REPUBLIQUE TUNISIENNE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Concours Nationaux d'Entrée aux Cycles de Formation d'Ingénieurs
Session 2018

الجمهورية التونسية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
المناظرات الوطنية للدخول
إلى مراحل تكوين المهندسين
دورة 2018

Concours Physique et Chimie
Epreuve de Physique

Date : Lundi 04 Juin 2018	**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.

<u>Données</u>

$h = 6{,}62 \times 10^{-34}$Js $\quad$ $k_B = 1{,}38 \times 10^{-23}$JK^{-1} $\quad$ $e = 1{,}6 \times 10^{-19}C$

$\varepsilon_o = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}$Fm^{-1} $\quad$ $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$Hm^{-1} $\quad$ $i^2 = -1$

$\overrightarrow{\text{rot}}(\overrightarrow{\text{rot}}\vec{u}) = \overrightarrow{\text{grad}}\text{div}\vec{u} - \Delta\vec{u}$ $\quad$ $\sin a - \sin b = 2\sin\left(\frac{a-b}{2}\right)\cos\left(\frac{a+b}{2}\right)$ $\quad$ $\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$

Problème N°1

L'analyse spectrale de la lumière émise par des corps célestes nous informe sur les conditions physiques (température, vitesse,...) et la composition chimique de leurs environnements astrophysiques.

A- Le modèle moléculaire

La cohésion de deux édifices moléculaires ou atomiques est due à l'existence de forces de nature électromagnétique. Considérons une molécule polaire A–B isolée, où A et B représentent deux atomes supposés ponctuels et de charges $q_A = -q_B = q = 0{,}6e$.
On supposera que l'atome A est pratiquement immobile par rapport à l'atome B et on notera $\overrightarrow{AB} = x\vec{u}_x$ le vecteur position et m la masse de la particule B (**figure 1**).
La force d'interaction $\vec{F}$ entre ces deux atomes dérive de l'énergie potentielle suivante:

$$U(x) = \frac{\alpha}{x^n} + \frac{q_A q_B}{4\pi\varepsilon_0 x},$$

avec α une constante positive et n un entier naturel supérieur à un.

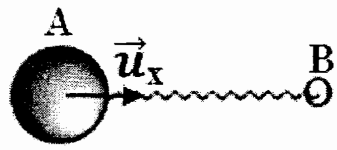

Figure 1

1- Donner la dimension du paramètre α.

2- Discuter le comportement de U(x) aux limites lorsque $x \to 0$ et $x \to \infty$. Montrer l'existence d'un minimum en $x = x_0$. En déduire l'expression de α sous la forme :

$$\alpha = x_0^{n-1}\frac{q^2}{4\pi n\varepsilon_0}.$$

3- Représenter l'allure de U(x).

4- Déterminer la force d'interaction $\vec{F}$ dérivant de $U(x)$. Dans quels domaines de distances la force d'interaction est-elle attractive ou répulsive ?

5- Déterminer l'énergie de dissociation E_d définie par $E_d = U(x \to \infty) - U(x \to x_0)$.

6- L'énergie potentielle peut être développée au voisinage de x_0 en série de Taylor:

$$U(x) = U(x = x_0) + (x - x_0)\left(\frac{dU}{dx}\right)_{x_0} + \frac{1}{2}(x - x_0)^2\left(\frac{d^2U}{dx^2}\right)_{x_0} + \cdots$$

a- Montrer qu'à l'ordre deux $U(x) = \frac{1}{2}k(x - x_0)^2 - E_d$.

En déduire que k peut s'écrire : $k = \frac{(n-1)q^2}{4\pi\varepsilon_0 x_0^3}$. Calculer k pour $n = 10$ et $x_0 = 0{,}13$ nm.

b- En posant $X(t) = x(t) - x_0$, montrer que l'équation différentielle du mouvement de la particule B est celle d'un oscillateur harmonique :

$$\frac{d^2X}{dt^2} + \omega_0^2 X = 0$$

Exprimer la pulsation propre ω_0 en fonction de k et m.

c- Calculer ω_0 ainsi que la longueur d'onde λ_0 associée à cette pulsation. Dans quel domaine du spectre électromagnétique λ_0 est-elle située ? On donne $m = 1{,}67\ 10^{-27}$kg.

7- Sous l'action d'un champ électrique $\underline{\vec{E}} = E_0 e^{i\omega_0 t}\vec{u}_x$, la particule subit des oscillations forcées. On suppose que cette particule est freinée par une force de frottement visqueux $\vec{F}_f = -m\frac{\vec{v}}{\tau}$, où $\vec{v}$ est la vitesse de la particule et τ est une constante positive.

a- Etablir l'équation différentielle vérifiée par $X(t)$.

b- En régime sinusoïdal forcé, la solution complexe est de la forme: $\underline{X}(t) = \underline{X}_M e^{i\omega_0 t}$. Exprimer l'amplitude $\underline{X}_M$ des oscillations en fonction de E_0, q, ω_0, m et τ. Calculer $|\underline{X}_M|$ pour $E_0 = 10^3 Vm^{-1}$ et $\tau = 10^{-8}$s. Comparer x_0 et $|\underline{X}_M|$. Commenter.

B- Etude du fond diffus cosmologique

Le fond diffus cosmologique est le nom donné au rayonnement électromagnétique issu de l'univers au moment de sa création. Ce rayonnement est assimilable à celui d'un corps noir de température T.

8- Définir un corps noir.

9- Pour ce type de rayonnement, la longueur d'onde λ_m correspondant au maximum d'émission est liée à la température T par la loi de Wien:

$$\lambda_m \times T = 2898\ \mu mK.$$

a- Déterminer la longueur d'onde du rayonnement cosmologique pour $T = 3$ K. Dans quel domaine spectral se trouve cette émission ?

b- Calculer λ_m pour une étoile de température de surface $T = 6000$K, et pour le corps humain. Expliquer la vision nocturne par des jumelles infrarouges.

C- Réflexion d'une onde plane sur un conducteur

Une onde plane progressive monochromatique se propageant suivant les x croissants dans le demi espace vide $x < 0$, rencontre en incidence normale la surface plane (yOz) d'un conducteur occupant le demi espace $x > 0$. Le conducteur présente une conductivité électrique $\gamma = 6{,}3\ 10^7\ \Omega^{-1}m^{-1}$. Il possède les mêmes propriétés électriques et magnétiques que celles du vide ($\varepsilon = \varepsilon_0, \mu = \mu_0$). On note $\underline{n}$ l'indice complexe du conducteur. L'onde incidente donne naissance à une onde transmise et à une onde réfléchie (**figure 2**).

Les champs électriques des trois ondes sont:

$$\begin{cases} \vec{\underline{E}}_i = E_0 e^{i(\omega t - kx)} \vec{u}_y \\ \vec{\underline{E}}_r = \underline{E}_{or} e^{i(\omega t + kx)} \vec{u}_y \\ \vec{\underline{E}}_t = \underline{E}_{ot} e^{i(\omega t - \underline{k}_t x)} \vec{u}_y \end{cases},$$

avec $k = \frac{\omega}{c}$, $\underline{k}_t = \underline{n}\frac{\omega}{c}$ où $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$

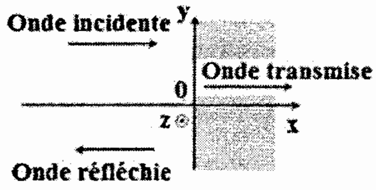

Figure 2

10- Déterminer les expressions des champs magnétiques complexes associés à ces ondes.

11- Ecrire les équations de Maxwell dans le conducteur. Montrer que le conducteur est électriquement neutre.

12- Dans quel domaine de fréquences, peut-on négliger le courant de déplacement devant le courant de conduction ? Dans la suite, on se placera dans ce domaine de fréquence.

13- Etablir l'équation de propagation du champ électrique $\vec{\underline{E}}_t$.

14- Montrer que l'équation de dispersion peut s'écrire sous la forme : $\underline{k}_t^2 = -i\gamma\mu_0\omega$.

15- On pose $\delta = \sqrt{\frac{2}{\gamma\mu_0\omega}}$; en déduire l'indice complexe en fonction de ω, c, et δ.

16- Exprimer le champ électrique transmis sous la forme : $\vec{\underline{E}}_t(x,t) = \underline{E}_{0t} e^{-\frac{x}{\delta}} e^{i(\omega t - \frac{x}{\delta})} \vec{u}_y$. Quelle est la nature de l'onde ? Quelle est la signification physique de δ ?

17- Calculer δ pour une fréquence radio de 100 MHz et pour une fréquence optique de 10^{14}Hz. Commenter les valeurs obtenues.

18- Les champs électriques et magnétiques de ces ondes sont continus à l'interface $x = 0$. Déterminer les coefficients de réflexion $\underline{r}$ et de transmission $\underline{t}$ en amplitude, définis par $\underline{r} = \frac{\underline{E}_{or}}{E_0}$ et $\underline{t} = \frac{\underline{E}_{ot}}{E_0}$ en fonction de l'indice $\underline{n}$. Les exprimer en fonction de ω, c, et δ.

19- Un conducteur parfait est un conducteur dont la conductivité électrique est infinie.

a- Que vaut δ pour un tel conducteur ?

b- Déduire alors son coefficient de réflexion.

c- Déterminer le champ électromagnétique $(\vec{\underline{E}}, \vec{\underline{B}})$ résultant de l'onde incidente et de l'onde réfléchie dans le demi-espace $x < 0$. Caractériser l'onde résultante.

d- Déterminer l'expression du vecteur de Poynting $\vec{\pi}$ de cette onde ainsi que sa valeur moyenne $\langle\vec{\pi}\rangle$ au cours du temps. Commenter.

e- Déterminer la moyenne temporelle de la densité d'énergie électromagnétique $< u_{em} >$.

D- Expansion de l'Univers

D'un point de vue thermodynamique, l'univers est assimilé à une enceinte sphérique de rayon R et de volume V subissant une évolution isentropique. On modélise le rayonnement émis par cet univers par un « gaz de photons » de température T et de pression de radiation p.

20- La densité volumique moyenne d'énergie électromagnétique totale de ce rayonnement est de la forme : $u = A\,T^4$ où A est une constante.

L'équation d'état de ce gaz s'écrit : $p = \frac{u}{3}$.

a- En appliquant le premier principe de la thermodynamique, montrer que :

$$V^4 u^3 = C \quad \text{où C est une constante.}$$

b- Montrer que le produit R T est constant. En déduire qu'au cours de son expansion l'univers se refroidit.

c- Montrer alors que la longueur d'onde du rayonnement du fond cosmique assimilé à un corps noir est proportionnelle au rayon R de l'univers.

E- Effet Doppler en astrophysique

L'effet Doppler permet d'estimer la vitesse d'approche ou d'éloignement des étoiles observées depuis la Terre.

Soit un détecteur D fixe en un point O de l'espace (**figure 3**), une source S se déplace le long de l'axe Ox à la vitesse constante $\vec{V} = V\,\vec{u}_x$, V étant positif ou négatif avec $|V| \ll c$, où c est la célérité de la lumière dans le vide. L'abscisse $x(t)$ représente la distance entre D et S.

La source S émet un signal lumineux, sous forme d'impulsions, de période T et de fréquence ν ; ce signal se déplace à la vitesse c.

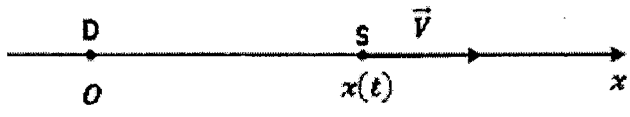

Figure 3

21- A un instant $t_1 = 0s$, pris comme origine des temps, la source S se trouvant en $x_1 = d$, émet une 1ère impulsion (impulsion " 1").

- a- A quel instant t'_1 , cette impulsion atteint-elle le détecteur D ?
- b- A l'instant $t_2 = T$, la source S émet une 2ème impulsion (impulsion " 2 "). Quelle est la nouvelle position x_2 de S à cet instant ?
- c- A quel instant t'_2, l'impulsion " 2 " atteint-elle D ? En déduire la durée T' entre les réceptions des impulsions " 1" et " 2 " en fonction de T, V et c.
- d- Exprimer la fréquence ν' mesurée par le détecteur en fonction de V, c et ν.
- e- En déduire l'expression du décalage Doppler $\Delta\nu = \nu' - \nu$. Soient λ et λ' les longueurs d'onde associées respectivement à ν et ν', montrer que : $\frac{\lambda'-\lambda}{\lambda} = \frac{V}{c}$.

F- Mesure de la vitesse d'éloignement d'une étoile

22- L'atome d'hydrogène est l'élément le plus abondant dans l'univers. Son énergie est quantifiée par le nombre quantique principal n selon l'équation : $E_n = -\frac{13{,}6}{n^2}$ eV.

L'atome se désexcite de l'état $n = 4$ vers l'état $n = 2$ en émettant un photon. Calculer la fréquence ν et la longueur d'onde λ de l'onde (raie H_β) associée à ce photon. Cette onde électromagnétique est-elle dans le visible, l'infra-rouge ou l'ultra-violet ? On donne $1eV = 1{,}6 \times 10^{-19}$J.

23- Cette partie du problème est consacrée à la mesure du décalage en fréquence à l'aide d'un réseau constitué de N fentes fines identiques périodiquement espacées de a (**figure 4**). Il est éclairé sous incidence normale par une onde plane monochromatique de longueur d'onde λ provenant d'une source S à l'infini. Les rayons émergent du réseau avec un angle θ vers un point M infiniment éloigné.

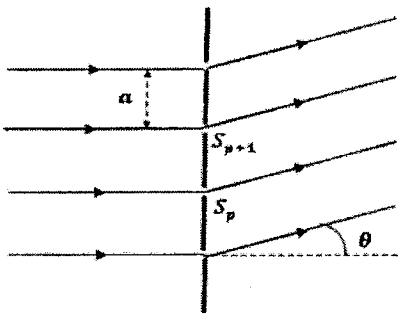

Figure 4

- a- Déterminer la différence de marche $\delta = (SS_{p+1}M) - (SS_pM)$ entre deux ondes passant par deux fentes consécutives S_p et S_{p+1} en fonction de a et θ.
- b- Soit $\underline{A}_p = A_0 e^{i\varphi_p}$ l'amplitude complexe au point M de l'onde issue de S_p. On prendra pour origine des phases celle de l'onde passant par la première fente ($\varphi_1 = 0$). Exprimer l'amplitude complexe $\underline{A}$ résultante de la superposition de N ondes en fonction de A_0, N et du déphasage $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\delta$.

c- En déduire l'expression de l'intensité $I = |\underline{A}|^2$.

d- En utilisant la construction de Fresnel, déterminer les valeurs du déphasage φ lorsque les interférences sont constructives. En déduire la relation :

$$a \sin\theta = m\lambda$$

L'entier relatif m est l'ordre d'interférence.

24- Le spectre de la source est en réalité composé par deux longueurs d'onde,

- λ=486,1 nm de la raie H_β de l'atome d'hydrogène (source au repos par rapport à la Terre),
- $\lambda' = \lambda + \Delta\lambda$ de la même raie H_β provenant de l'étoile en mouvement par rapport à la Terre. $\Delta\lambda$ est le décalage par effet Doppler.

a- Sachant que deux pics d'interférence associés à λ et $\lambda' = \lambda + \Delta\lambda$ ne peuvent être résolus à l'ordre $m = 1$ que si $\Delta\lambda > \frac{\lambda}{N}$. Combien de fentes doivent être éclairées pour pouvoir détecter un écart $\Delta\lambda = 10^{-1}$ nm à l'ordre 1 pour la radiation H_β ?

b- Dire si l'étoile s'approche ou s'éloigne de la Terre ; justifier. Déterminer la vitesse de l'étoile par rapport à la Terre (en $km.s^{-1}$).

c- La loi de Hubble établit la relation entre la distance d d'une galaxie par rapport à la Terre et sa vitesse d'éloignement V selon la loi :

$$V = H \times d.$$

Quelle est la dimension de la constante H ? Sachant que la galaxie est située à la distance $d = 2{,}5 \times 10^{19}$km de la terre, en déduire la valeur de H.

d- L'inverse de la constante de Hubble est la durée de l'expansion de l'univers, déduire une estimation de son âge.

G- Mesure de la largeur d'une raie spectrale

On étudie dans cette partie une méthode de mesure interférométrique de la largeur spectrale $\Delta\lambda$ de la raie H_β, mettant en œuvre l'interféromètre de Michelson.

Ce dispositif est constitué (**figure 5**) :

- de deux miroirs plans réfléchissants M_1 et M_2 orthogonaux. M_1 est en mouvement de translation suivant Ox; M_2 reste fixe.
- d'une lame semi-réfléchissante S_P, supposée infiniment mince qui divise la lumière incidente en deux faisceaux, l'un est transmis sans déviation, et l'autre est réfléchi. Cette lame, de coefficient de réflexion en énergie $R = 0{,}5$, est inclinée à 45° par rapport à l'axe Ox. L'ensemble est placé dans l'air d'indice $n = 1$.

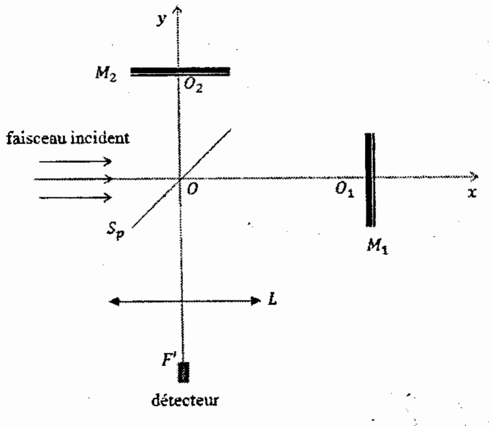

Figure 5

Les positions des miroirs sont données par les distances $OO_1 = \ell + e$ et $OO_2 = \ell$. On éclaire l'interféromètre avec un faisceau de lumière parallèle en incidence normale sur les miroirs. En sortie de cet interféromètre, on place une lentille convergente L de manière à ce que tous les rayons émergeants se focalisent sur le détecteur placé au foyer image F' de L.

25- Représenter la marche des rayons lumineux issus du faisceau incident et arrivant sur le détecteur en utilisant les deux « voies » de l'interféromètre. Justifier l'appellation de lame d'air que l'on donne à ce dispositif.

26- Exprimer les intensités I_1 et I_2 des deux ondes arrivant sur le détecteur en fonction de l'intensité I_0 du faisceau incident. Pourquoi choisit-on $R = 0{,}5$ pour la séparatrice S_P ?

27- En réalité la séparatrice S_P n'est pas parfaitement mince, le dispositif expérimental réel comporte alors, en plus de la séparatrice, une $2^{ème}$ lame parallèle à S_P. Qu'appelle t-on cette lame ? Quel est son rôle ?

28- Déterminer la différence de chemin optique δ entre les deux ondes. Déduire l'ordre d'interférence p, défini par : $p = \frac{\delta}{\lambda}$.

29- Dans le cas d'une source 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.

30- On enregistre l'interférogramme I en fonction de la différence de marche. Tracer l'allure de l'intensité I en fonction de e.

31- L'interféromètre est maintenant éclairé par une source qui possède un élargissement spectral. Pour simplifier les calculs, la source lumineuse est supposée présenter un spectre rectangulaire de largeur $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1$ et centré sur la fréquence $\nu_0 = \frac{\nu_1+\nu_2}{2}$ (**figure 6**). On notera $dI_0 = \frac{I_0}{\Delta\nu}d\nu$ l'intensité de la source dans l'intervalle de fréquences comprises entre ν et ν + dν

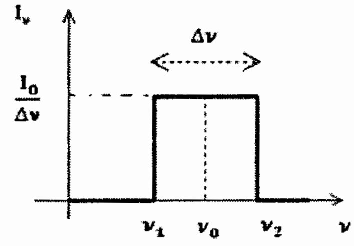

Figure 6

a- Donner l'intensité dI reçue par le détecteur correspondant à dν.

b- Montrer que l'intensité I intégrée sur l'intervalle Δν peut se mettre sous la forme :

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

Donner L_c en fonction de $\Delta\nu$ et c.

c- L'exprimer en fonction de la longueur d'onde moyenne λ_0 et l'intervalle en longueur d'onde $\Delta\lambda$.

d- Représenter l'interférogramme I(δ) dans le cas où $\Delta\nu \ll \nu_0$.

e- À l'aide d'un critère semi-quantitatif sur l'ordre d'interférences p, montrer que le contraste des franges d'interférence reste bon si la différence de marche δ obéit à l'inégalité : $\delta \leq L_c$. Qu'appelle-t-on la grandeur L_c ? Préciser sa signification physique.

32- On fait croître la différence de marche jusqu'à l'annulation du contraste (brouillage), on mesure $L_c = 4{,}074\ mm$. De quelle distance e a-t-on déplacé le miroir M_1 ? Calculer $\Delta\lambda$ pour $\lambda_0 = 486{,}2$ nm. Calculer L_c pour un laser He-Ne de largeur spectrale $\Delta\nu = 10\ MHz$. Que vaut L_c dans le cas d'une source parfaitement monochromatique ?

33- Dans l'hypothèse de la théorie cinétique des gaz, les atomes d'hydrogène émetteurs de la raie H_β se déplacent à la vitesse moyenne $v_m = \sqrt{\frac{8k_BT}{\pi m}}$ mesurée par rapport à l'étoile, où k_B est la constante de Boltzmann et $m = 1{,}67 \times 10^{-27}$kg la masse de l'atome d'hydrogène.

a- Montrer, en utilisant l'expression du décalage Doppler calculée à la question 21-e, que la raie H_β aura une largeur $\Delta\lambda = 2\lambda_0\frac{v_m}{c}$.

b- Calculer alors la température T de la surface de l'étoile.

Problème N°2

A- Caractère ondulatoire des électrons

Dans un canon électronique (**figure 7**), les électrons d'un filament électrique constituant la cathode sont arrachés avec une vitesse négligeable. Ils sont ensuite accélérés sous une tension U = 2 V entre la cathode et l'anode.

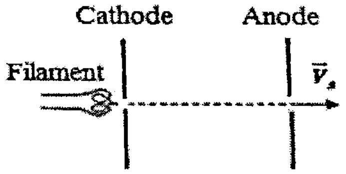

Figure 7

1- Préciser sur le schéma du canon la direction et le sens du champ électrique $\vec{E}$ entre ces électrodes.

2- Exprimer en fonction de m (masse de l'électron), U et e (charge élémentaire) la vitesse V_S acquise en sortie du canon par les électrons en utilisant le théorème de l'énergie cinétique.

3- On donne $m = 9{,}1 \times 10^{-31}\text{kg}$, calculer la longueur d'onde λ associée au faisceau d'électrons.

B- Effet tunnel

Une source émet des électrons qui arrivent depuis le domaine $x < 0$ sur une barrière de potentiel rectangulaire unidimensionnelle de hauteur V_0 et de largeur L (**figure 8**) définie par :

$$V(x) = \begin{cases} V_0 & pour\ 0 < x < L \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

Ces électrons ont une énergie $E < V_0$ et sont décrits par une fonction d'onde électronique stationnaire :

$$\underline{\psi}(x,t) = \varphi(x)e^{-i\frac{Et}{\hbar}}.$$

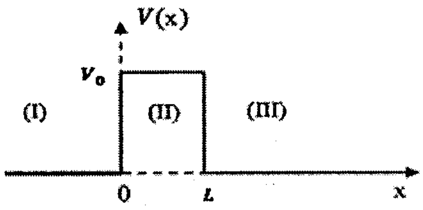

Figure 8

4- Quel serait le comportement classique de ces électrons ?

5- Cette fonction d'onde vérifie l'équation de Schrödinger:

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2\underline{\psi}(x,t)}{\partial x^2} + V(x)\underline{\psi}(x,t) = i\hbar\frac{\partial\underline{\psi}(x,t)}{\partial t}$$

a- Que représente le carré du module de la fonction d'onde $\left|\underline{\psi}(x,t)\right|^2$?

b- Ecrire les équations différentielles vérifiées par la fonction φ(x) dans les régions (I), (II) et (III).

6- On cherche des solutions des équations précédentes sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \varphi_I(x) = \underline{A}_1 e^{ikx} + \underline{B}_1 e^{-ikx} \\ \varphi_{II}(x) = \underline{A}_2 e^{\beta x} + \underline{B}_2 e^{-\beta x} \\ \varphi_{III}(x) = \underline{A}_3 e^{ikx} + \underline{B}_3 e^{-ikx} \end{cases}$$

a- Exprimer k et β en fonction de E, m et V_0.

b- Expliquer pourquoi le coefficient $\underline{B}_3$ doit-il être nul ? Que représentent les différents termes présents dans les trois solutions ?

7- Ecrire, au niveau de la barrière, les conditions de continuité de la fonction φ(x) et de sa dérivée.

8- On rappelle que le module du courant de probabilité associé aux électrons est:

$$J = \left|\underline{\psi}(x,t)\right|^2 \frac{\hbar k}{m}.$$

a- Quelle est la signification physique de J ? Donner sa dimension.

b- On rappelle que le facteur de transmission T de la barrière de potentiel est le rapport entre le courant de probabilité transmis et le courant de probabilité incident. Exprimer T en fonction de $\underline{A}_1$ et $\underline{A}_3$.

9- Le facteur T peut se mettre sous la forme :

$$T = \frac{1}{1 + \frac{V_0^2}{4E(V_0 - E)}\sinh^2(\beta L)}$$

a- Dans le cas d'une barrière épaisse ($\beta L \gg 1$), montrer que T peut s'écrire :

$$T \approx T_0 e^{-\frac{2L}{\delta}}$$

Exprimer T_0 en fonction de V_0 et E, puis δ en fonction de β. Quelle est la signification physique de δ ?

b- Que vaut T pour les cas suivants : $(V_0 - E) \to \infty$, $L \to \infty$ et $m \to \infty$? Commenter.

c- Des électrons d'énergie $E = 2\ \mathrm{eV}$ arrivent sur une barrière de potentiel $V_0 = 4\ \mathrm{eV}$. Evaluer δ.

d- Calculer T pour les largeurs $L_1 = 0{,}3\ \mathrm{nm}$ et $L_2 = 3\ \mathrm{nm}$. Conclure.

e- Vérifier que l'approximation de la barrière épaisse est justifiée pour $L_2 = 3\ \mathrm{nm}$.

10- Pour explorer la surface d'un échantillon conducteur, on lui approche la pointe fine métallique d'un microscope à effet tunnel. Il en résulte une barrière de potentiel de largeur L entre la pointe et l'échantillon, et un "courant tunnel'' de la forme:

$$I = I_0 e^{\frac{-2L}{\delta}}.$$

La variation relative minimale du courant que peut déceler le microscope est 2%, déterminer la variation ΔL correspondante, définissant la résolution du microscope. On donne $\delta = 0{,}6\ \mathrm{nm}$.

Fin de l'épreuve