Travaux dirigés de Physique, Biophysique et Acoustique

1ère année

Année 2025-2026

Arnaud LE PADELLEC arnaud.le-padellec@univ-tlse3.fr

P r é s e n t a t i o n

Tous les exercices d'acoustique qui seront abordés en Travaux Dirigés cette année sont regroupés dans ce fascicule. Il est demandé aux étudiants de préparer la séance de travaux dirigés.

Thème 1 : Oscillateurs harmoniques et systèmes couplés

Exercice 1 : oscillateur

On considère une masse m qui se déplace sur un axe horizontal et qui est soumise à la force $\boldsymbol{F} = -Kx\,\boldsymbol{e}_x$ de rappel d'un ressort de constante de raideur K, x étant la position de cette masse par rapport à la position d'équilibre.

1. Montrer que l'équation différentielle, donnant la position de cette masse, est :

$$m\frac{d^2x(t)}{dt^2} = -Kx(t).$$

2. Mettre cette équation sous la forme

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + \omega_0^2 x(t) = 0$$

En déduire l'expression de la constante ω_0. Calculer ω_0 pour $m = 0{,}1$ kg et $K = 10$ kg s^{-2}.

3. Donner la solution générale de cette équation sous forme d'une combinaison linéaire d'exponentielles.
4. Montrer que la solution peut aussi se mettre sous les formes suivantes

$$x(t) = A_1\cos(\omega_0 t) + B_1\sin(\omega_0 t)$$

$$x(t) = A_2\cos(\omega_0 t + \varphi_2)$$

$$x(t) = A_3\sin(\omega_0 t + \varphi_3)$$

Où A_i, B_i et φ_i sont des constantes. Préciser la solution correspondant aux conditions initiales $x(t=0) = x_0$ et $\frac{dx}{dt}(t=0)=0$. Tracer la courbe $x(t)$. En déduire la période T du mouvement.

5. Préciser la solution correspondant aux conditions initiales $x(t=0)=0$ et $\frac{dx}{dt}(t=0)=v_0$. Tracer la courbe $x(t)$. En déduire la période T du mouvement.
6. Préciser la solution correspondant aux conditions initiales $x(t=0)=0$ et $\frac{dx}{dt}(t=0)=0$.
7. Quels autres systèmes mécaniques peuvent être décrits par un mouvement harmonique? Donnez quelques exemples et commentez sur la période du mouvement.

Thème 2 : Ondes - généralités

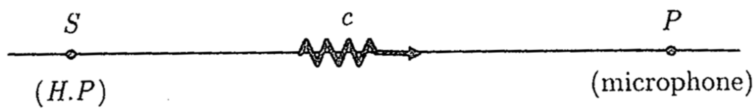
Exercice 2 : déphasage

Une onde acoustique de fréquence $\nu = 10^2$ Hz se propage à la célérité $c = 300$ m s^{-1}.

1. Quelle est la distance séparant deux points déphasés de 60°
2. Quelle est, en un point donné, la variation de phase $\Delta\Psi$ correspondant à des instants décalés de 2,5 ms ?

Exercice 3 : déphasage

Un générateur alimente un haut-parleur faisant vibrer la membrane de ce dernier avec une fréquence variable. Le haut-parleur assimilé à une source S émet une onde sonore longitudinale progressive de célérité $c = 340$ m s^{-1}.



En un point P à la distance $d = 2$ m de S, on place un microphone.

1. Quelles sont les trois plus petites valeurs de la fréquence pour lesquelles les vibrations de S et de P sont :
   a. En phase ?
   b. En opposition de phase ?
2. On règle la fréquence à 523 Hz. Déterminer la position et le nombre de points du segment SP vibrant en phase avec le point P.

Exercice 4 : onde impulsionnelle

On considère une corde tendue comme sur la figure. La masse vaut $m = 1$ kg. On prendra $g = 9{,}81$ m s^{-2}. On note $y(x,t)$ le déplacement de la corde par rapport à sa position au repos. On peut montrer que la vitesse de propagation des ondes est $v = \sqrt{T/\mu}$, où $T = mg$ est la tension de la corde et $\mu = 50$ g.m^{-1} est la masse par unité de longueur de la corde.

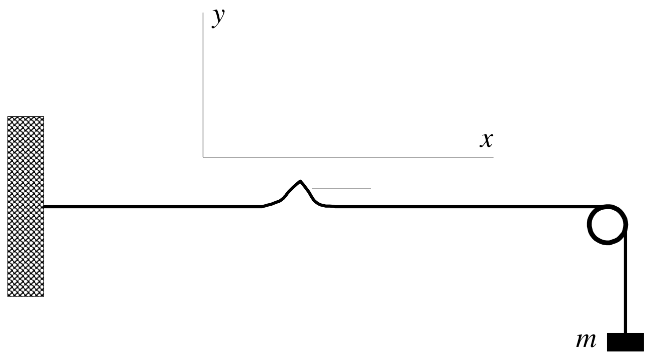


Schéma de la corde : l'extrémité de gauche est fixée à un mur, celle de droite passe sur une poulie et supporte une masse, ce qui permet de considérer que la tension de la corde est constante et égale à mg.

1. Quelle est la vitesse de propagation de l'onde ?
2. A l'instant $t = 0$, on observe une impulsion de la forme $y(x,0) = a\exp\left(-\dfrac{x^2}{b^2}\right)$ où $a = 5$ cm et $b = 10$ cm sont deux longueurs données. Pourquoi ne peut-on conclure sur la forme de l'impulsion à $t \neq 0$? Que faudrait-il connaître en plus pour cela ?
3. On suppose que l'onde se déplace vers la droite. Donner la forme de l'impulsion pour $t \neq 0$. Pouvez-vous définir une longueur d'onde ? Que faudrait-il pour cela ?
4. Dans une autre expérience, en plus de l'impulsion précédente que l'on notera $y_1(x, t)$, une autre impulsion $y_2(x, t)$ de même forme mais avec une amplitude opposée ($a < 0$), se déplace vers la gauche. Donner la forme générale de $y_2(x, t)$. En déduire celle du déplacement dû aux deux impulsions $y(x, t)$. Que pensez-vous de la fonction $y(x, 0)$ au temps $t = 0$? Cela vous étonne-t-il ?

Thème 3 : Ondes planes – notion d'impédance

Exercice 5 : ondes stationnaires – caractérisation mathématique

On va chercher toutes les solutions de l'équation des ondes qui sont des ondes stationnaires c'est-à-dire de la forme $y(x,t) = f(x)g(t)$.

1. Montrer que l'équation des ondes s'écrit alors $\dfrac{f''(x)}{f(x)} = \dfrac{1}{v^2}\dfrac{\ddot{g}(t)}{g(t)}$.
2. Comme l'équation précédente doit être vérifiée pour tout *x* et tout *t*, on va d'abord fixer $t = 0$. En déduire que $\dfrac{f''(x)}{f(x)} = C$, où C est une constante indépendante de *x* et *t*. Déduire alors que $\dfrac{\ddot{g}(t)}{g(t)} = Cv^2$.
3. Trouver les solutions générales des deux dernières relations. On veut que $y(x,t)$ reste fini pour toutes les valeurs de *x* et *t*. Montrer que cela impose que *C* soit négatif.
4. En déduire la forme la plus générale d'une onde stationnaire. On pourra poser $C = -k^2$ et $\omega = kv$.

Exercice 6 : ondes stationnaires - musique

Le 'La$_3$' émis par un tuyau sonore ouvert à embouchure de flûte a pour fréquence fondamentale $\nu = 435$ Hz. Quelle est la longueur du tuyau si la célérité du son dans les conditions de l'expérience est de 340 m s^{-1} ? Que devient la fréquence du fondamental si l'on place une cloison à l'extrémité du tuyau ? Au milieu du tuyau ?

Exercice 7 : impédance ramenée

Un tuyau sonore de section constante, d'axe *Oz* contenant de l'air, est ferme à l'une de ses extrémités, située en $z = L$, par un matériau d'impédance acoustique Z_m. Une OPPH incidente se propage dans le tuyau dans le sens des *z* croissants. Elle donne naissance à une onde réfléchie. En représentation complexe, on note $\underline{P}_i$ la pression acoustique de l'onde incidente er $\underline{r}$ le coefficient de réflexion en surpression en $z = L$.

1. Exprimer $\underline{r}$ en fonction de Z_m et de l'impédance de l'air Z_a.

2. Donner les expressions de $\underline{P}_i$, $\underline{v}_i$, pression acoustique et vitesse relatives à l'onde incidente, $\underline{P}_r$, $\underline{v}_r$, pression acoustique et vitesse relatives à l'onde réfléchie.