



Concours Mathématiques et Physique Epreuve de Physique

Date : Lundi 20 Juillet 2020	Heure : 8 H	Durée : 4 H	Nombre de pages : 8
Barème :	Problème 1 : 14 pts	Problème 2 : 6 pts	

L'usage d'une calculatrice non programmable est autorisé.

L'épreuve comporte deux problèmes indépendants, le candidat peut les résoudre dans l'ordre qui lui convient, en respectant néanmoins la numérotation des questions.

Un candidat peut toujours se servir d'un résultat fourni par l'énoncé pour continuer sa composition.

Problème 1 : Diffusion de Rayleigh-Mesure de largeur d'une raie spectrale.

Données :

$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-ax^2) dx = \sqrt{\frac{\pi}{a}}$	$\sin a - \sin b = 2 \sin\left(\frac{a-b}{2}\right) \cos\left(\frac{a+b}{2}\right)$	$\text{sinc}(x) = \frac{\sin x}{x}$	$\int_0^\pi \sin^3 \theta d\theta = \frac{4}{3}$
$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$	$k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$	$N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	
$m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$	$R = N_A k_B = 8,31 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$	$M = 29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$	
$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$	Spectre visible : $4,0 \times 10^{14} \text{ Hz} \leq \nu \leq 7,7 \times 10^{14} \text{ Hz}$	

L'espace est rapporté à un référentiel galiléen $\mathcal{R}(Oxyz)$ de base orthonormée directe $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$. On notera $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_\varphi)$ la base sphérique attachée à un point M de $\mathcal{R}$. Le mouvement des particules étudiées est **non relativiste**.

Le Soleil émet un ensemble d'ondes électromagnétiques non polarisées qui se propagent dans le vide à la vitesse c . Ces ondes interagissent avec l'atmosphère produisant plusieurs phénomènes optiques.

Partie I : Diffusion de Rayleigh.

Dans la première partie de ce problème on s'intéresse à l'interaction des molécules de l'atmosphère avec le rayonnement du Soleil pour expliquer certains phénomènes de diffusion. On adoptera le modèle de l'électron élastiquement lié.

On suppose pour simplifier les calculs, que l'onde électromagnétique émise par le Soleil est monochromatique, plane de pulsation ω et caractérisée par son champ électrique

$$\vec{E}(M, t) = E_0 e^{i(\omega t - kx)} \vec{e}_z. \text{ Où } i^2 = -1.$$

- 1) Déterminer le champ magnétique $\vec{B}(M, t)$ de cette onde.
- 2) Déterminer la densité d'énergie électromagnétique $u_{em}(M, t)$ ainsi que sa valeur moyenne dans le temps $\langle u_{em} \rangle$.
- 3) Relier le vecteur de Poynting $\vec{\Pi}$ à u_{em} . Déduire la vitesse de propagation de l'énergie électromagnétique.
- 4) Donner la valeur moyenne par rapport au temps du flux de $\vec{\Pi}$ à travers une surface unité perpendiculaire à la direction de propagation. Cette grandeur est appelée intensité de l'onde et sera notée I .

Champ rayonné par un dipôle :

Soit un dipôle électrique oscillant, de moment dipolaire $\vec{p}(t) = p_0 \cos(\omega t) \vec{e}_z$ placé au point O (**Figure 1**). Dans l'approximation dipolaire et dans la zone de rayonnement on montre que le champ magnétique rayonné par ce dipôle au

point $M(r, \theta, \varphi)$ est : $\vec{B}(M, t) = \frac{\mu_0 \sin \theta}{4\pi r c} \frac{d^2 \vec{p}(t - \frac{r}{c})}{dt^2} \vec{e}_\varphi$.

- 5) Qu'est-ce que l'approximation dipolaire et la zone de rayonnement ?

- 6) Justifier la direction de $\vec{B}$ par des arguments de symétrie.
Ecrire son expression dans le cas du dipôle oscillant considéré.

- 7) En admettant que le champ électromagnétique dans la zone de rayonnement possède localement la structure d'une onde plane, déduire l'expression du champ électrique rayonné par ce dipôle.

- 8) Montrer que le vecteur de Poynting moyen s'écrit : $\langle \vec{\Pi} \rangle = \frac{\mu_0 p_0^2 \sin^2 \theta}{32\pi^2 r^2 c} \omega^4 \vec{e}_r$.

- 9) En déduire la puissance moyenne P_r rayonnée par le dipôle à travers une sphère de centre O et de rayon r .

En présence de l'onde électromagnétique incidente émise par le Soleil, le barycentre O des charges positives des noyaux d'une molécule d'air ne coïncide plus avec le barycentre A du cortège électronique de charge $q < 0$. Dans le référentiel d'étude $\mathcal{R}$, le mouvement du nuage électronique se réduit à celui du point matériel A de masse m_e et de charge $q < 0$.

L'interaction de A avec le reste de la molécule est modélisée par une force de rappel $\vec{F}_r = -m_e \omega_0^2 \vec{OA}$

et par une force de frottement visqueux $\vec{F}_f = -\frac{m_e}{\tau} \frac{d\vec{OA}}{dt}$, ω_0 et τ deux constantes positives. On prend

$\omega_0 = 2,0 \times 10^{16} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ et $\tau = 10^{-8} \text{ s}$. Le rayonnement solaire auquel est soumis la molécule, est assimilé à une onde monochromatique plane de champ électrique $\vec{E}_i(M, t) = E_0 e^{i(\omega t - kx)} \vec{e}_z$.

- 10) Pourquoi le mouvement des noyaux des molécules est-il négligeable ? Pourquoi peut-on négliger la force magnétique ? Quelle condition faut-il réaliser la longueur d'onde électromagnétique λ pour pouvoir supposer l'uniformité du champ $\vec{E}_i$ à l'échelle de la distance OA qui est de l'ordre de la dimension d'une molécule ?

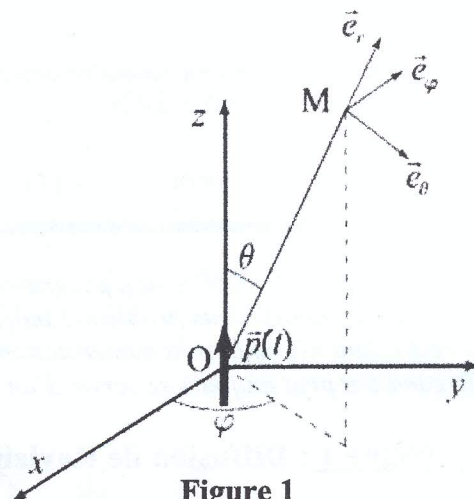


Figure 1

11) En appliquant le principe fondamental de la dynamique à la molécule d'air, établir qu'en régime forcé, $\overline{OA} = \frac{q}{m_e(\omega_0^2 - \omega^2 + i\frac{\omega}{\tau})} E_0 e^{i\omega t} \vec{e}_z$.

12) On définit le moment dipolaire de la molécule par : $\vec{p} = q \overline{OA} = \vec{p}_0 e^{i\omega t}$. Déterminer $p_0 = |\vec{p}_0|$.

Si l'onde incidente est située dans le visible, montrer que : $p_0 \approx \frac{q^2 E_0}{m_e \omega_0^2}$ (diffusion de Rayleigh).

13) En utilisant le résultat de la question 9), montrer que la puissance électromagnétique moyenne diffusée par une molécule d'air est $P_r = \frac{\mu_0 q^4 E_0^2}{12\pi c m_e^2} \frac{\omega^4}{\omega_0^4}$. En déduire une explication de la couleur bleue du ciel.

14) Quelle est la polarisation de la lumière diffusée par les molécules de l'atmosphère pour un observateur qui reçoit cette onde dans une direction perpendiculaire à celle du Soleil ? Justifier votre réponse.

15) Déterminer l'expression de la puissance moyenne P_i de l'onde solaire incidente, traversant sous incidence normale une surface S . En déduire la relation entre P_r et P_i .

16) On suppose que l'atmosphère contient N molécules d'air par unité de volume. La puissance P_r rayonnée par diffusion par ces molécules correspond à une diminution de la puissance solaire incidente P_i . Ce qui fait que la puissance de l'onde lumineuse incidente $P_i(x)$ diminue avec la distance x parcourue par celle-ci. En faisant un bilan de puissance sur le volume cylindrique de section S , située entre les plans d'abscisses x et $x + dx$, montrer que :

$$\frac{dP_i(x)}{dx} = -\frac{P_i(x)}{\ell}, \text{ où } \ell = \frac{6\pi m_e^2 \omega_0^4}{\mu_0^2 q^4 N \omega^4}.$$

17) En déduire l'expression de $P_i(x)$. Quelle est la signification physique de ℓ ? Comment varie ℓ avec λ ? Calculer ℓ pour les longueurs d'onde limites du spectre visible : $\lambda_{\text{rouge}} = 800 \text{ nm}$ et $\lambda_{\text{violet}} = 400 \text{ nm}$, sachant que $N = 3,0 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ et $q = -e$. Donner alors une interprétation de la couleur rouge du Soleil couchant.

Partie II : Elargissement Doppler.

18) Les ondes rayonnées par les molécules d'air ne sont pas rigoureusement monochromatiques, ceci est dû principalement à l'effet Doppler et à la distribution de vitesses des molécules d'air. Cette distribution est régie par la loi de Boltzmann : l'atmosphère est assimilée à un gaz parfait en équilibre thermique à la température T (les molécules sont supposées ponctuelles de masse m sans interaction entre elles). On suppose que ces molécules sont astreintes à se déplacer sur l'axe des z avec la vitesse v_z . On rappelle que la probabilité pour qu'une molécule ait une vitesse comprise

entre v_z et $v_z + dv_z$, est égale à $dP(v_z) = A \exp\left(-\frac{m v_z^2}{2k_B T}\right) dv_z$ où k_B est la constante de Boltzmann.

Exprimer A en fonction de m, k_B et T .

19) Lorsque la molécule se déplace à la vitesse v_z , par rapport à un observateur fixe situé sur l'axe Oz , et émet une onde de fréquence ν_0 , l'observateur reçoit une fréquence $\nu = \nu_0 \left(1 + \frac{v_z}{c}\right)$ où c est la vitesse de la lumière dans le vide. C'est l'effet Doppler (Figure 2).

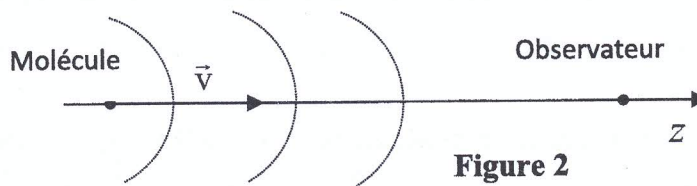


Figure 2

a) Quelle est la probabilité $dP(\nu)$ pour que la radiation émise par une molécule ait, pour l'observateur, une fréquence apparente comprise entre ν et $\nu + d\nu$?

b) L'intensité spectrale mesurée par l'observateur, $I_\nu(\nu)$, est proportionnelle à la probabilité $dP(\nu)$. En déduire que cette intensité peut se mettre à une constante près sous la forme :

$$I_\nu(\nu) = I_{\nu m} \exp\left(-\frac{(\nu - \nu_0)^2}{a^2}\right). \quad I_{\nu m} \text{ est une constante positive, } a \text{ est une constante à exprimer en}$$

fonction de ν_0, m, T, c et k_B .

c) Donner une représentation graphique de $I_\nu(\nu)$.

d) On caractérise la largeur $\Delta\nu$ de la raie spectrale, dite "largeur Doppler", par la largeur à mi-hauteur de la fonction $I_\nu(\nu)$. Exprimer $\Delta\nu$ en fonction de ν_0, m, T, c et k_B , puis en fonction de λ_0, R, M et T où M la masse molaire de l'air.

e) Calculer $\Delta\nu$ pour $\lambda_0 = 589\text{nm}$ et $T = 300\text{K}$.

Partie III : Mesure de la largeur d'une raie spectrale.

On étudie dans cette partie deux méthodes de mesure interférométrique de la largeur spectrale $\Delta\nu$ d'une raie.

A/ 1^{er} méthode : Interférence à deux ondes.

Dans la première méthode on utilise l'interféromètre de Michelson. Cet appareil est constitué de :

- Deux miroirs plans réfléchissants M_1 et M_2 . M_1 est en mouvement de translation; M_2 reste fixe.
- Une lame semi-réfléchissante S_p inclinée de 45° par rapport à l'axe Ox . Cette lame est supposée infiniment mince, de coefficient de réflexion en énergie $R = 0,5$. L'ensemble est placé dans l'air d'indice $n \approx 1$. Les positions des miroirs sont données par les distances $y = OO_2 = d$ et $x = OO_1 = d + e$. On éclaire l'interféromètre de Michelson avec un faisceau de lumière parallèle à l'axe Ox . En sortie de l'interféromètre, on place une lentille convergente L de manière que tous les rayons émergents se focalisent sur un photodétecteur placé au foyer image F' de L et relié à une table traçante (Figure 3).

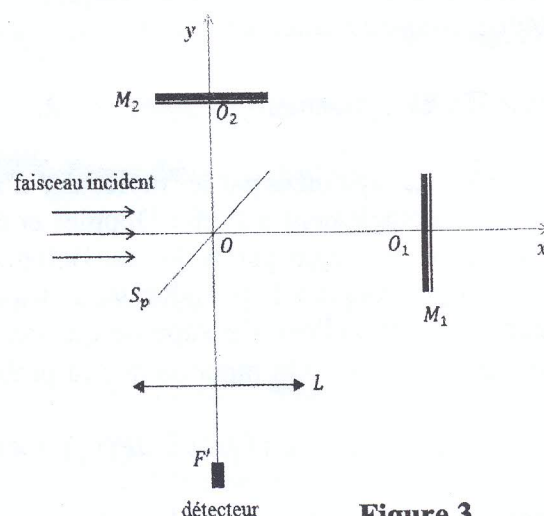


Figure 3

- 20) Représenter sur un schéma la marche de deux rayons lumineux de ce faisceau qui interfèrent en F' . Justifier l'appellation de lame d'air que l'on donne à ce dispositif. Exprimer la différence de chemins optiques δ entre ces deux rayons.

21) Dans le cas où la lumière peut être considérée comme parfaitement monochromatique de longueur d'onde λ , exprimer l'intensité I reçue par le détecteur en fonction de e , λ et l'intensité I_0 du faisceau incident.

22) La source lumineuse est en réalité polychromatique émettant des ondes de fréquences $\nu \in [\nu_1, \nu_2]$. Pour simplifier les calculs, on suppose que le profil spectral I_ν de la source est rectangulaire de largeur $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1$ et centré sur $\nu_0 = \frac{\nu_1 + \nu_2}{2}$. On notera $dI_0 = \frac{I_0}{\Delta\nu} d\nu$ l'intensité émise par la source dans l'intervalle de fréquences $[\nu, \nu + d\nu]$ (Figure 4).

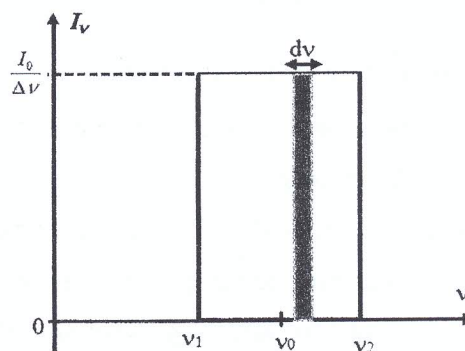


Figure 4

a) Donner l'intensité dI , reçue par le détecteur, correspondant à cet intervalle de fréquences.

b) En déduire que l'intensité totale I , reçue par le détecteur, peut se mettre sous la forme :

$$I = \frac{I_0}{2} \left(1 + \text{sinc}\left(\pi \frac{\delta}{L_c}\right) \cos\left(2\pi \frac{\nu_0}{c} \delta\right) \right).$$

Exprimer L_c en fonction de $\Delta\nu$ et de la célérité c de la lumière dans le vide, puis en fonction de la longueur d'onde moyenne λ_0 et l'intervalle en longueur d'onde $\Delta\lambda$. Exprimer le contraste des franges d'interférences $C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$ en fonction de L_c et δ .

23) Représenter l'allure de l'interférogramme $I(\delta)$ enregistré par le détecteur dans le cas où $\Delta\nu \ll \nu_0$. Interpréter cette allure.

24) À l'aide d'un critère semi-quantitatif sur l'ordre d'interférences $p = \frac{\delta}{\lambda}$, montrer que le contraste C reste bon si la différence de marche δ obéit à l'inégalité : $\delta < L_c$. Qu'appelle-t-on la grandeur L_c ? Préciser sa signification physique. Que vaut L_c dans le cas d'une source parfaitement monochromatique ?

25) À partir du contact optique on fait croître la différence de marche jusqu'à l'annulation du contraste (brouillage), on mesure alors $L_c = 4,047 \text{ mm}$. De quelle distance e a-t-on déplacé le miroir M_1 ? Calculer $\Delta\nu$ et $\Delta\lambda$ pour $\lambda_0 = 486,2 \text{ nm}$.

B/ 2^{ème} méthode : interférences à ondes multiples.

Un réseau plan constitué de N fentes fines F_p identiques et parallèles, périodiquement espacées de a , permet de déterminer la largeur spectrale $\Delta\lambda$. Nous supposons d'abord qu'il est éclairé sous incidence normale par une onde plane monochromatique de longueur d'onde λ provenant d'une source S située à l'infini (Figure 5).

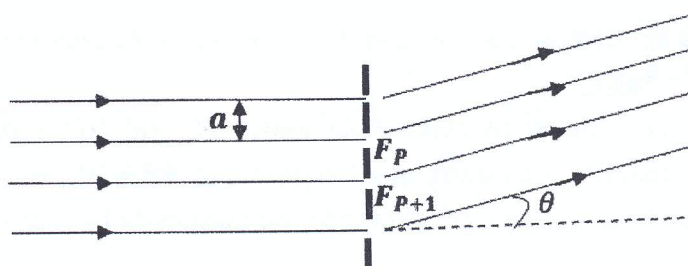


Figure 5

Les rayons émergents du réseau avec un angle θ convergent vers un point M d'un écran (E) situé dans le plan focal image d'une lentille convergente (L) de distance focale f' placée entre l'écran (E) et le réseau.

- 26) Déterminer la différence de marche $\delta = (SF_{p+1}M) - (SF_pM)$, ainsi que le déphasage φ , entre deux ondes qui convergent en M en passant par les deux fentes consécutives F_p et F_{p+1} , en fonction de a et θ .
- 27) Soit $\underline{A}_p = A_0 e^{-i\varphi_p}$, l'amplitude complexe au point M de l'onde issue de la fente F_p . On prendra pour origine des phases celle de l'onde passante par la première fente F_1 . Exprimer l'amplitude complexe totale $\underline{A}$ résultante de la superposition au point M des N ondes diffractées par le réseau, en fonction de A_0 , N et φ .
- 28) En déduire que l'intensité lumineuse diffractée par le réseau dans la direction θ est
$$I(\varphi) = \underline{A} \cdot \underline{A}^* = I_0 \frac{\sin^2\left(\frac{N\varphi}{2}\right)}{\sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)},$$
 avec $I_0 = A_0^2$ et $\underline{A}^*$ est le complexe conjugué de $\underline{A}$.
- 29) Etudier les variations de $I(\varphi)$ et préciser les directions des maximums principaux $I_{\max}$ (interférences constructives) et des minimums.
- 30) Calculer les intensités des maximums principaux $I_{\max}$ ainsi que les intensités I_1' et I_2'' correspondantes aux deux premiers maximums secondaires. Evaluer le rapport $\frac{I_1'}{I_{\max}}$ et $\frac{I_2''}{I_{\max}}$.
Conclure.
- 31) Tracer l'allure de la courbe $\frac{I(\varphi)}{I_{\max}}$, pour un nombre de fentes N assez grand, sur l'intervalle $[-2\pi, 2\pi]$.
- 32) Le faisceau est en réalité polychromatique. Qu'observe-t-on sur l'écran ?
- 33) Le pouvoir de résolution d'un réseau est son aptitude à séparer deux longueurs d'ondes voisines λ et $\lambda' = \lambda + \Delta\lambda$ ($\Delta\lambda \ll \lambda$). En admettant que pour un ordre m donné, les deux longueurs d'onde ne peuvent être séparées que si $\Delta\varphi \geq \frac{2\pi}{N}$ (critère de Rayleigh) où $\Delta\varphi$ est la différence de phase entre deux maximums principaux correspondants aux deux longueurs d'ondes λ et λ' .
- a) Montrer que $\Delta\varphi = 2m\pi \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$.
- b) En déduire en fonction de λ , m et N le plus petit écart $\Delta\lambda_{\min}$ qui peut être séparé par ce réseau.
- c) Déterminer le nombre de fentes N que doit avoir le réseau pour pouvoir résoudre deux radiations à l'ordre $m=1$ séparés par $\Delta\lambda = 10^{-1} nm$ pour $\lambda = 486,2 nm$.
- d) Comparer les deux méthodes de mesure de largeur spectrale. Commenter.

Problème 2 : Un pas vers la thermique des bâtiments.

Il est important de souligner que le premier rôle d'un bâtiment est d'assurer à ses occupants un climat intérieur agréable et peu dépendant des conditions extérieures : acoustiques et notamment thermiques

en liaison avec les situations météorologiques. Il devient donc primordial d'étudier la thermique du bâtiment qui est basée sur plusieurs phénomènes physiques qui sont essentiellement liés aux différents modes de transfert thermique.

1) Citer et définir les différents modes de transfert thermique.
 2) Dans un premier temps, nous considérons un barreau cylindrique parfaitement isolé sur sa surface latérale, de section S , de longueur L , de masse volumique ρ , de capacité thermique massique c et de conductivité thermique λ . On suppose qu'il n'y a aucune source d'énergie dans le barreau. La distribution de température à l'intérieur de ce barreau n'est pas uniforme et évolue au cours du temps. On suppose que la température du matériau ne dépend que de l'abscisse z et du temps t , elle sera notée $T(z, t)$. Soit $\vec{j}(z, t) = j(z, t)\vec{e}_z$ le vecteur densité de courant thermique.

- a) Quelle est l'unité de $j(z, t)$? Énoncer la Loi de Fourier.
 b) À partir d'un bilan énergétique effectué sur le volume du barreau compris entre z et $z + dz$, déterminer l'équation aux dérivées partielles vérifiées par la température $T(z, t)$.
 3) Ce barreau est chauffé à l'une de ses extrémités et est refroidi à l'autre extrémité en faisant circuler un liquide de refroidissement : on impose en $z = 0$, un flux thermique ϕ_0 et en $z = L$ on impose la température T_L . On suppose que le régime stationnaire est atteint (Figure 1).

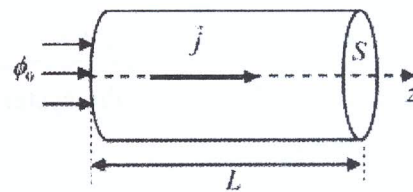


Figure 1

- a) Déterminer l'expression de $T(z)$ en fonction de ϕ_0 , L , T_L , λ et S .
 b) Tracer un graphique contenant deux profils de température $T(z)$ correspondants à deux flux thermiques différents : $\phi_{01} > \phi_{02}$ pour T_L fixe.
 4) **Conduction dans un mur** : On considère un mur tel que sa hauteur et sa profondeur sont supposées très grandes devant son épaisseur e . Le mur est constitué d'un matériau homogène et indéformable de conductivité thermique λ constante (Figure 2). On note $T(z = 0) = T_0$ et $T(z = e) = T_e$. Déterminer la densité de courant thermique $\vec{j}(z)$ et le flux correspondant qui traversent la surface S du mur en z quelconque. Interpréter.

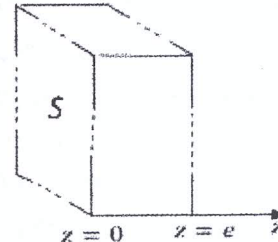


Figure 2

5) On reprend le même mur précédent, mais cette fois-ci la frontière en $z = 0$ est maintenue à une température constante T_0 , alors que la frontière en $z = e$ est soumise à un flux convectif dû à l'écoulement d'un fluide, caractérisé par le coefficient d'échange convectif h . La température du fluide loin du mur est égale à T_∞ .

- a) Montrer que T_e est donnée par la relation suivante : $\left(h + \frac{\lambda}{e}\right)T_e = \frac{\lambda}{e}T_0 + hT_\infty$.
 b) En remplaçant T_e par son expression, déterminer le flux thermique ϕ traversant la surface S du mur en fonction de T_0 , T_∞ , e , h , λ et S . Retrouver ϕ par une autre méthode sans calculer explicitement T_e .
 c) Établir que la distribution de température dans le mur est donnée par :

$$T(z) = -\frac{T_0 - T_\infty}{\left(e + \frac{\lambda}{h}\right)}z + T_0.$$

- 6) Considérons maintenant une succession de n murs constitués par des matériaux différents, de conductivité λ_i et d'épaisseur e_i ($i=1$ à n). On se place dans le cas où tous les murs ont la même hauteur et la même profondeur (Figure 3).

a) Montrer que le flux thermique qui traverse la surface S du système de n murs est donné par :

$$\phi = \frac{T_0 - T_n}{\sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i S}}$$

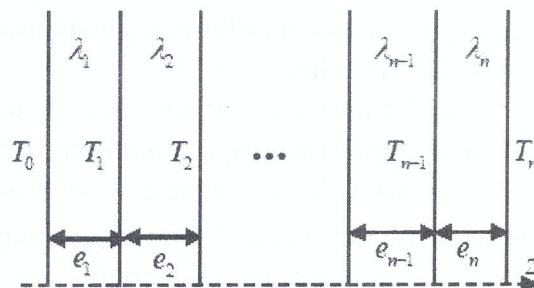


Figure 3

- b) Déterminer la distribution de température $T_i(z)$ dans chaque tronçon de mur.
- c) A l'aide d'un schéma illustrant la variation de la température dans une succession de murs, prouver que les bons conducteurs ont tendance à uniformiser la température.
- 7) Par analogie à l'électricité, on définit la résistance thermique d'un conducteur soumis à une différence de température ΔT et parcouru par un flux ϕ par : $R_{th} = \frac{\Delta T}{\phi}$. Donner l'expression de la résistance thermique du système étudié dans la question 5) et tracer son schéma électrique équivalent.

- 8) **Isolation d'un mur :** On considère un mur d'une cabane de conductivité thermique λ_c et d'épaisseur e_c , échangeant de la chaleur par convection avec l'extérieur qui est à une température T_{∞}^{ext} , et échangeant de la même façon de la chaleur avec l'intérieur de la pièce qui est à une température T_{∞}^{int} . La température de la face interne du mur est T_{int} et celle de la face externe est T_{ext} . Soient h_{int} le coefficient d'échange convectif avec la pièce et h_{ext} le coefficient d'échange convectif avec l'extérieur.

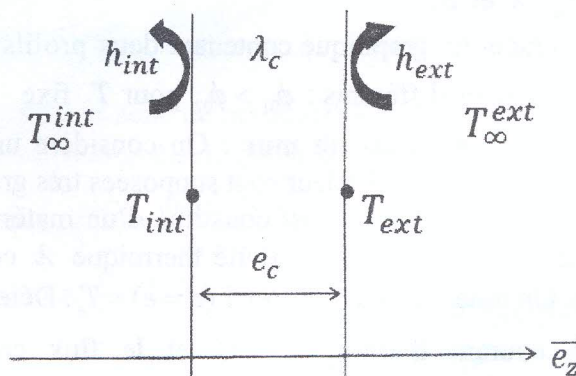


Figure 4

- a) Calculer le flux thermique qui traverse une surface de $1m^2$ du mur de l'intérieur vers l'extérieur.

Données : $T_{\infty}^{ext} = -2^{\circ}C$, $T_{\infty}^{int} = 26^{\circ}C$, $h_{int} = 5W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, $h_{ext} = 10W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, $e_c = 10cm$ et $\lambda_c = 2W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

- b) Calculer la température de la face interne du mur T_{int} . Conclure.
- c) Pour tenter d'isoler d'avantage la cabane, on colle une couche d'isolant sur la face interne du mur, de conductivité thermique $\lambda_{iso} = 0,04W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ et d'épaisseur $e_{iso} = 10cm$. Calculer la résistance thermique équivalente de ce système. En déduire le nouveau flux thermique ϕ' qui traverse une surface de $1m^2$ du mur.
- d) Quelle serait alors la température de la face interne du mur T_{int} dans ces conditions ? Commenter.

fin de l'épreuve