



Concours Technologie  
Epreuve de Physique

Date : Jeudi 24 Juin 2021      Heure : 8 H      Durée : 4 H      Nb pages : 8

Barème : Problème 1 : 8 pt ;      Problème 2 : 12 pt

*L'usage d'une calculatrice non programmable est autorisé. Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition.*

*L'épreuve comporte deux problèmes indépendants. Le problème 1 étudie le principe d'une pince ampèremétrique basé sur des phénomènes d'induction, le filtrage d'un signal électronique et la diffusion thermique dans un fil. Le problème 2 traite l'effet d'interaction d'un électron atomique avec un champ extérieur : diffusion d'un rayonnement et effet Zeeman.*

**Données :**

Permittivité du vide	$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{ F.m}^{-1}$
Célérité de la lumière dans le vide	$c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
Masse de l'électron	$m = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Charge électrique élémentaire	$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$
Constante de Planck	$h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J.s}$
Electronvolt	$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$
$i^2 = -1 ; \epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$	

**Problème 1**

**A. Pince ampèremétrique**

Une pince ampèremétrique à induction peut être décrite comme un tore de rayon intérieur  $l$ , d'axe  $Oz$  et sur lequel est bobiné un fil réalisant  $N$  spires carrées de côté  $a$  disposées en série (voir figure 1). Ce tore est de résistance totale  $R$ . On utilisera le système de coordonnées cylindriques  $(r, \theta, z)$  d'axe  $Oz$  et de base  $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_z)$ .

La figure 2, représente la situation considérée dans la suite, où le tore est disposé autour d'un fil infini, confondu avec l'axe  $Oz$ , parcouru par le courant  $I(t) = I_0 \cos(\omega t)$ , dont on souhaite mesurer la valeur.

On se placera par la suite dans l'approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS).

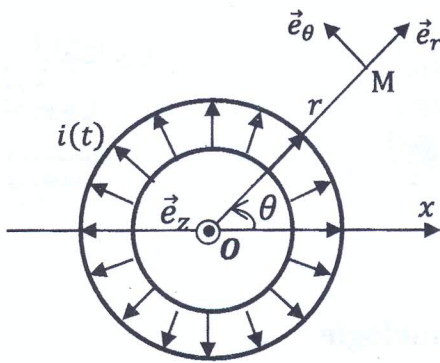


Figure 1

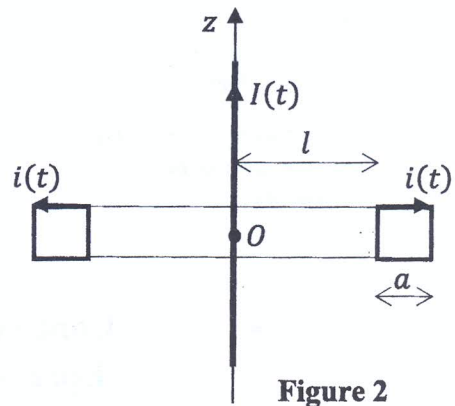


Figure 2

1. En quoi consiste l'ARQS ?
2. Écrire les équations de Maxwell en ARQS magnétique et donner leurs formes intégrales.
3. Expliquer brièvement pourquoi il va y avoir présence d'un courant  $i(t)$  dans le tore.
4. En étudiant les invariances et la symétrie du problème, montrer que le champ magnétique total  $\vec{B}$  (créé par le tore et le fil) est de la forme  $\vec{B} = B_\theta(r, z, t)\vec{e}_\theta$ .
5. En appliquant le théorème d'Ampère sur un contour qu'on précisera, calculer le champ magnétique total en un point  $M(r, \theta, z)$  situé à l'intérieur du tore, pour  $l < r < l + a$  et  $-a/2 < z < a/2$ .

6. Montrer que le flux du champ magnétique  $\vec{B}$  à travers une spire est donné par :

$$\Phi = \frac{\mu_0(I + Ni)}{2\pi} a \ln \frac{l + a}{l}$$

7. En déduire l'expression du flux  $\Phi_{\text{tot}}$  du champ magnétique à travers tout le bobinage du tore.
8. Déterminer la f.e.m induite totale  $e_{\text{tot}}$  dans le tore.
9. Soient  $L$  le coefficient d'auto-induction du tore et  $M$  le coefficient d'induction mutuelle tore-fil, écrire  $e_{\text{tot}}$  en fonction de  $L$ ,  $M$ ,  $i(t)$  et  $I(t)$ . En déduire  $L$  et  $M$ .
10. Donner le schéma électrique équivalent du circuit du tore.
11. Écrire l'équation électrique du circuit du tore, en déduire l'équation différentielle vérifiée par le courant  $i(t)$  en fonction de  $R$ ,  $L$ ,  $M$  et  $\frac{dI(t)}{dt}$ .
12. En utilisant la notation complexe, déterminer la relation reliant  $\underline{i}(t)$  et  $\underline{I}(t)$ . Que devient cette relation pour  $R \ll L\omega$  ?
13. Quel est l'intérêt de prendre un nombre de spires  $N$  très élevé ?

## B. Filtrage

On considère le circuit de la figure 3, constitué d'un amplificateur opérationnel, supposé idéal et fonctionnant en régime linéaire, de trois résistances ohmiques,  $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_3$ , et par deux condensateurs identiques de capacité  $C$ .

On suppose que le signal  $V_e(t)$  appliqué à l'entrée du circuit est sinusoïdal de pulsation  $\omega$ . On note  $\underline{V}_e$  et  $\underline{V}_s$  les amplitudes complexes des signaux d'entrée et de sortie.

14. Étudier qualitativement le comportement du circuit aux basses fréquences, puis aux hautes fréquences et en déduire la nature du filtre.



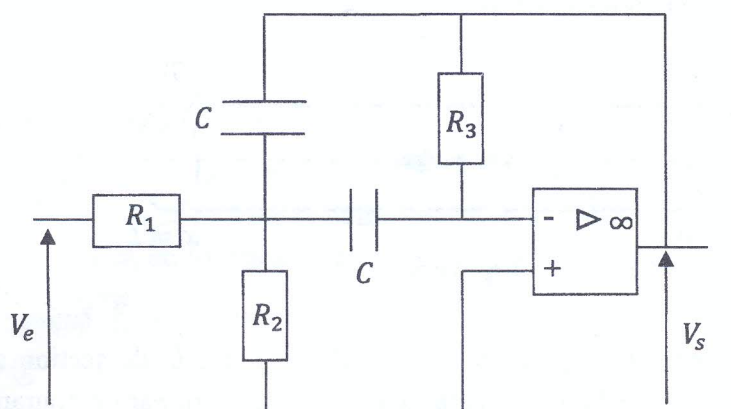


Figure 3

15. Montrer que la fonction de transfert  $\underline{H} = \frac{V_s}{V_e}$  s'écrit sous la forme :  $\underline{H} = \frac{H_0}{1+jQ(x-\frac{1}{x})}$ , avec  $x = \frac{\omega}{\omega_0}$ . Exprimer  $H_0$ ,  $Q$  et  $\omega_0$  en fonction de  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  et  $C$ . Que représente  $Q$  et  $\omega_0$  ?
16. Calculer  $H_0$  et  $Q$  pour  $R_1 = 50 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 250 \text{ }\Omega$  et  $R_3 = 100 \text{ k}\Omega$ .
17. Exprimer  $V_s(t)$  en fonction de  $V_e(t)$  aux basses et hautes fréquences. Préciser dans quel domaine de fréquences le filtre se comporte en intégrateur ou en dérivateur.
18. On définit le gain en décibel du circuit par  $G_{dB} = 20 \log_{10}|\underline{H}|$ .
  - a- Calculer les pulsations de coupure  $\omega_1$  et  $\omega_2$  du filtre en fonction de  $\omega_0$  et  $Q$ . En déduire la largeur de la bande passante du filtre  $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$  puis la calculer pour  $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = 3 \text{ kHz}$ . Commenter.
  - b- Tracer l'allure du diagramme de Bode en gain du filtre, en précisant les asymptotes aux basses et hautes fréquences.
19. Exprimer la phase  $\varphi(\omega)$  et tracer le diagramme de Bode en phase du filtre en précisant les asymptotes en basses et hautes fréquences.

Le signal d'entrée est désormais triangulaire (figure 4) de période  $T$ . Son développement en série de Fourier s'écrit :

$$V_e(t) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{8E}{(2n+1)^2\pi^2} \cos[(2n+1)\omega t]$$

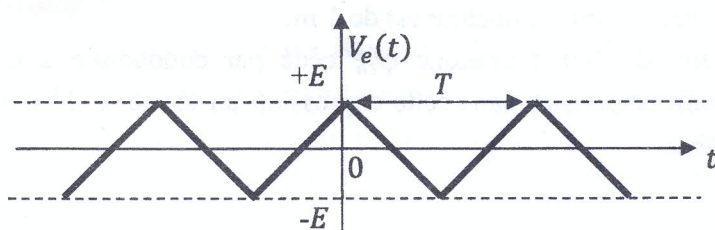


Figure 4

20. Exprimer les amplitudes des trois premières harmoniques et représenter le spectre en amplitude correspondant.
21. Quelle est l'harmonique sélectionnée par le filtre pour  $T = 1 \text{ ms}$  ?
22. Ecrire alors l'expression du signal de sortie  $V_s(t)$ .
23. Rappeler le critère de Nyquist-Shannon.
24. Déterminer la fréquence d'échantillonnage minimale du signal triangulaire, si on néglige les harmoniques dont l'amplitude est inférieure à 1% de celle du fondamental.

### C. Diffusion thermique dans un fil électrique

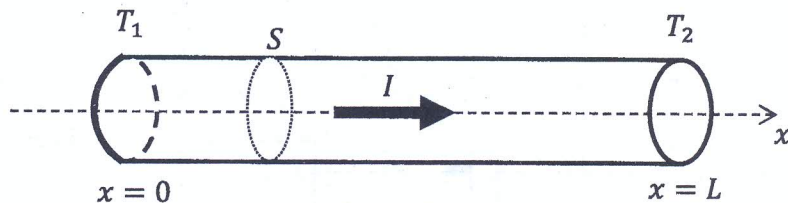


Figure 5

Un fil cylindrique en cuivre, homogène, d'axe  $Ox$ , de longueur  $L$ , de section droite  $S$ , de conductivité électrique  $\gamma$ , de conductivité thermique  $\lambda$ , est parcouru par un courant électrique d'intensité  $I$  uniformément répartie sur toute la section (figure 5).

Les extrémités du fil sont maintenues à des températures constantes  $T(x=0) = T_1$  et  $T(x=L) = T_2$  (avec  $T_1 > T_2$ ). On se place en régime permanent où la température  $T$  dans le fil ne dépend que de l'abscisse  $x$ .

25. Rappeler la loi de Fourier reliant le vecteur densité de courant thermique  $\vec{j}_{th}$  à la température  $T$ . Indiquer l'unité de  $j_{th}$ .

26. Montrer que la puissance volumique dissipée par effet Joule  $p_J$  dans le fil s'écrit :

$$p_J = \frac{I^2}{\gamma S^2}$$

27. Réaliser un bilan d'énergie pour une tranche du fil comprise entre  $x$  et  $x + dx$ . Montrer que l'équation différentielle vérifiée par  $T(x)$  s'écrit sous la forme :

$$\frac{d^2 T(x)}{dx^2} = -\alpha I^2$$

Exprimer  $\alpha$  en fonction de  $\lambda$ ,  $\gamma$  et  $S$ .

28. Calculer  $\alpha$  pour  $\lambda = 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $\gamma = 6 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$  et  $S = 2 \text{ mm}^2$ .

29. Déterminer l'expression de  $T(x)$ .

30. À quelle condition la fonction  $T(x)$  passe-t-elle par un maximum entre  $x = 0$  et  $x = L$  ? Représenter dans ce cas  $T(x)$ .

31. On suppose que  $T_1 - T_2 = 100 \text{ K}$ . Déterminer la valeur minimale  $I_1$  que doit posséder l'intensité  $I$  pour qu'un maximum de température existe entre les extrémités du fil,  $x = 0$  et  $x = L$ . La longueur  $L$  du conducteur est de  $1 \text{ m}$ .

32. Donner l'expression du flux thermique  $\phi_{th}$  cédé par conduction à la source de température  $T_2$ . Faire apparaître dans cette expression un terme en  $I^2$  et un terme en  $T_2 - T_1$ . Commenter.

## Problème 2

### A. Champ électromagnétique dans le vide

1. Rappeler les équations de Maxwell dans le vide dépourvu de charges et de courants.

2. Établir l'équation de propagation du champ  $\vec{E}$  dans le vide.

3. On considère une onde dont le champ électrique en notation complexe s'écrit :

$$\vec{E} = E_0 e^{i(\omega t - kz)} \vec{u}_x, \text{ où } E_0 \text{ est une amplitude réelle constante.}$$

a. Caractériser l'onde en précisant sa direction de propagation et sa polarisation.



- b. Etablir la relation de dispersion dans le vide. Le vide est-il un milieu dispersif ?
4. Déterminer les expressions réelles des champs électrique  $\vec{E}$  et magnétique  $\vec{B}$  de l'onde.
5. On définit le vecteur de Poynting :  $\vec{\pi} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0}$ .
  - a. Quelle est sa signification physique ? Donner son unité.
  - b. Exprimer l'intensité de l'onde, définie par la valeur moyenne temporelle :  
 $I = \langle \|\vec{\pi}\| \rangle$ , en fonction de  $E_0$ ,  $\varepsilon_0$  et  $c$ . Calculer sa valeur pour  $E_0 = 10^3 \text{ V.m}^{-1}$ .
6. On superpose à  $\vec{E}$  un deuxième champ  $\vec{E}' = E_0 e^{i(\omega t - kz - \frac{\pi}{2})} \vec{u}_y$ . Montrer que l'onde résultante ( $\vec{E} + \vec{E}'$ ) est polarisée circulairement et préciser si elle est gauche ou droite.

## B. Champ électromagnétique rayonné par un dipôle

Un dipôle électrique oscillant,  $\vec{p}(t) = p_0 e^{i\omega t} \vec{u}_z$  en notation complexe, situé à l'origine  $O$  du système des coordonnées (figure 1), rayonne à grande distance  $r = OM \gg \lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$  un champ électromagnétique :

$$\vec{E}(M, t) = -\frac{\mu_0 \omega^2 p_0 \sin \theta}{4\pi r} e^{i\omega(t - \frac{r}{c})} \vec{u}_\theta$$

$$\vec{B}(M, t) = -\frac{\mu_0 \omega^2 p_0 \sin \theta}{4\pi r c} e^{i\omega(t - \frac{r}{c})} \vec{u}_\varphi$$

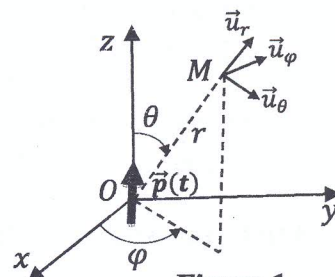


Figure 1

7. Justifier que les expressions des champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  sont compatibles avec la symétrie du problème.
8. Décrire la structure de l'onde électromagnétique rayonnée.
9. Exprimer le vecteur de Poynting  $\vec{\pi}$  de cette onde et sa valeur moyenne  $\langle \vec{\pi} \rangle$ .
10. Montrer que la puissance moyenne rayonnée à travers la sphère de rayon  $r$  est :

$$P_r = \frac{p_0^2 \omega^4}{12\pi \varepsilon_0 c^3}$$

On donne  $\int_0^\pi \sin^3 \theta d\theta = \frac{4}{3}$ .

## C. Diffusion Rayleigh

Une onde électromagnétique de champ électrique  $\vec{E} = E_0 e^{i(\omega t - kz)} \vec{u}_x$  interagit avec un atome placé à l'origine  $O$  du système des coordonnées. Sous l'action de l'onde, un électron atomique de masse  $m$  et de charge  $-e$  se met en mouvement selon la direction  $Ox$ . On suppose que l'électron est soumis à la force électrique de l'onde et à la force de rappel  $-m\omega_0^2 x \vec{u}_x$ .

11. Justifier pourquoi on néglige l'action du champ magnétique.
12. Justifier qu'on peut considérer, à l'échelle de l'atome, que le champ de l'onde est uniforme et s'écrit sous la forme  $\vec{E} \approx E_0 e^{i\omega t} \vec{u}_x$ .
13. Ecrire en notation complexe l'équation différentielle à laquelle satisfait le déplacement  $\underline{x}(t)$  de l'électron.
14. Déterminer en régime forcé l'expression de  $\underline{x}(t)$ .
15. En déduire l'expression du dipôle induit dans l'atome  $\vec{p}(t) = -e \underline{x}(t) \vec{u}_x$ . Donner son amplitude  $p_0$  en fonction de  $m, e, E_0, \omega$  et  $\omega_0$ .
16. En se référant à la partie B, donner l'expression de la puissance moyenne rayonnée  $P_r$  par le dipôle induit.

17. Donner l'expression de  $P_r$  en fonction de l'intensité  $I = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c E_0^2$  de l'onde incidente.
18. L'onde traverse un milieu comportant  $N$  atomes par unité de volume. A cause de la diffusion, l'amplitude  $E_0$  et par conséquent l'intensité  $I$  de l'onde diminue le long de l'axe  $Oz$ . L'intensité  $I$  de l'onde à la cote  $z$  est alors une fonction de  $z$ .
- a. En faisant un bilan des puissances dans un cylindre de section  $S$ , compris entre  $z$  et  $z + dz$  (figure 2), montrer que :

$$I(z) = I_0 e^{-\frac{z}{l}}$$

où  $I_0 = I(z = 0)$ . Exprimer  $l$  en fonction de

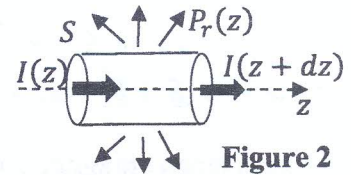


Figure 2

- $\omega, \omega_0, m, c, e, \varepsilon_0$  et  $N$ . Préciser son unité.
- b. Que devient l'expression de  $l$  pour  $\omega \ll \omega_0$  (cas de la diffusion Rayleigh) ?
- c. Dans le cas de l'atmosphère terrestre, calculer les valeurs de  $l$  correspondantes aux radiations lumineuses rouge ( $\lambda_R = 800 \text{ nm}$ ) et bleue ( $\lambda_B = 400 \text{ nm}$ ). On prendra  $\omega_0 = 2,3 \cdot 10^{16} \text{ rad.s}^{-1}$  et  $N = 2,5 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$ .
- d. En déduire une interprétation de la couleur bleue du ciel et de la couleur rouge du soleil au coucher.

#### D. Effet Zeeman longitudinal

On considère maintenant que l'atome est soumis à un champ magnétique uniforme et permanent  $\vec{B}_0 = B_0 \vec{u}_z$ . L'électron atomique est repéré par le vecteur  $\vec{r} = \overrightarrow{OM} = x\vec{u}_x + y\vec{u}_y + z\vec{u}_z$ . On suppose qu'avant d'appliquer le champ magnétique, l'électron, soumis à la seule force de rappel  $-m\omega_0^2 \vec{r}$ , se trouve sur une orbite circulaire de rayon  $R$  et de pulsation  $\omega_0$  dans le plan  $xOz$ .

19. Ecrire, sous l'effet du champ  $\vec{B}_0$ , l'équation de mouvement de l'électron et la projeter sur les axes  $Oxyz$ .
20. On montre que pour des conditions initiales données, la solution de cette équation est :  
 $x(t) = \frac{R}{2} [\sin(\omega_0 + \Omega)t + \sin(\omega_0 - \Omega)t]$  ;  $y(t) = -\frac{R}{2} [\cos(\omega_0 + \Omega)t - \cos(\omega_0 - \Omega)t]$   
 et  $z(t) = R \cos(\omega_0 t)$  ; avec  $\Omega = \frac{eB_0}{2m} \ll \omega_0$ .  
 Sachant que ce mouvement attribue à l'atome un moment dipolaire  $\vec{p} = -e\vec{r}$ . Donner les composantes  $p_x(t)$ ,  $p_y(t)$  et  $p_z(t)$  de ce dipôle suivant les axes  $Oxyz$ .
21. On observe le rayonnement de l'atome à grande distance, en un point de l'axe  $Oz$ , dans la direction du champ magnétique. Montrer que l'onde émise en présence de  $\vec{B}_0$  est la superposition de deux ondes polarisées circulairement, l'une gauche et l'autre droite, de pulsations très voisines  $\omega_1 = \omega_0 - \Omega$  et  $\omega_2 = \omega_0 + \Omega$  : c'est l'effet Zeeman longitudinal.
22. Exprimer  $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$  en fonction de  $\Omega$  et  $\omega_0$ , où  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  sont les longueurs d'onde correspondantes aux pulsations  $\omega_1$  et  $\omega_2$ . Calculer  $\Delta\lambda$  pour la radiation  $\lambda_0 = \frac{2\pi c}{\omega_0} = 434,1 \text{ nm}$  de l'atome d'hydrogène soumis à un champ  $B_0 = 1 \text{ T}$ .

#### E. Observation des raies Zeeman par un réseau

On veut étudier expérimentalement l'effet Zeeman avec un réseau optique plan constitué de  $N$  fentes infiniment fines identiques, parallèles et régulièrement espacées d'une distance  $a$  (pas de



réseau). Le réseau est éclairé sous incidence normale par un faisceau parallèle provenant d'une fente source (S) d'une lampe à hydrogène. La fente source est supposée infiniment fine, parallèle aux fentes du réseau et placée au foyer principal objet d'une lentille convergente ( $L_1$ ). L'écran d'observation (E) est placé dans le plan focal image d'une lentille convergente ( $L_2$ ) de distance focale image  $f'_2$ . On observe dans les directions définies par l'angle  $\theta$  la lumière diffractée par le réseau (figure 3).

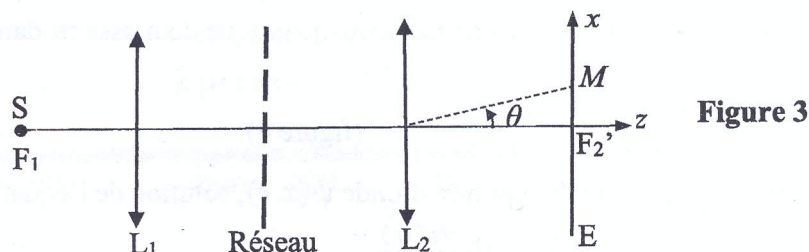


Figure 3

À l'aide d'un filtre interférentiel on sélectionne la radiation de longueur d'onde  $\lambda_0$  supposée monochromatique.

23. Tracer, à partir de S jusqu'au point M de l'écran d'abscisse x, la marche du faisceau lumineux diffracté par le réseau dans la direction  $\theta$ .
24. Calculer la différence de phase  $\varphi(M)$  entre deux ondes passant par les centres de deux fentes consécutives en fonction de  $a, \lambda_0$  et  $\theta$ , puis en fonction de  $a, x, \lambda_0$  et  $f'_2$ .
25. Les N ondes qui interfèrent en M sont-elles cohérentes ? justifier votre réponse.
26. On note  $\underline{A}_n(M) = A_0 e^{i\varphi_n(M)}$  l'amplitude complexe au point M de l'onde passant par la n<sup>ième</sup> fente. En prenant l'origine des phases celle de l'onde passant par la première fente ( $\varphi_1 = 0$ ), exprimer  $\varphi_n(M)$  en fonction du déphasage  $\varphi(M)$  entre deux fentes consécutives, et déterminer l'amplitude complexe totale  $\underline{A}(M)$  des N ondes en fonction de  $A_0, N$  et  $\varphi(M)$ .
27. On définit l'intensité lumineuse en M par  $I(M) = |\underline{A}(M)|^2$ , montrer que :

$$I(M) = A_0^2 \left( \frac{\sin \frac{N\varphi}{2}}{\sin \frac{\varphi}{2}} \right)^2$$

28. Quelles sont les valeurs de déphasages  $\varphi$  correspondant aux maxima principaux d'intensité ? En déduire la condition d'interférence constructive :  $a \sin \theta = p\lambda_0$ , où l'entier relatif p est l'ordre d'interférence.
29. Pour quelles valeurs de  $\varphi$  l'intensité  $I(M)$  s'annule-t-elle ?
30. En déduire la déviation angulaire  $\Delta\theta_l$  qui correspond à un déphasage  $\Delta\varphi$  séparant un maximum d'intensité d'ordre p à son premier minimum nul.
31. Représenter la figure  $I(M)$  en fonction de  $\varphi$  pour  $N = 4$ .
32. On soumet maintenant la lampe à hydrogène à un champ magnétique intense et on sélectionne à l'aide d'un filtre interférentiel les radiations de longueurs d'onde  $\lambda_1 = \lambda_0 + \frac{\Delta\lambda}{2}$  et  $\lambda_2 = \lambda_0 - \frac{\Delta\lambda}{2}$  dues à l'effet Zeeman. Quel est l'écart angulaire  $\Delta\theta$  correspondant à cette séparation en longueur d'onde à l'ordre p ?
33. On rappelle que deux raies sont séparées si leur écart angulaire  $\Delta\theta \geq \Delta\theta_l$ . Déterminer l'expression de l'écart minimal  $\Delta\lambda_l$  que peut séparer le réseau dans l'ordre p.
34. En déduire le pouvoir de résolution théorique du réseau défini par  $\mathcal{R} = \frac{\lambda_0}{\Delta\lambda_l}$ .

35. En se référant à la valeur de  $\Delta\lambda$  calculée à la question 22, déterminer le nombre de fentes  $N$  nécessaires pour séparer le doublet Zeeman à l'ordre 1. Commenter.
36. Dans la pratique, on a affaiblissement des spectres au fur et à mesure que l'ordre  $p$  augmente. Quel est l'origine de ce phénomène physique ?

### F. Quantification de l'énergie

Pour mettre en évidence la quantification de l'énergie dans les atomes, nous envisageons le mouvement le long de l'axe  $Ox$  d'une particule quantique de masse  $m$  dans un potentiel  $V(x)$  tel que :

$$\begin{cases} V(x) = 0, & \text{pour } 0 < x < a \\ V(x) = +\infty, & \text{pour } x < 0 \text{ et } x > a \end{cases} \quad (\text{figure 4})$$

Ce mouvement est décrit par la fonction d'onde  $\psi(x, t)$ , solution de l'équation de Schrödinger :

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

On s'intéresse à un état tel que  $\psi(x, t) = \phi(x) e^{-i\frac{Et}{\hbar}}$ , où  $E$  est son énergie associée. On pose  $k = \sqrt{2mE/\hbar^2}$ .

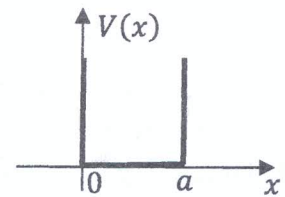


Figure 4

37. Pourquoi dit-on d'un tel état qu'il est stationnaire ?
38. Etablir l'équation différentielle vérifiée par  $\phi(x)$ .
39. Justifier que pour les domaines  $x < 0$  et  $x > a$ , la seule solution possible est  $\phi(x) = 0$ .
40. Déterminer, dans le domaine  $0 < x < a$ , les solutions  $\phi_n(x)$  et les énergies correspondantes  $E_n$  en faisant apparaître un nombre quantique  $n$ . On normalisera les fonctions  $\phi_n(x)$ .
41. Représenter la fonction d'onde et la densité de probabilité de présence pour les deux premiers niveaux.
42. Comparer à la situation classique.
43. Calculer l'énergie, en électronvolts, du niveau fondamental de l'électron dans le cas de l'atome d'hydrogène en prenant  $a = 0,1$  nm.
44. A l'instant  $t = 0$ , la fonction d'onde de la particule s'écrit :
- $$\psi(x, t = 0) = C \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \left[1 + \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right)\right], \text{ où } C \text{ est une constante.}$$
- Montrer que cette fonction est la somme de deux modes à préciser. Exprimer  $\psi(x, t)$ .

*Fin de l'épreuve*