

**SESSION DE 2006**

**concours interne  
de recrutement de professeurs agrégés  
et concours d'accès à l'échelle de rémunération**

**section : sciences physiques**

option : physique et chimie

composition sur la physique  
et le traitement automatisé de l'information

**Durée : 5 heures**

*Calculatrice électronique de poche, y compris programmable, alphanumérique ou à écran graphique, à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.*

*L'usage de tout document et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.*

*Dans le cas où un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale très lisiblement dans sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.*

**N.B. :** *Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.*

**Tournez la page S.V.P.**

## Informations utiles

Les parties de A jusqu'à H du problème illustrent les possibilités d'un modèle historique de l'atome d'hydrogène, le modèle de Thomson. Chacune de ces parties peut être traitée indépendamment des autres. Il suffit de se reporter aux résultats fournis dans les questions précédentes.

La partie J, consacrée à l'effet Thomson dans un conducteur électrique, est indépendante du reste du problème.

La partie K est une partie pédagogique portant sur le programme d'optique de terminale S. On utilisera les données suivantes dans les applications numériques demandées :

masse de l'électron  $m = 9,11 \times 10^{-31}$  kg,

vitesse de la lumière dans le vide  $c = 3,00 \times 10^8$  m.s<sup>-1</sup> ;

charge élémentaire  $e = 1,60 \times 10^{-19}$  C ;

perméabilité du vide  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H.m<sup>-1</sup>.

La permittivité du vide  $\varepsilon_0$  est donnée par la relation  $\mu_0 \varepsilon_0 c^2 = 1$ .

## A Le modèle atomique de Thomson

À la suite de ses travaux sur les rayons cathodiques et de sa découverte de l'électron, Joseph John Thomson, physicien anglais, émit l'hypothèse que les électrons étaient contenus dans les atomes. Il proposa un modèle de l'atome qu'il surnomma lui-même "plum pudding model". Les atomes de Thomson sont constitués :

- d'une sphère pleine, positivement et uniformément chargée, dont le rayon est de l'ordre du nanomètre ;
- d'électrons ponctuels qui peuvent vibrer librement à l'intérieur de la sphère. L'atome reste électriquement neutre.

Ainsi l'atome d'hydrogène est représenté par une sphère de rayon  $R$  (charge  $+e$ ), de centre O et un électron (charge  $-e$ , masse  $m$ ).

- A. 1. À quelle époque J.J. Thomson publia-t-il ses principaux travaux : 1800 ; 1900 ; 1930 ?
- A. 2. D'autres scientifiques firent évoluer le modèle de l'atome. Pouvez vous en citer au moins deux ?
- A. 3. L'expérience de Rutherford conduisit à réviser en profondeur le modèle atomique.
- A. 3. a. Décrire en quelques lignes et à l'aide d'un schéma cette expérience.
- A. 3. b. Rutherford estima la taille du noyau d'or ( $Z = 79$ ) en déterminant la distance minimale d'approche  $R_0$  des particules  $\alpha$  correspondant à un angle de diffusion de 180°. Quelle est la valeur de  $R_0$  si l'énergie cinétique initiale des particules  $\alpha$  est de 7,7 MeV ?

## B Mouvement de l'électron dans l'atome de Thomson

L'atome d'hydrogène n'est soumis à aucune action extérieure. On s'intéresse à l'oscillation libre de l'électron par rapport à la sphère de centre O. On admet dans cette première partie que l'électron ne perd pas d'énergie par rayonnement.

- B. 1. À l'instant  $t$ , l'électron est en M tel que  $\overrightarrow{OM} = \overrightarrow{r} = r \overrightarrow{e_r}$  ( $r \leq R$ ). Montrer que l'électron est soumis à un champ électrique  $\overrightarrow{E}$  créé par la charge  $+e$  répartie uniformément dans la sphère de rayon  $R$  tel que  $\overrightarrow{E} = k.r \overrightarrow{e_r}$ . Exprimer  $k$  en fonction de  $R$ ,  $e$  et  $\varepsilon_0$ .

B. 2. A l'instant  $t = 0$ , l'électron est écarté de sa position d'équilibre par une perturbation quelconque.

B. 2. a. Montrer que le mouvement de l'électron est plan.

B. 2. b. Montrer qu'il décrit une trajectoire rectiligne ou circulaire ou elliptique avec une pulsation  $\omega_0$  telle que

$$\omega_0^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m R^3}.$$

De quels paramètres la nature de la trajectoire dépend-elle ?

B. 2. c. Calculer la valeur de  $R$  pour laquelle la pulsation  $\omega_0$  correspond à la fréquence  $\nu_0$  d'une des raies du spectre de Lyman de l'atome d'hydrogène ( $\lambda_0 = 121,8 \text{ nm}$ ). Commenter.

B. 3. On admet que l'électron décrit une trajectoire circulaire de rayon  $a$  dans un plan  $Oxy$  perpendiculaire à un axe  $Oz$  dans le sens direct. L'atome possède alors un moment dipolaire  $\vec{p} = -e \vec{r}$  équivalent à deux dipôles élémentaires  $p_x(t)$  et  $p_y(t)$ .

B. 3. a. Donner les expressions de ces deux dipôles. Quelle est la valeur  $p_0$  de leur amplitude ?

B. 3. b. Exprimer l'énergie mécanique  $\mathcal{E}_M$  de l'oscillateur constitué par l'électron en fonction de  $p_0$ ,  $\omega_0$ ,  $m$  et  $e$ .

## C Champ électromagnétique dans le vide

C. 1. Rappeler les équations de Maxwell dans le vide.

C. 2. On repère tout point  $M$  de l'espace à l'aide d'un repère  $(O, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ .

C. 2. a. Montrer qu'une onde plane rectiligne  $\vec{E} = E_0 \cos(\omega t - kx) \vec{e}_y$  peut se propager dans le vide.  $E_0$  est une amplitude constante.

Préciser la direction de propagation et la valeur de la norme  $k$  du vecteur d'onde  $\vec{k}$ .

C. 2. b. Donner l'expression du champ magnétique  $\vec{B}$  associé. Faire un schéma représentant  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  et  $\vec{k}$ , le vecteur d'onde.

C. 2. c. On définit le vecteur de Poynting par  $\vec{R} = \frac{1}{\mu_0} [\vec{E} \wedge \vec{B}]$ . Donner la signification physique de ce vecteur et son unité de mesure.

Calculer sa valeur moyenne  $\langle \vec{R} \rangle$  sur une période, en fonction de  $E_0$ ,  $\epsilon_0$  et  $c$  (vitesse de la lumière dans le vide).

Rappel : pour une fonction périodique de période  $T$ ,  $\langle R(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T R(t) dt$ .

C. 3. Un faisceau laser polarisé rectilignement est assimilable à une onde plane de section  $1 \text{ mm}^2$ . Pour une puissance transportée  $P_0$  de 100 mW, calculer l'amplitude du champ électrique correspondant.

C. 4. On définit une onde  $\vec{E} = E_0 \cos(\omega t - kx) \vec{e}_y + E_0 \sin(\omega t - kx) \vec{e}_z$ .

C. 4. a. Pourquoi cette onde est-elle appelée "circulaire" ?

C. 4. b. Déterminer le champ  $\vec{B}$  associé et le vecteur de Poynting  $\vec{R}$ . Conclure.

## D Champ électromagnétique rayonné par un dipôle

Pour  $r = OM \gg \lambda = 2\pi c/\omega$ , le champ électromagnétique rayonné en M par un dipôle oscillant, de moment dipolaire  $\vec{p}(t) = p_0 \cos(\omega t) \vec{e}_z$ , placé en un point O est tel que :

$$E_\theta = \frac{-\omega^2 \sin \theta}{4\pi\epsilon_0 r c^2} p_0 \cos[\omega(t - r/c)] ; B_\varphi = E_\theta/c.$$

Les autres composantes sont négligeables.

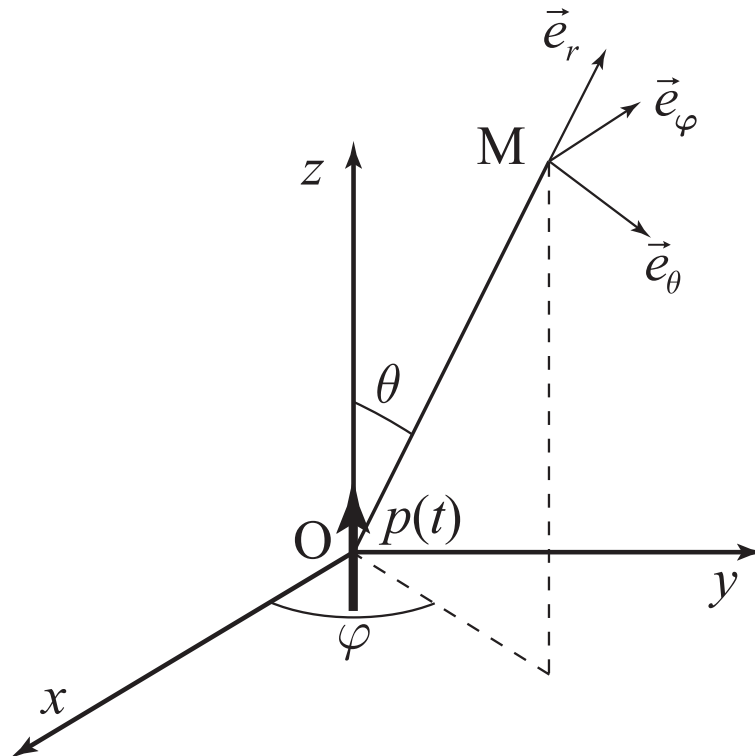


FIG. 1 –

- D. 1. Justifier, par des considérations de symétrie, la direction des champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$ .
- D. 2. L'onde électromagnétique est-elle une onde plane? quasi-plane?
- D. 3. Exprimer le vecteur de Poynting  $\vec{R}$  de cette onde et sa valeur moyenne  $\langle \vec{R} \rangle$ .
- D. 4. Montrer que l'énergie moyenne rayonnée par unité de temps à travers la sphère de rayon  $r$ , c'est à dire le flux de  $\vec{R}$  à travers la surface de la sphère de rayon  $r$ , est :

$$P_R = \frac{\omega^4 p_0^2}{12\pi\epsilon_0 c^3}.$$

## E Rayonnement de l'électron dans le modèle de Thomson

L'atome d'hydrogène est modélisé comme un double dipôle oscillant appliqué en O :  
 $p_x = p_0 \cos(\omega t)$  ;  $p_y = p_0 \sin(\omega t)$ . Il rayonne un champ électromagnétique.

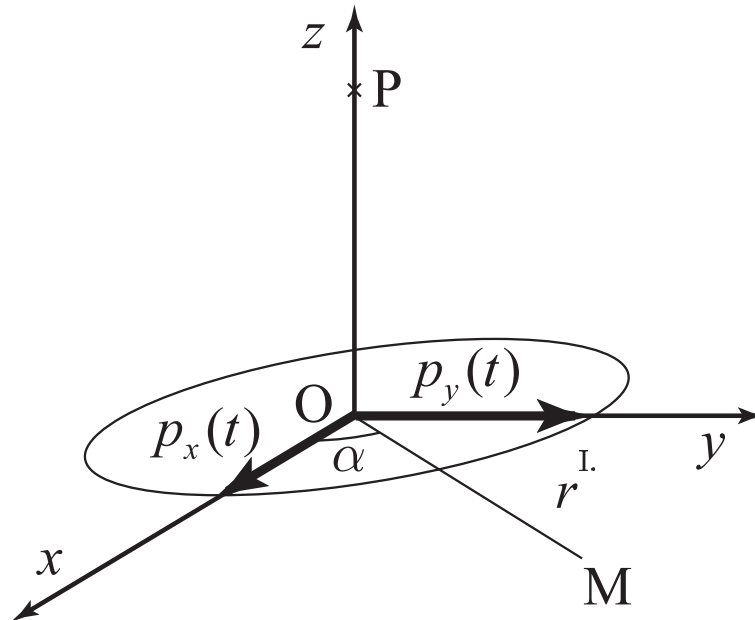


FIG. 2 –

- E. 1. À l'aide d'un schéma, donner les composantes du champ  $\vec{E}$  associé aux deux dipôles en un point M du plan de l'orbite ( $Oxy$ ) de l'électron; M est repéré par les coordonnées polaires  $r$  et  $\alpha$ . En déduire que l'onde dans ce plan est polarisée rectilignement.
- E. 2. À l'aide d'un schéma, donner les composantes du champ  $\vec{E}$  en un point P ( $OP = r$ ) de l'axe Oz de l'orbite. En déduire que l'onde en P est polarisée circulairement.
- E. 3. On admet que l'énergie moyenne rayonnée par unité de temps  $P_R$  est celle de deux dipôles d'amplitude  $p_0$ , de pulsation  $\omega$ .  
 Cette énergie correspond à une diminution  $P_R = -d\mathcal{E}_M/dt$  de l'énergie mécanique  $\mathcal{E}_M$  de l'oscillateur constitué par l'électron.
- E. 3. a. En déduire que  $p_0$  et donc le rayon  $a$  de l'orbite de l'électron doivent décroître.  
 On admet que la pulsation reste inchangée et que  $p_0$  décroît suffisamment lentement dans le temps pour que le mouvement reste circulaire durant des intervalles de temps grand devant  $T = 2\pi/\omega$  correspondant à la période de la radiation considérée de l'hydrogène ( $\lambda = 434,1 \text{ nm}$ ).
- E. 3. b. Montrer que l'on peut écrire la relation suivante  $d\mathcal{E}_M/dt = -\mathcal{E}_M/\tau$ .  
 Donner l'expression de la constante de temps  $\tau$  et l'expression de  $\mathcal{E}_M(t)$ .
- E. 3. c. Application numérique  $\omega = 4,34 \times 10^{15} \text{ rad.s}^{-1}$ . Calculer la constante de temps  $\tau$  et le comparer à  $T$ . Conclure.

## F Diffusion Rayleigh

Soit un milieu constitué d'atomes d'hydrogène. Le nombre d'atomes par unité de volume est  $N$ . Une onde électromagnétique plane polarisée rectilignement se propage dans la direction  $Ox$ . Le champ électrique est :  $\vec{E} = E_0 \cos(\omega t - kx) \vec{e}_z$ . L'électron de l'atome oscille alors selon la direction  $\vec{e}_z$ .

- F. 1. Montrer que le déplacement  $z$  de l'électron appartenant à un atome situé dans le plan d'abscisse  $x$  est décrit par l'équation différentielle suivante :

$$\ddot{z} + \omega_0^2 z = (-e/m)E_0 \cos(\omega t - kx).$$

Justifier vos approximations .

- F. 2. On néglige le régime transitoire.

F. 2. a. Donner l'expression  $z(t, x)$  du régime forcé à la pulsation  $\omega$ .

F. 2. b. Donner l'expression du dipôle induit  $\vec{p}(t) = -e.z \vec{e}_z$ . On précisera son amplitude  $p_0$ .

- F. 3. En se référant à la partie D donner l'expression de l'énergie moyenne rayonnée  $P_R$  par unité de temps par le dipôle  $\vec{p}$ .

- F. 4. La puissance moyenne de l'onde traversant sous incidence normale une surface d'aire  $S$  est  $P_i = \frac{1}{2}\epsilon_0 c E_0^2 S$ . Exprimer  $P_R$  en fonction de  $P_i$ .

- F. 5. En fait la puissance rayonnée qui correspond à une diffusion provient de la diminution de  $P_i$  et donc de  $E_0$  lorsque l'onde se propage dans le milieu. On peut admettre que  $P_i$  (et donc  $E_0$ ) dépend de  $x$  mais varie lentement selon  $x$ .

- F. 5. a. En réalisant un bilan énergétique dans un cylindre de section  $S$  entre  $x$  et  $x + dx$  montrer que l'on peut écrire :

$$\frac{dP_i(x)}{dx} = -\frac{P_i(x)}{\ell}.$$

Exprimer  $\ell$  en fonction de  $N$ ,  $\omega$ ,  $\omega_0$ ,  $m$ ,  $c$ ,  $e$ . Préciser son unité.

- F. 5. b. Que devient l'expression de  $\ell$  pour  $\omega \ll \omega_0$  (cas de la diffusion Rayleigh) ?

Calculer alors les valeurs de  $\ell$  pour des ondes électromagnétiques correspondantes aux radiations rouge (800 nm) et bleue (400 nm). On prendra  $\omega_0$  correspondant à  $\lambda_0 = 121,8$  nm et  $N = 10^{25}$  électrons par  $m^3$ .

- F. 5. c. A l'aide de ces résultats donner une interprétation du bleu du ciel et de la couleur rouge du Soleil au couchant.

## G Effet Zeeman

Dans le modèle de Thomson de l'atome d'hydrogène, le mouvement de l'électron en l'absence de champ extérieur est celui d'un oscillateur harmonique de pulsation  $\omega_0$ . On considère maintenant une situation où l'atome est placé dans un champ magnétique uniforme constant  $\vec{B}_0$  à l'instant  $t = 0$ . On utilise un système de coordonnées ayant pour origine O le centre du noyau. L'axe Oz est tel que  $\vec{B}_0 = B_0 \vec{e}_z$ . L'électron est repéré par le vecteur  $\vec{OM} = r \vec{e}_r$ . On suppose

qu'avant d'appliquer  $\vec{B}_0$ , l'électron est sur une orbite circulaire de rayon  $a$  dont l'axe forme l'angle  $\theta$  avec  $Oz$ . Pour simplifier, on supposera que la position initiale de l'électron à l'instant  $t = 0$  est  $\vec{OM}_0 = a \sin \theta \vec{e}_z - a \cos \theta \vec{e}_y$  et sa vitesse initiale est  $\vec{v}_0 = \omega_0 a \vec{e}_x$ .

G. 1. Projeter les équations du mouvement de l'électron sur les axes du trièdre  $Oxyz$ .

G. 2. Déterminer  $z(t)$  pour  $t > 0$ .

G. 3. On introduit le nombre complexe  $Z = x + iy$  avec  $i^2 = -1$ .

G. 3. a. Déterminer l'équation différentielle vérifiée par  $Z(t)$ . On utilisera la pulsation  $\Omega = eB_0/2m$ .

G. 3. b. On considère dans toute la suite de la partie G que  $\Omega \ll \omega_0$ ; montrer que

$$Z(t) = (ia/2)e^{i\Omega t}[(1 - \cos \theta)e^{-i\omega_0 t} - (1 + \cos \theta)e^{i\omega_0 t}].$$

G. 3. c. En déduire les fonctions  $x(t)$  et  $y(t)$ .

G. 3. d. Déduire de ces résultats que le mouvement de l'électron est la superposition d'un mouvement sinusoïdal de pulsation  $\omega_0$  suivant  $Oz$  et de deux mouvements circulaires directs dans le plan  $xOy$  de pulsation  $\omega_1 = (\omega_0 + \Omega)$  et  $\omega_2 = (\omega_0 - \Omega)$ .

G. 3. e. On peut admettre que ce mouvement confère à l'atome un moment dipolaire  $\vec{p} = -e \vec{r}$ . Donner les composantes de ce dipôle suivant le trièdre  $Oxyz$ .

G. 4. On observe le rayonnement de l'atome dans la direction du champ magnétique, en un point de l'axe  $Oz$ . Montrer que l'onde émise en présence de  $\vec{B}_0$  est la superposition de deux ondes polarisées circulairement de fréquence  $\nu_0 + \Delta\nu$  et  $\nu_0 - \Delta\nu$  très voisines. C'est l'effet Zeeman longitudinal.

Donner l'expression de  $\Delta\nu$ .

Calculer  $\Delta\nu$  et  $\Delta\nu/\nu_0$  pour  $B = 0,1$  T et une fréquence  $\nu_0$  correspondant à la radiation à 434,1 nm de l'hydrogène. Commenter.

G. 5. On observe le mouvement dans une direction perpendiculaire au champ magnétique c'est à dire dans le plan  $xOy$ . Montrer que l'onde émise est la superposition de trois ondes polarisées rectilignement comportant trois fréquences très voisines. C'est l'effet Zeeman transversal.

## H Observation des raies Zeeman

On étudie expérimentalement l'effet Zeeman avec un interféromètre de Michelson.

H. 1. Les interférences à deux ondes sont produites par des dispositifs à division du front d'onde ou des dispositifs à division d'amplitude.

H. 1. a. Préciser pour les deux types de dispositifs la localisation des franges en lumière monochromatique dans les cas :

- i. d'une source ponctuelle,
- ii. d'une source étendue.

On donnera un exemple de dispositif à division du front d'onde autre que le Michelson.

- H. 1. b. Quel est le rôle de la longueur de cohérence temporelle dans les conditions d'observation des franges d'interférences ?
- H. 2. Un interféromètre de Michelson (Fig. 3) est constitué d'une lame semi réfléchissante, non absorbante, appelée séparatrice  $S_P$  dont les facteurs de transmission et de réflexion sur les amplitudes valent  $1/2$ , et de deux miroirs plans  $M_1$  et  $M_2$  perpendiculaires l'un à l'autre. La lame  $S_P$  est inclinée à  $45^\circ$  par rapport aux normales à  $M_1$  et  $M_2$ . L'interféromètre est plongé dans l'air. On ne tiendra compte, ni des inconvénients liés à l'épaisseur non négligeable de la séparatrice (qui sont supposés parfaitement corrigés grâce à une lame compensatrice), ni d'éventuels changements de phase par réflexion. L'indice de l'air sera pris égal à  $1,0000$ . On utilise comme source étendue une lampe spectrale de symétrie de révolution autour de l'axe  $SO$  parallèle à l'axe  $Ox$ . On observe en lumière monochromatique dans le plan focal d'une lentille mince convergente  $L$  d'axe optique  $Oy$  et de distance focale  $f' = 1,0$  m.

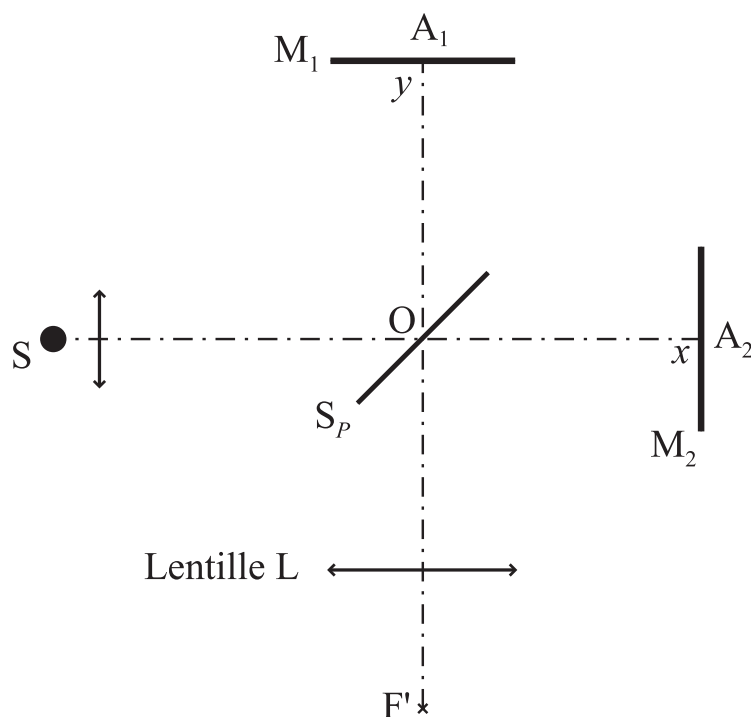


FIG. 3 –

- H. 2. a. On part de la situation où les deux bras sont égaux ( $OA_1 = OA_2$ ). Qu'observe-t-on ?
- H. 2. b. Pourquoi est-il nécessaire de diaphragmer la lentille ou de limiter l'inclinaison des rayons incidents issus de la source primaire ?
- H. 3. On déplace  $M_2$  normalement à son plan d'une distance  $e = 1,050$  mm dans la direction des  $x$  positifs.
- H. 3. a. Montrer à l'aide d'un schéma que le phénomène d'interférences observé est analogue à celui d'une lame d'air à faces parallèles.

- H. 3. b. Déterminer le rayon du premier anneau brillant correspondant à une raie de longueur d'onde incidente 434,1 nm.
- H. 4. La source primaire est maintenant une lampe à hydrogène. À l'aide d'un filtre interférentiel on sélectionne la radiation de longueur d'onde  $\lambda_0$ . Cette radiation n'est pas rigoureusement monochromatique : on admet que l'intensité lumineuse émise  $I(\nu) = I_0$  est constante entre  $(\nu_0 - \Delta\nu/2)$  et  $(\nu_0 + \Delta\nu/2)$  ;  $\nu_0$  est la fréquence centrale de la raie.
- H. 4. a. Déterminer l'éclairement détecté  $E(e)$  au foyer F' de la lentille pour une distance  $e = (OA_2 - OA_1)$ .
- H. 4. b. On enregistre  $E(e)$  en fonction du déplacement  $e$  à l'aide d'un photomultiplicateur. Déterminer le facteur de visibilité  $V$  des franges d'interférence en fonction de la distance  $e$ , de  $\delta\nu$  et de la vitesse de la lumière dans le vide  $c$ . On définit  $V$  par la relation  $V = (E_2 - E_1)/(E_2 + E_1)$ ,  $E_2$  étant l'éclairement maximal et  $E_1$  l'éclairement minimal.  
 Pour quelle valeur de  $e$ , le facteur  $V$  s'annule-t-il pour la première fois ?  
 Donner l'allure de la courbe d'enregistrement obtenue.  
 Montrer alors que l'on peut déterminer la longueur de cohérence  $L_c = c/\Delta\nu$  de la radiation.
- H. 5. 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 fréquence  $\nu_1 = \nu_0 + \Delta\nu$  et  $\nu_2 = \nu_0 - \Delta\nu$  dues à l'effet Zeeman. Pour simplifier on admettra que les deux raies ont une intensité d'émission  $I_0$  égale et qu'elles sont rigoureusement monochromatiques.
- H. 5. a. Déterminer l'éclairement  $E(e)$  au foyer F' de la lentille en fonction du déplacement  $e = OA_2 - OA_1$ .
- H. 5. b. Tracer l'allure de la courbe  $E(e)$ .
- H. 5. c. Montrer qu'on peut déduire la valeur  $\Delta\nu$  d'un enregistrement de  $E(e)$ .
- H. 5. d. Avec quel autre interféromètre pourrait-on mesurer  $\Delta\nu$  avec une plus grande précision ?

## I Détection et traitement du signal

Le photomultiplicateur placé au foyer de la lentille dans le montage du Michelson transforme le flux lumineux qu'il reçoit en signal électrique. Cette partie propose un système de traitement du signal permettant la détermination des fréquences  $\nu_0$  et  $\Delta\nu$ .

- I. 1. Du point de vue électrique, le photomultiplicateur (noté PM sur la Fig. 4) se comporte comme une source de courant  $i(t)$  en parallèle avec un condensateur de capacité  $C_0 = 15$  pF. Afin de prélever une tension  $u(t)$  proportionnelle à ce courant, on charge le photomultiplicateur par une résistance  $r = 50 \Omega$  (Fig. 4).
- I. 1. a. On étudie la réponse de ce système à un échelon de courant : la source idéale de courant délivre une intensité  $I$  constante à partir de l'instant  $t = 0$ . Établir l'équation différentielle déterminant  $u(t)$ .

- I. 1. b. Résoudre cette équation en considérant la condition initiale  $u(0) = 0$  et évaluer  $t_R$ , le temps de réponse à 5 % du photomultiplicateur.
- I. 1. c. Le chariot du Michelson portant le miroir  $M_2$  se déplace à une vitesse constante  $v$  telle que  $e(t) = vt$ . La source de courant délivre un courant  $i(t)$  proportionnel à l'éclairement  $E(t)$  que le détecteur reçoit. Montrer que pour des temps d'évolution très supérieurs à  $t_R$ , la tension  $u(t)$  reproduit les variations de l'éclairement.
- I. 2. Les signaux détectés par le photomultiplicateur sont faibles, noyés dans des bruits aussi bien continus qu'alternatifs. La transmission de l'information s'accompagne de parasites et nous considérerons qu'en pratique, un signal parasite existe identiquement sur les fils de liaison de résistance nulle notés [1] et [2]. Le signal du photomultiplicateur a besoin d'être conditionné.

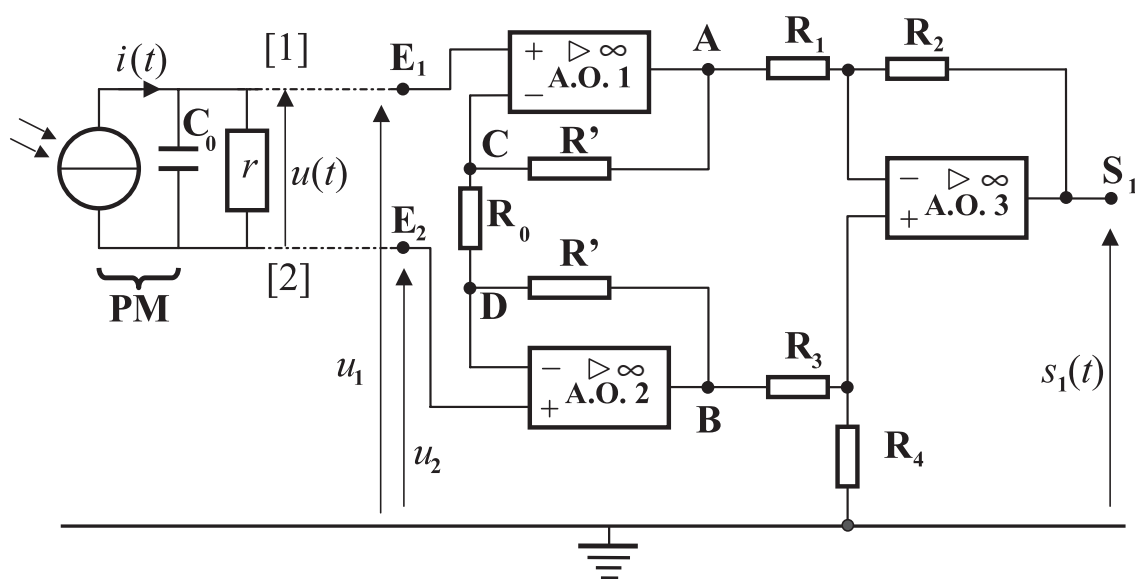


FIG. 4 –

Les amplificateurs opérationnels (notés A.O. sur les Fig. 4 et 5) utilisés sont supposés idéaux. Si un amplificateur fonctionne dans les conditions de saturation, on notera la tension de saturation  $V_{sat}$  et on prendra  $V_{sat} = 15$  V.

- I. 2. a. Exprimer la différence de potentiel entre les points A et B de la Fig. 4,  $v_A(t) - v_B(t)$ , en fonction de la différence de potentiel entre les points [1] et [2],  $u_1(t) - u_2(t) = u(t)$ .
- I. 2. b. Quelles conditions doivent satisfaire les résistances  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  et  $R_4$  pour que le signal  $s_1(t)$  soit proportionnel à  $u(t)$ ? *Ces conditions seront respectées par la suite.*
- I. 2. c. Quelles sont les fonctions de chacun des amplificateurs opérationnels de la Fig. 4? Quel est l'intérêt d'un tel montage?
- I. 3. Après conditionnement, le signal est traité par le montage de la Fig. 5.
- I. 3. a. Expliquer la fonction de l'A.O.4 dans le montage.

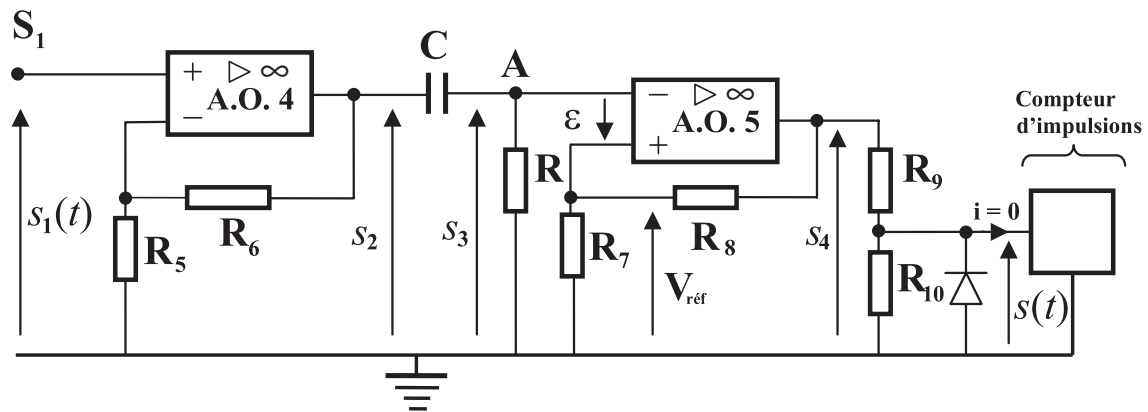


FIG. 5 –

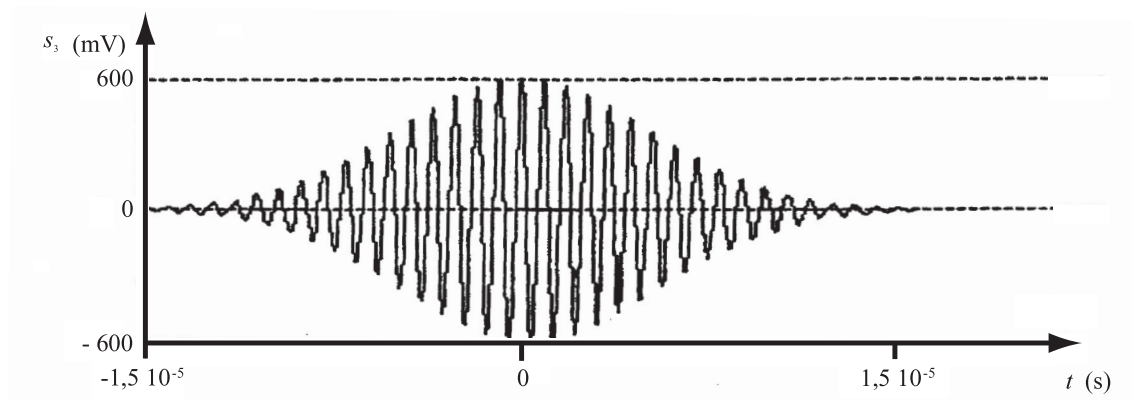


FIG. 6 –

- I. 3. b. Le signal  $s_3(t)$  est observé à l'oscilloscope, on obtient le tracé de la Fig. 6.  
Quel est l'intérêt du dispositif permettant de passer du signal  $s_2(t)$  au signal  $s_3(t)$ ?  
Comment choisir le produit RC pour obtenir le meilleur résultat?
- I. 3. c. Expliquer de manière détaillée le fonctionnement de l'A.O.5. On prendra  $R_8 = 100 R_7$ .
- I. 4. Le compteur d'impulsions placé en fin de montage fonctionne avec une tension d'entrée voisine de 5 V et l'intensité de son courant d'entrée est nulle. La diode est idéale, de tension de seuil nulle et de résistance nulle dans le sens passant. Les résistances  $R_9$  et  $R_{10}$  vérifient la relation  $R_9 = 2 R_{10}$ . Expliquer le rôle joué par la diode dans l'évolution de  $s(t)$  au cours du temps et tracer sur le même graphique l'allure des oscillogrammes  $s_4(t)$  et  $s(t)$ .
- I. 5. Entre deux annulations du facteur de visibilité, le nombre d'impulsions affiché par le compteur est  $N = 4464$  pour une durée de comptage  $2\tau = 3 \times 10^{-5}$  s correspondant à un déplacement  $e = 0,2721$  mm. Calculer la valeur des fréquences  $\nu_0$  et  $\Delta\nu$ .

## J Effet Joule et effet Thomson dans un fil conducteur

*Cette partie est indépendante du reste du problème.*

Sir William Thomson (Lord Kelvin) découvre en 1852 l'effet maintenant appelé Joule-Kelvin ou effet Thomson. Il résulte du passage d'un courant électrique dans un conducteur où règne un gradient de température. La puissance Thomson absorbée lors du passage d'un courant d'intensité  $I$  dans un tronçon de fil dont les extrémités sont portées à des températures différant de  $dT$  s'écrit  $dP_T = hIdT$ . Le coefficient  $h$  s'exprime en volt par kelvin. Il est appelé coefficient de Thomson du conducteur. Cet effet dépend du sens de passage du courant. On convient de compter  $h > 0$  si le passage d'un courant dans le sens des températures croissantes s'accompagne d'une absorption d'énergie. C'est le cas du cuivre.

- J. 1. On néglige dans un premier temps l'effet Thomson pour se consacrer à l'étude de l'effet Joule. Une barre conductrice en cuivre calorifugée de longueur  $L$ , de section  $s$ , de conductivité électrique  $\gamma$  et de conductivité thermique  $\lambda$ , est parcourue par un courant d'intensité  $I$  uniformément réparti. Les températures imposées aux extrémités sont  $T_1(x = 0)$  et  $T_2(x = L)$ . La masse volumique du cuivre est  $\rho$ ; sa capacité calorifique massique est  $c$ . La température  $T(x, t)$  est identique en tout point de la section d'abscisse  $x$ .

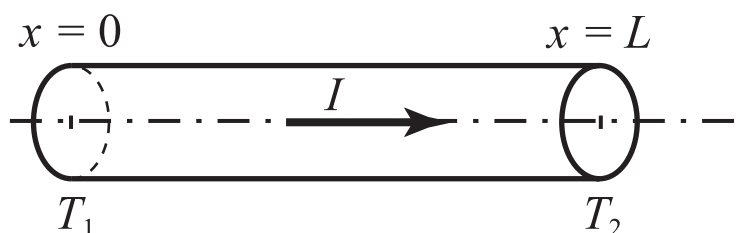


FIG. 7 –

- J. 1. a. Rappeler la loi de diffusion de Fourier pour la conduction de l'énergie thermique.  
 J. 1. b. Quelle est la puissance Joule fournie à la barre entre les sections d'abscisse  $x$  et  $x + dx$ ?  
 J. 1. c. Réaliser un bilan d'énergie pour une section comprise entre  $x$  et  $x + dx$ .  
 J. 1. d. Trouver l'équation différentielle vérifiée par  $T(x, t)$ .
- J. 2. On considère le régime permanent  $T(x)$ .
- J. 2. a. Montrer que l'équation différentielle vérifiée par  $T(x)$  est :  $\frac{d^2 T(x)}{dx^2} = -KI^2$ .  
 J. 2. b. Calculer  $K$  pour la barre de cuivre, on utilisera les valeurs suivantes :  
 $\lambda = 400 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ;  $\gamma = 6 \times 10^7 \text{ S.m}^{-1}$ ,  $s = 2 \text{ mm}^2$ .  
 J. 2. c. Déterminer  $T(x)$ .  
 J. 2. d. À quelle condition la fonction  $T(x)$  passe-t-elle par un maximum entre  $x = 0$  et  $x = L$ ?  
 J. 2. e. On suppose que  $T_2 - T_1 = 100 \text{ K}$ . 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 1,00 m.

- J. 3. On prend en compte maintenant l'effet Thomson; on se place en régime permanent dans la situation où le courant  $I$  et les températures  $T_1$  et  $T_2$  satisfont les conditions  $I < I_1$  et  $T_2 > T_1$ . Le courant  $I$  circule dans le sens des températures croissantes.
- J. 3. a. Trouver l'équation différentielle à laquelle obéit la distribution de température  $T(x)$ .
- J. 3. b. Pour quelle valeur  $I_2$  de l'intensité  $I$  obtient-on un gradient de température uniforme  $\frac{dT(x)}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} = \text{cte}$  ?
- J. 3. c. Pour le cuivre  $h = 2,2 \times 10^{-6} \text{ V} \cdot \text{K}^{-1}$ . Calculer  $I_2$  en utilisant les données précédentes.

## K Quelques questions pédagogiques sur l'optique en Terminale S

*Cette partie est indépendante des parties précédentes. Il est conseillé de ne pas y consacrer plus d'une heure. Un extrait du programme d'optique de Terminale S est proposé en annexe. Les réponses devront être les plus concises possibles.*

- K. 1. Donner une réponse succincte aux questions suivantes :
- K. 1. a. Définir une lumière monochromatique et une lumière polychromatique.
- K. 1. b. Donner les limites en longueurs d'onde du spectre visible et l'ordre de grandeur des longueurs d'onde des couleurs principales : rouge, jaune, vert, bleu.
- K. 1. c. Situer les rayonnements ultraviolets et infrarouges en termes de longueur d'onde, de fréquence et d'énergie.
- K. 1. d. Définir l'indice d'un milieu transparent pour une fréquence donnée.
- K. 2. Proposer un exercice du niveau de Terminale S pour chacun des objectifs suivants :
- K. 2. a. Savoir utiliser la relation  $\lambda = c/\nu$ , connaître la signification et l'unité de chaque terme.
- K. 2. b. Connaître et utiliser la relation de diffraction  $\theta = \lambda/a$ , la signification et l'unité de chaque terme.
- K. 2. c. Savoir que la lumière se propage dans le vide et dans les milieux transparents.
- K. 2. d. Savoir que la fréquence d'une radiation monochromatique ne change pas lorsqu'elle passe d'un milieu transparent à un autre.
- K. 3. Proposer deux activités à réaliser en cours sur le thème suivant : "*Observation expérimentale de la diffraction en lumière monochromatique et en lumière blanche (irisation)*".  
On fera un schéma précis des montages avec des commentaires sur les appareils utilisés.

13