**

II. $2^{ème}$ Partie :

Données : $\lambda_1 = 0.04$ W.m^{-1}.K^{-1} ; $\lambda_2 = 10$ W.m^{-1}.K^{-1} ; $\lambda_A = 1.50$ W.m^{-1}.K^{-1}
$e_1 = 0.03$ m ; $e_2 = 0.05$ m ; $e_A = 0.40$ m.
$h_1 = 100$ W.m^{-2}.K^{-1} ; $h_2 = 150$ W.m^{-2}.K^{-1}
$T_{f1} = 25°C$; $T_{f2} = 5°C$; $Q_V = 10^3$ W.m^{-3} ; $S = 1m^2$.

a) A partir de la question I e) Donner la formule qui lie T_{A1} et T_{A2} en fonction des données.
b) A partir de la question I f) Donner la formule qui lie T_{A1} et T_{A2} en fonction des données.
c) En déduire alors les valeurs de T_{A1} et T_{A2}.
d) En exprimant la continuité de la densité de flux, déterminer la température T_{p1}.
e) Même question pour T_{p2}.
f) Etablir la formule de la position x_{max} = correspondant à la température T_{Amax}.

Exercice 1 : Conduction, convection avec source de chaleur (Réponse)

I. $1^{ère}$ Partie :

a) Equation de la chaleur avec source.

$$\Delta T_A + \frac{Q_V}{\lambda_A} = 0 \; ; \qquad \frac{\partial^2 T_A}{\partial x^2} = -\frac{Q_V}{\lambda_A} \quad \Rightarrow \quad T_A(x) = -\frac{1}{2}\frac{Q_V}{\lambda_A}x^2 + ax + b$$

$$T_A(0) = b = T_{A1}$$

$$T_A(e_A) = T_{A2} = -\frac{1}{2}\frac{Q_V}{\lambda_A}{e_A}^2 + ae_A + T_{A1}$$

0.25 *4

$$a = \frac{T_{A2} - T_{A1}}{e_A} + \frac{1}{2}\frac{Q_V}{\lambda_A}e_A$$

b) Densité de flux du milieu A : $\varphi_A = -\lambda_A \frac{\partial T_A}{\partial x} \quad \Rightarrow \quad \varphi_A = -\lambda_A\left[-\frac{Q_V}{\lambda_A}x + a\right]$

c) Densité de flux du milieu 1 :

0.5 *2

$$\varphi_1 = \frac{T_{f1} - T_{A1}}{R\,S} = \frac{T_{f1} - T_{A1}}{\left(\frac{1}{h_1 S} + \frac{e_1}{\lambda_1 S}\right)S} = \frac{T_{f1} - T_{A1}}{\frac{1}{h_1} + \frac{e_1}{\lambda_1}}$$

0.5 *2

d) Densité de flux du milieu 2 :

$$\varphi_2 = \frac{T_{A2} - T_{f2}}{R\,S} = \frac{T_{A2} - T_{f2}}{\left(\frac{1}{h_2 S} + \frac{e_2}{\lambda_2 S}\right)S} = \frac{T_{A2} - T_{f2}}{\frac{1}{h_2} + \frac{e_2}{\lambda_2}}$$

0.5 *2

e) Continuité du flux en x = 0 ;

$$\varphi_1 = \varphi_A(x=0) \Rightarrow \frac{T_{f1}-T_{A1}}{\frac{1}{h_1}+\frac{e_1}{\lambda_1}} = -\lambda_A\left[-\frac{Q_V}{\lambda_A}x+a\right]_{x=0}$$

$$\frac{T_{f1}-T_{A1}}{\frac{1}{h_1}+\frac{e_1}{\lambda_1}} = -\lambda_A a = -\lambda_A\left[\frac{T_{A2}-T_{A1}}{e_A}+\frac{1}{2}\frac{Q_V}{\lambda_A}e_A\right]$$

0.5 *3

$$\boxed{T_{A1}\left(\frac{1}{\frac{1}{h_1}+\frac{e_1}{\lambda_1}}+\frac{\lambda_A}{e_A}\right)-T_{A2}\left(\frac{\lambda_A}{e_A}\right)-\frac{1}{2}Q_V e_A-\frac{T_{f1}}{\frac{1}{h_1}+\frac{e_1}{\lambda_1}}=0}$$

f) Continuité du flux en x = e_A ;

$$\varphi_2 = \varphi_A(x=e_A) \Rightarrow \frac{T_{A2}-T_{f2}}{\frac{1}{h_2}+\frac{e_2}{\lambda_2}} = -\lambda_A\left[-\frac{Q_V}{\lambda_A}x+a\right]_{x=e_A}$$

$$\frac{T_{A2}-T_{f2}}{\frac{1}{h_2}+\frac{e_2}{\lambda_2}} = -\lambda_A\left[-\frac{Q_V}{\lambda_A}e_A+\frac{T_{A2}-T_{A1}}{e_A}+\frac{1}{2}\frac{Q_V}{\lambda_A}e_A\right]$$

$$\boxed{T_{A1}\left(\frac{\lambda_A}{e_A}\right)-T_{A2}\left(\frac{\lambda_A}{e_A}+\frac{1}{\frac{1}{h_2}+\frac{e_2}{\lambda_2}}\right)+\frac{1}{2}Q_V e_A+\frac{T_{f2}}{\frac{1}{h_2}+\frac{e_2}{\lambda_2}}=0}$$

0.5 *3

II. 2ème Partie :

Données : $\lambda_1 = 0.04$ W.m^{-1}.K^{-1} ; $\lambda_2 = 10$ W.m^{-1}.K^{-1} ; $\lambda_A = 1.50$ W.m^{-1}.K^{-1}
$e_1 = 0.03$ m ; $e_2 = 0.05$ m ; $e_A = 0.40$ m.
$h_1 = 100$ W.m^{-2}.K^{-1} ; $h_2 = 150$ W.m^{-2}.K^{-1}
$T_{f1} = 25$°C ; $T_{f2} = 5$°C ; $Q_V = 10^3$ W.m^{-3} ; S = 1m^2.

a) A partir de I. e)

$$T_{A1}\left(\frac{1}{\frac{1}{h_1}+\frac{e_1}{\lambda_1}}+\frac{\lambda_A}{e_A}\right)-T_{A2}\left(\frac{\lambda_A}{e_A}\right)-\frac{1}{2}Q_V e_A-\frac{T_{f1}}{\frac{1}{h_1}+\frac{e_1}{\lambda_1}}=0$$

$$T_{A1}\left(\frac{1}{\frac{1}{100}+\frac{0.03}{0.04}}+\frac{1.50}{0.40}\right)-T_{A2}\left(\frac{1.50}{0.40}\right)-\frac{1}{2}10^3 0.40-\frac{25}{\frac{1}{100}+\frac{0.03}{0.04}}=0$$

$$5.066\ \ T_{A1}-3.75\ \ T_{A2}-232.89=0$$

0.5 *2

b) A partir de I. f)

$$T_{A1}\left(\frac{\lambda_A}{e_A}\right)-T_{A2}\left(\frac{1}{\frac{1}{h_2}+\frac{e_2}{\lambda_2}}+\frac{\lambda_A}{e_A}\right)+\frac{1}{2}Q_V e_A+\frac{T_{f2}}{\frac{1}{h_2}+\frac{e_2}{\lambda_2}}=0$$

$$T_{A1}\left(\frac{1.50}{0.40}\right)-T_{A2}\left(\frac{1}{\frac{1}{150}+\frac{0.05}{10}}+\frac{1.50}{0.40}\right)+\frac{1}{2}10^3 0.40+\frac{5}{\frac{1}{150}+\frac{0.05}{10}}=0$$

$$3.75\ T_{A1}-89.46\,T_{A2}-628.57=0$$

0.5 *2

c) On obtient alors un système de deux équations à deux inconnues.

$$\begin{cases} 5.066\ \ T_{A1}-3.75\ \ T_{A2}-232.89=0 \\ 3.75\ \ T_{A1}-89.46\,T_{A2}+628.57=0 \end{cases}\qquad T\ en\ celsius$$

Substitution ou combinaison, c'est à vous de voir :

On obtient :

$$T_{A1}=52.8°C=325.8\ K$$
$$T_{A2}=9.24\ °C=282.2\ K$$

0.5 *2

d) Pour déduire T_{P1} et T_{P2}, il faut utiliser la continuité du flux à l'interface milieu 1/fluide ; milieu 2/ fluide.

$$h_1 S(T_{f1}-T_{p1})=\frac{T_{p1}-T_{A1}}{\frac{e_1}{\lambda_1 S}}$$

$$T_{p1}=\frac{h_1 T_{f1}+\frac{T_{A1}}{\frac{e_1}{\lambda_1}}}{h_1+\frac{1}{\frac{e_1}{\lambda_1}}}$$

0.5 *2

$$T_{p1}=\frac{100*25+\frac{52.8}{\frac{0.03}{0.04}}}{100+\frac{1}{\frac{0.03}{0.04}}}=25.4°C=298.4\ K$$

e) Même méthode

$$h_2 S(T_{f2}-T_{p2})=\frac{T_{p2}-T_{A2}}{\frac{e_2}{\lambda_2 S}}$$

$$T_{p2}=\frac{h_2 T_{f2}+\frac{T_{A2}}{\frac{e_2}{\lambda_2}}}{h_2+\frac{1}{\frac{e_2}{\lambda_2}}}$$

0.5 *2

$$T_{p2} = \frac{150 * 5 + \frac{\frac{9.24}{0.05}}{10}}{150 + \frac{\frac{1}{0.05}}{10}} = 7.4°C = 280.4\ K$$

f) La température maximale dans le milieu A T_{Amax} est obtenue quand la fonction $T_A(x)$ s'annule.

$$T_A(x) = -\frac{1}{2}\frac{Q_V}{\lambda_B}x^2 + ax + b \Rightarrow \frac{dT_A(x)}{dx} = -\frac{Q_V}{\lambda_A}x_{max} + a = 0$$

$$a = \frac{T_{A2} - T_{A1}}{e_A} + \frac{1}{2}\frac{Q_V}{\lambda_A}e_A = \frac{9.24 - 52.8}{0.40} + \frac{1}{2} * \frac{1000}{1.50}0.40 = 24.4$$

$$x_{max} = \lambda_A \frac{a}{Q_V}$$

$$x_{max} = 1.50\frac{24.4}{1000} = 0.037\ m = 3.7\ cm$$

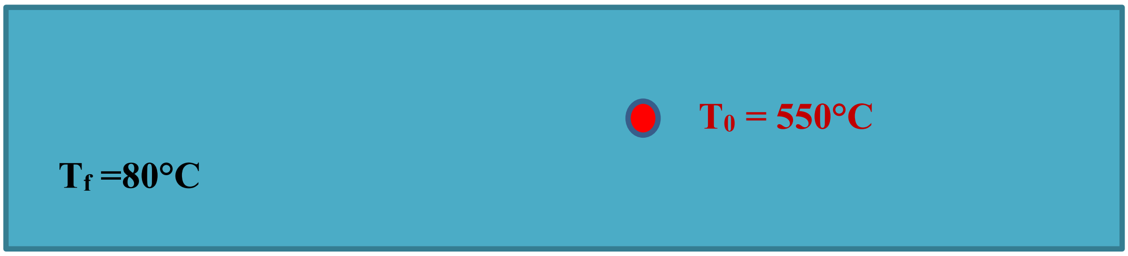
0.5 *2

$$T_{max} = 53.5\ °C = 326.5\ K$$

Exercice 2 : Refroidissement d'une bille dans un bain (6 points)

Une bille métallique de diamètre d = 2r = 5 cm, de capacité thermique c_p = 0,46 kJ/kg.K et conductivité thermique λ = 35 W/m.K, initialement à la température T_0 = 550°C est immergée brutalement dans un bain contenant un fluide à une température maintenue constante.
La masse volumique de la bille est de 7800 kg/m^3.
Le coefficient de convection h_c entre le fluide et la bille est de 10 W/m^2.K

$$sph\grave{e}re : \quad V = \frac{4}{3}\pi r^3 \ ; \quad S = 4\pi r^2$$



I. 1$^{\text{ère}}$ Partie :

Pour savoir si la température est uniforme dans la bille, il faut calculer le rapport appelé nombre de Biot (Bi) entre la résistance de conduction de la bille et la résistance de convection entre la bille et le fluide.

$$R_{cond} = \frac{r}{\lambda\, S} \qquad R_{conv} = \frac{1}{h\, S} \qquad Bi = \frac{R_{cond}}{R_{conv}}$$

Si le nombre de Biot est inférieur à 0.1, on peut alors dire que la température est uniforme dans la bille.

a) Calculer la résistance thermique de conduction de la bille.
b) Calculer la résistance thermique de convection entre la bille et le fluide.
c) Calculer le nombre de Biot.
d) Que peut-on dire des deux résistances thermiques ? Conclusion.
e) La chaleur traverse-t-elle facilement la bille ? Justifiez.

II. 2$^{\text{ème}}$ Partie :

Pour calculer le temps caractéristique de pénétration de la chaleur dans la bille, on fait un bilan d'énergie échangée entre la surface S de la bille et le fluide pendant l'intervalle de temps dt. On peut écrire alors :

$$h_c S\big(T_f - T(t)\big)dt = mc_p\, dT$$

a) En intégrant cette expression entre t = 0s et t = t, la température variant alors de T_0 et T(t), montrer que l'on obtient une expression de la forme :

$$\frac{T(t) - T_f}{T_0 - T_f} = Ae^{-\frac{t}{B}}$$

Déterminer A et B et donner leurs unités.

b) Calculer B, et donner son interprétation physique.
c) Calculer le temps au bout duquel la bille atteint 100°C.

Exercice 2 : Refroidissement d'une bille dans un bain (Réponse)

I. 1ère Partie :

a) Résistance de conduction.

$$R_{cond} = \frac{r}{\lambda\, S} = \frac{2.5\ 10^{-2}}{35 * 4\,\pi * (2.5\ 10^{-2})^2} = 9{,}1\,.10^{-2}\ K/W$$

0.5

b) Résistance de convection.

$$R_{conv} = \frac{1}{h_c\, S} = \frac{1}{10 * 4 * \pi * (2.5 * 10^{-2})^2} = 12.7\ \ K/W$$

0.5

c) Nombre de Bi.

$$Bi = \frac{R_{cond}}{R_{conv}} = \frac{9{,}1\,.10^{-2}}{12.7} = 7.1\ \ 10^{-3}$$

0.5

d) La résistance de convection est beaucoup plus élevée que la résistance de conduction. La chaleur passera facilement par conduction dans la bille.

0.5

e) Comme la résistance thermique de conduction de la bille est faible la chaleur traversera facilement la bille.

0.5

II. 2ème Partie :

a)

$$h_c S\big(T_f - T(t)\big)dt = mc_p\ dT$$

$$\int_0^t \frac{h_c S}{mc_p} dt = -\int_{T_0}^{T} \frac{dT}{\big(T(t) - T_f\big)}$$

$$\frac{h_c S}{mc_p} t = -\big[ln\big(T(t) - T_f\big)\big]_{T_0}^{T} = -ln\left(\frac{T(t) - T_f}{T_0 - T_f}\right)$$

$$\frac{T(t) - T_f}{T_0 - T_f} = e^{-\frac{h_c S}{mc_p}t}$$

0.5*5

$$A = 1\,;\ [A] = \left[\frac{T(t) - T_f}{T_0 - T_f}\right] = 1\,;\ pas\ d'unit\acute{e}$$

$$B = \frac{mc_p}{h_c S}\ ;\ \ [B] = T\ \ car\ \left[\frac{h_c S}{mc_p} t\right] = 1\ ;\ unit\acute{e}\ de\ B\ :\ s$$

b) Calcul et interprétation de B.

$$B = \tau = \frac{mc_p}{h_c S} = \frac{7800 * \frac{4}{3}\pi\big(2.5\ 10^{-2}\big)^3 * 460}{10 * 4\,\pi * (2.5\ 10^{-2})^2} = \frac{780 * 2.5\ 10^{-2} * 460}{3} = 2990\ s = 49.8\ min$$

0.5

Le B est constante caractéristique du phénomène physique. C'est-à-dire au bout de quelques τ la bille atteint la température du bain.

c) Temps au bout duquel la bille atteint 100°C.

$$T(t) = 100°C$$

$$\frac{T(t)-T_f}{T_0-T_f}=e^{-\frac{t}{\tau}} \qquad T(t)=100°C;\ \ T_f=80°C;\ \ T_0=550°C;\ \tau=2990s$$

$$t=-\tau\, ln\left(\frac{T(t)-T_f}{T_0-T_f}\right)=-2990\, ln\left(\frac{100-80}{550-80}\right)=9439\ s=157,3\ min$$

0.5

Exercice 3 : Captage de l'énergie solaire (6 points)

Un capteur solaire plan est constitué :

- ✓ **D'un panneau noir, appelé absorbeur à la température à l'équilibre T.**
- ✓ **D'une vitre à la température T_V permettant d'augmenter la température de l'absorbeur en réduisant les pertes thermiques.**

Entre la surface de l'absorbeur et la vitre, il y a du vide.
Le soleil émet comme un corps noir à la température à la température T_S = 5800 K. Le flux solaire arrivant sur le capteur est égal à : φ = 1000 W/m^2.
$\sigma = 5.67\ 10^{-8}$ W/m^{2}K^4.

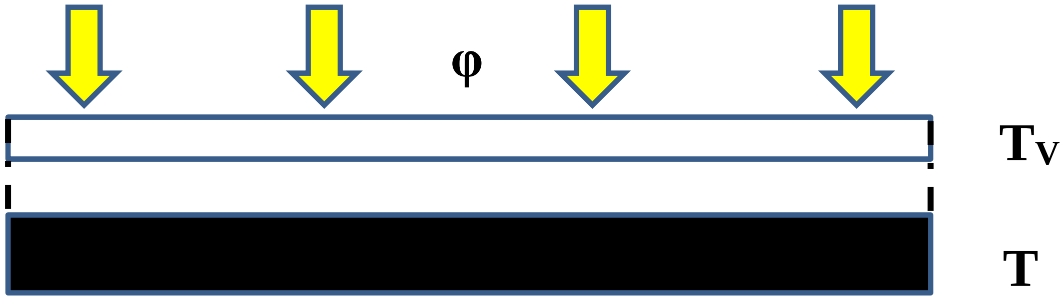
I. 1ère Partie :

Dans cette partie on considère uniquement le panneau noir, c'est-à-dire l'absorbeur qui se comporte comme un noir.

a) **Que peut-on dire du flux reçu par l'absorbeur et du flux émis par l'absorbeur ? Justifier.**
b) **Déterminer la température à l'équilibre et la calculer.**

II. 2ème Partie :

On considère le capteur solaire avec sa vitre. Le flux solaire arrivant sur la vitre est réparti sur 3 bandes spectrales.



Les caractéristiques optiques du vitrage selon les bandes spectrales sont les suivantes. Dans la dernière sont donnés les flux incidents dans chacune des bandes spectrales.

Zone	Bandes spectrales λ longueur d'onde en µm	Coefficient d'absorption	Coefficient de réflexion	Coefficient de transmission	Flux incident W/m²
❶	$0 < \lambda < 0.4$	$\alpha_1 = 0$	$\rho_1 = 1$	$\tau_1 = 0$	$\varphi_1 = 124$
❷	$0.4 < \lambda < 2.5$	$\alpha_2 = 0$	$\rho_2 = 0.05$	$\tau_2 = 0.95$	$\varphi_2 = 842.5$
❸	$\lambda > 2.5$	$\alpha_3 = 0.65$	$\rho_3 = 0.30$	$\tau_3 = 0.05$	$\varphi_3 = 33.5$

a) **Quelle relation lie les trois coefficients donnés dans le tableau. Justifiez.**

b) Quelle relation lie les trois flux incidents dans la 3ème colonne du tableau. Justifiez.
c) Dans quelle bande spectrale se situe toute la puissance de la vitre. Justifiez.

On supposera la température de l'absorbeur inférieur à 560 K. Toute la puissance du rayonnement émis par l'absorbeur l'est dans la bande spectrale 3.

III. 3ème Partie :

a) En tenant compte des caractéristiques optiques de la vitre, représenter sur un schéma les contributions du bilan thermique sur la vitre et sur l'absorbeur.
b) Ecrire les bilans thermiques par m^2 pour la vitre et l'absorbeur.
c) Montrer qu'il est alors possible de déterminer la température de l'absorbeur T et de la vitre T_V. On ne demande pas de les calculer.

Exercice 3 : Captage de l'énergie solaire (Solution)

I. 1ère Partie :

a) L'absorbeur étant un corps noir, à l'équilibre le flux reçu par l'absorbeur est égal au flux émis par l'absorbeur.

2*0.5

b) L'émittance d'un corps noir est donné par :

$$M^0(T) = \sigma T^4$$

$\sigma = 5.67\ 10^{-8}\ W/m^2K^4$

$$T = \left(\frac{M^0(T)}{\sigma}\right)^{1/4} = \left(\frac{\varphi}{\sigma}\right)^{1/4} = \left(\frac{10^3}{5.67\ 10^{-8}}\right)^{1/4} = 364\ K$$

2*0.5

II. 2ème Partie :

a) La somme des coefficients d'absorption, de réflexion et de transmission est égale à 1. En effet chaque coefficient représente une fraction d'énergie et la somme de tous ces coefficients donne la fraction totale de l'énergie.

2*0.5

b) Dans la dernière colonne, la somme des trois flux incidents dans les différentes bandes spectrales est égale au flux incident.

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 1000\ W/m^2$$

2*0.5

Le flux incident se répartit en trois flux selon la bande spectrale.

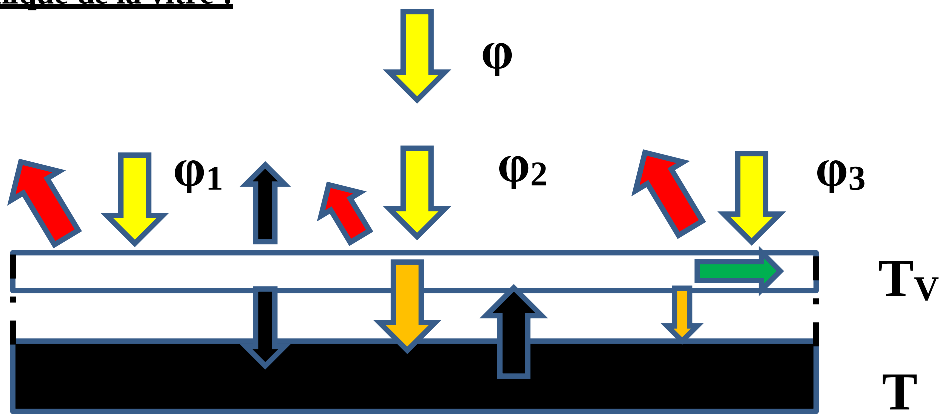
c) Toute la puissance de la vitre se situe dans la bande spectrale 3. Le coefficient d'absorption dans cette bande n'est pas nul.

2*0.5

III. 3ème Partie :

a) Représentation des contributions thermiques de la vitre et de l'absorbeur.

<u>Bilan thermique de la vitre :</u>

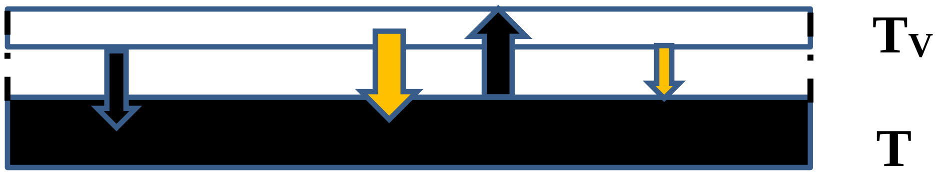


0.5

Bilan thermique de la vitre : absorbée par la vitre = émis par la vitre

$$\alpha_3\varphi_3 + \alpha_3\sigma T^4 = 2\varepsilon_3\sigma T_V^4$$

<u>Bilan thermique de l'absorbeur :</u>



0.5

Emis par l'absorbeur = transmis par la vitre + partie réfléchi par la vitre en direction de l'absorbeur +émis par la vitre vers l'absorbeur.

$$\sigma T^4 = \tau_2\varphi_2 + \tau_3\varphi_3 + \rho_3\sigma T^4 + \alpha_3\sigma T_V^4$$

b) Bilan

$$\alpha_3\varphi_3 + \alpha_3\sigma T^4 = 2\varepsilon_3\sigma T_V^4$$

$$\sigma T^4 = \tau_2\varphi_2 + \tau_3\varphi_3 + \rho_3\sigma T^4 + \alpha_3\sigma T_V^4$$

c) On obtient alors un système de deux équations à deux inconnues, il est alors possible de déterminer la température de la vitre et de l'absorbeur.

FORMULAIRE

Formules de transfert thermique	
Conduction et convection	
Flux de conduction (Loi de Fourier)	$\Phi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}$
Densité de flux de conduction (Loi de Fourier)	$\varphi = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$
Flux de convection (Loi de Newton)	$\Phi = h S (T - T_f)$
Densité de flux de convection (Loi de Newton)	$\varphi = h (T - T_f)$
Résistance thermique de conduction d'une paroi d'épaisseur e	$R = \frac{e}{\lambda S}$
Résistance de convection	$R = \frac{1}{h S}$
Flux de chaleur Densité de flux	$\Phi = \frac{\Delta T}{R}$ $\varphi = \frac{\Delta T}{RS}$
Equation de la chaleur avec source	$\Delta T + \frac{Q_V}{\lambda} = 0$
Equation de la chaleur sans source	$\Delta T = 0$
Rayonnement	
Emittance du corps noir	$M^0(T) = \sigma T^4$
	$\sigma = 5.67\ 10^{-8}\ W/m^2K^4$