INSA LYON

Premier Cycle
Deuxième Année

Année scolaire 2003/2004

Devoir de Synthèse de Physique

19 Janvier 2004 **Durée : 3h**

Barême approximatif : Problème 1 : 14 points ; Problème 2 : 6 points

Problème 1 : Anneau de Thomson

Un dispositif expérimental dû à Thomson est composé d'un solénoïde vertical de longueur d, de rayon ρ, comportant N spires jointives, et traversé par un cylindre en fer doux. Le rayon du cylindre sera considéré comme égal au rayon ρ du solénoïde.

Sur ce noyau de fer qui dépasse du solénoïde, on enfile un anneau cylindrique métallique de rayon intérieur ρ, de diamètre extérieur ρ'=ρ+a (a<<ρ), de hauteur h très faible et de section rectangulaire (Figure 1).

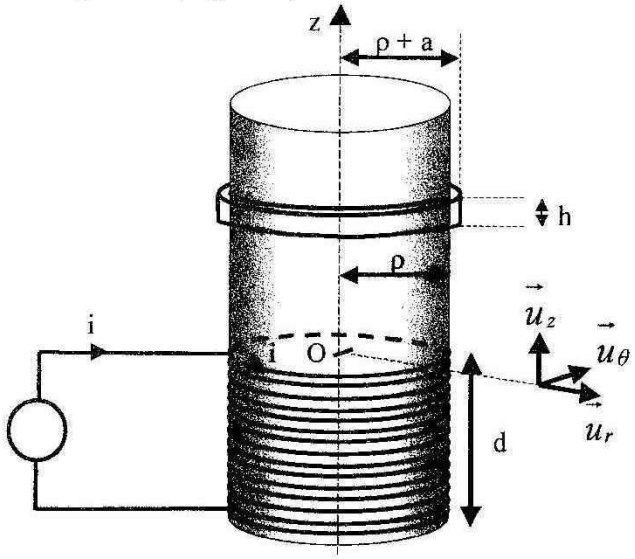


Figure 1

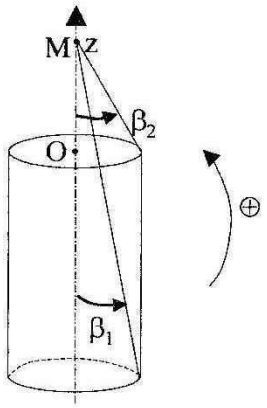


Figure 2

En l'absence de courant dans le solénoïde, l'anneau repose sur la face supérieure du solénoïde.

Dans tout le problème, on utilisera la base locale des coordonnées cylindriques $(\vec{u}_r, \vec{u}_\theta, \vec{u}_z)$, l'origine O des altitudes suivant z étant prise au niveau de la face supérieure du solénoïde.

Données numériques pour l'ensemble du problème :

$\rho = 3$ cm ; $d = 13$ cm ; $m = 15{,}8$ g ; $N = 320$; $\mu_r = 100$; $I_0 = 5$ A ; $R = 0{,}19\times10^{-3}\ \Omega$; $f = 50$ Hz; $L = 16{,}8\times10^{-6}$ H, $g = 9{,}8$ m.s^{-2}, $\mu_0 = 4\pi\times10^{-7}$ F/m.

I . Etude du champ magnétique créé par le solénoïde dans le cylindre en fer doux

Le cylindre en fer doux est considéré comme un matériau magnétique parfait de perméabilité magnétique relative μ_r avec $\mu_r >> 1$, et de faible conductivité. On néglige l'influence des courants induits dans le fer. Lorsque le solénoïde est parcouru par un courant i variable, on admettra qu'il crée en un point M **de l'axe Oz** du cylindre (intérieur ou extérieur au solénoïde), un champ magnétique $\vec{B}$ donné par l'expression des états quasi-permanents, soit :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu_r n\, i}{2}(\cos\beta_1 - \cos\beta_2)\, \vec{u}_z$$

où n est le nombre de spires par unité de longueur, β_1 et β_2 les angles orientés définis sur la figure 2.
μ_r étant très supérieur à 1, on considèrera que le champ magnétique créé à l'extérieur du cylindre est négligeable.

I–1- On considère un point M du cylindre situé sur l'axe Oz, à la distance z = OM positive de la face de sortie du solénoïde (Figure 2). Montrer que le champ magnétique au point M peut se mettre sous la forme $\vec{B}(z) = C\, i\, F(z)\, \vec{u}_z$ où la fonction F(z) ne dépend que de d, ρ et z. On exprimera la constante C en fonction de N, d, μ_0 et μ_r.

I-2- On considère un point P voisin de M dans un plan perpendiculaire à l'axe du solénoïde, et repéré par sa distance r à l'axe.
a) Dans un repère de coordonnées cylindriques d'axe Oz, que peut-on dire de la composante $B_\theta(P)$?
Justifier votre réponse.
b) La fonction $B_z(r)$ étant paire, on peut montrer que si $r << \rho$ (r proche de 0), on peut écrire au second ordre près, $B_z(P) \approx B_z(M)$. Dans la suite du problème, on considèrera que la composante B_z est uniforme sur toute section du cylindre perpendiculaire à l'axe Oz.
En utilisant la propriété de conservation du flux de $\vec{B}$, on peut montrer que $\vec{B}_r(P) = -\frac{r}{2} C\, i\, \frac{dF}{dz}\, \vec{u}_r$. Donner sans calculs, par un raisonnement qualitatif, le signe de $\frac{dF}{dz}$ pour z > 0. Dans le cas où i est un courant constant positif, faire un schéma représentant la direction et le sens du champ magnétique sur l'axe Oz, et pour deux points du cylindre symétriques par rapport à l'axe Oz, à une altitude z quelconque.

II - Phénomènes d'induction dans l'anneau

Dans un premier temps, on néglige l'épaisseur a et la hauteur h de l'anneau, qui est alors assimilé à une spire de rayon ρ. On oriente le solénoïde et l'anneau dans le même sens, celui du vecteur $\vec{u}_\theta$.

II-1- Le courant i dans le solénoïde est supposé constant et égal à I_0. On rappelle que la composante B_z du champ magnétique est supposée uniforme sur toute la surface de la spire et a pour valeur, sa valeur sur l'axe Oz.
a) Donner alors l'expression du flux ϕ du champ magnétique à travers l'anneau placé à l'altitude z.

b) Décrire et donner une interprétation qualitative des phénomènes qui interviennent lors de l'établissement du courant.

II-2- On suppose maintenant qu'un courant sinusoïdal $i(t) = I_0 \sin(\omega t)$ de fréquence f, circule dans le solénoïde.

a) Donner l'expression de $B_z(P)$, de $B_r(P)$ ainsi que la nouvelle expression du flux $\phi(t)$.

b) Précisez les deux facteurs qui peuvent être à l'origine d'une variation de ce flux au cours du temps.

II-3- a) Donner l'expression de la force électromotrice d'induction mutuelle e(t) induite dans l'anneau dans le cas général (anneau mobile), en fonction de $F(z)$, $\frac{dF}{dz}$ et $\frac{dz}{dt}$.

Dans toute la suite du problème, on supposera que l'anneau est dans la position initiale en z = 0, ou dans une position d'équilibre en $z = z_e$ (anneau immobile) que l'on étudiera en II-5.

b) Montrer que pour ces deux positions de l'anneau, la force électromotrice e(t) induite dans l'anneau s'exprime sous la forme simple :

$$e(t) = e_0 F(z)\cos(\omega t)$$

Donner l'expression de e_0 en fonction de C, I_0, ω et ρ. Calculer la valeur numérique de e_0.

II-4- Question indépendante

Afin de tenir compte des pertes d'énergie par effet Joule et du flux propre, on suppose que l'anneau a une résistance ohmique R et une inductance propre L.

a) Donner l'équation différentielle qui régit le **courant induit i'(t) circulant dans l'anneau**.

b) En régime sinusoïdal permanent, mettre la solution sous la forme $i'(t) = I'_0 F(z)\cos(\omega t - \psi)$ et donner les expressions de I'_0 et ψ en fonction de e_0, L, R et ω. Calculer numériquement I'_0 et ψ avec les données de l'énoncé.

II-5- a) Donner l'expression de la force de Laplace élémentaire $\vec{df}_L(z,t)$ qui agit sur un tronçon orienté de l'anneau à la distance z du solénoïde.

Montrer que $\vec{f}_L(z,t)$ peut s'écrire sous la forme $\vec{f}_L = \alpha\, F(z)\frac{dF}{dz}G(t)\,\vec{v}$, α étant une constante que l'on exprimera en fonction de ρ, I_0, I'_0 et C, $\vec{v}$ étant un vecteur unitaire que l'on précisera. On donnera également l'expression de G(t).

b) On rappelle que la valeur moyenne, $<G(t)>$, d'une fonction G(t) sur une période $T=2\pi/\omega$ est définie par :

$$< G(t) >= \frac{1}{T}\int_0^T G(t)dt$$

Calculer cette valeur moyenne pour G(t) en fonction de ψ puis en fonction de R, L et ω.

En déduire la valeur moyenne temporelle de la force de Laplace, notée $<\vec{f}_L>$, lorsque l'anneau est dans la position z = 0 ou $z = z_e$. Quel est le sens de $<\vec{f}_L>$? Que vaut cette force moyenne si on néglige les phénomènes d'auto-induction ?

II-6- On suppose que l'anneau a une masse m. Ecrire, sans la résoudre, l'équation qui permettrait de déterminer la valeur numérique de la position d'équilibre z_e.
Avec les données numériques de l'énoncé, on obtient la position d'équilibre à l'altitude z_e = 5,3 cm.
Quelle est la valeur de $< \vec{f}_L >$ à z = 0 ?
La position z = 0 est-elle une position d'équilibre ? Justifier votre réponse.

III- Effet Joule associé aux courants induits – (Question indépendante)

On suppose que l'anneau placé dans le champ magnétique $B_z = B_0F(z)\sin(\omega t)$, lévite à la **position d'équilibre z_e.** On ne néglige plus l'épaisseur a de l'anneau et on souhaite évaluer les pertes par effet Joule associées aux courants induits dans l'anneau. On suppose que la hauteur h de l'anneau est suffisamment faible pour que l'on puisse considérer l'anneau entier placé à l'altitude z_e. L'anneau a une conductivité électrique γ.

III-1- On admet que le champ électrique induit à l'intérieur de l'anneau, c'est-à-dire pour $\rho < r < \rho+a$, peut s'écrire $\vec{E}=E(r,z_e)\vec{u}_\theta$.
On rappelle qu'on considère négligeable le champ magnétique extérieur au cylindre en fer doux. En appliquant le théorème de Stokes, calculer alors le champ électrique induit en fonction de ρ, r, ω, B_0 et $F(z_e)$ puis calculer la densité de courant induite $\vec{j}$.

III-2- On rappelle que la puissance dissipée par unité de volume a pour expression

$$\frac{dP}{d\tau} = \vec{j}.\vec{E}.$$

Calculer $\frac{dP}{d\tau}$ ainsi que sa valeur moyenne temporelle, notée $< \frac{dP}{d\tau} >$. En déduire la puissance moyenne temporelle totale dissipée par effet Joule dans le conducteur. L'effet Joule est-il homogène dans tout l'anneau ?

Génération d'une onde sur une corde tendue (PARTIE DU DS 2004 – 1er SEMESTRE)

La figure 3 représente le dispositif permettant de générer une onde le long d'une corde tendue à partir d'un système oscillant masse-ressorts. Dans ce montage, la masse M se déplace sans frottement parallèlement à l'axe Oy. Son déplacement est noté $u_M(t)$. Cette masse est reliée, d'une part, à deux ressorts identiques de raideur R, dont les allongements sont nuls pour $u_M = 0$ et, d'autre part, à une corde de longueur semi-infinie, de tension T_0 et de masse linéaire m_l. Dans tout le problème, on considère les petits mouvements transversaux u(x,t) de la corde. Ces derniers s'effectuent sans aucun frottement visqueux , ni aucune autre perte d'énergie. On rappelle que la propagation de tels mouvements est gouvernée par l'équation d'onde :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{m_l}{T_0}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

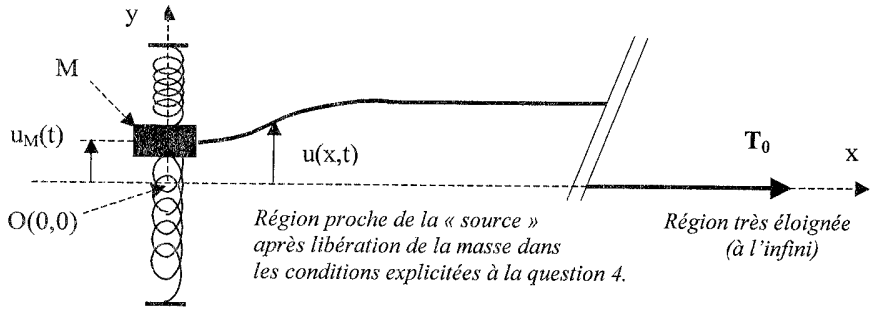


Figure 3

1) Donner et expliquer la forme **la plus générale** de la solution u(x,t) de l'équation d'onde précédente, en précisant l'expression de la constante qui intervient dans cette expression. En déduire la forme générale correspondant à la configuration de la figure 3. Préciser la relation entre u(x=0, t) et $u_M(t)$.

2) Etablir l'expression de la force transversale $F_y(x,t)$ exercée, en tout point, par la **partie située à droite** du point considéré de la corde sur la **partie de la corde située à gauche** de ce point (on donnera cette expression en fonction de la dérivée $\frac{\partial u}{\partial x}$). Faire un schéma pour justifier la réponse. Montrer

finalement que l'on peut aussi exprimer cette force en fonction de la vitesse de déplacement $\frac{\partial u}{\partial t}$.

3) En utilisant le résultat précédent, établir l'équation différentielle du mouvement de la masse M (que l'on supposera ponctuelle pour la mise en équation du problème), en tenant compte des différentes forces agissant sur celle-ci (**sauf la force de pesanteur dont on négligera les effets dans tout ce problème**). Montrer que l'équation différentielle peut se mettre sous la forme :

$$\frac{d^2u_M}{dt^2} + B\frac{du_M}{dt} + C^2u_M = 0$$

où B et C sont deux constantes positives que l'on exprimera en fonction des données du problème, soit M, m_l, T_0 et R.

4) Pour initier le mouvement du système, un opérateur déplace **très lentement** la masse M jusqu'à la position définie par $u_M = a$ (aucune onde n'est émise au cours de cette opération). On admettra qu'à cet instant initial, $u(x, 0) \cong a$, pour tout le domaine où l'on se propose de décrire les mouvements de la corde (au delà de ce domaine, c'est-à-dire lorsque $x \to \infty$, alors $u(x, 0) \to 0$). Ensuite, la masse M est laissée libre par l'opérateur. Cet instant est pris pour origine des temps. Décrire les différents types de mouvements que peut alors effectuer la masse M, selon la relation entre B et C, que l'on précisera dans chaque cas.

5) Dans toute la suite on s'intéresse au régime défini par B = 2C. Préciser dans ce cas l'expression particulière de $u_M(t)$, en prenant en compte les conditions initiales pour la mise en mouvement de la masse M (cf. question 4)). En déduire, l'expression du déplacement transversal u(x, t) dans le domaine de la corde défini précédemment (c'est-à-dire qui exclut $x \to \infty$). Faire deux schémas représentant qualitativement l'évolution de u en fonction du temps (en un point tel que x>0) et celle de u en fonction de x (à un instant $t > 0$). Commenter ces deux schémas.

CORRIGE – BAREME
du DS du 19 Janvier 2004

PROBLEME 1 : ANNEAU DE THOMSON : 28 points

I.1 Le champ magnétique en un point de l'axe est donné par :

$$B=\frac{\mu_0\mu_r N\, i}{2d}(\cos(\theta_1)-\cos(\theta_2)) = C\, iF(z)$$

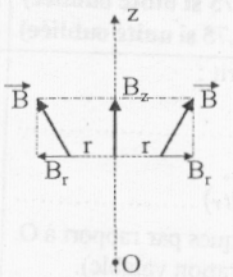
avec $C=\frac{\mu_0\mu_r N}{2d}$ ..... **(mettre 0/0,5 si n au lieu de N/d)** — 0.5

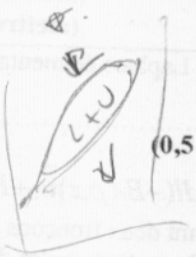
et $F(z)=\frac{d+z}{\sqrt{(d+z)^2+\rho^2}}-\frac{z}{\sqrt{z^2+\rho^2}}$ ..... — 1

I.2 **a)** Tout plan passant par l'axe Oz est un plan d'antisymétrie pour la distribution des courants (ou **B** orthogonal à i **dl** (d'après Biot et Savart)) donc $B_\theta(P) = 0$..... — 1

b) Pour z>0, le champ sur l'axe diminue lorsque l'on s'éloigne du solénoïde donc lorsque z augmente, donc dF/dz est négatif. (Admettre un raisonnement sur θ_1 et θ_2)..... — 0.5

Pour i constant positif, dF/dz étant négatif, la composante radiale B_r est positive.





(0,5 pour B_z constant et 0,5 pour sens de B_r) — 0.5+0.5

II.1

a) Compte tenu de l'uniformité de la composante B_z du champ magnétique sur la surface de la spire :

$$\phi(t)=\iint\vec{B}.d\vec{S}=B_z\iint dS=\pi\rho^2 CI_0F(z)$$ (certains étudiants ont considéré une hauteur h pour la spire : mettre **0,5/1** si l'intégrale sur B_z est juste même en présence d'une intégrale sur B_r). — 1

b) Lors de l'établissement du courant,
l'augmentation du flux magnétique à travers l'anneau, induit une f.e.m d'induction dans l'anneau qui génère un courant induit i' dans l'anneau de sens opposé à I_0..... — 0.5
Celui-ci est alors soumis à des forces de Laplace ..... — 0.5
qui entraînent l'anneau vers le haut de sorte que le flux du champ créé par le solénoïde à travers l'anneau diminue..... — 0,5

II.2 a) $B_z(P) = CI_0F(z)\sin(\omega t)$ ..... — 0.5

$$B_r(P) = -\frac{r}{2}CI_0\frac{dF}{dz}\sin(\omega t)$$ ..... — 0.5

Le flux a maintenant pour expression :

$$\phi(t) = \pi\rho^2 CI_0\, F(z(t))\sin(\omega t)$$ ..... — 0.5

b) Le flux peut varier pour deux raisons :
variation de z(t) au cours du temps si il y a déplacement de l'anneau..... — 0.75
variation temporelle du courant i et donc du champ magnétique pour une position z fixée (sin (ωt))..... — 0.75

II.3

a) $e(t)=-\frac{d\phi(t)}{dt}=-\pi\rho^2 CI_0\left[F(z)\omega\cos(\omega t)+\frac{dF}{dz}\frac{dz}{dt}\sin(\omega t)\right]$ **(mettre 0/1 si uniquement e = -dΦ/dt)** — 1

(mettre 0,5/1 si oubli du terme en dz/dt)

On peut calculer e(t) avec $e(t)=-\iint\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}.d\vec{S}+\oint(\vec{v}\wedge\vec{B}).d\vec{l}$ **(mettre 0/1 si uniquement la formule)**

b) Dans la situation initiale (v = dz/dt= 0) ou en position d'équilibre, dz/dt=0 ..... 0.5

$e(t)=-\pi\rho^2 CI_0F(z)\omega\cos(\omega t)=e_0F(z)\cos(\omega t)$ 0.5

avec $e_0=-C\pi\omega\rho^2 I_0$ (ne pas pénaliser oubli du signe – pour e_0)..... 0.5

e_0 = - 0,686 V **(mettre 0,25/0,75 si unité fausse ou oubliée)**..... 0.75

II.4 - La loi des mailles donne $L\frac{di'}{dt}+Ri' = e$ **(Pour toute erreur de signe, mettre 0/1)** — 1

D'où en notation complexe, $i'=\frac{e_0F(z)\,e^{j\omega t}}{R+jL\omega}=I'_0\,F(z)e^{j(\omega t-\psi)}$ ou $i'=\frac{e}{R+jL\omega}$ 1

Avec $\tan(\psi)=L\omega/R$ **(mettre 0,5/1 pour tan(ψ)= - Lω/R)**... 1

$I'_0=\frac{e_0}{\sqrt{R^2+L^2\omega^2}}$ 1

$\tan(\psi)$ = 27,76 soit ψ = 87,9°=1,53 rad **(mettre 0,25/0,75 si unité oubliée)** 0.75

I'_0 = −130 A **(mettre 0,25/0,75 si unité oubliée)** 0.75

II.5 – a) Sur un tronçon orienté de l'anneau, la force de Laplace élémentaire s'écrit :

$d\vec{f}_L=i'd\vec{l}\wedge\vec{B}$ 0.5

$d\vec{f}_L=i'dl\vec{u}_\theta\wedge(B_r(\rho,z)\vec{u}_r+B_z(\rho,z)\vec{u}_z)=i'dl(-B_r(\rho,z)\vec{u}_z+B_z(\rho,z)\vec{u}_r)$ 0.5

La résultante est suivant z comme on le voit en regroupant deux tronçons symétriques par rapport à O. (ou B_z uniforme donc intégrale de B_z sur le contour nulle ou toute autre démonstration valable).

On obtient une résultante suivant z ($\vec{v}=\vec{u}_z$)..... 0.75

f_L= -i'(t)2πρB_r(ρ,z)..... 0.5

En reprenant les expressions de i' et B_r on obtient :

$f_L= I'_0\pi\rho^2 CI_0F(z)\,(dF/dz)\sin(\omega t)\cos(\omega t-\psi) = \alpha\,F(z)\,(dF/dz)\,G(t)$

avec $\alpha = CI'_0I_0\pi\rho^2$..... 0.5

$G(t) = \sin(\omega t)\cos(\omega t-\psi)$..... 0.5

II.5 – b) $G(t) = (\sin(2\omega t-\psi) + \sin(\psi))/2$

La valeur moyenne sur une période de sin(2ωt-ψ) est nulle donc la valeur moyenne de G est

$<G(t)>=\frac{\sin(\psi)}{2}$ .....(admettre toute démonstration juste)..... 1

soit $<G(t)>=\frac{L\omega}{2\sqrt{R^2+L^2\omega^2}}$ *ou* $\frac{1}{2}\sin(\arctan\frac{L\omega}{R})$ 1

$<\vec{f}_L>=\frac{\pi\rho^2}{2}CI_0I'_0\sin(\Psi)F(z)\frac{dF}{dz}\vec{u}_z$ *ou* $\frac{\alpha}{2}\sin(\Psi)F(z)\frac{dF}{dz}\vec{u}_z$ 0.5

$\sin(\psi) > 0$ $I'_0 < 0$ $F(z) > 0$ $dF/dz < 0$ donc $<f_L> > 0$ La force est dirigée vers le haut 0.75

Si on néglige les phénomènes d'auto-induction L = 0 , $\sin(\psi) = 0$ et donc $<f_L>=0$ 0.5

II.6 Dans la position d'équilibre ($z = z_e$), la force de Laplace moyenne est compensée par le poids de l'anneau soit $<f_L> = mg$ **(mettre 0,5/1 si f_L au lieu de $<f_L>$)** 1

F(z=0) = 0,974 ; (dF/dz)(z=0) = -32,9 ; sin(ψ)=0;998

$<f_L(z=0)>$=10,7N **(Si $<f_L> > mg$ uniquement, mettre 0.25/1)** 1

mg = 0,15 N

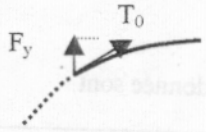
donc z = 0 n'est pas une position d'équilibre, l'anneau décolle 0.5+0.25

TOTAL PROBLEME 1 **28 pts**

PROBLEME 2 : GENERATION D'UNE ONDE SUR UNE CORDE TENDUE : 13 pts

1) $u(x,t) = f(x - Vt) + g(x + Vt)$ — 0.5
avec f = Onde se propageant à x croissant ; g = onde se propageant à x décroissant — 0.5
$V = \sqrt{(T_0/m_l)}$ — 0.5
Seule une onde se propageant à x croissant est possible $u(x,t) = f(x - Vt)$ — 0.5
$u(x=0,t) = u_M(t)$ — 0.5

2)



$F_y = T_0 \sin\alpha \cong T_0 \, \partial u/\partial x$ — 0.75

Si pas de schéma noter 0.5/0.75 ; si erreur de signe 0.25/0.75

Partant de la relation $u(x,t) = f(x - Vt)$, on déduit $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{V}\frac{\partial u}{\partial t}$ — 0.5

Si erreur de signe 0/0.5

soit $F_y = -\frac{T_0}{V}\frac{\partial u}{\partial t} = -\sqrt{m_l T_0}\,\frac{\partial u}{\partial t}$ — 0.5

Si deux erreurs de signe (sur F_y et sur la relation entre dérivées), qui se compensent, noter 0,75/1,75pt pour la question 2)

3) $F_{corde} = -\frac{T_0}{V}\frac{\partial u}{\partial t}$ (x=0) ; $F_{ressorts} = -2Ru_M$ — 0.5 + 0.5

F_{corde} noter 0.5/0.5 si signe cohérent avec question 2 ; $F_{ressorts}$ noter 0/0.5 si facteur 2 oublié ou erreur de signe, mais dans la suite compter justes les résultats cohérents avec facteur 2 oublié ou signe faux).

$$\frac{d^2u_M}{dt^2} + \frac{T_0}{MV}\frac{du_M}{dt} + \frac{2R}{M}u_M = 0 \quad \textit{non noté}$$

$B = \frac{T_0}{MV}$ *ou* $= \frac{\sqrt{m_l T_0}}{M}$ — 0.5

$D = \sqrt{\frac{2R}{M}}$ — 0.5

Pour toute erreur dans B ou D : 0/0,5

Décharge d'un condensateur chargé dans un circuit R, L série. (Accepter circuit R, L, C série) — 0.5

4) Equation caractéristique $x^2 + Bx + D^2 = 0 \Rightarrow$ forme de la solution dépend du discriminant
$\Delta = B^2 - 4D^2$, — 0.5
Si $B > 2D$: régime apériodique (ou exponentiel amorti)
Si $B < 2D$: régime oscillant amorti — 0.75
Si $B = 2D$: régime apériodique critique

5) L'équation caractéristique devient $x^2 + 2Dx + D^2 = 0 \Rightarrow x = -D = -B/2 = -\frac{\sqrt{m_l T_0}}{2M}$ ..... — 0.5

$u_M = (\alpha t + \beta)e^{-Dt}$ .....**(mettre 0/0,5 si $u_M = c^{ste}\, e^{-Dt}$)** ..... — 0.5

Conditions initiales : $u_M(t=0) = a \Rightarrow \beta = a$ ..... — 0.5

$\frac{\partial u_M}{\partial t}(t=0) = 0 \Rightarrow \alpha = aD = a\frac{\sqrt{m_l T_0}}{2M}$ ..... — 0.75

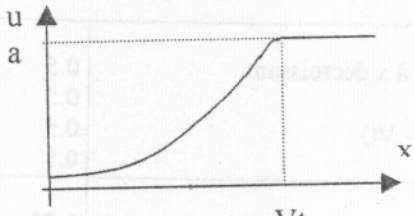
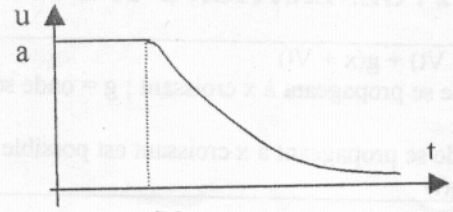
Conditions initiales bien posées, mais applications fausses 0,75/1,25

$u_M = a(Dt + 1)e^{-Dt}$ ..... — 0.5

Dans la zone atteinte par l'onde, u a la même forme que u_M, mais avec un retard égal à x/V , soit
$u = (\alpha(t - x/V) + \beta)e^{-D(t-x/V)}$ ..... — 0.75

Au delà de Vt, $u \cong a$. ..... — 0.5

Noter 0.5/0.5 si Vt est bien pris en compte comme front avant de l'onde mais u = 0 au delà. Par contre tenir compte de l'erreur pour noter les schémas 0.25/0.5 si u = 0 au delà de Vt ou s'il n'y a pas de limite avant (ou de temps minimum x/V).

 	0.5 + 0.5
Les évolutions de u en fonction de x à t donné et en fonction de t en une position donnée sont similaires mais inverses l'une de l'autre.	0.5
TOTAL PROBLEME 2	**13 pts**

TOTAL sur 41 points

Note finale sur 20 : Diviser par 2 et arrondir au 1/10ème de point supérieur.