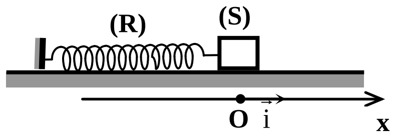
Oscillations mécaniques forcées

Exercice n° : 1



A/ Un pendule élastique horizontal est formé d'un ressort (R) à spires non jointives, de masse négligeable, de raideur $K=20N.m^{-1}$ dont l'une de ses extrémités est fixe et à l'autre est accroché un solide ponctuel (S) de masse m=50g. La position de (S) est repérée par son abscisse OS=x dans le repère (o,i) porté par l'axe du ressort et dirigé dans le sens de l'allongement ,O étant la position d'équilibre de (S).Pendant le mouvement le solide n'est soumis à aucune force de frottement.

A la date t=0, on écarte le solide (S) de sa position d'équilibre de x_0=2,5 cm à partir de O, dans le sens positif puis on le lance avec une vitesse initiale v_0= 0,866$m.s^{-1}$ dans le sens des élongations décroissantes. Le solide S effectue alors des d'oscillations d'amplitude constante, avec une période propre T_0 de l'oscillateur.

1) a- Donner l'analogue électrique de l'oscillateur mécanique libre non amorti considéré.

b- Etablir l'équation différentielle des oscillations du solide (S). En déduire par analogie l'équation différentielle régissant les oscillations de la charge q.

2) Déterminer l'amplitude et la phase initiale de l'élongation x(t). Déduire les expressions de x(t) et de v(t)

3) Montrer que l'énergie mécanique totale E du pendule élastique est constante. Calculer sa valeur.

B) On excite le pendule élastique précédent , le solide (S) est soumis à une force de frottement $\vec{f}$= - 0,2.$\vec{v}$ par une force excitatrice F= F_m sin ωt i Le solide (S) est alors animé d'un mouvement rectiligne sinusoïdal de même pulsation **ω=16 rad.s^{-1}** que la force excitatrice et d'élongation x(t)=X_m sin(ωt+φ).

1) a- Etablir l'équation différentielle du mouvement.

a- Etablir, dans ces conditions, les expressions de Xm et tgφ.

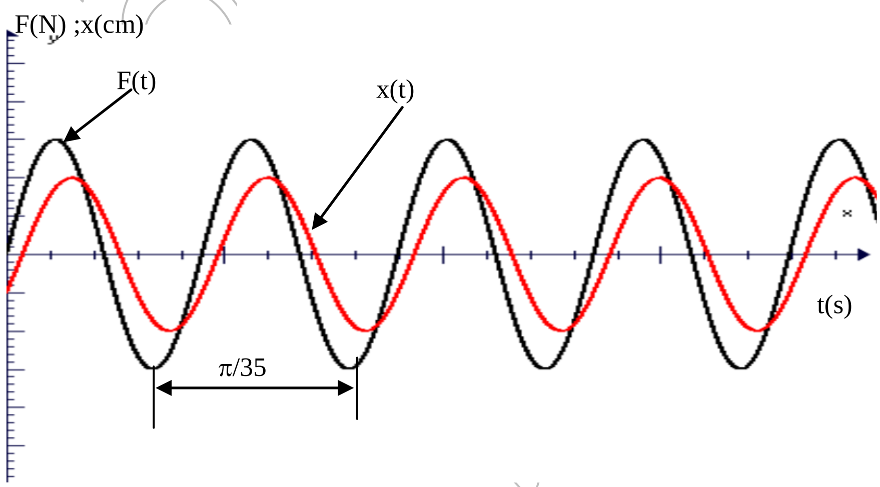
b- En déduire l'expression de l'amplitude Vm de la vitesse du solide (S).

2) Rappeler l'expression de l'impédance électrique de l'oscillateur forcé RLC puis exprimer par analogie de l'impédance mécanique Zméc du pendule élastique.

3)On donne Xm=4cm et w=16rad.s-1. Calculer V_m ; F_m ; Ø ; $Z_{méc}$.

Exercice n°2

un oscillateur mécanique est formé d'un solide (S) de masse m=50g attaché à l'extrémité libre d'un ressort à spires non jointives de masse négligeable et de raideur K, l'autre extrémité est fixe. on suppose que le solide est soumis à une force de frottement visqueux de la forme f=-hv ou h est une constante positive. les oscillations de (S) sont entretenues à l'aide d'une force supplémentaire F=$F_m$sin(ωt) exercée à l'aide d'un dispositif approprié jouant le rôle d'excitateur.



1-/ Montrer qu'à tout instant t au cours du mouvement, l'élongation x de G, sa vitesse instantanée v=dx/dt et son accélération $a=d^2x/dt^2$ vérifient la relation :$m\, d^2x/dt^2+h\, dx/dt+Kx= F_m\sin(\omega t)$ dont la solution est $x(t)=X_m\sin(\omega t+\varphi)$. Les fonctions x(t) et F(t)sont représentées par les diagrammes de la figure ci-dessus.

2) A partir des digrammes de la figure ci-dessus.

a) Déterminer les expressions de x(t) et F(t). Préciser, en le justifiant, s'il existe des valeurs de la pulsation ω de la force excitatrice pour lesquelles le déphasage de x(t) par rapport à F(t) change de signe.

b) Faire la construction de Fresnel, et en déduire les valeurs de h et de K. Ech : 1N $\longrightarrow$ 1cm

3)a) Donner l'expression de l'amplitude X_m en fonction de F_m, h, ω, K et m. Déduire l'expression de l'amplitude de Vm de la vitesse instantanée en fonction des mêmes données.

b) Déterminer le rapport Fm/ Vm en fonction de h, w, K,et m. Déduire à l'aide de l'analogie mécanique électrique , l'expression correspondant à ce rapport en électricité et en donner signification physique.

4) Dans le cas ou les frottements sont négligeables, donner les valeurs possibles du déphasage de f(t) par rapport à x(t).

Exercice n °3

Un solide (S) de centre d'inertie G, de masse M =200g et pouvant glisser sur un plan horizontal,est relié à l'extrémité d'un ressort horizontal (R) de masse négligeable, de raideur k et dont l'autre extrémité est fixe. Lorsque (S) est dans sa position d'équilibre, G occupe l'origine du repère (O, $\vec{i}$) d'axe Ox horizontal (figure 5).Un excitateur approprié exerce sur le solide (S) une force F$\vec{i}$ =F_m sinωt $\vec{i}$ où l'amplitude F_m est constante et la pulsation ω est réglable. (S) est introduit dans un liquide amortisseur où il subit une force de frottement visqueux $\vec{f} = -h\vec{v}$ avec h est un coefficient positif et $\vec{v}$ est la vitesse de G. En régime permanent l'équation horaire du mouvement de G est de la forme x(t)=X_m sin $(\omega t - \frac{\pi}{2})$.

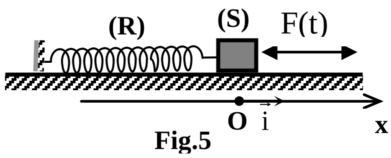


Fig.5

1-Donner l'unité internationale du coefficient de frottement h.

2-a) Etablir l'équation différentielle vérifiée par l'élongation x de G.

b) Faire la construction de Fresnel relative à l'équation différentielle du mouvement de G.

c) Déduire que l'oscillateur est en résonance qu'on précisera la nature.

d) Montrer que, dans ces conditions, la force de frottement $\vec{f}$ est opposée à la force excitatrice $\vec{F}$.

e) Prouver que, dans ces conditions, l'énergie mécanique du système {(S),(R)}se conserve.

4- A l'aide d'un dispositif approprié on mesure pour différentes valeurs de ω, l'amplitude X_m des oscillations de G et l'amplitude V_m de la vitesse de passage de ce point par la position O. Les résultats des mesures ont permis de tracer les courbes $X_m(\omega)$ et $V_m(\omega)$ de la figure 6.

a) Identifier en le justifiant, la courbe qui correspond à $X_m(\omega)$.

b) Lire la valeur ω_1 de la pulsation propre du résonateur et déduire la valeur de k.

c) Lire la valeur ω_2 de la pulsation ω à la résonance d'élongation et déduire la valeur de h.

d) Déterminer la valeur de F_m.

e) Montrer que dans le cas où $\omega = \omega_1$, la puissance moyenne consommée par le résonateur est maximale.

5) On change le liquide amortisseur ; on constate qu'on n'obtient plus le phénomène de résonance d'élongation. Interpréter ce résultat.

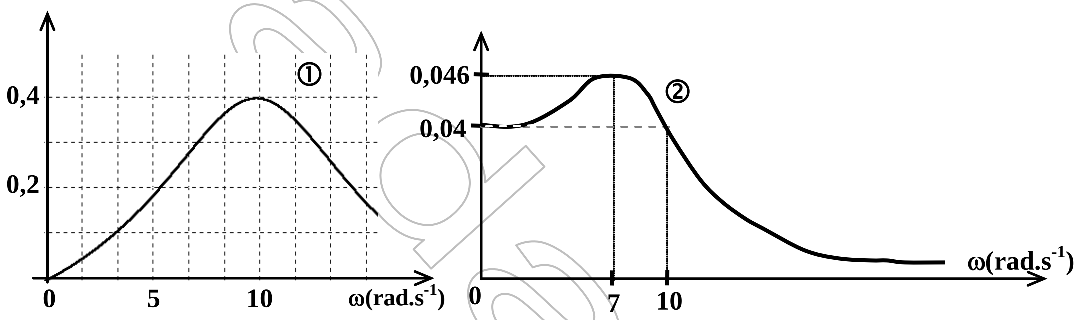


Fig.6

Exercice 4

Un pendule élastique est constitué d'un solide (S) de masse **m=0,2 Kg** attaché à l'extrémité d'un ressort (R) à spires non jointives de masse négligeable et de raideur K, l'autre extrémité du ressort est fixe. Le pendule repose sur un plan horizontal (figure 1) et la position du centre d'inertie G du solide est repérée sur un axe horizontal (O,i), d'origine O position d'équilibre du solide. Au cours de son mouvement, le solide (S) est soumis à une force de frottement visqueux f=-hv (**h=1,5 Kg.s^{-1})**. Un dispositif approprié exerce sur (S) une force excitatrice F=Fmsin(ωt).i, d'amplitude Fm constante et de pulsation ω réglable.

1) Comment peut-on montrer expérimentalement que les oscillations du solide (S) sont forcées ?
2) Etablir l'équation différentielle du mouvement.
3) La solution de l'équation différentielle précédente est x(t) =Xmsin(ωt + φ)
   a- Faire la construction de Fresnel dans le cas ou $\omega < \omega_0$ (ω_0 pulsation propre de l'oscillateur).
   b- Déduire l'expression de l'amplitude Xm en fonction de K, m, h, ω et Fm ainsi que celle de tgφ.
4) Expliquer brièvement la résonance d'élongation et donner l'expression de la pulsation ω_r correspondante en fonction de ω_0, h et m.
5) a- Donner l'expression de l'amplitude Im de l'intensité du courant i(t) traversant un circuit RLC en régime sinusoïdal forcé en fonction de R, L, ω, C et Um.
   b- Déduire, en précisant l'analogie utilisée, l'expression de l'amplitude Vm de la vitesse du solide (S) en fonction de h, m, ω, k et Fm.
   c- Montrer que l'impédance mécanique s'écrit sous la forme $Z_{méc} = \sqrt{h^2 + (m\omega - \frac{k}{\omega})^2}$.

6- Pour une valeur **ω_1=20 rad.s^{-1}** de la pulsation de l'excitateur, l'impédance mécanique est minimale et égale à h alors que l'amplitude Xm a pris la valeur 8 cm.

a- Montrer que le pendule élastique est à la résonance de vitesse. Calculer K et Fm.
b- Déduire la valeur de φ dans ces conditions.
c- Tracer l'allure de la courbe représentant $Z_{méc} = f(\omega)$ en précisant le point correspondant à $(Z_{méc})_{min}$

Exercice 5

Un pendule élastique est constitué d'un ressort à spires non jointives, de masse négligeable et de constante de raideur K, et d'un solide (S) supposé ponctuel de masse m. Le solide (S) peut se déplacer sans frottement sur un plan horizontal. Sa position est repérée par son abscisse x dans le repère $(O, \vec{i})$ avec O la position d'équilibre de (S) **(fig 1).** On soumet (S) à une force excitatrice $\vec{F} = F.\vec{i} = F_m \sin(\omega t + \varphi_F)\vec{i}$ et à une force de frottement $\vec{f} = -h\vec{v}$ avec $\vec{v}$ la vitesse de (S) et h une constante positive.

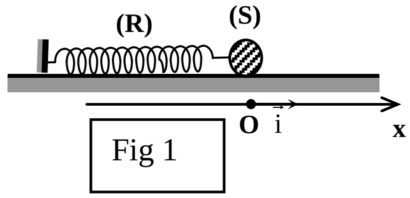


Fig 1

1- Etablir l'équation différentielle régissant les variations de l'élongation x.

Pour une certaine valeur h_1 de h et une valeur ω_1 de ω, on obtient les courbes de variations de F et de x en fonction de temps **(fig 2).**

a- Montrer que la courbe C_1 correspond à F(t).
b- Déterminer la valeur de ω_1, F_m, X_m, et $\varphi_F - \varphi_x$.
c- Quelle est la valeur de φ_F ? Déduire celle de φ_x.
d- Faire la construction de Fresnel correspondante. Déduire les expressions de X_m et de $\sin(\varphi_F - \varphi_x)$. Calculer h_1.

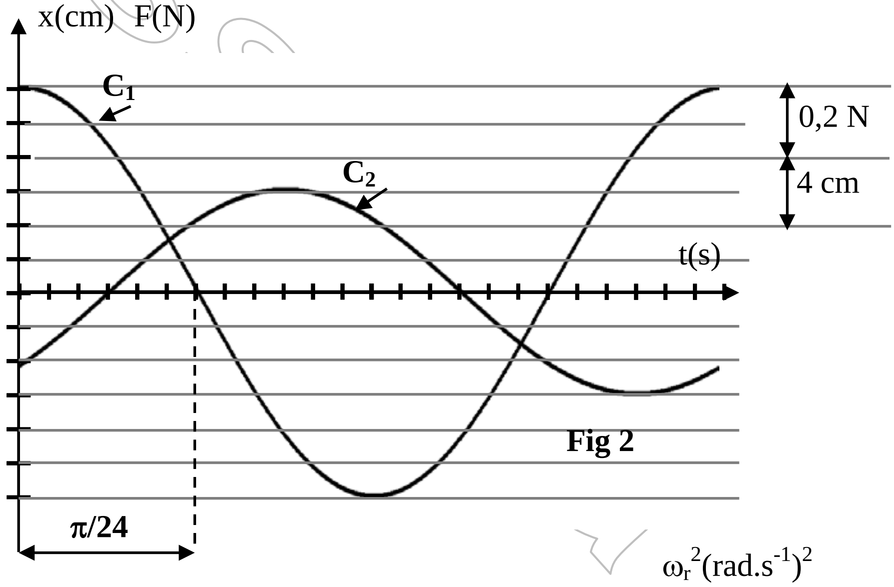
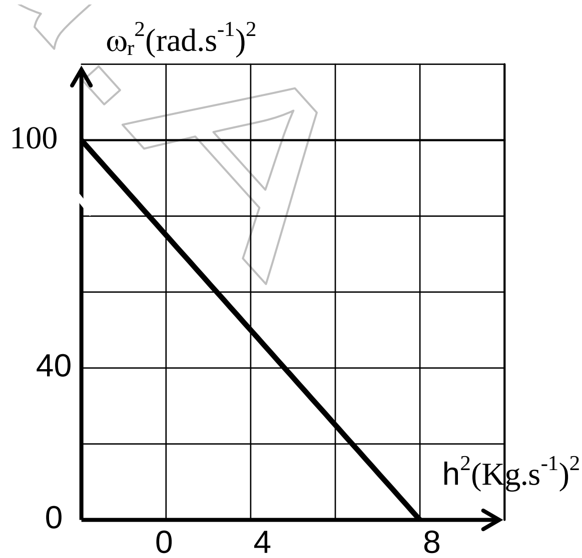


Fig 2

2- Pour une certaine valeur ω_r de ω, on constate que X_m prend sa valeur la plus élevée.
a- Dans quel état se trouve l'oscillateur ?
b- On donne la courbe de variation de ω_r^2 en fonction de h^2 (fig 3) ainsi que l'expression de

$$\omega_r = \sqrt{-\frac{h^2}{2m^2} + \frac{K}{m}}.$$

Déterminer K et m.



3- En précisant l'analogie utilisée donner:
a- Le schéma du montage du circuit électrique analogue à l'oscillateur mécanique précédent.
b- L'expression de la charge maximale Q_m du condensateur.
c- L'expression de la pulsation ω_r correspondant à la valeur la plus élevée de Q_m.

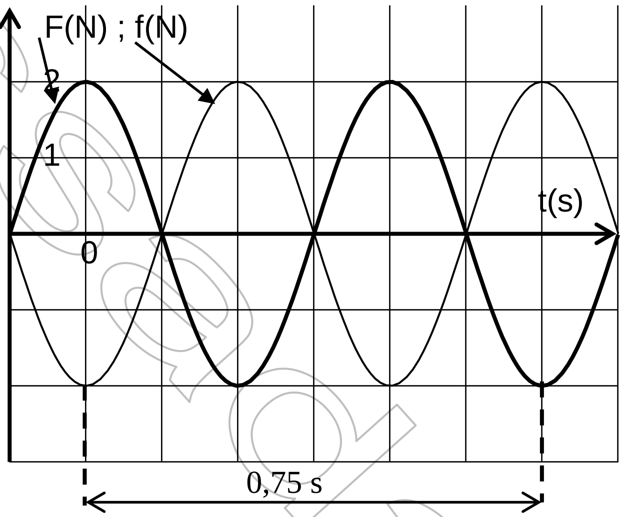
Exercice 6

Un pendule élastique horizontal est formé :

- d'un solide (S) de centre d'inertie G et de masse **m** =0,4 Kg.
- d'un ressort (R) à spires non jointives de masse négligeable et de raideur K.

Le pendule repose sur un plan horizontal (figure 1) et la position du centre d'inertie G du solide est repérée sur un axe horizontal $(O,\vec{i})$, d'origine O position d'équilibre du solide. Au cours de son mouvement, le solide (S) est soumis à une force de frottement visqueux $\vec{f}=-h\vec{v}$ (**h=une constante positive).** On soumet le solide (S) à une force excitatrice $\vec{F}=F_m\sin(\omega t)\vec{i}$, d'amplitude Fm constante et de pulsation ω réglable. À un instant de date t, on notera x l'abscisse de G relative au repère $(O,\vec{i})$. On donne l'équation différentielle du mouvement du solide (S).

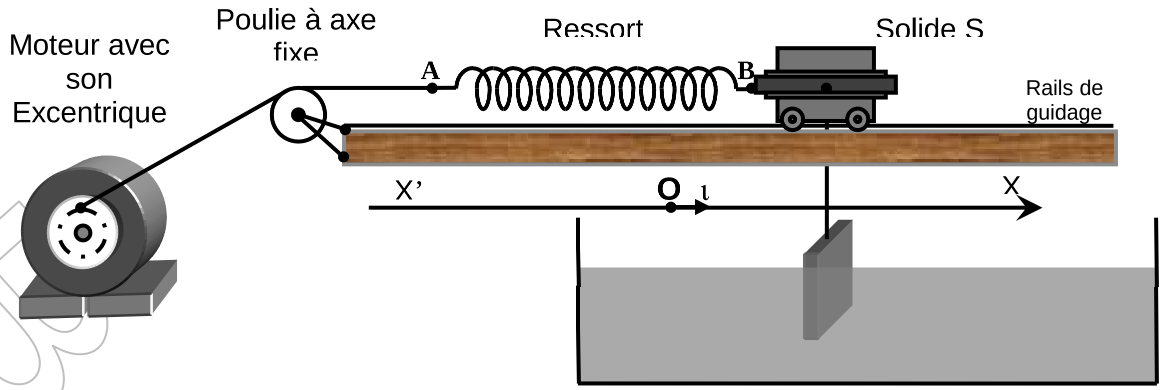
1- établir l'équation différentielle du mouvement régissant les variations de x(t).
2- la solution de l'équation différentielle précédente s'écrit sous la forme $x(t)=X_m\sin(\omega t + \varphi)$ donner l'expression de l'amplitude X_m en fonction de F_m, h, K, ω et m.
3- pour une valeur $\omega_1=12\ rad.s^{-1}$ de la pulsation, on constate que l'amplitude des oscillations X_m est maximale. Donner l'expression de ω_1 en fonction de K, m et h.
4- pour une valeur ω_2 de la pulsation, on donne les courbes de variation de F(t) et de f(t).



a- Montrer que F(t) + f(t) = 0.
b- Déduire que l'oscillateur se comporte comme un oscillateur libre non amorti.
c- L'oscillateur est le siège d'une résonance dont on précisera la nature. Calculer la valeur de ω_2.
d- Trouver la valeur de K et de h.
e- Calculer l'énergie totale du système ={solide + ressort}.

Exercice 7

Un chariot de masse m= 100g accroché à l'extrémité d'un ressort de constante de raideur k= 40 Nm^{-1} roule sur deux rails horizontaux .Sur ce chariot on peut fixer une tige, liée à une plaque qui plonge dans un fluide visqueux .Le liquide visqueux exerce par l'intermédiaire de la tige et de la plaque sur le chariot au cours de son mouvement, une force de frottement $\phi= -h.\varpi$. Avec h une constante positive et ϖ la vitesse du solide. L'autre extrémité du ressort est liée à l'excentrique d'un moteur par l'intermédiaire d'un fil inextensible qui passe dans la gorge d'une poulie à axe fixe et de masse négligeable. Voir le schéma ci-dessous. L'ensemble (moteur + excentrique + fil + ressort) transmet au solide S une force excitatrice Φ= Fi. Avec **F= F_{Max}sin(ω_et).** On supposera que la masse de la tige et la masse de la plaque sont négligées devant la masse du solide S.



A/ Dans un premier temps, on décroche la tige et la plaque du solide S, et on négligera tout type de frottement.

1- Faire un bilan des forces qui s'exercent sur le solide S et en déduire l'équation différentielle vérifiée par x(t).

2- Faire une construction de Fresnel pour $\omega_e > \omega_0$ et pour $\omega_e < \omega_0$, et indiquer pour chacun des cas le déphasage entre F(t) et x(t).

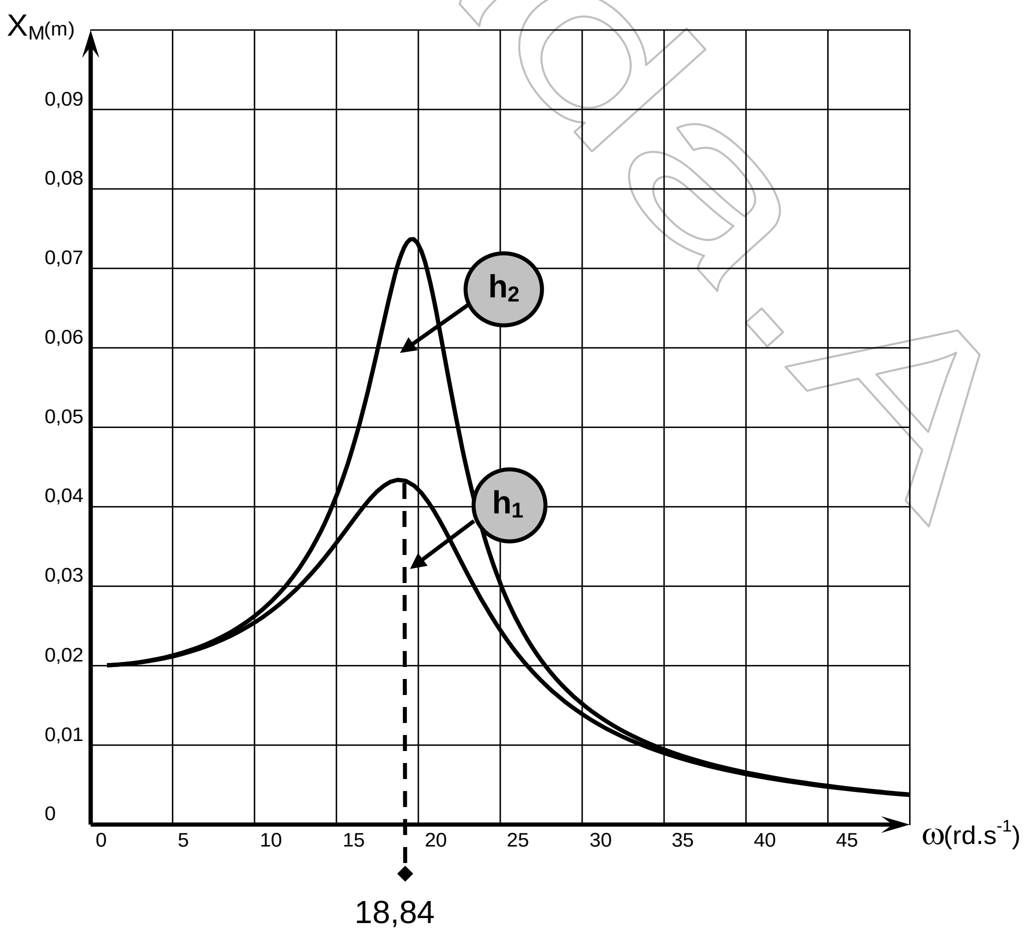
B / On accroche la tige et la plaque au solide S. F_{Max} garde toujours la même valeur.

1- Etablir l'équation différentielle vérifiée par $x(t)=X_{Max}\sin(\omega_e t+\phi_x)$.

2- Etablir l'expression de l'amplitude X_{Max} en fonction de F_{Max}, ω_e, m , k et h.

3- Montrer que l'amplitude X_{Max} est maximale pour une valeur particulière de ω_e , que l'on notera ω_R. Exprimer ω_R en fonction de k, m, et h.

C / Une étude expérimentale a permis de tracer la courbe X_{Max} en fonction de la pulsation de l'excitateur pour deux valeurs de h notées h_1 et h_2. Voir les courbes ci-dessous.



1- Calculer les limites suivantes de la fonction $X_{Max} = f(\omega_e)$.

- $\lim\limits_{(\omega_e \to 0)} X_{Max} =$
- $\lim\limits_{(\omega_e \to +\zeta)} X_{Max} =$

2- Déterminer la valeur de h_1.Comparer les valeurs de h_1 et h_2.Justifier.

3- Déterminer la valeur de F_{Max}.

4- On fixe la valeur de la pulsation **ω_e = 22,5 rd.s^{-1} et h_2=0,3 kg.s^{-1}**.Determiner l'expression instantanée de x(t).

5- Calculer la puissance mécanique moyenne reçue par le système solide- ressort.

6- Montrer que l'énergie mécanique E_M du système {Solide, Ressort, Terre} est constante pour une valeur de ω_e que l'on précisera. Calculer E_M avec h=h_2. On prendra comme référence de énergie potentielle de pesanteur E_{PP}=0 Au niveau du plan horizontal passant par le centre d'inertie du solide S au cours de son mouvement.

7- Dresser un tableau des analogies électromécaniques et en déduire l'expression de la grandeur analogue à l'amplitude X_{Max} établie dans la question B/3-.

8- Faire le schéma du circuit R,L,C série et indiquer les branchements du matériel nécessaire ainsi que les mesures a effectuer pour étudier le phénomène de résonance de cette grandeur.

<u>Exercice 8</u>

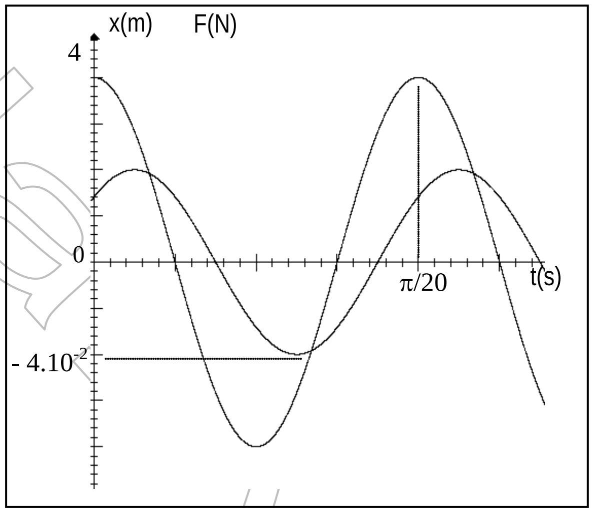
Un pendule élastique est constitué d'un ressort de raideur K et un solide de masse m = 50g. On suppose que le solide est soumis à une force de frottement $\vec{f} = -h\vec{v}$ ou (*h*) est une constante positive. Les oscillations du solide sont entretenues à l'aide d'une force supplémentaire $\vec{F} = F(t)\vec{i} = F_M \sin(\omega_e t + \varphi_F)\vec{i}$ exercée à l'aide d'un dispositif approprié jouant le rôle d'excitateur.

1°/ Déterminer l'équation différentielle liant :

x, $\dfrac{dx}{dt}$, $\dfrac{d^2x}{dt^2}$, m, K, *h* et F.

2°/ Préciser dans quel sens s'effectue l'échange d'énergie entre le résonateur et l'excitateur et pourquoi ?

3°/ Les fonctions x(t) et F(t) sont représentées par les courbes suivantes : A partir des diagrammes



a- Déterminer les expressions de x(t) et F(t).

b- Préciser, en le justifiant, s'il existe des valeurs de la pulsation w de la force excitatrice pour lesquelles le déphasages de x(t) par rapport à F(t) change de signe.

c- Faire la construction de Fresnel et en déduire les valeurs de *h* et K.

4/ Donner l'expression de l'amplitude X_M en fonction de F_M, *h*, w, K et m.

En déduire l'expression de V_M : amplitude de la vitesse instantanée.

5°/Déterminer X_M et V_M à la résonance.

6°/ Déterminer le rapport F_M / V_M en fonction de *h*, w, K et m.

Déduire, à l'aide de l'analogie mécanique-électrique, l'expression correspondant à ce rapport et en donner la signification physique.

<u>Exercice 9</u>

Un solide (S) de masse M=98g et de centre d'inertie G est soudé à l'extrémité inférieure d'un ressort vertical (R), de masse négligeable, de raideur k=20N.m^{-1} et dont l'extrémité supérieure est fixe. Lorsque le solide (S) est dans sa position d'équilibre, G occupe le point O, origine du repère (O, $\vec{i}$) d'axe Ox vertical dirigé vers le bas. Un excitateur approprié exerce sur le solide (S) une force $\vec{F}$= F_m sin (ωt+φ_F) $\vec{i}$ où F_m = 1,29N, $\varphi_F = -\dfrac{\pi}{2}$ et la pulsation ω est réglable. (S) subit une force de frottement visqueux $\vec{f}$ = -h$\vec{v}$ où $\vec{v}$ est la vitesse de G et h un coefficient positif que l'on peut modifier. En régime permanent, l'équation horaire du mouvement de G est de type x=$X_m$sin(ωt +φ).

1°/Au cours des oscillations forcées, il y a échange d'énergie entre l'oscillateur et l'excitateur. Préciser dans quel sens s'effectue-t-il.
2°/Etablir l'équation différentielle du mouvement de G.
3°/a-On ajuste la pulsation ω et le coefficient h respectivement aux valeurs 20rad.s^{-1}et 1,8kg.s^{-1}. Déterminer par la construction de Fresnel les expressions de X_m et de tg$\Delta\varphi$ avec
$\Delta\varphi = \varphi + \pi/2$. Calculer X_m et φ .
b-Ecrire l'équation horaire du mouvement de G.

4°/a-Montrer que l'oscillateur entre en résonance d'élongation pour une pulsation ω_r que l'on déterminera .
b-Montrer qu'il existe un coefficient de frottement h_l au-delà du quel la résonance d'élongation ne se produit plus. Exprimer h_l en fonction de M et k.
c-Montrer que l'amplitude X_{mr} à la résonance d'élongation est donnée par la relation :

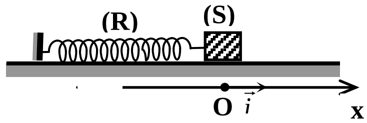
$$X_{mr} = \frac{F_m}{h\sqrt{\omega_0^2 - \frac{h^2}{4M^2}}}$$

d-Représenter l'allure de la courbe X_m = f (ω), dans les cas suivants :
h est nul.*h est non nul mais faible.*h est élevé mais inférieur à h_l *h est supérieur à h_l..

5°/Déterminer lorsque la pulsation ω varie entre une valeur très faible et une autre très élevée :
a-Le signe du déphasage $\Delta\varphi$ entre l'élongation x et la force $\vec{F}$.Donner la signification physique du résultat
b-Les valeurs du déphasage $\Delta\varphi$.
c-Les valeurs du déphasage φ_V - φ_F entre la vitesse $\vec{v}$ de G et la force excitatrice $\vec{F}$.

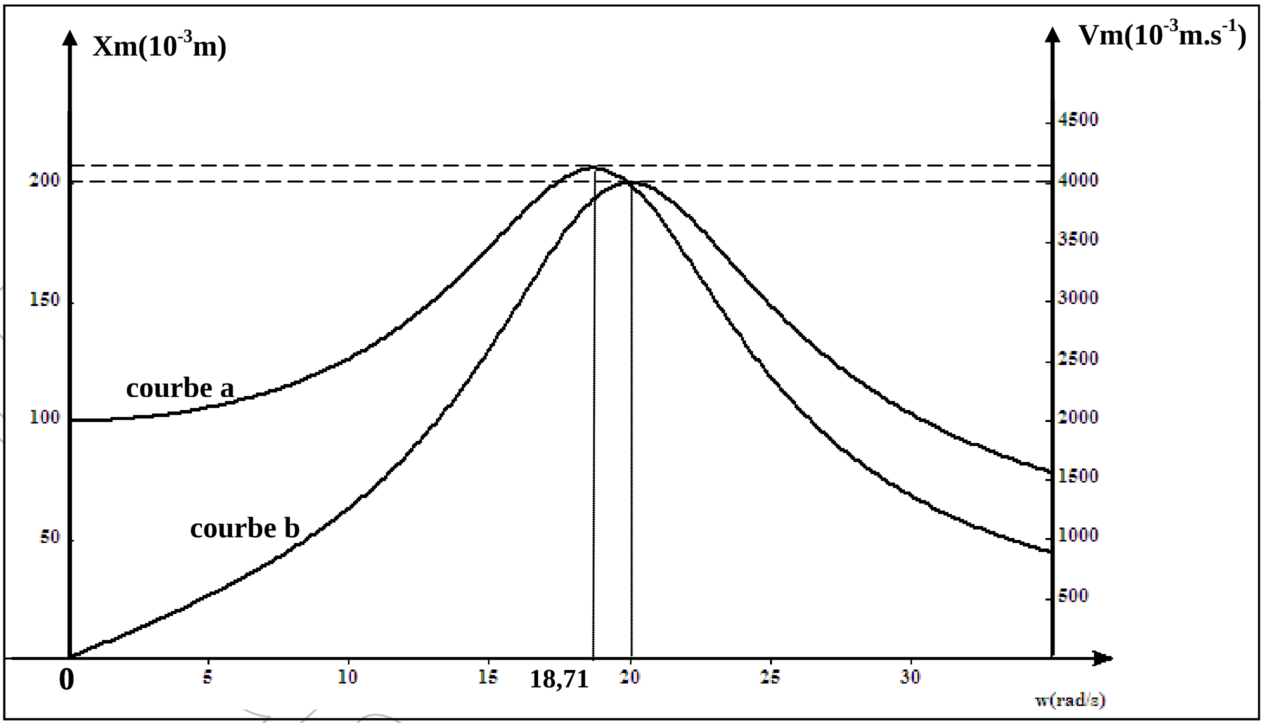
6°/La pulsation ω et le coefficient h sont ajustés toujours respectivement aux valeurs 20rad.s^{-1}et 1,8kg.s^{-1}.
a-Le point de soudure A assurant la liaison entre le solide (S) et le ressort (R), ne peut pas supporter une tension de valeur supérieure à 2,1N.
Indiquer, en le justifiant, si le risque de rupture de la soudure au point A a lieu en augmentant ou en diminuant ω.
b-Déduire qu'il peut y avoir rupture de la soudure en A. On donne : g = 9,8m.s^{-2}

Exercice 10
Un oscillateur mécanique horizontal (figure ci-contre) est constitué par un ressort élastique à spires non jointives de masse négligeable et de raideur k=40N.m^{-1} à l'extrémité duquel est accroché un solide (S) de masse m. Cet oscillateur est soumis d'une part à une force de frottement visqueux $\vec{f} = -h.\vec{v}$ où $\vec{v}$ est la vitesse du centre d'inertie G du solide du (S) et h un coefficient positif ; d'autre part à une force excitatrice $\vec{F}(t) = Fm.\sin(\omega.t).\vec{i}$ exercée par un excitateur approprié. L'équation différentielle régissant les oscillations de l'élongation x(t) du centre d'inertie G du solide (S) est :



$$m.\frac{d^2x}{dt^2} + h.\frac{dx}{dt} + K.x = F$$

La solution générale de cette équation différentielle est x(t)=Xm.sin (ω t + φ_x).
1°/ La valeur maximale Xm de l'élongation x(t), est donnée par : $\frac{Fm}{\sqrt{(h\omega)^2 + (m\omega^2 - K)^2}}$. Monter que l'amplitude Xm, prend une valeur maximale Xm_0 lorsque la pulsation de la force excitatrice prend une valeur ω_r telle que $\omega_r^2 = \omega_0^2 - \frac{h^2}{2m^2}$ où ω_0 est la pulsation propre de l'oscillateur mécanique.
2°/ On mesure l'amplitude Xm pour différentes valeurs de la pulsation ω de la force excitatrice.
A partir de ces mesures on trace la courbe Xm=f(ω) et on en déduit la courbe qui traduit les variations de Vm=f(ω) ou Vm est la valeur maximale de la vitesse instantanée v(t) du centre d'inertie G du solide (S). On obtient les courbes (a) et (b)



a- En justifiant la réponse, montrer que la courbe (a) correspond à l'évolution de Xm en fonction de la pulsation ω.

b- Expliquer comment peut-on déduire la courbe (b) à partir de la courbe (a).

3°/ Déterminer graphiquement la valeur de :

a- La pulsation propre ω_0 de l'oscillateur.

b- La pulsation ω_r de résonance d'amplitude.

c- L'amplitude maximale Xm_0 à la résonance d'élongation.

d- La vitesse maximale Vm_0 du centre d'inertie G du solide (S) à la résonance de vitesse.

4°/ a- Monter que la valeur maximale de la force excitatrice est Fm=4N.

b- Déterminer la valeur du coefficient de frottement visqueux h.

c- Déterminer la masse m du solide (S).

5°/a-Calculer, à la résonance de vitesse, le coefficient $Q=\frac{K.Xm}{Fm}$.

b-Donner par exploitation de l'analogie électrique mécanique, la signification physique de ce coefficient et nommer le.

6°/ a- Soient E l'énergie totale de l'oscillateur et v la vitesse instantanée du centre d'inertie G du solide (S), montrer que : $\frac{dE}{dt} = A - B$ avec A= F.v et $B = h.v^2$.

b- Quelles sont les significations physique de A, de B et de $\frac{dE}{dt}$.

c- En déduire qu'à la résonance de vitesse, l'énergie E prend une valeur constante que l'on calculera.

7°/a- Monter qu'à partir d'une certaine valeur de h la résonance d'élongation devient impossible.

b- Sur la même figure de la feuille annexe représenter l'allure des courbes X_m=f(ω) et V_m=f(ω) si on augmente la valeur du coefficient de frottement h.(indiquer la courbe de Xm(ω) et celle de Vm(ω).

c- Pour quelle valeur de h, on a une résonance simultanée de vitesse et d'élongation ? Quelle est la conséquence sur le résonateur ?