

Olympiades de physique 1983

par René RAVIER,
Lycée Carnot de Dijon
et Marcel BURIE,
Inspection Générale.

Les XIV^e Olympiades Internationales de Physique se sont déroulées à Bucarest et à Magurele (Roumanie) du 5 juillet au 14 juillet 1983 (sur l'organisation des O.I.P., voir l'article de P. LEGRAND et R. RAVIER, B.U.P. n° 652, mars 1983).

16 pays étaient représentés : Autriche, Bulgarie, Tchécoslovaquie, Cuba, République Fédérale Allemande, République Démocratique Allemande, France, Hongrie, Pays-Bas, Pologne, Roumanie, Suède, Finlande, Union Soviétique, Vietnam, Yougoslavie.

Les cinq candidats français étaient tous élèves des classes terminales C et lauréats du Concours Général de Physique 1983. Ils ont obtenu UN troisième prix et TROIS accessits, ainsi que DEUX prix spéciaux (solution originale du problème d'électromagnétisme et maximum de points en physique atomique). C'est au problème d'optique et à l'épreuve pratique que nos candidats ont obtenu leurs moins bons résultats.

À côté des faiblesses dues à la divergence entre les nouveaux programmes français et les programmes des Olympiades (compensée en partie par une préparation intensive et efficace mais trop rapide lorsqu'on la compare à celle d'autres pays), nous avons relevé deux lacunes graves chez nos candidats :

- une mauvaise rédaction et une mauvaise présentation des copies françaises qui ont surpris les correcteurs roumains ;
- un manque d'aisance dans le choix et dans la mise en œuvre de la méthode expérimentale devant un problème pratique simple (l'apprentissage correspondant nécessite en particulier beaucoup de temps !)

Par contre, ont été appréciées l'ouverture d'esprit, l'adaptabilité et les qualités humaines de nos candidats français.

EPREUVES THEORIQUES

(5 heures ; 30 points)

I. Mécanique (8 points).

Une particule se meut sur le demi-axe positif Ox . Elle est soumise à la force F représentée sur la fig. 1. A l'origine O ,

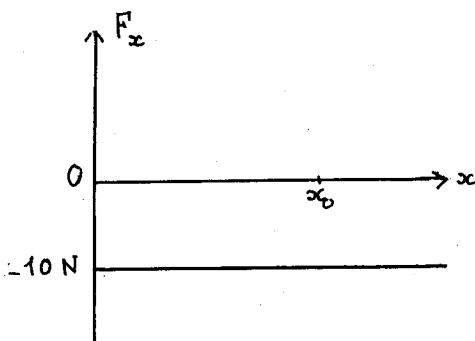


Fig. 1

se trouve une paroi parfaitement réfléchissante. En même temps, agit sur la particule une force de frottement de module $F_f = 1,00\text{ N}$. La particule part du point d'abscisse $x = x_0 = 1,00\text{ m}$ avec l'énergie cinétique $E_c = 10,0\text{ J}$.

- 1) Trouver la longueur du chemin parcouru par la particule jusqu'à son arrêt définitif.
- 2) Représenter graphiquement l'énergie potentielle $U(x)$ de la particule dans le champ de force F .
- 3) Représenter qualitativement la vitesse de la particule en fonction de son abscisse x .

II. Electromagnétisme (8 points).

On considère le circuit représenté sur la fig. 2, où $L_1 = 10\text{ mH}$, $L_2 = 20\text{ mH}$, $C_1 = 10\text{ nF}$, $C_2 = 5\text{ nF}$ et $R = 100\text{ k}\Omega$. L'interrupteur K étant fermé (en position 1), on fait varier la fréquence du générateur de courant alternatif, l'amplitude de l'intensité du courant débité par ce générateur étant maintenue constante.

- 1) Déterminer le rapport entre la fréquence f_m pour laquelle la puissance active dans le circuit est maximale P_m et la différence $f = f_+ - f_-$ des fréquences f_+ et f_- pour lesquelles la puissance active dans le circuit est égale à la moitié de la puissance maximale.

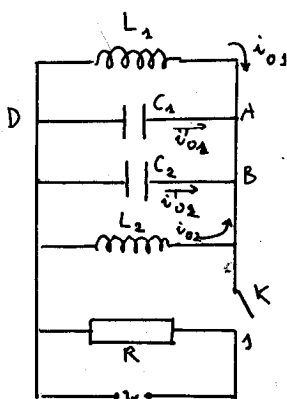


Fig. 2

2) On ouvre l'interrupteur K. Sachant qu'à l'instant t_0 , après l'ouverture de l'interrupteur, les intensités des courants dans les bobines L_1 et L_2 sont : $i_{01} = 0,1$ A, $i_{02} = 0,2$ A (voir la figure pour les sens respectifs des courants), et la tension aux bornes du condensateur C_1 est $u_0 = 40$ V, on demande :

a) la fréquence des oscillations électromagnétiques dans le circuit $L_1 C_1 C_2 L_2$;

b) l'intensité du courant électrique dans le conducteur AB ;

c) l'amplitude des oscillations de l'intensité du courant électrique dans la bobine L_1 .

III. Optique (7 points).

Deux prismes ayant les angles $A_1 = 60^\circ$ et $A_2 = 30^\circ$ sont réunis selon la fig. 3 ; l'angle C vaut 90° . Les indices de réfraction sont donnés par les relations :

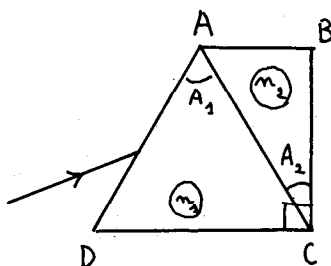


Fig. 3

$$n_1 = a_1 + \frac{b_1}{\lambda^2} \quad n_2 = a_2 + \frac{b_2}{\lambda^2}$$

où $a_1 = 1,1$; $b_1 = 10^5 \text{ nm}^2$; $a_2 = 1,3$; $b_2 = 5 \cdot 10^4 \text{ nm}^2$.

1) Déterminer la longueur d'onde λ_0 de la radiation incidente telle qu'il n'y ait pas de réfraction sur AC quel que soit l'angle d'incidence.

2) Dessiner le trajet des rayons dans ce système de prismes pour trois radiations différentes (λ_{rouge} , λ_0 , λ_{bleu}).

3) Trouver l'angle de déviation minimale du système pour la radiation λ_0 .

4) Calculer la longueur d'onde de la radiation qui, entrant dans le système suivant une direction parallèle à la base DC, sort parallèle à cette direction.

IV. Physique atomique (7 points).

Un photon de longueur d'onde λ_i est diffusé élastiquement sur un électron libre en mouvement. Après la diffusion, l'électron est au repos et le photon diffusé a une longueur d'onde λ_0 et est dévié d'un angle $\vartheta = 60^\circ$ par rapport à la direction du photon incident. Il est ensuite diffusé par un autre électron libre au repos. Le photon résultant du deuxième processus de diffusion a une longueur d'onde $\lambda_f = 1,25 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ et est dévié de l'angle $\vartheta = 60^\circ$ par rapport à la direction du mouvement du photon de longueur d'onde λ_0 .

Calculer la longueur d'onde de DE BROGLIE de l'électron qui est entré en interaction avec le photon initial.

On donne les constantes suivantes :

$$\begin{aligned} h &= 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} && \text{constante de Planck,} \\ m &= 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} && \text{masse de l'électron,} \\ c &= 3,0 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} && \text{vitesse de la lumière dans le vide.} \end{aligned}$$

V. Question facultative.

Regardez l'emblème de l'Olympiade et expliquez qualitativement pourquoi le jet de liquide ne se détache pas suivant la courbe en traits interrompus mais contourne le cylindre suivant la courbe continue. Ce fait est lié à l'effet Coandà, breveté en 1936 (en France) par l'ingénieur roumain Henry COANDA.

Emblème des XIV^e Olympiades.**EPREUVE PRATIQUE**

(5 heures ; 20 points)

On dispose d'un générateur, de deux voltmètres et d'une boîte de résistances étalon.

a) Déterminez la force électromotrice du générateur en utilisant seulement les voltmètres (sans utiliser la boîte de résistances) et un nombre minimal de circuits.

b) Déterminez la force électromotrice du générateur et les résistances internes de ce générateur et du voltmètre, en utilisant seulement un voltmètre et la boîte de résistances étalon ; pour cela, on tracera deux graphiques établis expérimentalement et correspondant à des relations théoriques linéaires.

c) Indiquez les sources d'erreurs et appréciez laquelle a la plus grande influence sur les résultats finaux.

SOLUTION ABREGEE

Mécanique.

1) Le travail de la force de frottement est toujours négatif. L'énergie de la particule (énergie cinétique et énergie potentielle $U = F_0 x$ de la force de rappel $F = -F_0$) diminue et après une infinité de réflexions, la particule s'immobilise au point $x = 0$. La longueur parcourue, indépendante du signe de la vitesse initiale, se déduit du bilan énergétique :

$$l \cdot F_f = E_c + F_0 \cdot x_0 \quad l = 20 \text{ m.}$$

2) L'énergie potentielle est $U = F_0 \cdot x$. Il est intéressant de tracer sur le graphique demandé la variation de l'énergie mécanique de la particule en considérant les deux cas v_0 positif et v_0 négatif.

3) La courbe $v(x)$ est constituée par une série de branches de paraboles de type :

$$\frac{1}{2} m v^2 + (F_0 + F_f) x = \text{constante} \quad \text{si } v \text{ est positif,}$$

$$\frac{1}{2} m v^2 + (F_0 - F_f) x = \text{constante} \quad \text{si } v \text{ est négatif.}$$

On considère les deux cas v_0 positif et v_0 négatif.

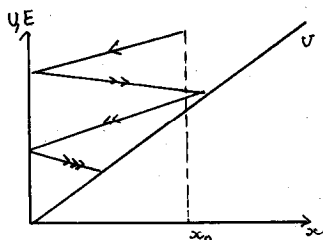
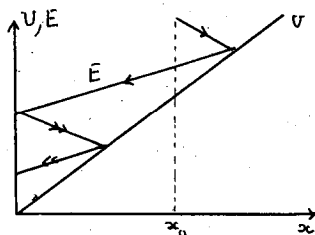
Dans chacun des cas, on retrouve, par sommation de la série :

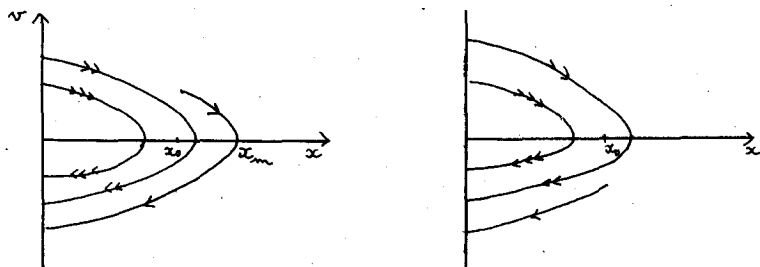
$$S = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{F_0 - F_f}{F_0 + F_f} \right)^n = \frac{F_0 + F_f}{2 F_f}$$

la distance l parcourue, calculée au 1) :

$$v_0 > 0 \quad l = 2 x_m S - x_0 \quad \text{avec} \quad x_m = x_0 + \frac{E_c}{F_0 + F_f}$$

$$v_0 < 0 \quad l = x_0 + 2 x_{m1} S \quad \text{avec} \quad x_{m1} = \frac{E_c + x_0 (F_0 - F_f)}{F_0 + F_f}.$$





Electromagnétisme.

1) On peut utiliser la représentation de Fresnel ou les impédances complexes (ou raisonner par analogie avec un circuit RLC série à tension imposée).

L'impédance est telle que :

$$\frac{1}{Z^2} = \frac{1}{R^2} + \left[(C_1 + C_2) \omega - \frac{1}{\omega} \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \right) \right]^2$$

et la puissance vaut :

$$P = \frac{Z^2 I_m}{2R}$$

La puissance est maximale pour $Z = R$ (et vaut alors

$$P_m = \frac{1}{2} R I_m^2, \text{ d'où :}$$

$$\omega_m^2 = \frac{1}{(C_1 + C_2)} \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \right)$$

$$\omega_m = 10^5 \text{ rad. s}^{-1} \quad f_m = 15,9 \text{ kHz.}$$

La puissance est égale à $\frac{1}{2} P_m$ pour 2 fréquences f_+ et f_-

telles que : $\omega_+ - \omega_- = \frac{1}{R(C_1 + C_2)}$, d'où le facteur de qualité Q ,

$$Q = \frac{f_m}{f_+ - f_-} = R \sqrt{(C_1 + C_2) \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \right)} ; Q = 150.$$

2) a) La tension $u = V_D - V_A$ et les intensités i_1, i'_1, i_2, i'_2 obéissent aux relations :

$$i_1 + i'_1 + i'_2 + i_2 = 0$$

$$u = L_1 \frac{di_1}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt} \quad i'_1 = C_1 \frac{du}{dt} \quad i'_2 = C_2 \frac{du}{dt}.$$

En dérivant la première équation, on obtient pour la variable u , l'équation différentielle :

$$(C_1 + C_2) \frac{d^2u}{dt^2} + u \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \right) = 0$$

d'où la pulsation :

$$\omega^2 = \omega_m^2 = \frac{1}{(C_1 + C_2)} \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \right)$$

$$\omega = 10^5 \text{ rad. s}^{-1}.$$

b) On a $I_{AB} = i_1 + i'_1$; on déduit des expressions de i_1 et i'_1 en fonction de u :

$$\frac{di_1}{dt} + \frac{di'_1}{dt} = \left(\frac{1}{L_1} - C_1 \omega^2 \right) u.$$

Or, L_1, C_1, L_2, C_2 n'ont pas des valeurs numériques arbitraires : $L_1 C_1 = L_2 C_2$, ce qui implique :

$$L_1 C_1 = L_2 C_2 = \frac{1}{(C_1 + C_2)} \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \right) = \omega^2.$$

Dans ces conditions,

$$\frac{di_1}{dt} + \frac{di'_1}{dt} = 0 \Rightarrow i_1 + i'_1 = I_{AB} = \text{constante}$$

la valeur de cette constante se détermine par l'étude des conditions initiales, en utilisant en particulier la relation, vraie à

$$\text{chaque instant : } i_1 + i_2 + (C_1 + C_2) \frac{du}{dt} = 0.$$

On obtient :

$$I_{AB} = \frac{1}{(C_1 + C_2)} [C_2 i_{o1} - C_1 i_{o2}] = \frac{i_{o1} L_1 - i_{o2} L_2}{(L_1 + L_2)} = -0,10 \text{ A.}$$

(on aurait pu utiliser les flux ϕ_1 et ϕ_2 à travers les 2 bobines :

$$u = \frac{d\phi_1}{dt} = \frac{d\phi_2}{dt}, \text{ ce qui implique } \phi_1 - \phi_2 = \text{constante}$$

$$\text{quand } \frac{du}{dt} = 0, \quad i'_1 = i'_2 = 0, \quad i_1 = I_{AB}; \quad i_2 = -I_{AB},$$

d'où :

$$I_{AB} (L_1 - L_2) = L_1 i_{o1} - L_2 i_{o2}.$$

b) L'étude des conditions initiales conduit aux expressions de u et de i_1 (ainsi que des autres courants) :

$$u = u_0 \cos \omega t - \frac{i_{o1} + i_{o2}}{\omega (C_1 + C_2)} \sin \omega t$$

$$i_1 = C_1 \omega u_0 \sin \omega t + \frac{C_1}{C_1 + C_2} (i_{o1} + i_{o2}) \cos \omega t \dots$$

$$\dots + \frac{1}{C_1 + C_2} [i_{o1} C_2 - i_{o2} C_1]$$

i_1 est donc la superposition du courant constant I_{AB} et d'un courant sinusoïdal d'amplitude i_{1m} :

$$i_{1m} = \sqrt{C_1^2 \omega^2 u_0^2 + \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2} \right)^2 (i_{o1} + i_{o2})^2}; \quad i_{1m} = 0,204 \text{ A.}$$

Optique.

1) Il y a absence de réfraction sur la face AC lorsque les deux indices n_1 et n_2 sont égaux. On déduit de cette égalité la valeur de λ_0 :

$$\lambda_0^2 = \frac{b_1 - b_2}{a_2 - a_1} \quad \lambda_0 = 500 \text{ nm} = 0,5 \mu\text{m} \quad n_0 = 1,50.$$

3) Pour $\lambda = \lambda_0$, le système constitue un prisme unique d'angle $A' = 30^\circ$. La déviation minimale est obtenue lorsque $r = 1/2 A' = 15^\circ$; on en déduit l'angle d'incidence correspondant : $i_m = 22,8^\circ$ et la déviation minimale $D_m = 15^\circ 7'$.

4) L'étude géométrique montre qu'alors les 2 angles i et i' correspondant au prisme ACD valent 30° ; les angles r et r' (avec les notations habituelles) sont donc liés par les relations :

$$\sin r = \frac{1}{2 n_1}; \quad \sin r' = \frac{n_2}{2 n_1}; \quad r + r' = 60^\circ.$$

On obtient, en éliminant r et r' : $3 n_1^2 - n_2^2 - n_2 - 1 = 0$,

d'où :

$$\lambda^4 [3 a_1^2 - a_2^2 - a_2 - 1] + \lambda^2 [6 a_1 b_1 - 2 a_2 b_2 - b_2] + 3 b_1^2 - b_2^2 = 0$$

$\lambda \simeq 1,2 \mu\text{m}.$

Physique atomique.

Les lois de conservation (énergie et quantité de mouvement) conduisent, par les calculs habituels de l'effet Compton, aux relations : $\lambda_i - \lambda_o = \lambda_c$, avec $\lambda_f - \lambda_o = \lambda_c$

avec $\lambda_c = \frac{h}{2mc} = 1,21 \cdot 10^{-12}$ m (la symétrie des deux chocs

permettait d'affirmer immédiatement que $\lambda_i = \lambda_f$) et à la valeur de la longueur d'onde de Broglie du premier électron :

$$\lambda = \frac{\lambda_o \lambda_i}{\sqrt{\lambda_o^2 + \lambda_i^2 - \lambda_o \lambda_i}}$$

Etant donné l'ordre de grandeur de λ_c devant λ_i , cette formule se réduit à :

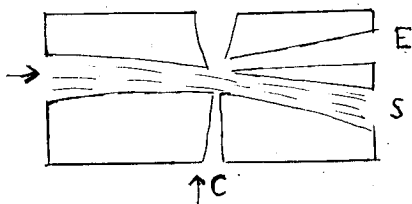
$$\lambda = \lambda_i \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\lambda_c}{\lambda_i} \right) \quad \lambda = 1,24 \cdot 10^{-10} \text{ m.}$$

EFFET COANDA

Explication qualitative de l'attachement d'un jet fluide, liquide ou gazeux, à une paroi : les particules situées entre la paroi et le jet sont entraînées par celui-ci, il en résulte une dépression qui « attire » le jet.

L'effet COANDA est utilisé dans certains dispositifs pneumatiques d'automatisme pouvant réaliser des fonctions binaires ou des fonctions d'amplification (voir, par exemple, J.-P. LEROUX et Ph. BAUDUIN : *Mécanique des fluides*, Dunod, collection Technologie et Université).

On obtient, par exemple, la fonction « NON » à l'aide de la porte schématisée ci-après. En l'absence d'un jet secondaire venant de la commande C, le jet principal se dirige par effet Coanda vers la sortie S ; en présence d'un jet secondaire suffisant venant de C, le jet principal se détache de la paroi et se dirige vers l'évent E : la mesure de la pression de sortie fournit la réponse binaire : NON, OUI.



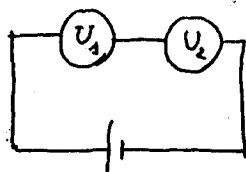
EPREUVE PRATIQUE

a) On a 4 inconnues : E force électromotrice du générateur (celui-ci était une pile associée à une résistance de l'ordre de $5\,000\ \Omega$), r résistance interne du générateur, g_1 et g_2 résistances des deux voltmètres mais g_1 et g_2 n'interviennent que par les rapports g_1/r et g_2/r : il suffira donc de 3 mesures et donc de 2 montages.

Montage 1.

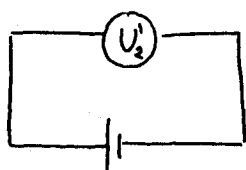
Les deux voltmètres sont montés en série aux bornes du générateur ; on lit U_1 et U_2 :

$$U_1 = E \frac{g_1}{r + g_1 + g_2} \quad U_2 = E \frac{g_2}{r + g_1 + g_2}.$$

**Montage 2.**

Un seul voltmètre est monté aux bornes du générateur ; on mesure U'_2 :

$$U'_2 = E \frac{g_2}{r + g_2}.$$

**Calculs.**

De U_1 , U_2 , U'_2 , on déduit E :

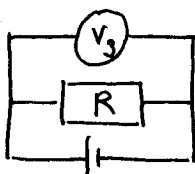
$$E = \frac{U_1 U'_2}{U'_2 - U_2}.$$

b) On effectue 2 montages.

Montage 3.

La boîte de résistances et le voltmètre sont montés en dérivation aux bornes du générateur ; on lit l'indication du volt-

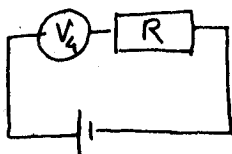
mètre V_3 pour différentes valeurs de R ; on trace la courbe $\frac{1}{R} \rightarrow \frac{1}{V_3}$ qui est théoriquement une droite :



$$\frac{1}{V_3} = \frac{1}{E} \left(1 + \frac{r}{g} \right) + \frac{r}{E} \cdot \frac{1}{R} = b + a_3 \frac{1}{R}.$$

Montage 4.

La boîte de résistances et le voltmètre sont montés en série aux bornes du générateur; on lit l'indication du voltmètre V_4 pour différentes valeurs de R ; on trace la courbe $R \rightarrow \frac{1}{V_4}$ qui est théoriquement une droite :



$$\frac{1}{V_4} = \frac{1}{E} \left(1 + \frac{r}{g} \right) + \frac{1}{gE} R = b + a_4 R.$$

Calculs.

Des valeurs de b , a_3 , a_4 déterminées au moyen des deux graphiques, on déduit les valeurs de E , de r et de g , par exemple en calculant d'abord E :

$$b = \frac{1}{E} \left(1 + \frac{r}{g} \right), \quad a_3 = \frac{r}{E} \quad a_4 = \frac{1}{gE}$$

$$\Rightarrow a_3 a_4 E^2 - bE + 1 = 0,$$

d'où E (une seule valeur convient numériquement) :

$$r = a_3 E \quad g = \frac{1}{a_4 E}.$$

c) La discussion de l'influence relative des différentes sources d'erreurs nécessite la comparaison des caractéristiques précises du matériel utilisé.