

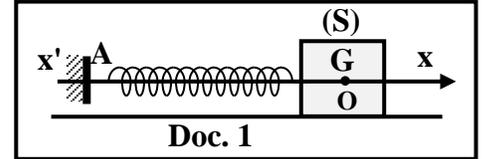
الاسم:
الرقم:

مسابقة في مادة الفيزياء
المدة: ثلاث ساعات

Cette épreuve est formée de quatre exercices obligatoires répartis sur quatre pages.
L'usage d'une calculatrice non programmable est autorisé.

Exercice 1 (8 points) Oscillations libres amorties

On considère un oscillateur mécanique formé d'un solide (S), de masse m , et d'un ressort horizontal de masse négligeable et de constante de raideur k . (S) est attaché à l'une des deux extrémités du ressort, l'autre extrémité étant reliée à un support fixe A. Le centre de masse G, de (S), peut se déplacer suivant un axe horizontal ($x'x$) (Doc. 1).



À l'équilibre, G coïncide avec l'origine O de l'axe ($x'x$). On déplace (S) horizontalement, dans le sens positif, à partir de sa position d'équilibre. À l'instant $t_0 = 0$, l'abscisse de G est X_m et (S) est lâché sans vitesse initiale. À un instant t , l'abscisse de G est $x = \overline{OG}$ et la valeur algébrique de sa vitesse est $v = x' = \frac{dx}{dt}$. Durant son mouvement, (S) est soumis à plusieurs forces parmi lesquelles on a la

tension $\vec{F} = -kx \vec{i}$ du ressort et la force de frottement $\vec{f} = -h \vec{v}$, où h est une constante positive appelée coefficient d'amortissement.

Prendre le plan horizontal contenant G comme niveau de référence de l'énergie potentielle de pesanteur. Le but de cet exercice est d'étudier l'effet du frottement sur les oscillations et de déterminer la valeur de h .

1) Étude théorique

1-1) Montrer, en appliquant la deuxième loi de Newton $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = m \frac{d\vec{v}}{dt}$, que $m \frac{dv}{dt} + kx = -hv$.

1-2) Écrire, à un instant t , l'expression de l'énergie mécanique E_m du système (Oscillateur, Terre) en fonction de m , k , x et v .

1-3) Dédire que $\frac{dE_m}{dt} = -hv^2$.

1-4) Établir l'équation différentielle, du second ordre en x , qui régit le mouvement de G.

1-5) Le centre de masse G oscille avec une pulsation $\omega = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{h}{2m}\right)^2}$.
Dédire l'expression de la pseudo-période T .

1-6) Pour différentes valeurs de h , on obtient la courbe du document 2 représentant T en fonction de h , pour $0 \leq h < h_0$.

1-6-1) Comment varie T pour $0 \leq h < h_0$?

1-6-2) T_0 représente la période propre des oscillations de G. Justifier en se référant au document 2.

1-7) Dédire l'expression de T_0 en fonction de m et k .

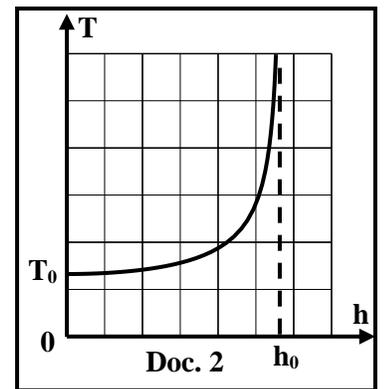
2) Étude expérimentale

Dans l'étude expérimentale, on prend : $m = 0,5 \text{ kg}$ et $k = 100 \text{ N/m}$.

2-1) Calculer la valeur de T_0 .

2-2) La courbe du document 3 représente x en fonction du temps t . En utilisant le document 3 :

2-2-1) déterminer la pseudo-période T ;



2-2-2) donner deux indicateurs montrant que (S) est soumis à une force de frottement.

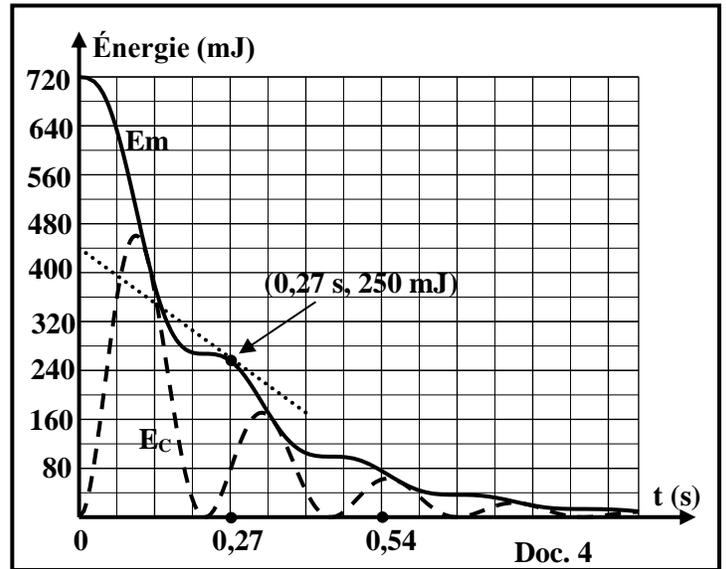
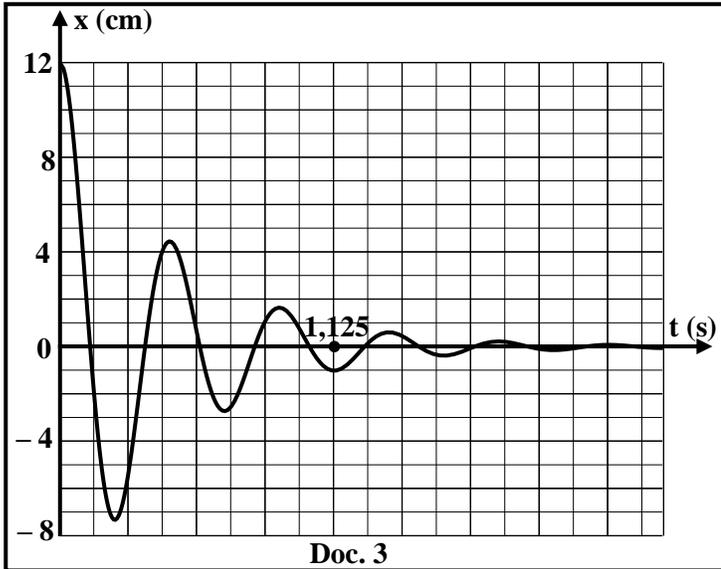
2-3) Calculer h.

2-4) Dans le but de déterminer de nouveau la valeur de h, un dispositif approprié est utilisé pour tracer les courbes de E_m et de l'énergie cinétique E_C de (S) en fonction du temps ainsi que la tangente à la courbe représentant E_m à $t = 0,27$ s (Doc. 4).

2-4-1) Déterminer la vitesse de G à $t = 0,27$ s en utilisant la courbe représentant E_C .

2-4-2) Déterminer $\frac{dE_m}{dt}$ à $t = 0,27$ s.

2-4-3) Déduire de nouveau la valeur de h.



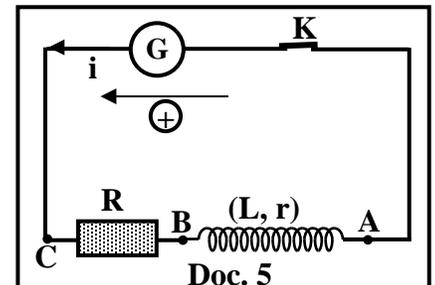
Exercice 2 (8 points)

Caractéristiques d'une bobine

Le but de cet exercice est de déterminer, par deux méthodes, les caractéristiques d'une bobine.

On réalise un montage comprenant en série : un générateur (G), un interrupteur K, un conducteur ohmique de résistance $R = 90 \Omega$ et une bobine d'inductance L et de résistance r (Doc.5).

À l'instant $t_0 = 0$, on ferme l'interrupteur K. À un instant t, le circuit est parcouru par un courant d'intensité i.



1) Première méthode

(G) est un générateur délivrant une tension constante $u_{CA} = E$.

Un système approprié trace les courbes $u_{CB} = u_R$ et

$u_{BA} = u_{bobine}$ en fonction du temps (Doc. 6).

1-1) En utilisant les courbes du document 6 :

1-1-1) déterminer la valeur de E ;

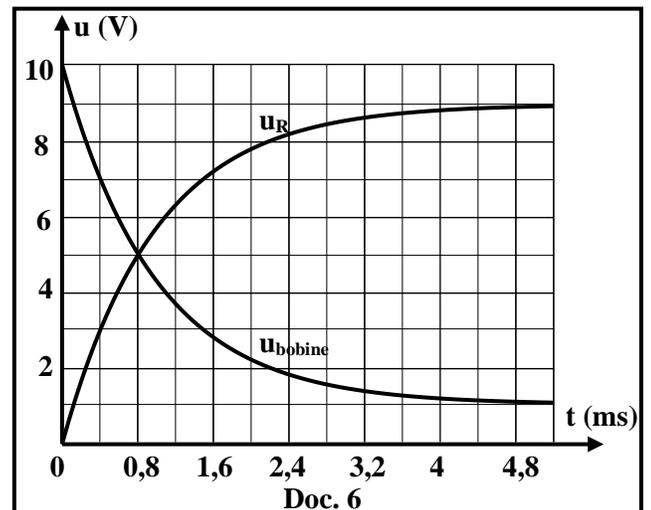
1-1-2) déterminer la valeur de l'intensité I_0 du courant en régime permanent ;

1-1-3) montrer que $r = 10 \Omega$.

1-2) Établir, en appliquant la loi d'additivité des tensions, l'équation différentielle du premier ordre qui décrit l'évolution de i au cours du temps.

1-3) La solution de cette équation différentielle est

$$i = I_0 \left(1 - e^{-\frac{(R+r)}{L}t}\right).$$



Déduire les expressions des tensions u_R et u_{bobine} en fonction de R , r , L , I_0 et t .

1-4) À un instant t_1 , $u_{\text{bobine}} = u_R$. Montrer que $t_1 = -\frac{L}{R+r} \ln\left(\frac{R-r}{2R}\right)$.

1-5) Déduire la valeur de L en utilisant le document 6.

2) Deuxième méthode

Le générateur (G) délivre maintenant une tension alternative sinusoïdale de pulsation ω .

Un oscilloscope, convenablement branché dans le circuit, permet de visualiser $u_{CB} = u_R$ sur la voie 1 et $u_{BA} = u_{\text{bobine}}$ sur la voie 2 (Doc. 7). Les réglages de l'oscilloscope sont :

Sensibilité horizontale : $S_h = 4 \text{ ms/div}$.

Sensibilité verticale : $S_{V1} = 4 \text{ V/div}$ pour la voie 1 ;

$S_{V2} = 1 \text{ V/div}$ pour la voie 2.

2-1) Le circuit est parcouru par un courant alternatif sinusoïdal d'intensité $i = I_m \sin(\omega t)$ (S.I.).

Déterminer l'expression de u_{bobine} en fonction de L , I_m , r , ω et t .

2-2) L'expression de la tension aux bornes de la bobine s'écrit sous la forme : $u_{\text{bobine}} = A \sin(\omega t) + B \cos(\omega t)$, avec A et B des constantes.

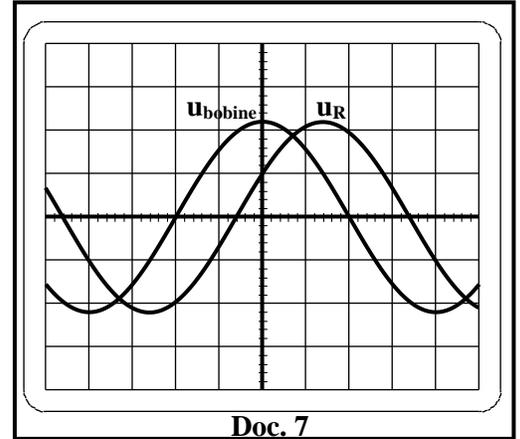
Déterminer A et B en fonction de r , L , I_m et ω .

2-3) En utilisant le document 7, calculer :

2-3-1) les valeurs de I_m et ω ;

2-3-2) la valeur maximale U_m de la tension aux bornes de la bobine ;

2-3-3) la différence de phase φ entre u_{bobine} et u_R .



Doc. 7

2-4) Déterminer de nouveau les valeurs de L et r , sachant que $\tan \varphi = \frac{L \omega}{r}$ et $U_m^2 = A^2 + B^2$.

Exercice 3 (7 points) Désintégration du radon 219

Le but de cet exercice est de déterminer les valeurs de la puissance et de l'énergie des radiations

électromagnétiques γ émises durant la désintégration du radon 219. Le radionucléide radon ${}^{219}_{86}\text{Rn}$ se

désintègre, en polonium ${}^A_Z\text{Po}$ avec émission d'une particule α et d'un rayonnement γ d'énergie E_γ suivant



Données : $m({}^{219}_{86}\text{Rn}) = 204007,3316 \text{ MeV}/c^2$; $m({}^A_Z\text{Po}) = 200271,9597 \text{ MeV}/c^2$; $m(\alpha) = 3728,4219 \text{ MeV}/c^2$.

1 MeV = $1,602 \times 10^{-13} \text{ J}$; Masse molaire de ${}^{219}_{86}\text{Rn}$: $M = 219 \text{ g/mol}$; $N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

- 1) Calculer A et Z , en indiquant les lois utilisées.
- 2) Calculer, en MeV, l'énergie libérée par la désintégration d'un noyau de radon 219.
- 3) Déduire que l'énergie du rayonnement γ émis est $E_\gamma = 0,195 \text{ MeV}$ sachant que le noyau de radon est au repos, et que l'énergie cinétique de la particule α émise est $6,755 \text{ MeV}$ et celle du noyau de polonium est négligeable.
- 4) À $t_0 = 0$, la masse initiale de l'échantillon de radon est $m_0 = 8 \text{ g}$. Montrer que le nombre initial N_0 des noyaux de radon présents dans l'échantillon à $t_0 = 0$ est $N_0 = 21,998 \times 10^{21}$ noyaux.
- 5) Calculer le nombre des particules α émises entre $t_0 = 0$ et $t_1 = 10 \text{ s}$, sachant que le nombre des noyaux de radon restants à $t_1 = 10 \text{ s}$ est $N = 3,998 \times 10^{21}$ noyaux.
- 6) Calculer la valeur de la constante radioactive λ et celle de la demi-vie radioactive T du radon 219.
- 7) Calculer, en becquerel, l'activité A_1 de l'échantillon de radon 219 à l'instant $t_1 = 10 \text{ s}$.
- 8) L'énergie du rayonnement γ émis entre l'instant $t_0 = 0$ et un instant t est : $E = N_d E_\gamma$ où N_d est le nombre des noyaux désintégrés de radon 219 entre ces deux instants.

8-1) Montrer que $E = N_0 E_\gamma (1 - e^{-\lambda t})$.

8-2) Déduire la valeur de E durant l'intervalle de temps $[0, \infty[$.

9) La puissance p, à un instant t, des radiations γ émises, est donnée par : $p = \frac{dE}{dt}$.

9-1) Montrer que $p = \lambda N_0 E_\gamma e^{-\lambda t}$.

9-2) Déduire la puissance maximale P_{\max} des radiations γ .

9-3) Déduire la puissance des radiations γ pour $t \rightarrow \infty$.

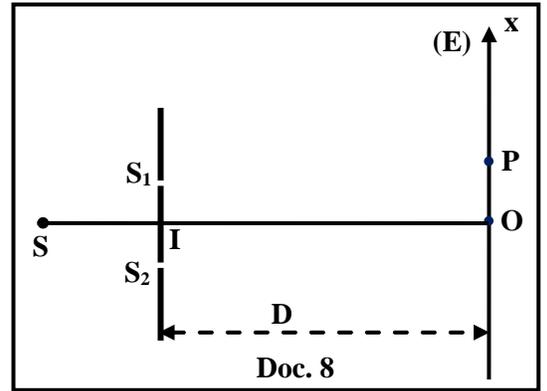
Exercice 4 (7 points)

Interférence de la lumière

Le but de cet exercice est d'étudier le phénomène d'interférences lumineuses en utilisant le dispositif de Young.

Le document 8 montre un dispositif de Young, qui est constitué de deux fentes S_1 et S_2 fines, parallèles, horizontales et distantes de $a = 0,5 \text{ mm}$, et d'un écran d'observation (E) disposé parallèlement au plan des deux fentes et à une distance $D = 2 \text{ m}$.

Une source ponctuelle S, située à égale distance de S_1 et de S_2 , éclaire les deux fentes par une radiation monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 600 \text{ nm}$ dans l'air. (OI) est la médiatrice du segment $[S_1S_2]$. L'expression de la différence de marche optique en un point P situé dans la région d'interférence sur un axe vertical (Ox) est :



$$\delta = (SS_2 + S_2P) - (SS_1 + S_1P) = \frac{ax}{D} \text{ où } x = \overline{OP}.$$

1) Décrire la figure d'interférence observée sur (E).

2) Montrer que O est le centre de la frange brillante centrale.

3) On suppose que P est le centre de la frange sombre d'ordre k, $k \in \mathbb{Z}$.

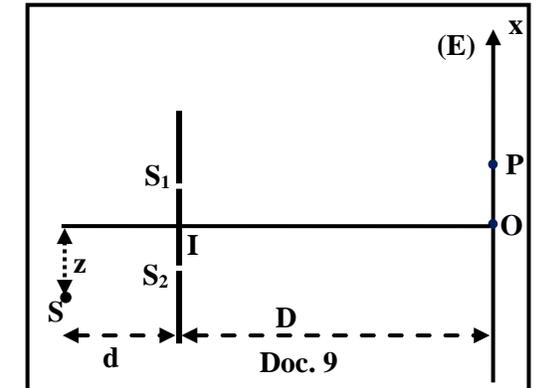
3-1) Donner l'expression de la différence de marche optique δ au point P en fonction de k et λ .

3-2) Déduire l'expression de l'abscisse x_k de P en fonction de k, λ , D et a.

3-3) Déterminer l'ordre de la frange sombre en P sachant que

$$x_k = 6 \text{ mm}.$$

4) La source (S), située à la distance d du plan des fentes, est déplacée de z du côté de S_2 , parallèlement à l'axe (Ox) dans le sens négatif (Doc. 9).



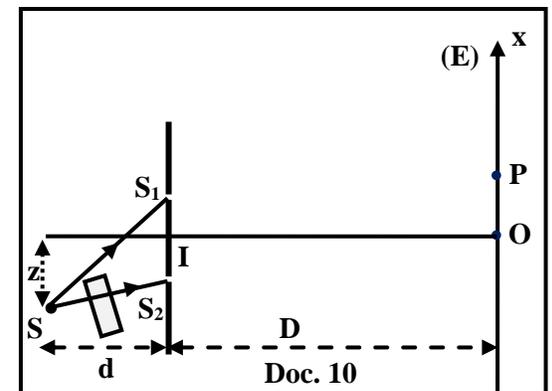
La différence de marche optique au point P devient :

$$\delta = \frac{az}{d} + \frac{ax}{D}$$

4-1) Déterminer la position du centre O' de la frange centrale brillante en fonction de D, z et d.

4-2) Préciser si la frange brillante centrale est déplacée du côté de S_1 ou du côté de S_2 .

4-3) Une lame à faces parallèles, transparente, d'épaisseur $e = 0,02 \text{ mm}$ et d'indice de réfraction $n = 1,5$ est placée devant S_2 (Doc. 10). La différence de



marche optique au point P devient : $\delta = \frac{az}{d} + \frac{ax}{D} + e(n - 1)$.

On règle la distance d de façon que le centre de la frange brillante centrale revienne au point O.

Déterminer la valeur de d sachant que $|z| = 0,4 \text{ cm}$.

Exercice 1 (8 points) Oscillations libres amorties

Partie		Réponses	note	
1	1-1	$m\vec{g} + \vec{N} + \vec{f} + \vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt}$; par projection on aura : $0 + 0 + -hv - kx = m \frac{dv}{dt}$, alors $m \frac{dv}{dt} + kx = -hv$	0,75	
	1-2	$E_M = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} k x^2$	0,25	
	1-3	$\frac{dE_M}{dt} = m v \frac{dv}{dt} + k x \frac{dx}{dt} = v (m \frac{dv}{dt} + k x)$ Or on a $m \frac{dv}{dt} + k x = -hv$ On aura $\frac{dE_M}{dt} = v (-hv)$, alors $\frac{dE_M}{dt} = -h v^2$	0,5	
	1-4	$\frac{dE_M}{dt} = v (m \frac{dv}{dt} + k x) = -h v^2$, donc $m x'' + h x' + k x = 0$	0,5	
	1-5	$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{k}{m} - (\frac{h}{2m})^2}}$	0,25	
	1-6	1	quand h augmente, T augmente	0,25
		2	T_0 correspond à $h = 0$ donc pas de frottement et la période est dite propre	0,25
1-7	Pour $h = 0$, $T = T_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{k}{m} - 0}}$ donc $T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$	0,5		
2	2-1	$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2 \times 3,14 \sqrt{\frac{0,5}{100}} = 0,444$ s	0,5	
	2-2	1	$2,5 T = 1,125$ s , alors $T = 0,45$ s.	0,5
		2	X_m diminue avec le temps et T est supérieur à $T_0 (T > T_0)$	0,5
	2-3	$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{k}{m} - (\frac{h}{2m})^2}}$, alors $\frac{k}{m} - \frac{h^2}{4m^2} = \frac{4\pi^2}{T^2}$, alors $h^2 = 4mk - \frac{16 m^2 \pi^2}{T^2}$ par suite $h = \sqrt{4mk - \frac{16 m^2 \pi^2}{T^2}}$ $T = \sqrt{4(0,5)(100) - \frac{16(0,5^2)(\pi^2)}{0,45^2}} = 2,24$ kg/s	1	
	2-4	1	pour $t = 0,27$ s, $E_C = 80$ mJ , alors $\frac{1}{2} m V^2 = 0,08$ et $V = \sqrt{\frac{2 \times 0,08}{0,5}} = 0,566$ m/s.	0,75
		2	$\frac{dE_M}{dt} = \frac{\Delta E_M}{\Delta t}$ pente = $\frac{0,25 - 0,440}{0,27 - 0} = -0,704$ J/s	0,75
3		$\frac{dE_M}{dt} = -0,704 = -h V^2$, alors $h = \frac{0,704}{0,566^2} = 2,2$ kg/s	0,75	

Exercice 2 (8 points)

Caractéristiques d'une bobine

Partie		Réponses	Notes
1	1-1	1 Loi d'additivité des tensions : $u_{CA} = u_{CB} + u_{BA}$ en régime permanent $u_{CB} = u_R = 9V$ et $u_{BA} = u_{bobine} = 1V$; donc $u_{CA} = E = 9+1 = 10V$ Ou bine : $E = u_{bobine} + u_R$. A $t = 0$, $i = 0$ donc $u_R = 0$ alors $E = u_{0bobine} = 10V$	0,75
		2 En régime permanent $u_{CB} = u_R = 9 = R \times I_0$ donc $9 = 90 \times I_0$; $I_0 = 0,1 A$	0,5
		3 $u_{BA} = u_{bobine} = ri + L \frac{di}{dt}$; en régime permant $u_{BA} = 1V$ et $\frac{di}{dt} = 0$ donc $1 = r I_0$; $r = \frac{1}{0,1} = 10 \Omega$ Ou bien : En régime permanent $I_0 = E/(R+r)$ donc $r = 10 \Omega$	0,5
	1-2	Loi d'additivité des tensions : $u_{CA} = u_{CB} + u_{BA}$; $E = Ri + ri + L \frac{di}{dt} = (R+r)i + L \frac{di}{dt}$	0,5
	1-3	$u_{bobine} = ri + L \frac{di}{dt} = r I_0(1 - e^{-\frac{(R+r)t}{L}}) + L(R+r) \frac{I_0}{L} e^{-\frac{(R+r)t}{L}} = r I_0 + RI_0 e^{-\frac{(R+r)t}{L}}$ $u_R = Ri = RI_0(1 - e^{-\frac{(R+r)t}{L}})$	0,5 0,25
1-4	$u_{bobine} = u_R$; $r I_0 + RI_0 e^{-\frac{(R+r)t}{L}} = RI_0 \left(1 - e^{-\frac{(R+r)t}{L}} \right)$; $(R - r) I_0 = 2 RI_0 e^{-\frac{(R+r)t}{L}}$; $e^{-\frac{(R+r)t}{L}} = \frac{R-r}{2R}$; $-\frac{(R+r)t}{L} = \ln\left(\frac{R-r}{2R}\right)$ $t_1 = -\frac{L}{R+r} \times \ln\left(\frac{R-r}{2R}\right)$	0,75	
1-5	$L = \frac{-(R+r) \times t_1}{\ln\left(\frac{R-r}{2R}\right)} = \frac{-(90+10) \times 0,0008}{\ln\left(\frac{90-10}{180}\right)} = 0,099 H$	0,75	
2	2-1	$u_{bobine} = ri + L \frac{di}{dt} = rI_m \sin(\omega t) + L \omega I_m \cos(\omega t)$	0,5
	2-2	$u_{bobine} = rI_m \sin(\omega t) + L \omega I_m \cos(\omega t) = A \sin(\omega t) + B \cos(\omega t)$ donc $A = rI_m$ et $B = L \omega I_m$	0,5
	2-3	1 $U_{Rm} = 4V/div \times 2,2div = 8,8 V$; $I_m = \frac{U_{Rm}}{R} = \frac{8,8}{90} = 0,098A$ $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{8 \times 4 \times 10^{-3}} = 62,5\pi rd/s = 196,35rd/s$	0,5 0,5
		2 $U_m = 2,2div \times 1V/div = 2,2V$	0,25
		3 $\varphi = \frac{2\pi \times 1,4 div}{8 div} = \frac{7\pi}{20} rd = 1,099rd$	0,5
2-4	$\tan \varphi = \frac{L\omega}{r}$; $\tan 1,099 = \frac{L \times 62,5\pi}{r}$ donc $\frac{L}{r} = \frac{\tan 1,099}{62,5\pi}$; $L = \frac{\tan 1,099}{62,5\pi} \times r$ ① $U_m^2 = A^2 + B^2$; $9 = (rI_m)^2 + (L \omega I_m)^2$ ② En remplaçant ① dans ② : $2,2^2 = r^2 \times I_m^2 \left(1 + \omega^2 \times \left(\frac{\tan 1,099}{62,5\pi} \right)^2 \right)$; donc $r = 9,998 \Omega$ et $L = 0,0998 H$ ou bien : $U_m^2 = A^2 + B^2$ alors $U_m^2 = (L\omega)^2 I_{max}^2 + r^2 I_{max}^2$ mais $\tan \varphi = \frac{L\omega}{r}$; $L \omega = r \tan \varphi$; Alors $U_m^2 = r^2 I_{max}^2 (1 + \tan^2 \varphi)$ on aura : $r = \frac{U_m}{I_m \sqrt{1 + (\tan \varphi)^2}} = 10,3 \Omega$ alors $L = 0,1 H$	0,75	

Exercice 3 (7 points)

Désintégration du radon 219

Partie	réponses	notes
1	Loi de conservation de nombre de masse A : $219 = A + 4 + 0$ donc $A = 215$. Loi de conservation de nombre de charge Z : $86 = Z + 2 + 0$ donc $Z = 84$.	1
2	$E_{\text{lib}} = \Delta m \times c^2$ $E_{\text{lib}} = [(m_{\text{86}}^{219}\text{Rn}) - (m_{\text{84}}^{\text{A}}\text{Po} + m_{\alpha})] c^2 = 204007,3316 - (200271,9597 + 3728,4219)$ $E_{\text{lib}} = 6,95\text{MeV}$	0,75
3	$E_{\text{lib}} = E_{c(\alpha)} + E_{\gamma}$; $E_{\gamma} = 6,95 - 6,755 = 0,195\text{MeV}$	0,5
4	$N_0 = \frac{m_0}{M} N_A = \frac{8}{219} \times 6,022 \times 10^{23} = 21,998 \times 10^{21}$ noyaux.	0,5
5	$N_{\alpha} = N_d = N_0 - N = 21,998 \times 10^{21} - 3,998 \times 10^{21} = 18 \times 10^{21}$ noyaux.	0,5
6	$N = N_0 e^{-\lambda t}$, donc $\lambda t = -\ln \frac{N}{N_0} = -\ln \left(\frac{3,998 \times 10^{21}}{21,998 \times 10^{21}} \right)$ donc $\lambda = \frac{-1}{10} \times \ln \left(\frac{3,998 \times 10^{21}}{21,998 \times 10^{21}} \right) = 0,1705 \text{ s}^{-1}$. $T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{0,1705} = 4,06 \text{ s}$.	0,75
7	$A = \lambda N = 0,1705 \times 3,998 \times 10^{21} = 68,1659 \times 10^{19} \text{ Bq}$.	0,5
8	8-1 $E = N_d E_{\gamma} = (N_0 - N) E_{\gamma} = (N_0 - N_0 e^{-\lambda t}) E_{\gamma}$, donc $E = N_0 E_{\gamma} (1 - e^{-\lambda t})$	0,5
	8-2 Pour $t \rightarrow \infty$, $E = N_0 E_{\gamma} (1 - 0) = 21,998 \times 10^{21} \times 0,195 \times 1,602 \times 10^{-13}$ Donc, $E = 6,87 \times 10^6 \text{ J}$	0,5
9	9-1 $P = \frac{dE}{dt} = \frac{d(N_0 E_{\gamma} (1 - e^{-\lambda t}))}{dt} = \lambda N_0 E_{\gamma} e^{-\lambda t}$	0,5
	9-2 Pour $t = 0$; $p = p_{\text{max}} = \lambda N_0 E_{\gamma} e^{-\lambda(0)} = \lambda N_0 E_{\gamma}$ $p = 0,1705 \times 21,998 \times 10^{21} \times 0,195 \times 1,602 \times 10^{-13} = 11,72 \times 10^7 \text{ W}$	0,75
	9-3 Pour $t \rightarrow \infty$, $P_{\infty} = \lambda N_0 E_{\gamma} e^{-\lambda(\infty)} = 0$	0,25

Exercice 4 (7 points)

Interférence de la lumière

Partie	Réponses	notes
1	On observe des franges rectilignes, alternativement brillantes et sombres, équidistantes et parallèles entre eux et aux fentes	1
2	$x_0 = 0$ donc $\delta_0 = \frac{ax}{D} = 0$	0,5
3	3-1 $\delta = (2k+1) \frac{\lambda}{2}$ avec $k \in \mathbb{Z}$	0,5
	3-2 $(2k+1) \frac{\lambda}{2} = \frac{ax}{D}$, donc $x_k = (2k+1) \frac{\lambda D}{2a}$ avec $k \in \mathbb{Z}$	1
	3-3 $x_k = (2k+1) \frac{\lambda D}{2a}$ donc $6 \times 10^{-3} = (2k+1) \frac{600 \times 10^{-9} \times 2}{2 \times 0,5 \times 10^{-3}}$, on aura $k = 2$	1
4	4-1 $\delta_{0'} = \frac{az}{d} + \frac{ax}{D} = 0$, donc $x_{0'} = \frac{-zD}{d}$	1
	4-2 $Z < 0$ et $D > 0$; $d > 0$ donc $x_{0'} > 0$, par suite la frange central est déplacée du côté de S_1 .	0,75
	4-3 $\delta_0 = 0$ et $x_0 = 0$, mais $\delta = \frac{az}{d} + \frac{ax}{D} + e(n-1)$ $d = \frac{-az}{e(n-1)} = \frac{-(0,5 \times 10^{-3})(-0,4 \times 10^{-2})}{(0,02 \times 10^{-3})(1,5-1)}$, donc $d = 0,2$ m	1,25