1.7

Les oscillations amorties et forcées

Après l'étude de cette section, le lecteur pourra décrire l'oscillation d'un système bloc-ressort en présence d'une force d'amortissement proportionnelle à la vitesse du bloc (oscillation amortie), et expliquer ce qui se produit si une force qui varie de manière périodique agit sur le bloc (oscillation forcée).

Aperçu

Considérons un système bloc-ressort qui subit une **force d'amortissement** (symbole : $\vec{F}_{am}$) s'opposant à son mouvement (par exemple, une force de résistance exercée par un fluide). Si l'on donne un élan au bloc afin de le mettre en oscillation, on observe que l'oscillation possède une fréquence angulaire plus petite (donc une période plus grande) que s'il n'y avait pas d'amortissement. De plus, l'amplitude de l'oscillation diminue graduellement.

Supposons que le module de la force d'amortissement est proportionnel à la vitesse du bloc :

$$\boxed{\vec{F}_{am} = -b\vec{v}}$$

Force d'amortissement agissant sur un système bloc-ressort

(La force d'amortissement est dans le sens contraire de la vitesse du bloc, d'où le signe négatif.) Dans le SI, la **constante d'amortissement** (symbole : b) s'exprime en newtons-secondes par mètre (N·s/m), ce qui est équivalent à des kilogrammes par seconde (kg/s).

Dans ce cas, la fréquence angulaire naturelle de l'**oscillation amortie** (l'oscillation en présence de la force d'amortissement) est

$$\boxed{\omega' = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{b}{2m}\right)^2}}$$

Fréquence angulaire de l'oscillation amortie d'un système bloc-ressort

(Rappelons que la fréquence angulaire en l'absence d'amortissement est $\omega_0 = \sqrt{k/m}$.) L'équation qui décrit l'oscillation amortie est

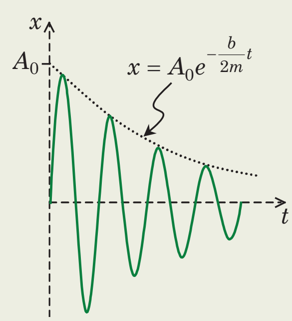
$$\boxed{x = A_0 e^{-\frac{b}{2m}t}\sin(\omega' t + \phi)}$$

Équation $x(t)$ pour une oscillation amortie

où A_0 est l'amplitude de l'oscillation à $t = 0$ (schéma ci-contre). Le terme

$$A_0 e^{-\frac{b}{2m}t}$$

correspond à l'amplitude de l'oscillation amortie : sa valeur diminue de manière exponentielle en fonction du temps.



Lorsque $b > 2\sqrt{mk}$, les deux équations encadrées précédentes ne peuvent pas être utilisées, car l'argument de la racine carrée dans l'équation qui donne ω' est négatif. Dans ce cas, qualifié d'**amortissement surcritique**, il n'y a pas d'oscillation : le bloc revient tout simplement à sa position d'équilibre (plus b est grand, plus le retour vers la position d'équilibre se fait lentement).

Imaginons que l'on exerce, sur le bloc d'un système bloc-ressort, une force externe qui oscille à la fréquence angulaire ω_{ext} :

$$F_{ext(x)} = F_{ext}\sin(\omega_{ext}t)$$

On est alors en présence d'une **oscillation forcée**. (Il faut supposer que le système bloc-ressort subit également une certaine force d'amortissement, sans quoi l'amplitude de l'oscillation augmenterait sans cesse sous l'effet de la force externe.) Au bout d'un certain temps, il s'établit un **régime permanent** pour lequel la puissance moyenne fournie au système par la force externe est exactement compensée par la puissance moyenne dissipée par la force d'amortissement. En régime permanent, on observe que le système oscille à la même fréquence que celle de la force externe (et ce, peu importe la fréquence naturelle d'oscillation du système) :

$$x = A\sin(\omega_{ext}t + \phi)$$

L'oscillation n'est pas nécessairement en phase avec la force externe, d'où la nécessité d'avoir une constante de phase ϕ dans l'équation.

Supposons que la constante d'amortissement est suffisamment petite pour que la fréquence angulaire de l'oscillation amortie soit à peu près égale à la fréquence angulaire naturelle ($\omega' \approx \omega_0 = \sqrt{k/m}$). Dans ce cas, on observe que l'amplitude de l'oscillation est maximale (le système est en *résonance*) lorsque la fréquence angulaire de la force externe est égale à la fréquence angulaire naturelle du système :

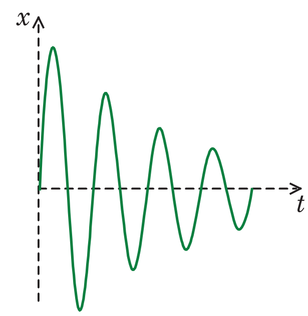
$$\omega_{ext} \approx \omega' \approx \omega_0$$

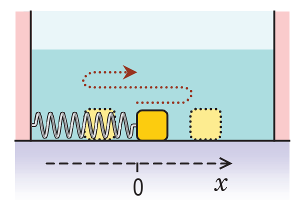
Exposé

À la fin de la **section 1.2 : La dynamique du mouvement harmonique simple**, nous avons introduit de manière qualitative les notions d'*oscillation amortie* et d'*oscillation forcée*, et nous avons décrit le phénomène de *résonance*. Dans la présente section, nous allons analyser ces notions plus en profondeur, en considérant le système oscillant le plus simple : un bloc de masse m qui oscille horizontalement à l'extrémité d'un ressort de constante de rappel k.

Les oscillations amorties

Sur le schéma ci-contre, nous avons représenté le graphique $x(t)$ d'une **oscillation amortie** : à $t = 0$, on donne un élan au bloc et on le laisse aller. On constate qu'à chaque période l'amplitude du mouvement est plus petite qu'à la période précédente. Cela est dû à une **force d'amortissement** (symbole : $\vec{F}_{\text{am}}$) qui transforme graduellement l'énergie mécanique initiale du système oscillant en énergie thermique. La manière exacte dont l'amplitude diminue avec le temps dépend du type de force d'amortissement. Dans cette section, nous allons limiter notre étude au cas où le module de la force d'amortissement est proportionnel à la vitesse du bloc. C'est ce qui se produit lorsque la force d'amortissement est due à la résistance causée par un fluide : par exemple, lorsqu'un système bloc-ressort oscille au fond d'un aquarium rempli d'eau (schéma ci-contre).





D'après la théorie que nous avons présentée dans le **tome A**, la force de frottement entre un bloc et une surface d'appui est indépendante de la vitesse du bloc : ainsi, nous allons supposer que le bloc glisse sur une surface sans frottement et que la seule force d'amortissement est due au fluide dans lequel est plongé le montage.

Sous forme d'équation, nous pouvons écrire

$$\boxed{\vec{F}_{\text{am}} = -b\vec{v}}$$

Force d'amortissement agissant sur un système bloc-ressort

où b, la **constante d'amortissement**, exprime l'importance de l'amortissement. Dans le SI, b s'exprime en newtons-secondes par mètre (N·s/m), ce qui est équivalent à des kilogrammes par seconde (kg/s). Le signe négatif dans l'équation indique que la force d'amortissement est dans le sens contraire de la vitesse du bloc.

Afin de déterminer l'équation $x(t)$ qui décrit l'oscillation amortie, nous allons employer une méthode semblable à celle que nous avons utilisée à la fin de la **section 1.3 : Le pendule composé** pour déterminer la fréquence angulaire de l'oscillation d'un pendule composé : nous allons écrire une équation *différentielle* qui caractérise le mouvement de l'objet.

Une équation différentielle est une équation qui fait intervenir à la fois une variable et ses dérivées d'ordre 1 ou supérieur.

Dans la **situation 1** de la **section 1.2**, nous avons analysé l'oscillation d'un système bloc-ressort et nous avons vu que la force exercée par le ressort sur le bloc est

$$F_x = -kx$$

Le signe négatif indique que la force du ressort tend toujours à ramener le bloc vers l'origine : lorsque la position x est positive, la force est orientée dans le sens négatif, et vice versa.

Si l'on ajoute la force d'amortissement, on obtient la force résultante qui agit sur le bloc :

$$\sum F_x = -kx - bv_x$$

(Selon la direction verticale, la force normale contrebalance le poids du bloc.) Or, d'après la deuxième loi de Newton, $\sum F_x = ma_x$, ce qui permet d'écrire

$$ma_x = -kx - bv_x$$

Or,

$$v_x = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} \qquad \text{et} \qquad a_x = \frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\right) = \frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}$$

Ainsi, le système bloc-ressort amorti est caractérisé par l'équation différentielle

$$m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} = -kx - b\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} \qquad \Rightarrow \qquad m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} + b\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} + kx = 0$$

Les techniques de résolution des équations différentielles dépassent le niveau de cet ouvrage. En les appliquant, on trouve la solution suivante :

$$\boxed{x = A_0 e^{-\frac{b}{2m}t}\sin(\omega' t + \phi)}$$

Équation $x(t)$ pour une oscillation amortie

Avec un peu de patience, en remplaçant les équations ci-contre dans l'équation différentielle et en appliquant les règles de dérivation (voir **section M10 : La dérivée** de l'annexe mathématique), on peut montrer que la solution est bonne !

où

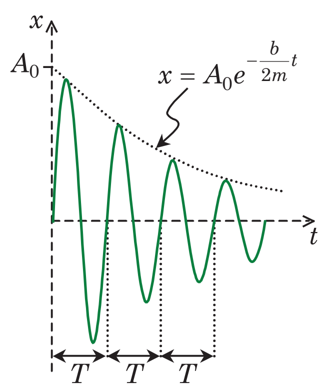
$$\boxed{\omega' = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{b}{2m}\right)^2}}$$

Fréquence angulaire de l'oscillation amortie d'un système bloc-ressort

Sur le schéma ci-contre, nous avons représenté le graphique de la fonction $x(t)$ représentant l'oscillation amortie. On peut interpréter ce graphique comme celui d'une fonction sinusoïdale dont l'amplitude

$$A_0 e^{-\frac{b}{2m}t}$$

diminue de manière exponentielle avec le temps. Malgré la diminution de l'amplitude, la période d'oscillation T demeure constante d'un cycle d'oscillation au suivant : à chaque aller-retour, la distance parcourue par le bloc est plus petite, mais la *durée* d'un aller-retour demeure la même.



En l'absence d'amortissement, nous avons vu à la **section 1.2 : La dynamique du mouvement harmonique simple** que la fréquence angulaire naturelle d'oscillation d'un système bloc-ressort est

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

La fréquence angulaire ω' de l'oscillation amortie est *plus petite* qu'en l'absence d'amortissement. Comme la période et la fréquence angulaire sont inversement proportionnelles ($T = 2\pi/\omega$), la période de l'oscillation amortie est *plus grande* qu'en l'absence d'amortissement.

Situation 1 : *Quand l'oscillation cesse-t-elle d'être perceptible ?* Un bloc de 0,5 kg oscille au bout d'un ressort dont la constante de rappel est de 5 N/m. À $t = 0$, l'amplitude de l'oscillation est de 10 cm ; 8 s plus tard, l'amplitude n'est plus que de 3 cm. (La force d'amortissement est proportionnelle à la vitesse du bloc.) Le mouvement d'oscillation cesse d'être perceptible lorsque l'amplitude devient inférieure à 1 mm : on désire déterminer à quel instant t cela se produit et combien d'oscillations complètes le bloc effectue entre $t = 0$ et cet instant.

Comme la force d'amortissement est proportionnelle à la vitesse du bloc, nous pouvons utiliser la théorie que nous venons de présenter. Nous avons une amplitude initiale $A_0 = 10$ cm, et nous savons qu'à $t = 8$ s, l'amplitude est $A = 3$ cm. Ainsi,

$$A_0 e^{-\frac{b}{2m}t} = A$$

$$(10\ \text{cm})e^{-\frac{b}{2m}t} = (3\ \text{cm})$$

$$e^{-\frac{b}{2m}t} = \frac{(3\ \text{cm})}{(10\ \text{cm})} = 0{,}3$$

En appliquant le logarithme naturel de part et d'autre de l'équation, nous obtenons

$$-\frac{b}{2m}t = \ln(0{,}3)$$

Comme $m = 0{,}5$ kg, nous pouvons isoler b :

$$b = -\frac{2m\ln(0{,}3)}{t} = -\frac{2\times(0{,}5\ \text{kg})\times(-1{,}204)}{(8\ \text{s})} = 0{,}1505\ \text{kg/s}$$

Nous voulons calculer à quel instant t l'amplitude est $A = 1$ mm $= 0{,}1$ cm :

$$A_0 e^{-\frac{b}{2m}t} = A$$

$$(10\ \text{cm})e^{-\frac{b}{2m}t} = (0{,}1\ \text{cm})$$

$$e^{-\frac{b}{2m}t} = \frac{(0{,}1\text{cm})}{(10\ \text{cm})} = 0{,}01$$

$$-\frac{b}{2m}t = \ln(0{,}01)$$

$$t = -\frac{2m\ln(0{,}01)}{b} = -\frac{2\times(0{,}5\ \text{kg})\times(-4{,}605)}{(0{,}1505\ \text{kg/s})}$$

$$\boxed{t = 30{,}6\ \text{s}}$$

Il est intéressant de remarquer que le terme $(b/2m)^2$ n'influence la valeur de ω' que si l'on garde une précision d'au moins quatre chiffres significatifs.

Comme $k = 5$ N/m, la fréquence angulaire de l'oscillation est

$$\omega' = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{b}{2m}\right)^2} = \sqrt{\frac{(5\ \text{N/m})}{(0{,}5\ \text{kg})} - \left(\frac{(0{,}1505\ \text{kg/s})}{2\times(0{,}5\ \text{kg})}\right)^2} = 3{,}159\ \text{rad/s}$$

ce qui correspond à une période

$$T = \frac{2\pi}{\omega'} = \frac{2\pi}{(3{,}159\ \text{rad/s})} = 1{,}989\ \text{s}$$

Comme

$$\frac{t}{T} = \frac{(30{,}6\ \text{s})}{(1{,}989\ \text{s})} = 15{,}4$$

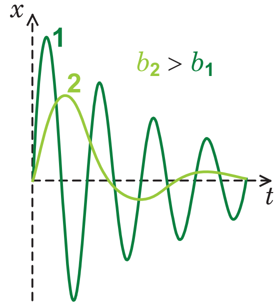
le mouvement cesse d'être perceptible au bout de $\boxed{15\ \text{oscillations}}$.

L'amortissement surcritique

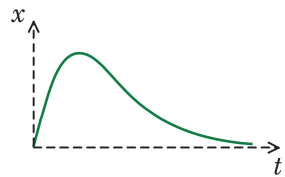
Plus la constante d'amortissement b est grande, plus l'amplitude de l'oscillation amortie diminue rapidement (schéma ci-contre). De plus, d'après l'équation

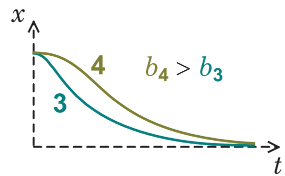
$$\omega' = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{b}{2m}\right)^2}$$

plus la constante d'amortissement b est grande, plus la fréquence angulaire ω' est petite, et plus la période de l'oscillation amortie ($T = 2\pi/\omega'$) est grande.



Lorsque $b > 2\sqrt{mk}$, l'argument de la racine carrée dans l'équation qui donne ω' est négatif : le système ne possède plus de fréquence angulaire, ce qui signifie qu'il n'y a plus d'oscillation. Si l'on donne un élan au bloc, il commence par s'éloigner de sa position d'équilibre, puis il y revient graduellement (schéma ci-contre, en haut). On dit alors que le système possède un **amortissement surcritique**. (Le cas « critique », qui sépare les systèmes oscillants des systèmes non oscillants, correspond à $b = 2\sqrt{mk}$.) Si on déplace le bloc de sa position d'équilibre et qu'on le lâche, le temps qu'il prend pour revenir à sa position d'équilibre est d'autant plus long que la constante d'amortissement b est grande (schéma ci-contre, en bas).





Les amortisseurs des voitures (photo ci-contre) sont conçus pour minimiser les chocs causés par les irrégularités de la route : on veut que la voiture revienne rapidement à sa position d'équilibre, mais qu'elle ne fasse pas plusieurs oscillations autour de sa position d'équilibre (ce qui donnerait la nausée aux passagers). Ainsi, un amortisseur en bon état possède une constante d'amortissement voisine de la valeur critique.

ISTOCKPHOTO

Les oscillations forcées

Nous allons maintenant voir ce qui se passe si, au lieu de donner un élan à un système bloc-ressort amorti et de le laisser aller, on exerce continuellement sur lui une force, afin d'*entretenir* l'oscillation. Si la force oscille (on « tire » et on « pousse » sur l'objet de manière périodique), il est possible de contrebalancer les effets de l'amortissement et d'obtenir un MHS (amplitude constante).

Nous avons vu que la force résultante qui s'exerce sur le bloc d'un système bloc-ressort amorti est

$$\sum F_x = -kx - bv_x$$

Afin de créer une **oscillation forcée**, nous allons exercer sur le bloc une force externe qui oscille à une certaine fréquence angulaire, que nous allons appeler ω_{ext} :

$$F_{\text{ext}(x)} = F_{\text{ext}} \sin(\omega_{\text{ext}} t)$$

(La fréquence angulaire de la force externe, ω_{ext}, n'est pas nécessairement égale à la fréquence angulaire à laquelle le système oscille naturellement, ω'.)

Le bloc subit une force résultante

$$\sum F_x = -kx - bv_x + F_{\text{ext}} \sin(\omega_{\text{ext}} t)$$

et l'équation différentielle qui caractérise son mouvement est

$$m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} + b\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} + kx = F_{\text{ext}} \sin(\omega_{\text{ext}} t)$$

Cette équation admet des solutions passablement complexes. Si l'on suppose que la force externe commence à agir à $t = 0$, la fonction $x(t)$ est non périodique pendant un certain temps, puis elle adopte un comportement périodique : on dit alors que le système a atteint son **régime permanent**. En régime permanent, la puissance moyenne fournie au système par la force externe est exactement compensée par la puissance moyenne dissipée par la force d'amortissement.

On observe que le régime permanent est un MHS de même fréquence que celle de la force externe, et ce, peu importe la fréquence naturelle d'oscillation du système :

$$x = A \sin(\omega_{\text{ext}} t + \phi)$$

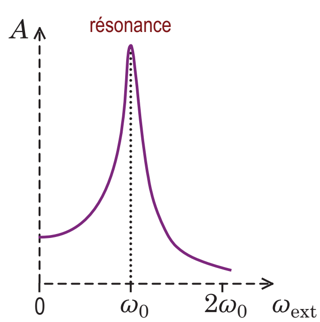
L'oscillation n'est pas nécessairement en phase avec la force externe, d'où la nécessité d'avoir une constante de phase ϕ dans l'équation.

La résonance

L'amplitude A d'une oscillation forcée dépend, de manière complexe, de l'amplitude de la force externe (F_{ext}), de la constante d'amortissement (b) et de la fréquence angulaire de la force externe (ω_{ext}). Si l'on fait varier ω_{ext} (en gardant les autres paramètres constants), on observe que l'amplitude passe par un maximum pour une certaine fréquence : le système est alors en *résonance*.

Le graphique ci-contre correspond à la situation où la constante d'amortissement est 10 fois plus petite que sa valeur critique : $b = 0{,}2\sqrt{mk}$. Dans ce cas, la fréquence de résonance diffère de la fréquence naturelle par moins de 1 %.

Lorsque $\omega_{\text{ext}} = 0$, la force externe est constante ($F = F_{\text{ext}}$) et l'amplitude est égale au module de la force divisée par la constante de rappel du ressort : $A = F_{\text{ext}}/k$.



$\omega_{\text{rés}} \approx \omega_0$

Supposons que la constante d'amortissement est suffisamment petite pour que la fréquence angulaire de l'oscillation amortie soit à peu près égale à la fréquence angulaire naturelle :

$$\omega' = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{b}{2m}\right)^2} \approx \sqrt{\frac{k}{m}} = \omega_0$$

Dans ce cas, on observe que la fréquence angulaire de la force externe qui correspond à la résonance est à peu près égale à la fréquence angulaire naturelle du système (graphique ci-contre).

GLOSSAIRE

amortissement surcritique : situation où un système, qui oscillerait en l'absence de force d'amortissement, subit une force d'amortissement si grande que, si on le perturbe, il revient simplement à sa position d'équilibre sans osciller.

constante d'amortissement : (symbole : b) rapport du module de la force d'amortissement sur celui de la vitesse de l'objet qui la subit ; sert à décrire la force d'amortissement lorsqu'elle est proportionnelle à la vitesse de l'objet ; unité SI : kg/s.

force d'amortissement : (symbole : $\vec{F}_{am}$) force qui s'oppose au mouvement d'oscillation d'un objet et qui est responsable de son amortissement.

oscillation amortie : oscillation dont l'amplitude diminue en raison d'une force d'amortissement.

oscillation forcée : oscillation d'un objet qui subit une force oscillante (on « tire » et on « pousse » sur l'objet de manière périodique).

régime permanent : situation « stable » qui se produit au bout d'un certain temps ; dans le cas d'une oscillation forcée, il s'agit d'un mouvement harmonique simple, de même fréquence que la force externe oscillante, pour lequel la puissance moyenne fournie au système par la force externe est exactement compensée par la puissance moyenne dissipée par la force d'amortissement.

QUESTIONS

Q1. Vrai ou faux ? La fréquence angulaire d'une oscillation amortie est plus petite qu'en l'absence d'amortissement.

Q2. Dans un système bloc-ressort amorti, quelle est la différence entre le comportement du bloc pour $b < 2\sqrt{mk}$ et pour $b > 2\sqrt{mk}$?

Q3. Expliquez pourquoi les amortisseurs placés sur les roues des voitures doivent avoir une constante d'amortissement voisine de la valeur critique.

Q4. Vrai ou faux ? En régime permanent, la fréquence d'oscillation d'un système-bloc ressort est égale à la fréquence de la force oscillante qu'il subit.

Q5. Expliquez ce qui se passe lorsqu'un système bloc-ressort qui oscille de manière forcée est en résonance.

DÉMONSTRATIONS

D1. Montrez que l'oscillation d'un système bloc-ressort en présence d'une force d'amortissement dont le module est proportionnel à celui de la vitesse du bloc est décrite par l'équation différentielle

$$m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}+b\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}+kx=0$$

D2. À partir de l'équation qui donne la fréquence d'une oscillation amortie,

$$\omega' = \sqrt{\frac{k}{m}-\left(\frac{b}{2m}\right)^2}$$

déterminez pour quelles valeurs de b l'amortissement est surcritique.

EXERCICES

Tous les exercices font référence à des systèmes bloc-ressort qui oscillent en présence d'une force d'amortissement dont le module est proportionnel à celui de la vitesse du bloc.

SÉRIE PRINCIPALE

1.7.1 ***Le temps de retour à la position centrale de l'oscillation.*** Un bloc de 0,5 kg est fixé à un ressort dont la constante de rappel est de 12,5 N/m. On lâche le bloc (vitesse initiale nulle) alors que le ressort est étiré de 20 cm. Calculez le temps que met le ressort pour revenir pour la première fois à sa longueur naturelle si **(a)** $b = 0$ (amortissement négligeable) ; **(b)** $b = 1$ kg/s ; **(c)** $b = 4$ kg/s. **(d)** À partir de quelle valeur de b les équations utilisées pour résoudre les parties (b) et (c) cessent-elles d'être valables ?

1.7.2 ***Une oscillation deux fois plus lente en raison de l'amortissement.*** Sur une surface horizontale sans frottement, un bloc de masse m oscille au bout d'un ressort de constante de rappel k : l'amortissement est négligeable. Lorsqu'on remplit le montage de liquide, on observe que la fréquence d'oscillation est deux fois plus petite qu'avant. Déterminez la valeur de la constante d'amortissement.

1.7.3 ***Lorsque l'amortissement vaut 80 % de sa valeur critique.*** Un système bloc-ressort de masse m et de constante de rappel k subit une constante d'amortissement $b = 1{,}6\sqrt{mk}$ (c'est-à-dire 80 % de sa valeur critique). Calculez le rapport ω'/ω_0, où ω' est la fréquence angulaire de l'oscillation amortie et ω_0 est la fréquence angulaire naturelle en l'absence d'amortissement.

SÉRIE SUPPLÉMENTAIRE

1.7.4 ***L'amplitude diminue de moitié en une période.*** Un bloc de 250 g oscille au bout d'un ressort dont la constante de rappel est de 65 N/m. Sachant que l'amplitude de l'oscillation amortie diminue de moitié à chaque période de l'oscillation, déterminez la valeur de la constante d'amortissement.

1.7.5 ***L'amplitude diminue de moitié en une période, prise 2.*** Reprenez l'analyse de l'**exercice 1.7.4** sans remplacer les valeurs numériques, afin d'exprimer de manière algébrique la relation entre la constante d'amortissement b, la masse du bloc m et la constante de rappel k.

1.7.6 ***La vitesse au centre de l'oscillation.*** **(a)** À partir de l'équation de la position en fonction du temps pour une oscillation amortie, montrez que l'équation

$$v_x = A_0\omega' e^{-\frac{b}{2m}t}\cos(\omega' t+\phi)$$

permet de calculer la vitesse du bloc aux instants où il passe par la position centrale de l'oscillation. **(b)** Pourquoi l'équation donnée en (a) peut-elle être utilisée uniquement lorsque le bloc passe par la position centrale de l'oscillation ?

1.7.7 ***La vitesse au centre de l'oscillation, prise 2.*** Pour les situations de l'**exercice 1.7.1 (a)**, **(b)** et **(c)**, déterminez le module de la vitesse du bloc lorsque le ressort revient pour la première fois à sa longueur naturelle.

1.7.8 ***Deux passages consécutifs par la position d'équilibre.*** Un bloc de 2 kg est fixé à un ressort dont la constante de rappel est de 18 N/m. On lâche le bloc (vitesse initiale nulle) alors que le ressort est étiré de 40 cm : 0,6 s plus tard, le bloc passe pour la première fois à la position d'équilibre. Déterminez le module de la vitesse du bloc lorsqu'il passe à la position d'équilibre **(a)** pour la première fois et **(b)** pour la deuxième fois.