

# PTSI

# 320 exercices corrigés de PHYSIQUE

- ▶ Pour maîtriser le cours
- ▶ Pour réviser les méthodes fondamentales
- ▶ Pour aller plus loin en s'entraînant aux devoirs
- ▶ Solutions détaillées, commentées avec rappel des méthodes

Christophe Bernicot  
Jean-Christophe Tisserand





## Maîtriser le cours

### Exercice 1 – Le vrai/faux du début

1. La dimension de la somme de deux grandeurs physiques A et B est égale à la somme des dimensions des grandeurs A et B. Ainsi,

$$[A + B] = [A] + [B]$$

☐ Vrai☐ Faux

2. L'énergie potentielle de pesanteur  $E_p$  a pour dimension  $ML^2T^{-2}$ .

☐ Vrai☐ Faux

3. Une altitude, une profondeur, une coudée, une année-lumière et un mille nautique sont des grandeurs qui ont toutes la même dimension.

☐ Vrai☐ Faux

4. N'importe quelle grandeur physique A peut s'exprimer, d'un point de vue dimensionnel, en fonction d'un temps T, d'une longueur L, d'une masse M, d'une température  $\Theta$ , d'une quantité de matière N et d'une intensité électrique I.

☐ Vrai☐ Faux

### Exercice 2 – Dimensions de grandeurs physiques

1. Donner la dimension d'une vitesse  $v$ , du champ de pesanteur  $g$ , d'une force  $\vec{F}$

2. Donner également la dimension d'une pression  $P$  et de l'énergie cinétique  $E_c$ .

### Exercice 3 – Énergies

On considère, dans cet exercice, un système de masse  $m$  placé à une altitude  $z$  et se déplaçant à la vitesse  $v$ . Son énergie cinétique est notée  $E_c$ , son énergie potentielle de pesanteur  $E_{pes}$  et son énergie de masse  $E_m$ .

1. Montrer que l'énergie cinétique, l'énergie potentielle de pesanteur et l'énergie de masse du système ont toutes la même dimension.

2. Une énergie  $E$  peut également s'exprimer en fonction d'une force  $F$  et d'une distance  $D$ . Proposer une relation dimensionnellement correcte entre ces trois grandeurs.

### Exercice 4 – Pendule simple

Un pendule simple de masse  $m$  et de longueur  $l$  est placé dans le champ de pesanteur  $\vec{g}$ . Si l'angle n'est pas trop important, il oscille sinusoïdalement avec une pulsation propre  $\omega_0$  dont l'expression est

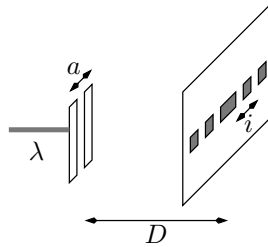
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

1. Sachant que l'unité d'une pulsation  $\omega_0$  peut être le  $\text{rad.s}^{-1}$ , donner sa dimension.

- Vérifier l'homogénéité de la formule proposée.

### Exercice 5 – Interfrange et fentes d'Young

Un faisceau laser monochromatique, de longueur d'onde  $\lambda$ , éclaire un système de double-fentes d'Young, espacée l'une de l'autre d'une distance  $a$ . Sur un écran, placé à une distance  $D$  des fentes, est obtenue une figure d'interférences correspondant à une succession de zones sombres et brillantes. Cette figure est caractérisée par un interfrange  $i$  comme on peut le voir sur le schéma ci-dessous.



- Parmi les formules suivantes, déterminer laquelle (ou lesquelles) est (sont) dimensionnellement justes?

$$i = \frac{a\lambda}{D} \quad i = \frac{a}{\lambda D} \quad i = \lambda D a \quad i = \frac{\lambda D}{a}$$

- A partir d'un raisonnement qualitatif, quelle formule est physiquement correcte?

### Exercice 6 – Chute libre

Une bille de masse  $m$  est lancée, sans vitesse initiale, depuis une hauteur  $H$ . Sa vitesse  $v$  juste avant l'impact sur le sol peut s'écrire sous la forme, si les frottements avec l'air sont négligés,

$$[v] = [m]^\alpha [H]^\beta [g]^\gamma$$

où  $g$  est le champ de pesanteur et  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  sont des constantes sans dimension.

- Déterminer les paramètres  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  pour que la relation soit homogène.
- Quelle remarque pouvez-vous faire?
- À partir d'un raisonnement vu en Terminale, retrouver la relation précédente.

### Exercice 7 – Simple vitrage

La température, qui règne dans un appartement, est notée  $T_A$ . De la même manière, la température extérieure est notée  $T_0$ . En supposant qu'il fait plus froid dehors que dedans, on en déduit que  $T_A > T_0$ . Pour caractériser les fuites thermiques présentes dans une fenêtre simple vitrage d'épaisseur  $e$  et de surface  $S$ , on utilise la notion de résistance thermique  $R$ . Par définition, la résistance thermique de la fenêtre est, si on ne prend en compte que la conduction et si on néglige la convection et la radiation

$$R = \frac{e}{\lambda S}$$

où  $\lambda$  est la conductivité thermique du verre.

- Rappeler la dimension du flux de chaleur  $\varphi$  traversant la fenêtre sachant que son unité, dans le système international, est le Watt.
- Donner la dimension de la densité de flux de chaleur  $j$  qui est égal, par définition, au flux de chaleur  $\varphi$  traversant la fenêtre par unité de surface.

3. Donner la dimension de la conductivité  $\lambda$  sachant que la densité de flux de chaleur  $j$  est reliée au gradient de température par la loi empirique de Fourier

$$j = \lambda \frac{T_A - T_0}{e}$$

4. En déduire la dimension de la résistance thermique  $R$  de la fenêtre.

### Exercice 8 – Pompe centrifuge

L'étude expérimentale des pompes centrifuges fait intervenir des coefficients de similitude appelés nombres de Râteau. L'un de ces coefficients est le nombre de puissance  $N_p$ , sans dimension, défini par

$$N_p = \frac{P_m}{\rho \omega^\alpha D^5}$$

où  $P_m$  est la puissance mécanique fournie par la roue de la pompe, de diamètre  $D$ , au liquide de masse volumique  $\rho$ . On rappelle que la vitesse angulaire  $\omega$  avec laquelle tourne la roue s'exprime usuellement en tour par minute (tr.min<sup>-1</sup>).

1. Rappeler la dimension d'une masse volumique.
2. Donner la dimension de la vitesse angulaire  $\omega$ .
3. Montrer que la dimension de la puissance mécanique  $P_m$  est

$$[P_m] = M.L^2.T^{-3}$$

4. Que doit valoir le paramètre  $\alpha$  pour que le nombre de puissance  $N_p$  soit effectivement sans dimension ?

## Maîtriser les méthodes fondamentales

### Exercice 9 – Io et Jupiter

Le satellite Io, de masse  $m$ , est en orbite circulaire de rayon  $R_J$  autour de Jupiter de masse  $M_J$ . La période de révolution du satellite autour de Jupiter est notée  $T_0$  et la constante de gravitation universelle est notée  $\mathcal{G}$ .

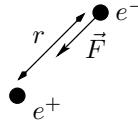
1. Rappeler l'expression de la norme de la force d'interaction gravitationnelle  $F$  de Jupiter sur Io.
2. En déduire la dimension de la constante de gravitation universelle  $\mathcal{G}$ .
3. Proposer, par analyse dimensionnelle, une expression de  $T_0$  en fonction de  $\mathcal{G}$ ,  $M_J$  et  $R_J$ .
4. Comparer la relation précédente avec celle obtenue à l'aide de la troisième loi de Kepler, appelée aussi loi des périodes.

### Exercice 10 – Constante de structure fine $\alpha$

En physique des particules, la force d'interaction électrostatique entre un proton et un électron de charges respectives  $+e$  et  $-e$  a pour expression

$$\vec{F} = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{e}_r$$

où  $\varepsilon_0$  est la permittivité du vide et  $r$  la distance entre les deux particules comme on peut le voir sur le schéma ci-dessous.



En sus, la constante de structure fine  $\alpha$  est une constante associée à l'interaction électromagnétique. Elle est définie par

$$\alpha = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 hc}$$

où  $e$  est la charge élémentaire,  $c$  est la célérité de la lumière dans le vide et  $h$  est la constante de Planck. Les valeurs numériques de ces différentes constantes sont les suivantes

Données :

$$h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$

$$c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$$

$$e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$\varepsilon_0 = 8,854\,187\,82 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$$

1. Donner la dimension de la constante de Planck  $h$  à partir des données.
2. Montrer que la constante de structure fine  $\alpha$  est sans dimension.
3. L'inverse de la constante de structure fine est-il un nombre entier?

### Exercice 11 – Frottement visqueux

Une bille sphérique de masse  $m$  et de rayon  $R$  est plongée dans du miel de viscosité  $\eta$  et de masse volumique  $\rho$ . Lors de sa chute dans le miel, elle est soumise, lorsque sa vitesse  $\vec{v}$  n'est pas trop importante, à une force de frottement  $\vec{F}$ , appelée force de Stokes, dont l'expression est

$$\vec{F} = -6\pi R \eta \vec{v}$$

L'écoulement du miel autour de la bille est caractérisé par un nombre, noté  $Re$ , appelé nombre de Reynolds, défini par

$$Re = \frac{\rho v R}{\eta}$$

1. Rappeler la dimension de la force  $\vec{F}$ .
2. En déduire la dimension de la viscosité  $\eta$  du miel.
3. Donner la dimension du nombre de Reynolds  $Re$ .

### Exercice 12 – Un peu d'électricité

Un générateur idéal de tension de force électromotrice  $E$  alimente un circuit constitué d'un condensateur de capacité  $C$  et d'un conducteur ohmique de résistance  $R$  placés en série. L'évolution temporelle de la charge  $q(t)$  du condensateur, initialement déchargé, est

$$q(t) = CE(1 - e^{-t/\tau}) \quad \text{avec} \quad \tau = RC$$

1. Déterminer la dimension du paramètre  $\tau$ .
2. Vérifier l'homogénéité de la relation.

## Pour aller plus loin

### Exercice 13 – Dualité onde-particule

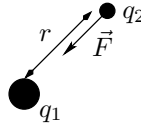
L'aspect ondulatoire d'un électron non relativiste de masse  $m$  et possédant une énergie cinétique  $E$  est caractérisé par sa longueur d'onde  $\lambda$ . On rappelle que la constante de Planck  $h$  vaut  $6,62 \cdot 10^{-34}$  J.s.

1. Donner la dimension de la constante de Planck  $h$  à l'aide de son unité.
2. Proposer une relation entre la longueur d'onde  $\lambda$ , la masse  $m$ , l'énergie cinétique  $E$  et la constante de Planck  $h$ .
3. Comparer la relation obtenue avec celle trouvée à l'aide de la formule de de Broglie pour laquelle à n'importe quelle particule de quantité de mouvement  $p$  peut être associée une onde de longueur d'onde  $\lambda$  avec

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

### Exercice 14 – Célérité de la lumière dans le vide

On considère deux particules, notées 1 et 2, de charges opposées respectives  $q_1$  et  $q_2$  comme on peut le voir sur le schéma ci-dessous.



Si elles sont distantes de  $r$ , la force d'interaction électrostatique  $\vec{F}$  de la première particule sur la seconde vaut

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{e}_r$$

où  $\vec{e}_r$  est le vecteur unitaire radial des coordonnées sphériques et  $\epsilon_0$  la permittivité du vide. On rappelle que la perméabilité du vide  $\mu_0$  vaut  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  kg.m.A<sup>-2</sup>.s<sup>-2</sup>.

1. Donner la dimension de la permittivité du vide  $\epsilon_0$ .
2. Montrer qu'il existe une relation simple entre la permittivité  $\epsilon_0$ , la perméabilité  $\mu_0$  et la célérité de la lumière dans le vide  $c$ .

**Exercice 15 – Le QCM de fin**

1. La dimension de l'intégrale d'une grandeur physique  $A$  par rapport à  $B$  a pour dimension

$$\left[ \int A dB \right] = \frac{[A]}{[B]}$$

☐ Vrai☐ Faux

2. Une grandeur physique sans dimension n'a pas d'unités.

☐ Vrai☐ Faux

3. La constante de gaz parfaits  $R$  a pour dimension  $ML^2T^{-2}N^{-1}\Theta^{-1}$ .

☐ Vrai☐ Faux

## Solution des exercices

**Exercice 1 –**

1. La dimension de la somme (ou de la différence) de deux grandeurs physiques  $A$  et  $B$  est égale à la dimension de  $A$  (et à la dimension de  $B$ ) :

$$[A + B] = [A] = [B]$$

☐ Vrai☒ Faux

2. Toutes les énergies ont la même dimension. En effet, l'énergie potentielle de pesanteur a pour dimension

$$[E_p] = [mgz] = [m][g][z] = M \times LT^{-2} \times L = ML^2T^{-2}$$

☒ Vrai☐ Faux

3. Toutes ces grandeurs ont la dimension d'une longueur  $L$ .

☒ Vrai☐ Faux

4. Il manque l'intensité lumineuse  $J$ . En effet, toute grandeur physique  $A$  peut s'exprimer en fonction des sept grandeurs fondamentales suivantes :  $T$  (temps),  $L$  (longueur),  $M$  (masse),  $\Theta$  (température),  $N$  (quantité de matière),  $I$  (intensité électrique) et  $J$  (intensité lumineuse).

☐ Vrai☒ Faux**Exercice 2 –**

1. En utilisant quelques formules de base en physique, on aboutit à la dimension des différentes grandeurs. Ainsi, grâce à la définition de la vitesse d'un point matériel dans le cas unidimensionnel, il vient

$$v = \frac{dx}{dt} \quad \Rightarrow \quad [v] = \frac{[x]}{[t]} = LT^{-1}$$

**À retenir**

La dimension de la dérivée  $n$ -ième d'une grandeur physique  $A$  par rapport à  $B$  a pour dimension

$$\left[ \frac{d^n A}{dB^n} \right] = \frac{[A]}{[B]^n}$$

Dans le cas de la chute libre, l'accélération d'un point matériel est égale au champ de pesanteur.

Ainsi

$$\vec{g} = \vec{a} \quad \Rightarrow \quad [\vec{g}] = [\vec{a}] = LT^{-2}$$

Par ailleurs, l'utilisation de la seconde loi de Newton (ou principe fondamental de la dynamique), on en déduit que

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad \Rightarrow \quad [\vec{F}] = [m][\vec{a}] = MLT^{-2}$$

### À retenir

La dimension du produit de deux grandeurs physiques  $A$  et  $B$  est égale au produit des dimensions de  $A$  et  $B$  :

$$[A \times B] = [A] \times [B]$$

2. La pression  $P$  dans un fluide étant homogène à une force  $F$  par unité de surface  $S$ , on aboutit à

$$P = \frac{F}{S} \quad \Rightarrow \quad [P] = \frac{[F]}{[S]} = \frac{MLT^{-2}}{L^2} = ML^{-1} T^{-2}$$

### À retenir

La dimension du quotient de deux grandeurs physiques  $A$  et  $B$  est égale au quotient des dimensions de  $A$  et  $B$  :

$$\left[ \frac{A}{B} \right] = \frac{[A]}{[B]}$$

La définition de l'énergie cinétique conduit à

$$\mathcal{E}_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad \Rightarrow \quad [\mathcal{E}_c] = \left[ \frac{1}{2} \right] [m][v]^2 = ML^2T^{-2}$$

### À retenir

La dimension de la puissance  $n$ -ième d'une grandeur physique  $A$  est égale à la puissance  $n$ -ième de la dimension de  $A$  :

$$[A^n] = [A]^n$$

## Exercice 3 –

1. Sachant que la vitesse  $v$  est homogène au rapport d'une longueur sur un temps, on en déduit que la dimension de l'énergie cinétique  $E_c$  est

$$\begin{aligned} [E_c] &= \left[ \frac{1}{2}mv^2 \right] = \left[ \frac{1}{2} \right] [m][v]^2 \\ &= M \cdot (L \cdot T^{-1})^2 \\ &= M \cdot L^2 \cdot T^{-2} \end{aligned}$$

Sachant que le champ de pesanteur  $g$  est homogène à une accélération et que l'altitude  $z$  est

homogène à une longueur, on en déduit que

$$\begin{aligned}[E_{pes}] &= [mgz] = [m][g][z] \\ &= M \cdot (L \cdot T^{-2}) \cdot L \\ &= M \cdot L^2 \cdot T^{-2}\end{aligned}$$

Sachant que la célérité de la lumière  $c$  est homogène à une vitesse, la dimension de l'énergie de masse du système est alors

$$\begin{aligned}[E_m] &= [mc^2] = [m][c]^2 \\ &= M \cdot (L \cdot T^{-1})^2 \\ &= M \cdot L^2 \cdot T^{-2}\end{aligned}$$

Les trois grandeurs ont donc bien la même dimension. Elles sont toutes homogènes à une énergie.

2. Une énergie  $E$  est liée à une force  $F$  et à une distance  $D$  s'il existe des nombres sans dimension  $\alpha$  et  $\beta$  tels que

$$[E] = [F]^\alpha [D]^\beta$$

Sachant qu'une force est, d'après la seconde loi de Newton, homogène au produit d'une masse et d'une accélération et en utilisant la question précédente, il vient

$$\begin{aligned}M \cdot L^2 \cdot T^{-2} &= (M \cdot L \cdot T^{-2})^\alpha L^\beta \\ &= M^\alpha \cdot L^{\alpha+\beta} \cdot T^{-2\alpha}\end{aligned}$$

Par identification, on aboutit au système suivant

$$\begin{cases} \alpha = 1 \\ \alpha + \beta = 2 \\ -2\alpha = -2 \end{cases}$$

La résolution du système d'équations donne immédiatement

$$\begin{cases} \alpha = 1 \\ \beta = 1 \end{cases}$$

Finalement les trois grandeurs sont liées et une énergie est homogène au produit d'une force et d'une distance puisque

$$[E] = [F]^1 \times [D]^1 = [F] \times [D]$$

#### Exercice 4 –

1. La pulsation propre  $\omega_0$  a pour unité, dans le système international, le  $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ . Elle est donc homogène au quotient d'un angle, qui n'a pas de dimension, et d'un temps. De la même manière, elle est reliée à la période propre  $T_0$  des oscillations par la relation

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} \quad \Rightarrow \quad [\omega_0] = \left[ \frac{2\pi}{T_0} \right] = \frac{[2\pi]}{[T_0]} = T^{-1}$$

2. En outre, puisque le champ de pesanteur est homogène à une accélération, il vient

$$\left[ \sqrt{\frac{g}{l}} \right] = \sqrt{\left[ \frac{g}{l} \right]} = \sqrt{\frac{[g]}{[l]}} = \sqrt{\frac{LT^{-2}}{L}} = T^{-1}$$

Les deux membres ont la même dimension. La relation est par conséquent homogène.

### ⚙️ Méthode

Pour s'assurer qu'une équation est homogène, il suffit de vérifier que les deux membres de cette dernière ont même dimension. Par contraposition, si les deux membres de l'équation ont des dimensions différentes, elle est nécessairement fausse.

### Exercice 5 –

1. Par définition, une longueur d'onde a pour dimension une longueur  $L$ . Il en est de même pour l'espacement entre les fentes  $a$  et pour la distance  $D$  entre l'écran et les fentes d'Young. Par ailleurs, l'interfrange étant la distance entre deux zones sombres (ou brillantes) successives, on en déduit qu'il est aussi homogène à une longueur  $L$ . Ainsi

$$[i] = L \quad \left[ \frac{a\lambda}{D} \right] = L \quad \left[ \frac{a}{\lambda D} \right] = L^{-1} \quad [\lambda Da] = L^3 \quad \text{et} \quad \left[ \frac{\lambda D}{a} \right] = L$$

Finalement, les seules formules qui soient homogènes sont

$$i = \frac{a\lambda}{D} \quad \text{et} \quad i = \frac{\lambda D}{a}$$

2. Plus l'écran est éloigné, plus l'interfrange  $i$  est important. De la même manière, plus l'espacement entre les fentes  $a$  est grand, plus l'interfrange  $i$  est faible car les effets ondulatoires sont peu marqués. En conclusion, la seule formule qui soit compatible avec ces deux constats qualitatifs est

$$i = \frac{\lambda D}{a}$$

### Exercice 6 –

1. Sachant que la masse  $m$  de la bille a pour dimension  $M$  et que sa vitesse a pour dimension  $L.T^{-1}$ , on en déduit que l'équation aux dimensions donne, puisque  $[H]=L$ ,

$$L.T^{-1} = M^{\alpha} L^{\beta} [g]^{\gamma}$$

Le champ de pesanteur étant homogène à une accélération, il vient finalement,

$$\begin{aligned} L.T^{-1} &= M^{\alpha} L^{\beta} (L.T^{-2})^{\gamma} \\ &= M^{\alpha} L^{\beta+\gamma} T^{-2\gamma} \end{aligned}$$

Pour que cette relation soit homogène, il faut que les membres de gauche et de droite aient la même dimension. Ainsi il vient, par identification,

$$\begin{cases} \alpha = 0 \\ \beta + \gamma = 1 \\ -2\gamma = -1 \end{cases}$$

La résolution du système d'équations donne immédiatement

$$\begin{cases} \alpha &= 0 \\ \beta &= \frac{1}{2} \\ \gamma &= \frac{1}{2} \end{cases}$$

Ainsi, la vitesse  $v$  de la bille peut se mettre sous la forme

$$[v] = [m]^0 [H]^{\frac{1}{2}} [g]^{\frac{1}{2}} = \sqrt{[g][H]}$$

- La vitesse de chute libre  $v$  est indépendante de la masse  $m$  de la bille.
- Puisque la chute se fait sans frottement, la conservation de l'énergie mécanique implique que l'énergie mécanique initiale est égale à l'énergie mécanique juste avant l'impact. Par conséquent,

$$\frac{1}{2}mv^2 + 0 = 0 + mgH$$

On en déduit alors que

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}mv^2 &= mgH \\ \Rightarrow v^2 &= 2gH \\ \Rightarrow v &= \sqrt{2gH} \end{aligned}$$

On retrouve bien le même résultat que celui obtenu dans l'avant-dernière question à l'exception du préfacteur  $\sqrt{2}$  qui ne peut être obtenu par analyse dimensionnelle car il est sans dimension.

On aurait aussi pu retrouver ce résultat à l'aide de la seconde loi de Newton.

### Exercice 7 –

- La puissance est le rapport d'une énergie sur un temps. En utilisant la dimension d'une énergie, on aboutit alors à la dimension du flux de chaleur  $\varphi$ . Ainsi,

$$[\varphi] = \frac{ML^2T^{-2}}{T} = ML^2T^{-3}$$

- La densité de flux de chaleur  $j$  étant, par définition,  $\varphi = jS$  où  $S$  est la surface de la fenêtre, on en déduit que

$$[j] = \frac{[\varphi]}{[S]} = \frac{ML^2T^{-3}}{L^2} = MT^{-3}$$

- D'après la loi de Fourier, la dimension de la conductivité thermique  $\lambda$  est

$$[\lambda] = \frac{[j][e]}{[T_A - T_0]} = \frac{MT^{-3} \times L}{\Theta} = MT^{-3}L\Theta^{-1}$$

- En utilisant la définition de la résistance thermique, on en déduit que

$$[R] = \frac{[e]}{[\lambda][S]} = \frac{L}{MT^{-3}L\Theta^{-1} \times L^2} = M^{-1}T^3L^{-2}\Theta$$

**Exercice 8 –**

1. Une masse volumique étant, par définition, le rapport d'une masse sur un volume, on en déduit que sa dimension est

$$[\rho] = \frac{[m]}{[V]} = \frac{M}{L^3} = M.L^{-3}$$

2. En utilisant l'unité usuelle rappelée dans l'énoncé, on peut affirmer qu'une vitesse angulaire est le rapport d'un angle par un temps. Un angle n'ayant pas de dimension, la dimension de la vitesse angulaire est par conséquent

$$[\omega] = \frac{1}{T} = T^{-1}$$

3. Sachant qu'une puissance est, d'un point de vue dimensionnel, le rapport d'une énergie  $E$  sur un temps  $T$ , on en déduit que

$$[P_m] = \frac{[E]}{T} = [E].T^{-1}$$

Pour déterminer la dimension d'une énergie  $E$ , on peut utiliser, par exemple, la définition de l'énergie cinétique. Par conséquent,

$$\begin{aligned} [P_m] &= \frac{\left[\frac{1}{2}mv^2\right]}{T} = \frac{\left[\frac{1}{2}\right][m][v]^2}{T} \\ &= \frac{M.(L.T^{-1})^2}{T} = \frac{M.L^2.T^{-2}}{T} = M.L^2.T^{-3} \end{aligned}$$

4. La grandeur  $\frac{P_m}{\rho\omega^\alpha D^5}$  a pour dimension, puisque le diamètre de la roue est homogène à une longueur  $L$ ,

$$\left[\frac{P_m}{\rho\omega^\alpha D^5}\right] = \frac{[P_m]}{[\rho][\omega]^\alpha [D]^5} = \frac{M.L^2.T^{-3}}{(M.L^{-3}).(T^{-1})^\alpha.L^5} = \frac{M.L^2.T^{-3}}{M.L^2.T^{-\alpha}} = T^{-3+\alpha}$$

Si  $\alpha$  est égal à 3, la grandeur précédente est sans dimension et, par conséquent, le nombre de puissance est effectivement adimensionné.

**Exercice 9 –**

1. Par définition, la force d'interaction gravitationnelle de Jupiter sur Io est

$$F = \frac{\mathcal{G}mM_J}{d^2}$$

où  $d$  est la distance entre la planète et son satellite.

2. Sachant qu'une force a la même dimension que le produit d'une masse et d'une accélération, il vient, par analyse dimensionnelle,

$$[\mathcal{G}] = \left[\frac{Fd^2}{mM_J}\right] = \frac{MLT^{-2} \times L^2}{M \times M} = M^{-1}L^3T^{-2}$$

3. La période de révolution  $T_0$  de Io peut se mettre sous la forme

$$[T_0] = [R_J]^A [\mathcal{G}]^B [M_J]^C$$

où  $A$ ,  $B$  et  $C$  sont des nombres sans dimension que l'on cherche à déterminer. Sachant que la période de révolution a pour dimension  $T$  et en utilisant le résultat de la question précédente, il vient, par analyse dimensionnelle,

$$T = L^A (M^{-1} L^3 T^{-2})^B M^C = L^{A+3B} M^{-B+C} T^{-2B}$$

Pour que cette relation soit homogène, il faut que les membres de gauche et de droite aient la même dimension. Ainsi il vient, par identification,

$$\begin{cases} A + 3B = 0 \\ -B + C = 0 \\ -2B = 1 \end{cases}$$

Après résolution du système, on aboutit à

$$\begin{cases} A = \frac{3}{2} \\ C = -\frac{1}{2} \\ B = -\frac{1}{2} \end{cases}$$

Finalement, on parvient à la relation suivante

$$[T_0] = [R_J]^{\frac{3}{2}} [\mathcal{G}]^{-\frac{1}{2}} [M_J]^{-\frac{1}{2}}$$

Enfin, en élevant au carré la formule précédente, on aboutit à

$$\frac{[T_0]^2}{[R_J]^3} = \frac{1}{\sqrt{[\mathcal{G}][M_J]}}$$

4. D'après la troisième loi de Kepler, la période de révolution  $T_0$  du satellite est reliée au rayon  $R_J$  de son orbite circulaire par la relation

$$\frac{T_0^2}{R_J^3} = \frac{4\pi^2}{\sqrt{\mathcal{G}M_J}}$$

On retrouve bien la même formule que dans la question précédente. Il manque simplement le préfacteur  $4\pi^2$  qui ne pouvait pas être obtenu par analyse dimensionnelle car il est adimensionné.

### Exercice 10 –

1. Sachant que l'unité, dans le système international, de la constante de la Planck est J.s, on en déduit qu'elle est homogène au produit d'une énergie  $E$  et d'un temps  $T$ . Ainsi,

$$[h] = [E].T$$

En utilisant par exemple la définition de l'énergie cinétique, il est possible de déterminer la

dimension d'une énergie. Par conséquent, la constante de Planck est homogène à

$$\begin{aligned} [h] &= \left[ \frac{1}{2}mv^2 \right] \cdot T = \left[ \frac{1}{2} \right] [m] [v]^2 \cdot T \\ &= M \cdot (L \cdot T^{-1})^2 \cdot T \\ &= M \cdot L^2 \cdot T^{-1} \end{aligned}$$

2. En utilisant l'expression de la force d'interaction électrostatique, le rapport  $\frac{e^2}{\varepsilon_0}$  est homogène au produit d'une force et d'une distance au carré car

$$\frac{e^2}{\varepsilon_0} = [4\pi r^2 \vec{F}] = [4][\pi][r]^2 [\vec{F}] = [r]^2 [\vec{F}]$$

Sachant qu'une force est homogène au produit d'une masse et d'une accélération, on trouve

$$\left[ \frac{e^2}{\varepsilon_0} \right] = L^2 \cdot (M \cdot L \cdot T^{-2}) = M \cdot L^3 \cdot T^{-2}$$

En utilisant ce résultat ainsi que celui de la première question, la constante de structure fine  $\alpha$  a alors pour dimension

$$\begin{aligned} [\alpha] &= \left[ \frac{e^2}{2\varepsilon_0 hc} \right] = \frac{1}{[2][h][c]} \times \left[ \frac{e^2}{\varepsilon_0} \right] \\ &= \frac{M \cdot L^3 \cdot T^{-2}}{M \cdot L^2 \cdot T^{-1} \cdot (L \cdot T^{-1})} \\ &= \frac{M \cdot L^3 \cdot T^{-2}}{M \cdot L^3 \cdot T^{-2}} \\ &= 1 \end{aligned}$$

La constante de structure fine  $\alpha$  est donc effectivement adimensionnée.

3. La valeur numérique de l'inverse de la constante de structure fine est

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{2\varepsilon_0 hc}{e^2} \approx 137, \dots$$

On constate que cette valeur est pratiquement entière mais en toute rigueur ce n'est pas le cas.

Longtemps, on a cru que l'entier 137 avait un statut très particulier en physique des particules.

### Exercice 11 –

1. D'un point de vue dimensionnel, une force est le produit d'une masse et d'une accélération. Ainsi

$$[\vec{F}] = M \times LT^{-2} = MLT^{-2}$$

2. Sachant que le rayon  $R$  de la bille a la dimension d'une longueur et que la vitesse  $\vec{v}$  de cette dernière est le quotient d'une longueur et d'un temps, il vient, par analyse dimensionnelle,

$$[\eta] = \frac{[\vec{F}]}{[6\pi R \vec{v}]} = \frac{[\vec{F}]}{[6\pi][R][\vec{v}]} = \frac{MLT^{-2}}{1 \times L \times LT^{-1}}$$

Finalement, la dimension de la viscosité est, après simplification,

$$[\eta] = ML^{-1}T^{-1}$$

3. Sachant que la masse volumique  $\rho$  est le rapport d'une masse sur un volume, on trouve

$$[\rho] = \frac{M}{L^3} = ML^{-3}$$

Le nombre de Reynolds a par conséquent pour dimension

$$[Re] = \left[ \frac{\rho v R}{\eta} \right] = \frac{ML^{-3} \times LT^{-1} \times L}{ML^{-1}T^{-1}} = \frac{L^{-1}}{L^{-1}} = 1$$

En conclusion, le nombre de Reynolds est sans dimension.

### Exercice 12 –

1. En utilisant les relations tension-intensité pour le condensateur et pour le conducteur ohmique, il vient

$$u_R = Ri \quad \text{et} \quad i = C \frac{du_C}{dt}$$

Ainsi

$$[RC] = [R][C] = \left[ \frac{u_R}{i} \right] \left[ \frac{i}{\frac{du_C}{dt}} \right] = \frac{[u_R]}{[i]} \frac{[i][t]}{[u_C]} = [t] = T$$

Par conséquent, la constante  $\tau$  est homogène à un temps.

2. Par définition, l'intensité  $i$  du courant est égale à la dérivée de la charge  $q$  par rapport au temps. Il vient alors

$$[i] = \left[ \frac{dq}{dt} \right] = \frac{[q]}{[t]} = \frac{[q]}{T} = I$$

La charge a donc pour dimension le produit d'une intensité  $I$  et d'un temps  $T$ . De la même manière, puisque l'argument de l'exponentielle est sans dimension, on a

$$[CE(1 - e^{-t/\tau})] = [C][E][1 - e^{-t/\tau}] = [C][E][1] = [C][E]$$

#### À retenir

L'argument des fonctions cosinus, sinus, tangente, exponentielle, logarithme, logarithme népérien, ... n'a pas de dimension.

D'après la question précédente, on a vu que l'intensité du courant qui traverse un condensateur est égal au produit de la capacité  $C$  et de la dérivée temporelle de la tension  $u_C$ . Par conséquent

$$[i] = I = \left[ C \frac{du_C}{dt} \right] = [C] \frac{[u_C]}{[t]} = [C] \frac{[u_C]}{T} \Rightarrow [C][u_C] = IT = [C][E]$$

On en déduit alors que

$$[CE(1 - e^{-t/\tau})] = IT$$

Les deux membres ont la même dimension. L'équation est donc homogène.

**Exercice 13 –**

1. Sachant que l'unité de la constante de Planck  $h$  est J.s, on en déduit que sa dimension est le produit d'une énergie par un temps. Ainsi,

$$[h] = ML^2T^{-2} \times T = ML^2T^{-1}$$

2. On suppose que la longueur d'onde  $\lambda$  de l'électron peut s'écrire sous la forme

$$[\lambda] = [m]^A [E]^B [h]^C$$

où  $A$ ,  $B$  et  $C$  sont des nombres sans dimension que l'on cherche à déterminer. En utilisant la première question et puisque la longueur d'onde est homogène à une longueur et que l'énergie cinétique a la dimension d'une énergie, on en déduit que

$$L = M^A (ML^2T^{-2})^B (ML^2T^{-1})^C = M^{A+B+C} L^{2B+2C} T^{-2B-C}$$

Pour que cette relation soit homogène, il faut que les membres de gauche et de droite aient la même dimension. Ainsi, il vient, par identification,

$$\begin{cases} A + B + C &= 0 \\ 2B + 2C &= 1 \\ -2B - C &= 0 \end{cases}$$

Après résolution du système d'équations, on a

$$\begin{cases} A &= -\frac{1}{2} \\ B &= -\frac{1}{2} \\ C &= 1 \end{cases}$$

Finalement, on aboutit à la relation suivante

$$[\lambda] = [m]^{-\frac{1}{2}} [E]^{-\frac{1}{2}} [h]^1 = \frac{[h]}{\sqrt{[m] [E]}}$$

3. D'après la relation de de Broglie, la longueur d'onde  $\lambda$  de l'électron vaut

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

où  $p$  est la quantité de mouvement de l'électron. Sachant que la quantité de mouvement est reliée à l'énergie cinétique par la relation

$$E = \frac{p^2}{2m}$$

on en déduit que

$$E = \frac{h^2}{2m\lambda^2}$$

c'est-à-dire, en isolant la longueur d'onde  $\lambda$ ,

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$$

On retrouve bien le même résultat que dans la question précédente. Il manque uniquement le préfacteur sans dimension  $\sqrt{2}$  qui ne pouvait pas être obtenu par analyse dimensionnelle.

**Exercice 14 –**

1. Sachant qu'une charge a pour dimension le produit d'une intensité et d'un temps et qu'une force le produit d'une masse et d'une accélération, on en déduit que

$$[\varepsilon_0] = \frac{[q_1][q_2]}{[4\pi][\vec{F}_{1 \rightarrow 2}][r^2]} = \frac{(IT)^2}{1 \times MLT^{-2} \times L^2} = \frac{I^2 T^2}{ML^3 T^{-2}}$$

Finalement, on obtient  $[\varepsilon_0] = I^2 T^4 M^{-1} L^{-3}$

2. On recherche une relation entre la permittivité  $\varepsilon_0$ , la perméabilité  $\mu_0$  et la célérité de la lumière dans le vide  $c$  sous la forme

$$[c] = [\varepsilon_0]^A [\mu_0]^B$$

où  $A$  et  $B$  sont des nombres sans dimension que l'on cherche à déterminer. Sachant que la perméabilité du vide  $\mu_0$ , grâce à son unité donnée dans l'énoncé, a pour dimension  $MLI^{-2}T^{-2}$  et en utilisant le résultat de la question précédente, il vient, par analyse dimensionnelle,

$$LT^{-1} = (I^2 T^4 M^{-1} L^{-3})^A (MLI^{-2} T^{-2})^B = I^{2A-2B} T^{4A-2B} M^{-A+B} L^{-3A+B}$$

Pour que cette relation soit homogène, il faut que

$$\begin{cases} 2A - 2B = 0 \\ 4A - 2B = -1 \\ -A + B = 0 \\ -3A + B = 1 \end{cases}$$

Après résolution du système, on aboutit à  $A = B = -1/2$ . Les trois grandeurs sont liées et on a

$$[c] = [\varepsilon_0]^{-\frac{1}{2}} [\mu_0]^{-\frac{1}{2}} \Rightarrow [c] = \frac{1}{\sqrt{[\varepsilon_0][\mu_0]}}$$

**Exercice 15 –**

1. La dimension de l'intégrale d'une grandeur physique  $A$  par rapport à  $B$  a pour dimension  $\left[ \int A dB \right] = [A] \times [B]$

☐ Vrai      ☒ Faux

2. Certaines grandeurs physico-chimiques sans dimension, comme par exemple l'indice de réfraction  $n$ , le potentiel hydrogène  $pH$  ou la densité d'un gaz n'ont effectivement pas d'unités. Cependant, d'autres grandeurs, comme par exemple le niveau sonore ou un angle, n'ont pas de dimension mais possède une unité. En effet un angle peut se mesurer en degrés ( $^\circ$ ), en radians (rad), en minutes d'arc ( $'$ ), en tours (tr), ...

☐ Vrai      ☒ Faux

3. D'après la loi des gaz parfaits, on a  $PV = nRT$ . Puisque le produit  $PV$  est homogène au travail des forces pressantes, on en déduit que le produit d'une pression  $P$  et d'un volume  $V$  a la dimension d'une énergie. On aboutit alors à

☒ Vrai      ☐ Faux

$$[R] = \frac{[PV]}{[n][T]} = \frac{ML^2 T^{-2}}{N \times \Theta} = ML^2 N^{-1} T^{-2} \Theta^{-1}$$

## Maîtriser le cours

**Exercice 1 – Le vrai/faux du début**

1. La solution d'une équation différentielle linéaire homogène du premier (second) ordre à coefficients constants fait apparaître une (deux) constante(s) d'intégration. Pour le(s) déterminer, on peut utiliser la (les) condition(s) initiale(s).

☐ Vrai☐ Faux

2. La solution générale de l'équation différentielle linéaire homogène du second ordre à coefficients constants

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0$$

☐ Vrai☐ Faux

est de la forme, si le facteur qualité  $Q$  est strictement supérieur à  $\frac{1}{2}$ ,

$$x(t) = (At + B)e^{-\omega_0 t}$$

où  $A$  et  $B$  sont deux constantes à déterminer.

**Exercice 2 – Principe de superposition**

On considère dans cet exercice  $f_1$  et  $f_2$  deux fonctions solutions d'une même équation différentielle linéaire homogène à coefficients constants.

1. Montrer que toute combinaison linéaire de  $f_1$  et  $f_2$  est également solution de l'équation différentielle si elle est du premier ordre.
2. Montrer que toute combinaison linéaire de  $f_1$  et  $f_2$  est également solution de l'équation différentielle si elle est du second ordre.

**Exercice 3 – Circuit RC série**

Dans un circuit  $RC$  série alimenté par un générateur idéal de tension de force électromotrice  $E$ , la tension  $u_C$  aux bornes du condensateur, initialement déchargé, vérifie l'équation différentielle

$$\frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{RC} = \frac{E}{RC}$$

1. Donner la solution générale de l'équation différentielle après l'avoir mise sous forme canonique.
2. Sachant que  $u_C(0) = 0$ , en déduire l'évolution temporelle de la tension  $u_C$ .

**Exercice 4 – Rails de Laplace**

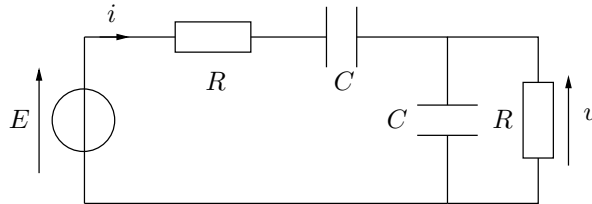
On considère une tige en cuivre de longueur  $L$ , de masse  $m$  et de résistance  $r$  qui peut se déplacer rectilignement. Elle est déposée sur des rails métalliques alimentés par un générateur idéal de tension de force électromotrice  $E$ . L'ensemble du circuit est soumis à un champ magnétique  $\vec{B}$ . L'équation différentielle vérifiée par la vitesse de la tige, initialement immobile, est

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{B^2 L^2}{rm} v + \frac{EBL}{rm}$$

1. Mettre sous forme canonique l'équation différentielle et donner sa solution générale.
2. En déduire l'expression de la vitesse  $v$  de la tige en fonction du temps.

**Exercice 5 – Filtre de Wien**

En électricité, un filtre de Wien est constitué de l'association série d'un conducteur ohmique de résistance  $R$  et d'un condensateur de capacité  $C$ , eux-mêmes placés en série avec un condensateur de même capacité et un conducteur ohmique identique. Ces deux derniers sont mis en parallèle comme on peut le voir sur le schéma ci-dessous.



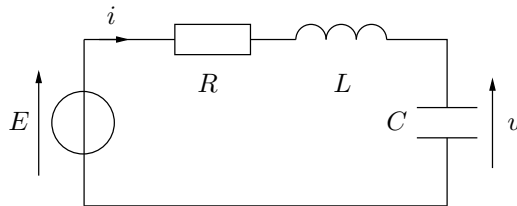
L'ensemble est alimenté par un générateur idéal de tension de force électromotrice  $E$ . L'équation différentielle vérifiée par la tension  $u$  aux bornes du dipôle  $RC$  parallèle est alors

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{3}{RC} \frac{du}{dt} + \frac{1}{(RC)^2} u = 0$$

1. Déterminer la pulsation propre  $\omega_0$  et le facteur de qualité  $Q$  du circuit et mettre l'équation différentielle sous forme canonique.
2. Donner l'évolution temporelle de la tension  $u$  si les deux condensateurs sont initialement déchargés, c'est-à-dire si  $u(0) = 0$  et  $\frac{du}{dt}(0) = \frac{E}{RC}$ .

**Exercice 6 – Circuit RLC série**

Comme on peut le voir sur le schéma ci-dessous, on considère un circuit constitué d'un condensateur idéal de capacité  $C = 1 \mu\text{F}$ , d'un conducteur ohmique de résistance  $R = 200 \Omega$  et d'une bobine parfaite d'inductance  $L = 10 \text{ mH}$  placés en série.



L'ensemble est alimenté par un générateur idéal de tension de force électromotrice  $E$ . On admet que

l'équation différentielle vérifiée par la tension  $u$  aux bornes du condensateur est

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{du}{dt} + \frac{1}{LC} u = \frac{E}{LC}$$

1. Déterminer les expressions littérales de la pulsation propre  $\omega_0$  et du facteur de qualité  $Q$  du circuit ainsi que leurs valeurs numériques.
2. Donner l'évolution temporelle de la tension  $u$  si  $u(0) = 0$  et  $\frac{du}{dt}(0) = 0$ .

### Exercice 7 – Pendule simple

Comme on peut le voir sur le schéma ci-contre, un solide de masse  $m$ , assimilé à un point matériel, est accroché, par l'intermédiaire d'un fil inextensible de longueur  $l$ , au plafond. Sa position est repérée par l'angle  $\theta$  que fait le fil du pendule avec la direction verticale. On suppose qu'il est lancé avec une vitesse angulaire initiale positive  $\frac{d\theta}{dt}(0) = \frac{v_0}{l}$  depuis la position angulaire  $\theta(0) = \theta_0$ . Si l'angle  $\theta$  est petit, on admet que l'équation différentielle du second ordre vérifiée par ce dernier est

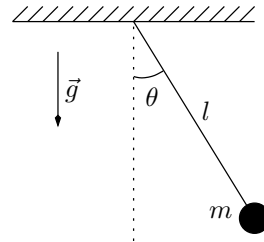
$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{g}{l} \theta = 0$$

où  $g$  est le champ de pesanteur.

1. Donner la solution générale de l'équation différentielle.
2. Montrer que l'évolution temporelle de  $\theta$  est

$$\theta(t) = \theta_0 \cos(\omega_0 t) + \frac{v_0}{\omega_0 l} \sin(\omega_0 t)$$

où  $\omega_0$  est une pulsation propre dont on donnera l'expression en fonction de  $l$  et  $g$ .

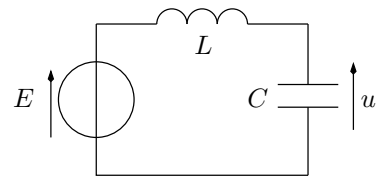


### Exercice 8 – Circuit LC série

Un générateur idéal de tension de force électromotrice  $E$  est branché en série à une bobine parfaite d'inductance  $L$  et un condensateur de capacité  $C$  comme on peut le voir sur le schéma ci-contre. On admet que la tension  $u$  aux bornes du condensateur vérifie l'équation différentielle du second ordre à coefficients constants suivante

$$LC \frac{d^2 u}{dt^2} + u = E$$

Enfin, on suppose qu'initialement le condensateur est déchargé, c'est-à-dire que  $u(0) = 0$  et qu'aucun courant ne circule dans le circuit, c'est-à-dire que  $\frac{du}{dt}(0) = 0$ .

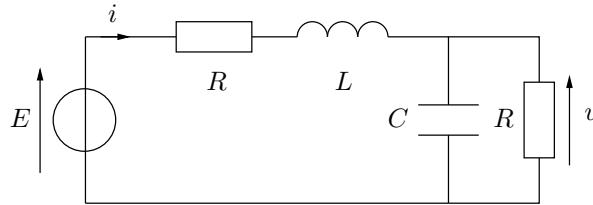


1. Mettre sous forme canonique l'équation différentielle en faisant apparaître la pulsation propre  $\omega_0$  du circuit.
2. Donner l'évolution temporelle de la tension  $u$  aux bornes du condensateur.

## Maîtriser les méthodes fondamentales

**Exercice 9 – Circuit du second ordre et équation différentielle**

Comme on peut le voir sur le schéma ci-dessous, un circuit  $LC$  série réel est modélisé par une bobine réelle d'inductance  $L$  et de résistance interne  $R$  et par un condensateur réel lui-même représenté par l'association parallèle d'une capacité  $C$  et d'un conducteur ohmique de résistance  $R$ .



Pour simplifier les calculs, on suppose que  $RC = L/R = \tau$ . Le dipôle est alimenté par un générateur idéal de tension de force électromotrice  $E$ . Enfin, on admet que la tension  $u$  aux bornes du condensateur réel vérifie l'équation différentielle du second ordre à coefficients constants suivante

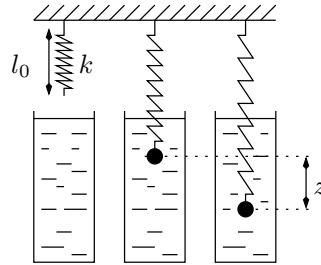
$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{2}{\tau} \frac{du}{dt} + \frac{2}{\tau^2} u = \frac{E}{\tau^2}$$

1. Déterminer la pulsation propre  $\omega_0$  et le facteur de qualité  $Q$  du montage et mettre l'équation différentielle sous forme canonique.
2. En déduire l'évolution temporelle de la tension  $u$  si  $u(0) = 0$  et  $\frac{du}{dt}(0) = 0$ .

**Exercice 10 – Oscillateur amorti**

Une bille sphérique de masse volumique  $\rho$  et de rayon  $R$  est suspendue à un ressort de constante de raideur  $k$  et de longueur à vide  $l_0$ . L'autre extrémité du ressort est, quant à elle, accrochée à un support fixe. Comme on peut le voir sur le schéma ci-contre, l'ensemble du dispositif est immergé dans du glycérol de viscosité  $\eta$ . On admet que l'altitude  $z$  de la bille par rapport à sa position d'équilibre vérifie l'équation différentielle

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{9\eta}{2\rho R^2} \frac{dz}{dt} + \frac{3k}{4\pi\rho R^3} z = 0$$



Enfin, on suppose qu'elle est initialement écartée, sans vitesse, de sa position d'équilibre avec une altitude  $Z_0$ . Les conditions initiales sont alors  $z(0) = Z_0$  et  $\frac{dz}{dt}(0) = 0$ .

1. Déterminer les expressions littérales de la pulsation propre  $\omega_0$  et du facteur de qualité  $Q$  du système en fonction de  $k$ ,  $R$ ,  $\eta$  et  $\rho$  et mettre sous forme canonique l'équation différentielle.
2. Donner une condition sur  $k$  en fonction de  $R$ ,  $\eta$  et  $\rho$  pour obtenir un régime pseudo-périodique.
3. Résoudre l'équation différentielle à l'aide des conditions initiales.
4. Au bout d'un temps très long, que vaut l'altitude  $z$  de la bille dans le glycérol ?

**Exercice 11 – Chute d'une balle**

Une balle de ping-pong de masse  $m$ , assimilée à un point matériel, est lancée vers le sol dans le champ de pesanteur  $\vec{g} = -g\vec{e}_z$  avec une vitesse initiale  $\vec{v}(0) = -v_0\vec{e}_z$  ( $v_0 > 0$ ). Si elle subit une force de frottement visqueux avec l'air  $\vec{F} = -\lambda\vec{v}$ , on admet que sa vitesse  $\vec{v} = v\vec{e}_z$  vérifie l'équation différentielle à coefficients constants du premier ordre suivante

$$m \frac{dv}{dt} + \lambda v = -mg$$

1. Mettre sous forme canonique l'équation différentielle et donner sa solution générale.
2. En déduire l'expression de la vitesse  $v$  de la balle en fonction du temps.

## Pour aller plus loin

**Exercice 12 – Lancer d'une balle de tennis**

Une balle de tennis de masse  $m$  est lancée verticalement vers le haut dans le champ de pesanteur  $\vec{g}$  avec une vitesse initiale  $\vec{v}_0$ . Elle subit, en plus de son poids, une force de frottement  $\vec{F}$  avec l'air quadratique de la forme  $\vec{F} = -k \parallel \vec{v} \parallel \vec{v}$  où  $\vec{v}$  est la vitesse de la balle et  $k$  une constante positive. On admet que l'application du principe fondamental de la dynamique, dans le référentiel terrestre supposé galiléen, donne l'équation différentielle suivante pour la vitesse de la balle lors de la phase d'ascension

$$m \frac{dv}{dt} = -mg - kv^2$$

On rappelle que

$$\int \frac{dx}{a^2 + x^2} = \frac{1}{a} \text{Arctan}\left(\frac{x}{a}\right)$$

1. Montrer que l'équation différentielle peut se mettre sous la forme

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{k}{m}(v_1^2 + v^2)$$

où  $v_1$  est une vitesse caractéristique dont on donnera l'expression en fonction de  $m$ ,  $g$  et  $k$ .

2. Déterminer l'évolution temporelle de la vitesse  $v$  de la balle lors de la phase d'ascension.

**Exercice 13 – Mouvement d'un pendule**

L'énergie mécanique  $\mathcal{E}_m$  d'un solide de masse  $m$  relié à un fil inextensible de longueur  $l$  placé dans le champ de pesanteur  $\vec{g}$  est

$$\mathcal{E}_m = \frac{1}{2}ml^2\dot{\theta}^2 + mgl(1 - \cos\theta)$$

où  $\theta$  est l'angle fait par le pendule avec l'axe vertical. On rappelle qu'elle est conservée si les frottements avec l'air sont négligeables. On suppose également que le pendule est lâché sans vitesse initiale en faisant un angle  $\theta_0$  par rapport à l'axe vertical. Enfin, on donne, si  $a$  est positif, une primitive de l'intégrale suivante

$$\int \frac{dx}{\sqrt{a^2 - x^2}} = \text{Arcsin}\left(\frac{x}{a}\right)$$

1. Établir l'équation différentielle non linéaire du premier ordre vérifiée par l'angle  $\theta$ .

2. Si l'amplitude du mouvement est faible, montrer que  $\theta(t) = \theta_0 \cos\left(\sqrt{\frac{g}{l}}t\right)$ .

### Exercice 14 – Cycliste

Un cycliste de masse  $m$  fournit, sur son vélo, une puissance  $\mathcal{P}$  supposée constante pour avancer à la vitesse  $v$ . Sachant qu'il est soumis à une force de frottement avec l'air quadratique dont la puissance est  $-hv^3$  (où  $h$  est une constante qui dépend principalement des caractéristiques du cycliste et de l'air), on admet que l'équation différentielle non linéaire du premier ordre vérifiée par sa vitesse est, d'après la théorème de la puissance cinétique,

$$mv^2 \frac{dv}{dx} = \mathcal{P} - hv^3$$

où  $x$  est la distance parcourue par le cycliste sur la route.

- Montrer que le cycliste atteint une vitesse limite  $v_\infty$  qu'on exprimera en fonction de  $h$  et  $\mathcal{P}$ .
- Si on pose  $V = \frac{v}{v_\infty}$ , donner l'expression d'une longueur caractéristique  $L$  en fonction de  $h$  et  $m$  pour que l'équation différentielle devienne, en fonction de la variable adimensionnée  $X = \frac{x}{L}$ ,

$$V^2 \frac{dV}{dX} = 1 - V^3$$

- Sachant que la vitesse initiale du cycliste est nulle, exprimer  $V$  en fonction de  $X$ .

### Exercice 15 – Le QCM de fin

- La solution de l'équation différentielle du premier ordre à coefficients constants

$$\frac{du}{dt} + \frac{u}{\tau} = \frac{E \times t}{\tau}$$

est, si la condition initiale vaut  $u(0) = 0$ ,

☐ Vrai ☐ Faux

$$u(t) = E\left(t + \tau(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})\right)$$

- L'équation différentielle du premier ordre non linéaire

$$\frac{dC}{dt} + kC^2 = 0$$

admet pour solution, si  $C(0) = C_0$ ,

☐ Vrai ☐ Faux

$$C(t) = \frac{C_0}{1 + kC_0 t}$$

- L'équation différentielle homogène à coefficients constants du second ordre

$$\frac{d^2 f}{dt^2} - \frac{2}{\tau} \frac{df}{dt} + \frac{f}{\tau^2} = 0$$

☐ Vrai ☐ Faux

admet pour solution générale  $f(t) = (At + B)e^{-\frac{t}{\tau}}$  où  $A$  et  $B$  sont deux nombres réels.

## Solution des exercices

**Exercice 1 –**

1. La proposition est vraie. En revanche, si l'équation différentielle à résoudre a un second membre, il faut veiller à n'utiliser la (ou les) condition(s) initiale(s) qu'après avoir déterminé la solution de l'équation homogène et une solution particulière de cette équation.

☒ Vrai      ☐ Faux

2. Si  $Q > \frac{1}{2}$ , la solution de l'équation différentielle linéaire du second ordre à coefficients constants sans second membre s'écrit sous la forme

$$x(t) = [A \cos(\Omega t) + B \sin(\Omega t)] e^{-\frac{\omega_0}{2Q} t}$$

avec  $\Omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}$  et où  $A$  et  $B$  sont deux constantes à déterminer à l'aide des conditions initiales par exemple. En revanche, si le facteur qualité  $Q$  est égal à  $\frac{1}{2}$ , la solution générale de l'équation différentielle linéaire homogène du second ordre à coefficients constants est bien

☐ Vrai      ☒ Faux

$$x(t) = (At + B)e^{-\omega_0 t}$$

où  $A$  et  $B$  sont deux constantes à déterminer à l'aide des conditions initiales par exemple.

**Exercice 2 –**

1. Si  $f_1$  et  $f_2$  sont solutions de l'équation différentielle linéaire homogène du premier ordre à coefficients  $a$  et  $b$  constants ( $a \neq 0$ )

$$af' + bf = 0$$

alors  $\lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2$  (où  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  sont deux nombres réels) est également solution car

$$a(\lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2)' + b(\lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2) =$$

$$a\lambda_1 f_1' + a\lambda_2 f_2' + b\lambda_1 f_1 + b\lambda_2 f_2 =$$

$$\lambda_1 (af_1' + bf_1) + \lambda_2 (af_2' + bf_2) = \lambda_1 0 + \lambda_2 0 = 0$$

2. De la même manière, si  $f_1$  et  $f_2$  sont solutions de l'équation différentielle linéaire homogène du second ordre à coefficients  $a$ ,  $b$  et  $c$  constants ( $a \neq 0$ )

$$af'' + bf' + cf = 0$$

alors  $\lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2$  (où  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  sont deux nombres réels) est également solution car

$$a(\lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2)'' + b(\lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2)' + c(\lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2) =$$

$$a\lambda_1 f_1'' + a\lambda_2 f_2'' + b\lambda_1 f_1' + b\lambda_2 f_2' + c\lambda_1 f_1 + c\lambda_2 f_2 =$$

$$\lambda_1 (af_1'' + bf_1' + cf_1) + \lambda_2 (af_2'' + bf_2' + cf_2) = \lambda_1 0 + \lambda_2 0 = 0$$

D'un point de vue mathématique, cette propriété est appelée principe de superposition.

**Exercice 3 –**

1. En posant  $\tau = RC$ , l'équation différentielle s'écrit sous la forme canonique suivante

$$\frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{\tau} = \frac{E}{\tau}$$

Les solutions de l'équation homogène sont les fonctions  $u_{C_1}$  telles que, pour tout  $t$ ,

$$u_{C_1}(t) = Ae^{-t/\tau}$$

où  $A$  est une constante réelle.

** Cours**

Les solutions de l'équation différentielle homogène

$$\frac{df}{dt} + \frac{f}{\tau} = 0$$

sont les fonctions  $f_1$  telles que  $\forall t, f_1(t) = Ae^{-t/\tau}$  où  $A$  est une constante réelle.

Une solution particulière de l'équation différentielle est la fonction  $u_{C_2}$  telle que, pour tout  $t$ ,

$$u_{C_2}(t) = E$$

** Cours**

Une solution particulière de l'équation différentielle

$$\frac{df}{dt} + \frac{f}{\tau} = \mathcal{C}$$

où  $\mathcal{C}$  est une constante, est la fonction constante  $f_2$  telle que  $\forall t, f_2(t) = \mathcal{C}\tau$ .

Par conséquent la solution générale de l'équation différentielle est la fonction  $u_C$  telle que, pour tout  $t$ ,

$$u_C(t) = Ae^{-t/\tau} + E$$

où  $A$  est une constante réelle déterminée à l'aide de la condition initiale.

2. Le condensateur étant initialement déchargé, il vient, par continuité de la tension aux bornes de ce dernier,  $u_C(0) = 0$ .

En utilisant cette condition initiale, on en déduit que  $A + E = 0$  et par conséquent  $A = -E$ . La solution de l'équation différentielle est

 Dans la méthode de résolution, il faut toujours finir par la condition initiale. En particulier, il faut veiller à ne pas utiliser la condition initiale juste après l'écriture de la solution de l'équation homogène.

$$u_C(t) = E(1 - e^{-t/\tau})$$

**🔧 Méthode**

Pour résoudre une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants, il suffit de

- Trouver toutes les solutions de l'équation homogène  $f_1$ .
- Trouver une solution particulière de l'équation différentielle avec second membre  $f_2$ .
- Sommer les solutions de l'équation homogène et la solution particulière  $f = f_1 + f_2$ .
- Utiliser la condition initiale  $f(0)$  pour déterminer la constante d'intégration.

**Exercice 4 –**

1. En posant  $\tau = \frac{rm}{B^2 L^2}$ , l'équation différentielle s'écrit sous la forme canonique suivante

Mettre sous forme canonique l'équation différentielle en faisant apparaître le temps caractéristique  $\tau$ .

$$\frac{dv}{dt} + \frac{v}{\tau} = \frac{E}{BL\tau}$$

Les solutions de l'équation différentielle homogène sont les fonctions  $v_1$  telles que, pour tout  $t$ ,

$$v_1(t) = Ae^{-t/\tau}$$

où  $A$  est une constante réelle. Une solution particulière de l'équation différentielle est la fonction  $v_2$  telle que, pour tout  $t$ ,

$$v_2(t) = \frac{E}{BL}$$

Par conséquent la solution générale de l'équation différentielle est la fonction  $v$  telle que, pour tout réel  $t$

$$v(t) = Ae^{-t/\tau} + \frac{E}{BL}$$

2. La tige étant initialement immobile, sa vitesse est nulle. Il vient alors  $A + \frac{E}{BL} = 0$  et par conséquent  $A = -\frac{E}{BL}$ . La solution de l'équation différentielle est finalement

$$v(t) = \frac{E}{BL} (1 - e^{-t/\tau})$$

**Exercice 5 –**

1. L'équation différentielle peut se mettre sous la forme canonique suivante :

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{du}{dt} + \omega_0^2 u = 0 \quad \text{avec} \quad \omega_0 = \frac{1}{RC} \quad \text{et} \quad Q = \frac{1}{3}$$

2. Puisque  $Q$  est inférieur à  $\frac{1}{2}$ , les solutions de l'équation différentielle homogène sont les fonctions  $u_1$  telles que, pour tout  $t$ ,

$$u_1(t) = Ae^{r_1 t} + Be^{r_2 t}$$

avec  $r_1 = -\frac{\omega_0}{2} (3 + \sqrt{5})$  et  $r_2 = -\frac{\omega_0}{2} (3 - \sqrt{5})$ .

 Cours

Si  $Q < \frac{1}{2}$ , les solutions de l'équation différentielle du second ordre homogène à coefficients constants

$$\frac{d^2 f}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{df}{dt} + \omega_0^2 f = 0$$

sont les fonctions  $f_1$  telles que, pour tout réel  $t$ ,

$$f_1(t) = Ae^{r_1 t} + Be^{r_2 t}$$

avec  $r_1 = -\frac{\omega_0}{2Q}(1 + \sqrt{1 - 4Q^2})$ ,  $r_2 = -\frac{\omega_0}{2Q}(1 - \sqrt{1 - 4Q^2})$  et où  $A$  et  $B$  sont deux constantes réelles.

L'équation différentielle étant sans second membre, la solution particulière  $u_2$  est la solution nulle. Par conséquent la solution générale de l'équation différentielle est la fonction  $u$  telle que pour tout réel  $t$

$$u(t) = Ae^{r_1 t} + Be^{r_2 t} + 0$$

où  $A$  et  $B$  sont deux constantes réelles. Les deux conditions initiales étant  $u(0) = 0$  et  $\frac{du}{dt}(0) = \omega_0 E$ , on en déduit que ces deux constantes vérifient le système linéaire suivant

$$\begin{cases} A + B = 0 \\ Ar_1 + Br_2 = \omega_0 E \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = \frac{\omega_0 E}{r_1 - r_2} = -\frac{E}{\sqrt{5}} \\ B = -\frac{\omega_0 E}{r_1 - r_2} = \frac{E}{\sqrt{5}} \end{cases}$$

La solution de l'équation différentielle est finalement

$$u(t) = \frac{E}{\sqrt{5}} \left( e^{\frac{\sqrt{5}}{2} \omega_0 t} - e^{-\frac{\sqrt{5}}{2} \omega_0 t} \right) e^{-\frac{3}{2} \omega_0 t}$$

En utilisant la définition de la fonction sinus hyperbolique, on peut aussi écrire la solution sous la forme

$$u(t) = \frac{2E}{\sqrt{5}} \operatorname{sh} \left( \frac{\sqrt{5}}{2} \omega_0 t \right) e^{-\frac{3}{2} \omega_0 t}$$

**Exercice 6 –**

1. L'équation différentielle peut se mettre sous la forme canonique suivante

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{du}{dt} + \omega_0^2 u = \omega_0^2 E, \text{ avec } \begin{cases} \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 10^4 \text{ rad.s}^{-1} \\ Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{2} \end{cases}$$

2. Puisque le facteur de qualité  $Q$  est égal à  $\frac{1}{2}$ , les solutions de l'équation différentielle homogène sont les fonctions  $u_1$  telles que, pour tout  $t$ ,

$$u_1(t) = (At + B)e^{-\omega_0 t}$$

**Cours**

Si  $Q = \frac{1}{2}$ , les solutions de l'équation différentielle du second ordre homogène à coefficients constants

$$\frac{d^2 f}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{df}{dt} + \omega_0^2 f = 0$$

sont les fonctions  $f_1$  telles que, pour tout réel  $t$ ,

$$f_1(t) = (At + B)e^{-\omega_0 t}$$

où  $A$  et  $B$  sont deux constantes réelles.

Une solution particulière de l'équation différentielle est la fonction  $u_2$  telle que  $\forall t, u_2(t) = E$ .

**Cours**

Une solution particulière de l'équation différentielle du second ordre à coefficients constants

$$\frac{d^2 f}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{df}{dt} + \omega_0^2 f = \mathcal{C}$$

où  $\mathcal{C}$  est une constante, est la fonction  $f_2$  telle que pour tout réel  $t, f_2(t) = \frac{\mathcal{C}}{\omega_0^2}$ .

Par conséquent la solution générale de l'équation différentielle est la fonction  $u$  telle que pour tout réel  $t$

$$u(t) = (At + B)e^{-\omega_0 t} + E$$

où  $A$  et  $B$  sont deux constantes réelles à déterminer à l'aide des conditions initiales. Sachant que  $u(0) = 0$  et  $\frac{du}{dt}(0) = 0$ , ces deux constantes vérifient le système linéaire suivant

$$\begin{cases} u(0) = B + E = 0 \\ \frac{du}{dt}(0) = A - \omega_0 B = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = -\omega_0 E \\ B = -E \end{cases}$$

La solution de l'équation différentielle est finalement

$$u(t) = E \left( 1 - (1 + \omega_0 t)e^{-\omega_0 t} \right)$$

**Méthode**

Pour résoudre une équation différentielle linéaire du second ordre à coefficients constants, il suffit de

- trouver toutes les solutions  $f_1$  de l'équation homogène selon la valeur du facteur de qualité  $Q$ .
- trouver une solution particulière  $f_2$  de l'équation différentielle avec second membre.
- sommer les solutions de l'équation homogène et la solution particulière  $f = f_1 + f_2$ .
- utiliser les conditions initiales  $f(0)$  et  $\frac{df}{dt}(0)$  pour déterminer les constantes d'intégration.

**Exercice 7 –**

1. Si on pose  $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$ , l'équation différentielle vérifiée par l'angle  $\theta$  devient

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \omega_0^2\theta = 0$$

On reconnaît une équation différentielle linéaire du second ordre à coefficients constants de type oscillateur harmonique.

**🎓 Cours**

Les solutions de l'équation différentielle du second ordre homogène à coefficients constants

$$\frac{d^2f}{dt^2} + \omega_0^2f = 0$$

sont les fonctions  $f_1$  telles que pour tout réel  $t$ , on a

$$f_1(t) = A \cos(\omega_0 t) + B \sin(\omega_0 t)$$

où  $\omega_0$  est la pulsation propre du système et où  $A$  et  $B$  sont deux constantes réelles. Cette équation différentielle linéaire du second ordre à coefficients constants est l'équation canonique d'un oscillateur harmonique. Dans un tel système, la dissipation est nulle et le facteur de qualité  $Q$  est infini.

La solution générale de cette dernière est, puisqu'elle est homogène,

$$\theta(t) = A \cos(\omega_0 t) + B \sin(\omega_0 t)$$

où  $A$  et  $B$  sont des constantes réelles déterminées avec les conditions initiales.

2. Sachant que  $\theta(0) = \theta_0$  et que la vitesse angulaire initiale vaut  $\frac{d\theta}{dt}(0) = \frac{v_0}{l}$ , on en déduit que les constantes  $A$  et  $B$  vérifient le système linéaire suivant

$$\begin{cases} \theta(0) = A = \theta_0 \\ \frac{d\theta}{dt}(0) = B\omega_0 = \frac{v_0}{l} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = \theta_0 \\ B = \frac{v_0}{\omega_0 l} \end{cases}$$

Finalement on trouve

$$\theta(t) = \theta_0 \cos(\omega_0 t) + \frac{v_0}{\omega_0 l} \sin(\omega_0 t)$$

**Exercice 8 –**

1. En posant la pulsation propre  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , l'équation différentielle s'écrit sous la forme canonique suivante

$$\frac{d^2u}{dt^2} + \omega_0^2u = \omega_0^2E$$

On reconnaît une équation différentielle linéaire du second ordre à coefficients constants de type oscillateur harmonique.

2. Les solutions de l'équation homogène sont les fonctions  $u_1$  telles que, pour tout  $t$ ,

$$u_1(t) = A \cos(\omega_0 t) + B \sin(\omega_0 t)$$

où  $A$  et  $B$  sont des constantes réelles. Par ailleurs, une solution particulière de l'équation différentielle est la fonction  $u_2$  telle que, pour tout  $t$ ,

$$u_2(t) = E$$

Par conséquent, la solution générale de l'équation différentielle est la fonction  $u$  telle que, pour tout réel  $t$ ,

$$u(t) = A \cos(\omega_0 t) + B \sin(\omega_0 t) + E$$

où  $A$  et  $B$  sont déterminées à l'aide des conditions initiales. Ces deux dernières amènent au système linéaire suivant

$$\begin{cases} u(0) = A + E = 0 \\ \frac{du}{dt}(0) = B\omega_0 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = -E \\ B = 0 \end{cases}$$

La solution de l'équation différentielle est finalement

$$u(t) = E[1 - \cos(\omega_0 t)]$$

### Exercice 9 –

1. L'équation différentielle linéaire du second ordre à coefficients constants peut se mettre sous la forme canonique suivante

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{du}{dt} + \omega_0^2 u = \frac{E}{\tau^2} \quad \text{avec} \quad \omega_0 = \frac{\sqrt{2}}{\tau} \quad \text{et} \quad Q = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

2. Puisque le facteur de qualité  $Q$  du circuit est supérieur à  $\frac{1}{2}$ , les solutions de l'équation différentielle homogène sont les fonctions  $u_1$  telles que pour tout réel  $t$

$$u_1(t) = [A \cos(\Omega t) + B \sin(\Omega t)] e^{-\frac{\omega_0}{2Q} t}$$

$$\text{où } \Omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}} = \frac{\omega_0}{\sqrt{2}}.$$

#### Cours

Si  $Q > \frac{1}{2}$ , les solutions de l'équation différentielle linéaire homogène du second ordre à coefficients constants

$$\frac{d^2 f}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{df}{dt} + \omega_0^2 f = 0$$

sont les fonctions  $f_1$  telles que, pour tout réel  $t$ ,

$$f_1(t) = [A \cos(\Omega t) + B \sin(\Omega t)] e^{-\frac{\omega_0}{2Q} t}$$

où  $\Omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}$  et où  $A$  et  $B$  sont deux constantes réelles.