Corrigé complet — Bac S 2003 La Réunion (ancien programme)

Physique-chimie, Bac S (épreuve écrite) **16 points** **3 h 30**

Ex 1	**Elaboration du zinc par électrolyse** Électrolyse · Réactions aux électrodes · Transformation forcée · Tableau d'avancement · Quantité d'électricité · Volume molaire d'un gaz	6,5 pts	1 h 18	9 questions	p. 2
Ex 2	**Spécialité : Modélisation d'un microscope sur banc optique** Vergence et distance focale · Relation de conjugaison · Grandissement · Image à l'infini et œil au repos · Construction de rayons · Grossissement	4 pts	52 min	10 questions	p. 5
Ex 3	**Mécanisme de fusion de l'hydrogène dans une étoile** Fusion et fission nucléaires · Interaction électrostatique · Lois de conservation · Perte de masse · Équivalence masse-énergie	4 pts	52 min	9 questions	p. 9
Ex 4	**Oscillations libres et forcées** Équilibre et raideur d'un ressort · Période propre · Analyse dimensionnelle · Amortissement · Oscillations forcées et résonance	5,5 pts	1 h 05	14 questions	p. 12

Comment s'en servir. Fais d'abord le sujet en temps limité, puis corrige-toi exercice par exercice. À gauche de chaque question, sur les carreaux : ce qu'il faut écrire sur ta copie. À droite : les pièges, ce qu'il faut comprendre et les méthodes.

Elaboration du zinc par électrolyse

Bac S 2003 La Réunion (ancien programme) · Exercice 1 **6,5 points** **Durée conseillée 1 h 18**

1 (Partie A) Quelles réactions peuvent se produire sur chaque électrode, sachant que c'est le solvant qui est oxydé en dioxygène ?

Données utiles couples $Zn^{2+}(aq)/Zn(s)$; $H^+(aq)/H_2(g)$; $O_2(g)/H_2O(l)$

À l'anode a lieu une oxydation. Le solvant, l'eau, y est oxydé :

$$2\,H_2O(l) = O_2(g) + 4\,H^+(aq) + 4\,e^-$$

À la cathode a lieu une réduction. Deux oxydants sont présents dans la solution, Zn^{2+} et H^+, d'où deux réactions envisageables :

$$Zn^{2+}(aq) + 2\,e^- = Zn(s) \qquad 2\,H^+(aq) + 2\,e^- = H_2(g)$$

Anode : oxydation de l'eau en O_2. Cathode : réduction de Zn^{2+} en Zn ou de H^+ en H_2.

MÉTHODE
Recenser les espèces présentes au départ : seul un réducteur présent peut être oxydé à l'anode, seul un oxydant présent peut être réduit à la cathode. Les ions sulfate sont écartés par l'énoncé.

2 (Partie A) Schématiser l'électrolyseur en précisant le nom de chaque électrode, leur polarité et le sens de déplacement des espèces chargées.

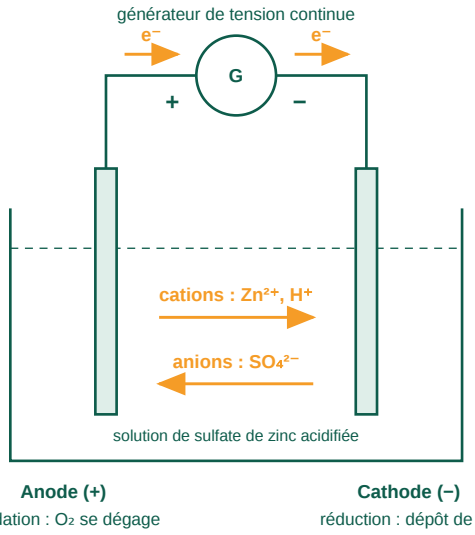
L'anode, siège de l'oxydation, est reliée à la borne $+$ du générateur ; la cathode, siège de la réduction, à la borne $-$.

Dans les fils, les électrons quittent l'anode, traversent le générateur et arrivent à la cathode.

Dans la solution, les cations (Zn^{2+}, H^+) migrent vers la cathode et les anions (SO_4^{2-}) vers l'anode.

Schéma ci-dessous : anode $(+)$, cathode $(-)$, électrons de l'anode vers la cathode par le circuit extérieur.

PIÈGE
Reprendre les signes d'une pile. Dans un électrolyseur, c'est le générateur qui impose le sens du courant : l'anode est reliée à sa borne positive. Seule la définition ne change pas : oxydation à l'anode, réduction à la cathode.



2 · Schéma de l'électrolyseur

3 (Partie A) En justifiant le choix des couples, vérifier que l'équation de la réaction globale est $\mathrm{Zn^{2+}\,(aq) + H_2O\,(l) = Zn\,(s) + \frac{1}{2}\,O_2\,(g) + 2\,H^+\,(aq)}$.

On observe un dépôt métallique sur une électrode et un dégagement gazeux sur l'autre seulement. Le gaz est le dioxygène formé à l'anode ; à la cathode il se dépose donc du zinc, sans dégagement de dihydrogène. Les couples mis en jeu sont $\mathrm{O_2/H_2O}$ et $\mathrm{Zn^{2+}/Zn}$.

Anode : $\mathrm{H_2O\,(l) = \frac{1}{2}\,O_2\,(g) + 2\,H^+\,(aq) + 2\,e^-}$ (demi-équation de la question 1 divisée par 2)

Cathode : $\mathrm{Zn^{2+}\,(aq) + 2\,e^- = Zn\,(s)}$

Les deux demi-équations échangent 2 électrons ; on les additionne :

$\mathrm{Zn^{2+}\,(aq) + H_2O\,(l) = Zn\,(s) + \frac{1}{2}\,O_2\,(g) + 2\,H^+\,(aq)}$: c'est l'équation proposée.

COMPRENDRE
Le nombre $\frac{1}{2}$ devant $\mathrm{O_2}$ est acceptable : une équation de réaction se lit en moles, et une demi-mole de dioxygène a un sens. Il n'y a jamais d'électron dans l'équation globale.

4 (Partie A) S'agit-il d'une transformation spontanée ou forcée ? Pourquoi ? Quelle vérification théorique proposer ?

La transformation est forcée : elle n'a lieu que parce que le générateur fournit de l'énergie électrique et impose le sens de circulation des électrons. Sans lui, une solution acidifiée de sulfate de zinc ne donne ni zinc métallique ni dioxygène.

Vérification théorique : calculer le quotient de réaction initial $Q_{r,i}$ et le comparer à la constante d'équilibre K de la réaction d'électrolyse. On trouverait $Q_{r,i} > K$: le sens spontané est le sens inverse de celui observé.

Transformation forcée par le générateur ; on le vérifie en montrant que $Q_{r,i} > K$.

COMPRENDRE
Lors d'une électrolyse, le système s'éloigne de l'état d'équilibre : Q_r évolue en s'écartant de K. C'est l'inverse d'une pile, où la transformation est spontanée et Q_r se rapproche de K.

5 (Partie A) Établir le tableau d'avancement correspondant à la réaction d'électrolyse.

On note n la quantité initiale d'ions zinc. L'eau, solvant, est en excès ; les ions $\mathrm{H^+}$ sont déjà très abondants puisque la solution est acidifiée.

État	$\mathrm{Zn^{2+}}$	$+\,\mathrm{H_2O}$	$=\,\mathrm{Zn}$	$+\,\frac{1}{2}\,\mathrm{O_2}$	$+\,2\,\mathrm{H^+}$
initial ($x = 0$)	n	excès	0	0	excès
en cours (x)	$n - x$	excès	x	$\frac{x}{2}$	excès
final (x_f)	$n - x_f$	excès	x_f	$\frac{x_f}{2}$	excès

Pour un avancement x (en mol) : $n(\mathrm{Zn}) = x$ et $n(\mathrm{O_2}) = \frac{x}{2}$.

PIÈGE
Écrire x dans la colonne du dioxygène. Le nombre stœchiométrique $\frac{1}{2}$ donne $\frac{x}{2}$: il se forme deux fois moins de dioxygène que de zinc, en quantité de matière.

1 (Partie B) Quelle est la relation entre l'avancement x de la réaction et la quantité d'électricité Q transportée dans l'électrolyseur ?

D'après la demi-équation $\mathrm{Zn^{2+} + 2\,e^- = Zn}$, la formation de x mol de zinc nécessite $n(\mathrm{e^-}) = 2x$ mol d'électrons.

Une mole d'électrons transporte la charge F (un faraday), donc $Q = n(\mathrm{e^-}) \times F$.

$Q = 2\,x\,F$

MÉTHODE
Le nombre d'électrons échangés ne se lit pas dans l'équation globale mais dans les demi-équations : ici 2 électrons chaque fois que la réaction « a lieu une fois ».

2 (Partie B) Quel est l'ordre de grandeur de la masse de zinc produite par une cellule en 2 jours ?

Données utiles $I = 80\ \text{kA}$; $\Delta t = 48\ \text{h}$; $M(\text{Zn}) \approx 65\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $F \approx 10^5\ \text{C}\cdot\text{mol}^{-1}$; $65 \times 8 \times 36 \times 48 \approx 9 \times 10^5$; $Q = 2xF$ (question précédente)

La quantité d'électricité vaut aussi $Q = I\,\Delta t$, donc $x = \dfrac{I\,\Delta t}{2F}$.

D'après le tableau d'avancement, $n(\text{Zn}) = x$, d'où :

$$m(\text{Zn}) = x\,M(\text{Zn}) = \frac{I\,\Delta t\,M(\text{Zn})}{2F}$$

Avec $I = 8 \times 10^4$ A et $\Delta t = 48 \times 36 \times 10^2$ s :

$$m(\text{Zn}) = \frac{8 \times 10^4 \times 48 \times 36 \times 10^2 \times 65}{2 \times 10^5} = \frac{9 \times 10^5 \times 10^6}{2 \times 10^5} = 4{,}5 \times 10^6\ \text{g}$$

$m(\text{Zn}) \approx 4{,}5 \times 10^6$ g, soit environ 4,5 tonnes : ordre de grandeur 10^6 g.

PIÈGE
Laisser l'intensité en kA ou la durée en heures. La relation $Q = I\,\Delta t$ exige des ampères et des secondes : $48\ \text{h} = 48 \times 3600\ \text{s}$.

COMPRENDRE
Sans calculatrice, on regroupe les facteurs pour faire apparaître les produits fournis en fin d'énoncé. Avec des données arrondies (F, M), le résultat n'est fiable qu'à un chiffre significatif : seul l'ordre de grandeur est demandé.

3 (Partie B) En fait, on obtient une quantité de zinc inférieure à celle attendue. Pourquoi ?

Le calcul suppose que tous les électrons débités servent à réduire les ions Zn^{2+}. Or la solution est acide : une partie des électrons réduit les ions H^+ en dihydrogène à la cathode (réaction envisagée à la question A.1). Ces électrons sont perdus pour le dépôt de zinc.

De plus, 80 kA est l'intensité maximale (« peut atteindre ») : si l'intensité est plus faible pendant une partie des 48 h, la quantité d'électricité réelle est inférieure à celle calculée.

Une réaction concurrente (réduction de H^+ en H_2) consomme une partie des électrons, et l'intensité n'est pas toujours maximale.

4 (Partie B) Le rendement de la réaction produisant le dioxygène est de 80 %. Donner la relation entre l'avancement x et le volume v de dioxygène récupéré, puis l'ordre de grandeur de v.

Données utiles $V_m = 24\ \text{L}\cdot\text{mol}^{-1}$; rendement $\eta = 0{,}80$; $8 \times 48 \times 36 \approx 1{,}4 \times 10^4$; $x = \dfrac{I\,\Delta t}{2F}$ (question précédente B.2)

D'après le tableau d'avancement, la quantité de dioxygène attendue est $\dfrac{x}{2}$, soit un volume $\dfrac{x}{2}V_m$. Avec un rendement η, on n'en récupère que la fraction η :

$$v = \eta\,\frac{x}{2}\,V_m$$

Calcul de l'avancement :

$$x = \frac{I\,\Delta t}{2F} = \frac{8 \times 10^4 \times 48 \times 36 \times 10^2}{2 \times 10^5} = \frac{1{,}4 \times 10^4 \times 10^6}{2 \times 10^5} = 7 \times 10^4\ \text{mol}$$

Volume récupéré :

$$v = 0{,}80 \times \frac{7 \times 10^4}{2} \times 24 = 2{,}8 \times 10^4 \times 24 \approx 6{,}7 \times 10^5\ \text{L}$$

$v = \eta\,\dfrac{x}{2}\,V_m \approx 7 \times 10^5$ L (environ $700\ \text{m}^3$) : ordre de grandeur 10^6 L.

PIÈGE
Diviser par le rendement au lieu de multiplier : on récupère moins de gaz que prévu, donc v est inférieur au volume théorique. Ne pas oublier non plus le facteur $\frac{1}{2}$ du dioxygène.

COMPRENDRE
$6{,}7 \times 10^5$ est plus proche de 10^6 que de 10^5 : l'ordre de grandeur est la puissance de dix la plus proche de la valeur.

Spécialité : Modélisation d'un microscope sur banc optique

Bac S 2003 La Réunion (ancien programme) · Exercice 2 **4 points** **Durée conseillée 52 min**

A Déterminer les distances focales des deux lentilles.

Données utiles $C_1 = 10\ \delta$; $C_2 = 5\ \delta$

La distance focale image est l'inverse de la vergence : $f' = \dfrac{1}{C}$, avec f' en mètre et C en dioptrie.

Objectif : $f'_1 = \dfrac{1}{10} = 0{,}10\ \text{m}$ Oculaire : $f'_2 = \dfrac{1}{5} = 0{,}20\ \text{m}$

$f'_1 = 10\ \text{cm}$ et $f'_2 = 20\ \text{cm}$

PIÈGE
La dioptrie vaut $1\ \text{m}^{-1}$: l'inverse de la vergence donne des mètres, pas des centimètres.

COMPRENDRE
Plus la vergence est grande, plus la lentille est convergente et plus sa distance focale est courte : l'objectif est ici deux fois plus convergent que l'oculaire.

B.1 Calculer, avec la relation de conjugaison, la position de l'image intermédiaire A_1B_1 formée sur l'écran.

Données utiles objet à 15 cm devant O_1 ; $C_1 = 10\ \delta$

Relation de conjugaison pour L_1 : $\dfrac{1}{\overline{O_1A_1}} - \dfrac{1}{\overline{O_1A}} = \dfrac{1}{f'_1} = C_1$

L'objet est avant la lentille : $\overline{O_1A} = -0{,}15\ \text{m}$.

$$\frac{1}{\overline{O_1A_1}} = C_1 + \frac{1}{\overline{O_1A}} = \frac{1}{0{,}10} - \frac{1}{0{,}15} = \frac{3}{0{,}30} - \frac{2}{0{,}30} = \frac{1}{0{,}30}\ \text{m}^{-1}$$

$\overline{O_1A_1} = 0{,}30\ \text{m}$: l'image se forme sur un écran placé 30 cm après l'objectif.

PIÈGE
Oublier le signe de $\overline{O_1A}$: avec $+0{,}15$ m, on trouve une image à 6 cm, ce qui est faux.

COMPRENDRE
$\overline{O_1A_1} > 0$: l'image est réelle, après la lentille, donc recueillie sur un écran. Résultat à deux chiffres significatifs, comme les données.

MÉTHODE
Sans calculatrice, réduire les fractions au même dénominateur $(0{,}30)$ plutôt que de passer par des valeurs décimales approchées comme $6{,}67$.

B.2 Calculer le grandissement de l'objectif. En déduire la taille de l'image intermédiaire A_1B_1.

Données utiles $AB = 5{,}0\ \text{mm}$; $\overline{O_1A} = -0{,}15\ \text{m}$; $\overline{O_1A_1} = 0{,}30\ \text{m}$ (B.1)

$$\gamma_1 = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{O_1A_1}}{\overline{O_1A}} = \frac{0{,}30}{-0{,}15} = -2{,}0$$

$$\overline{A_1B_1} = \gamma_1 \times \overline{AB} = -2{,}0 \times 5{,}0 = -10\ \text{mm}$$

$\gamma_1 = -2{,}0$; l'image intermédiaire mesure $A_1B_1 = 10\ \text{mm} = 1{,}0\ \text{cm}$: elle est renversée et deux fois plus grande que l'objet.

COMPRENDRE
Le signe de γ_1 indique le sens de l'image (négatif : renversée), sa valeur absolue indique l'agrandissement. Une taille, elle, se donne positive.

C.1 L'œil n'accommode pas. Que dire de la position de l'image définitive $A'B'$? Quelle doit être la position particulière de A_1B_1 ?

Un œil normal qui n'accommode pas voit nets les objets très éloignés : l'image définitive $A'B'$ est donc à l'infini.

Une lentille convergente donne une image à l'infini d'un objet situé dans son plan focal objet : A_1B_1 doit être dans le plan focal objet de l'oculaire, A_1 confondu avec F_2.

Vérification : $\overline{O_2A_1} = \overline{O_1A_1} - \overline{O_1O_2} = 0{,}30 - 0{,}50 = -0{,}20\ \text{m} = -f'_2$.

$A'B'$ est à l'infini ; A_1 est en F_2, à 20 cm avant l'oculaire.

COMPRENDRE
C'est la même condition que pour la lunette astronomique : l'image intermédiaire dans le plan focal objet de l'oculaire permet une observation sans fatigue.

C.2 Expliquer pourquoi la qualité de l'image $A'B'$ est améliorée par un diaphragme de faible diamètre (15 mm) placé contre l'objectif.

Le diaphragme arrête les rayons qui frappent les bords de l'objectif. Il ne laisse passer que ceux qui traversent la lentille près du centre optique et qui sont peu inclinés sur l'axe : les conditions de Gauss sont mieux respectées.

Chaque point de l'objet donne alors une image quasi ponctuelle.

L'image est plus nette et sans bords colorés, mais elle est moins lumineuse.

COMPRENDRE
Les relations de conjugaison et de grandissement ne valent que dans les conditions de Gauss. Les rayons marginaux ne convergent pas exactement au même point que les rayons centraux, d'où le flou.

D.1 Faire un schéma du dispositif à l'échelle 1/5 horizontalement et 1/1 verticalement sur le papier millimétré.

Données utiles $O_1O_2 = 50$ cm ; diamètre des lentilles : 4 cm

Échelle horizontale 1/5 : 1 cm sur le papier représente 5 cm. La distance $O_1O_2 = 50$ cm est représentée par 10 cm.

Échelle verticale 1/1 : chaque lentille est une double flèche de 4 cm, centrée sur l'axe optique et perpendiculaire à celui-ci.

Axe optique horizontal, L_1 et L_2 distantes de 10 cm sur le papier (schéma en D.2).

MÉTHODE
Placer O_1 à 3 cm au moins du bord gauche et garder 6 cm à droite de O_2 : l'objet et F_2' doivent tenir sur la feuille.

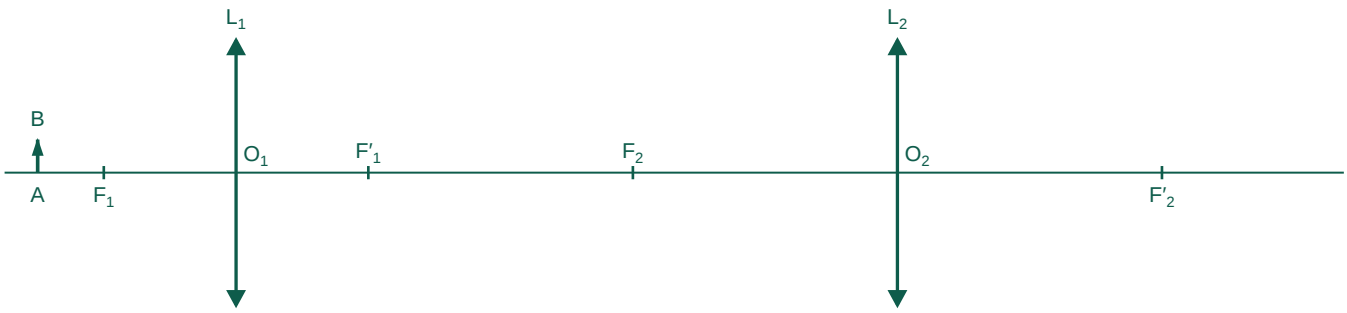
D.2 Placer les foyers F_1, F_1', F_2, F_2' des lentilles et l'objet AB (flèche de hauteur 5 mm).

Données utiles $f_1' = 10$ cm ; $f_2' = 20$ cm (A) ; objet à 15 cm de O_1

Sur le papier, à l'échelle 1/5 : $O_1F_1 = O_1F_1' = 2$ cm ; $O_2F_2 = O_2F_2' = 4$ cm ; A est à 3 cm à gauche de O_1.

Les foyers objets F_1 et F_2 sont à gauche de leur lentille, les foyers images F_1' et F_2' à droite. AB est une flèche verticale de 5 mm, A sur l'axe.

Schéma ci-dessous : F_2 se trouve à 6 cm de O_1 sur le papier, soit 30 cm en réalité.



D.2 · Dispositif : 1 cm sur le papier pour 5 cm horizontalement, taille réelle verticalement

D.3 Construire l'image intermédiaire A_1B_1 et l'image définitive $A'B'$.

Trois rayons issus de B traversent L_1 :

- le rayon parallèle à l'axe émerge en passant par F'_1 ;
- le rayon passant par O_1 n'est pas dévié ;
- le rayon passant par F_1 émerge parallèle à l'axe.

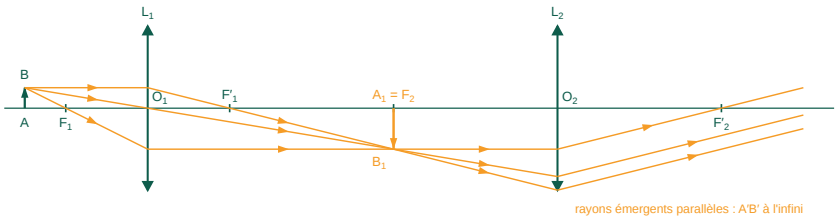
Ils se coupent en B_1 ; A_1 est le projeté de B_1 sur l'axe. On lit A_1 en F_2 et $A_1B_1 = 1{,}0\ \text{cm}$, en accord avec B.1 et B.2.

Après L_2 : le rayon arrivant parallèle à l'axe émerge par F'_2. Comme B_1 est dans le plan focal objet de L_2, les autres rayons émergent parallèles à celui-ci, donc parallèles à la droite (B_1O_2).

A_1B_1 est réelle, renversée, en F_2 ; $A'B'$ est à l'infini (rayons émergents parallèles entre eux).

PIÈGE
Arrêter les rayons en B_1. L'image intermédiaire n'est pas un obstacle : les rayons se prolongent jusqu'à L_2, puis sont déviés.

COMPRENDRE
Le rayon parallèle à l'axe atteint L_2 à 2 cm de l'axe, juste au bord de la lentille : l'oculaire limite le champ observé.



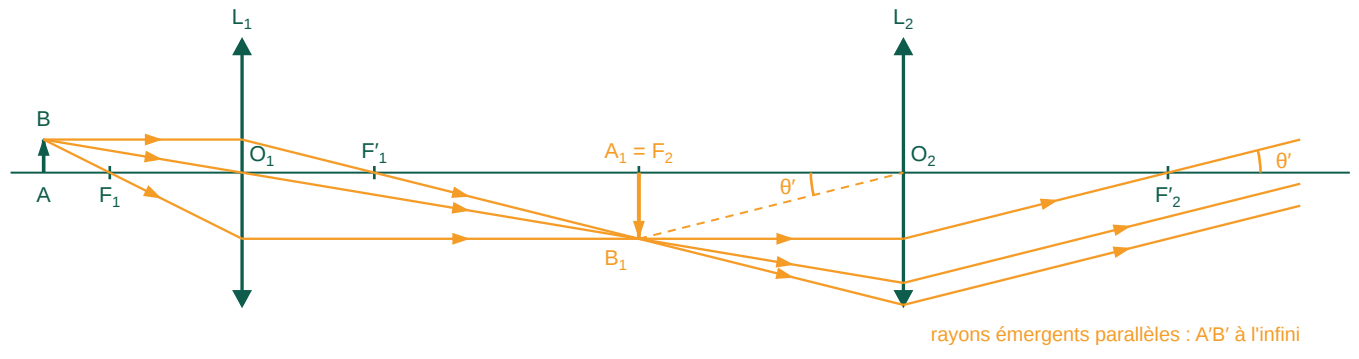
D.3 · Marche de trois rayons issus de B à travers les deux lentilles

E.1 Représenter θ' sur le schéma.

θ' est l'angle entre l'axe optique et la direction des rayons émergents issus de B_1. Pour l'œil placé en F'_2, c'est l'angle entre l'axe et le rayon qui passe par F'_2.

Ces rayons sont parallèles à (B_1O_2) : on retrouve le même angle en O_2, entre l'axe et (O_2B_1).

θ' est marqué en F'_2 et en O_2 sur le schéma ci-dessous.



E.1 · Angle θ' : inclinaison des rayons émergents, visible en F'_2 et en O_2

E.2 Calculer le grossissement $G = \dfrac{\theta'}{\theta}$ du microscope.

Données utiles $AB = 5{,}0\ \text{mm}$; $d_m = 0{,}25\ \text{m}$; $A_1B_1 = 1{,}0\ \text{cm}$ (B.2) ; $f_2' = 0{,}20\ \text{m}$ (A)

Objet vu à l'œil nu à la distance d_m : $\theta \approx \tan\theta = \dfrac{AB}{d_m} = \dfrac{5{,}0 \times 10^{-3}}{0{,}25} = 2{,}0 \times 10^{-2}\ \text{rad}$

Dans le triangle $O_2A_1B_1$, rectangle en A_1, avec $O_2A_1 = f_2'$: $\theta' \approx \tan\theta' = \dfrac{A_1B_1}{f_2'} = \dfrac{1{,}0 \times 10^{-2}}{0{,}20} = 5{,}0 \times 10^{-2}\ \text{rad}$

$$G = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{5{,}0 \times 10^{-2}}{2{,}0 \times 10^{-2}}$$

$$\boxed{G = 2{,}5}$$

PIÈGE
Mélanger les unités dans un même rapport : AB et d_m en mètre, A_1B_1 et f_2' en mètre. Un angle en radian est un quotient de deux longueurs de même unité.

COMPRENDRE
G n'a pas d'unité. Littéralement, $G = |\gamma_1| \times \dfrac{d_m}{f_2'} = 2{,}0 \times 1{,}25$: le grossissement est le produit de l'effet de l'objectif par celui de l'oculaire, utilisé comme une loupe.

Mécanisme de fusion de l'hydrogène dans une étoile

Bac S 2003 La Réunion (ancien programme) · Exercice 3 **4 points** **Durée conseillée 52 min**

A.1 Donner une définition rapide des mots « fusion nucléaire » et « fission nucléaire ».

Fusion nucléaire : réaction nucléaire au cours de laquelle deux noyaux légers s'unissent pour former un noyau plus lourd.

Fission nucléaire : réaction nucléaire au cours de laquelle un noyau lourd, percuté par un neutron, se scinde en deux noyaux plus légers.

Fusion : deux noyaux légers donnent un noyau plus lourd. Fission : un noyau lourd donne deux noyaux plus légers. Les deux libèrent de l'énergie.

PIÈGE
Confondre les deux mots, ou parler d'atomes et de molécules. Ce sont les noyaux qui sont transformés : il faut écrire « noyau » dans chaque définition.

A.2 En considérant les charges des noyaux en cause, expliquer pourquoi ces réactions de fusion ne peuvent se produire qu'à très haute température.

Les noyaux ne contiennent que des protons et des neutrons : ils sont tous chargés positivement. Deux noyaux qui s'approchent exercent donc l'un sur l'autre une force électrostatique répulsive, d'autant plus intense que leur distance est faible.

Pour fusionner, ils doivent pourtant arriver presque au contact. Il leur faut une très grande vitesse, donc une très grande énergie cinétique, ce qui correspond à une agitation thermique très forte.

La très haute température donne aux noyaux assez d'énergie cinétique pour vaincre leur répulsion électrostatique.

COMPRENDRE
La température mesure l'agitation des particules : plus elle est élevée, plus les noyaux sont rapides. À très courte distance, l'interaction forte, attractive, l'emporte sur la répulsion et soude les noyaux.

B.1 Écrire la réaction de fusion de deux noyaux d'hydrogène en un noyau de deutérium et une particule notée ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$. Comment s'appelle cette particule ?

$$ {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{A}_{Z}\mathrm{X} $$

Conservation du nombre de nucléons : $1 + 1 = 2 + A$, donc $A = 0$.

Conservation de la charge électrique : $1 + 1 = 1 + Z$, donc $Z = 1$.

La particule n'a aucun nucléon et porte une charge $+e$: c'est un positon.

${}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{0}_{1}\mathrm{e}$: la particule émise est un **positon**.

PIÈGE
Répondre « électron ». L'électron se note ${}^{0}_{-1}\mathrm{e}$; avec $Z = +1$, il s'agit de son antiparticule, le positon, de même masse et de charge opposée.

MÉTHODE
Pour toute équation nucléaire, écrire deux égalités : somme des nombres du haut (A) identique des deux côtés, somme des nombres du bas (Z) identique des deux côtés.

B.2 Écrire la réaction de fusion d'un noyau de deutérium et d'un proton en un noyau d'hélium 3. Comment interpréter l'émission d'un photon qui l'accompagne ?

${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He}$; on vérifie $2 + 1 = 3$ et $1 + 1 = 2$.

Le noyau d'hélium 3 est formé dans un état excité, noté ${}^{3}_{2}\mathrm{He}^{*}$. Il retrouve son état fondamental en cédant son excédent d'énergie sous la forme d'un photon γ : ${}^{3}_{2}\mathrm{He}^{*} \longrightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + \gamma$.

${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + \gamma$: le photon est émis lors de la désexcitation du noyau d'hélium 3.

COMPRENDRE
Le photon γ n'a ni charge ni nucléon ($A = 0$, $Z = 0$) : il ne change rien aux lois de conservation, il emporte seulement de l'énergie.

B.3 Écrire la réaction de fusion de deux noyaux d'hélium 3 en un noyau d'hélium 4. Quels sont les deux noyaux identiques émis ?

$$^3_2\mathrm{He} + {}^3_2\mathrm{He} \longrightarrow {}^4_2\mathrm{He} + 2\,{}^A_Z\mathrm{X}$$

Conservation du nombre de nucléons : $3 + 3 = 4 + 2A$, donc $A = 1$.

Conservation de la charge électrique : $2 + 2 = 2 + 2Z$, donc $Z = 1$.

$^3_2\mathrm{He} + {}^3_2\mathrm{He} \longrightarrow {}^4_2\mathrm{He} + 2\,{}^1_1\mathrm{H}$: les deux noyaux émis sont des **noyaux d'hydrogène** (protons).

PIÈGE
Oublier le coefficient 2 devant A et Z dans les deux égalités : on trouverait $A = 2$ et $Z = 2$, ce qui ne correspond à aucun noyau connu.

B.4 Écrire la réaction bilan des trois réactions de fusion précédentes, qui permet d'obtenir un noyau d'hélium 4 à partir de noyaux d'hydrogène.

La dernière étape consomme deux noyaux d'hélium 3 : les deux premières doivent donc se produire deux fois chacune.

$2 \times \left({}^1_1\mathrm{H} + {}^1_1\mathrm{H} \longrightarrow {}^2_1\mathrm{H} + {}^0_1\mathrm{e}\right)$

$2 \times \left({}^2_1\mathrm{H} + {}^1_1\mathrm{H} \longrightarrow {}^3_2\mathrm{He} + \gamma\right)$

$^3_2\mathrm{He} + {}^3_2\mathrm{He} \longrightarrow {}^4_2\mathrm{He} + 2\,{}^1_1\mathrm{H}$

En additionnant, les noyaux de deutérium et d'hélium 3 disparaissent ; il reste 6 noyaux d'hydrogène à gauche et 2 à droite, soit 4 après simplification.

$4\,{}^1_1\mathrm{H} \longrightarrow {}^4_2\mathrm{He} + 2\,{}^0_1\mathrm{e} + 2\,\gamma$

COMPRENDRE
Vérification : $4 \times 1 = 4 + 0$ nucléons et $4 \times 1 = 2 + 2 \times 1$ charges. C'est bien la réaction donnée par le sujet en partie C.

MÉTHODE
Dans un bilan, les espèces intermédiaires, produites par une étape puis consommées par la suivante, ne doivent plus apparaître. On ajuste les coefficients des étapes jusqu'à ce qu'elles se simplifient toutes.

C.1 Calculer la perte de masse correspondant à la fusion $4\,{}^1_1\mathrm{H} \longrightarrow {}^4_2\mathrm{He} + 2\,{}^0_1\mathrm{e} + 2\,\gamma$.

Données utiles $m({}^1_1\mathrm{H}) = 1{,}0073$ u ; $m({}^4_2\mathrm{He}) = 4{,}0026$ u ; $m({}^0_1\mathrm{e}) = 0{,}0006$ u

Perte de masse = masse des réactifs − masse des produits (le photon a une masse nulle) :

$$\Delta m = 4\,m({}^1_1\mathrm{H}) - \left[m({}^4_2\mathrm{He}) + 2\,m({}^0_1\mathrm{e})\right]$$

$$\Delta m = 4 \times 1{,}0073 - (4{,}0026 + 2 \times 0{,}0006) = 4{,}0292 - 4{,}0038$$

$\Delta m = 0{,}0254$ u

PIÈGE
Oublier les deux positons, ou ne compter qu'un seul noyau d'hydrogène. Sans calculatrice, poser les opérations : $4 \times 1{,}0073 = 4{,}0292$ puis $4{,}0026 + 0{,}0012 = 4{,}0038$.

COMPRENDRE
Une différence se donne avec la précision des termes, ici 10^{-4} u : le résultat n'a plus que trois chiffres significatifs alors que les masses en ont cinq.

C.2 En déduire une estimation, en MeV, de l'énergie libérée par nucléon lors de cette fusion (0,6 MeV, 6 MeV ou 60 MeV).

Données utiles $\Delta m = 0{,}0254$ u (C.1) ; 1 u correspond à 935 MeV $\approx$ 1000 MeV

Énergie libérée par la fusion : $E \approx 0{,}0254 \times 1000 \approx 25$ MeV.

La réaction met en jeu 4 nucléons (les quatre protons) :

$$\frac{E}{4} \approx \frac{25}{4} \approx 6 \text{ MeV}$$

L'énergie libérée est d'environ **6 MeV par nucléon**.

PIÈGE
S'arrêter à 25 MeV : c'est l'énergie libérée par la réaction entière. La question porte sur un nucléon, il faut diviser par 4.

COMPRENDRE
Avec 935 MeV au lieu de 1000, on obtient environ 24 MeV, soit toujours 6 MeV par nucléon. Les propositions diffèrent d'un facteur 10 : seul l'ordre de grandeur compte.

C.3 Le Soleil transforme chaque seconde 720 millions de tonnes d'hydrogène en hélium 4. Estimer la perte de masse qu'il subit chaque seconde.

Données utiles $\Delta m = 0{,}0254$ u (C.1) ; $\dfrac{0{,}0254}{4{,}0292} \approx \dfrac{1}{160}$

Pour $4 \times 1{,}0073 = 4{,}0292$ u d'hydrogène consommé, la masse perdue est $0{,}0254$ u. La fraction de masse perdue est la même à l'échelle du Soleil :

$$\frac{m_{\text{perdue}}}{m_{\text{hydrogène}}} = \frac{0{,}0254}{4{,}0292} \approx \frac{1}{160}$$

$$m_{\text{perdue}} \approx \frac{720 \times 10^6}{160} = \frac{72}{16} \times 10^6 = 4{,}5 \times 10^6 \text{ tonnes}$$

Le Soleil perd environ **4 500 000 tonnes** par seconde.

COMPRENDRE
Le Soleil « maigrit » donc bien : la masse perdue est convertie en énergie rayonnée. Cette perte reste infime devant sa masse, de l'ordre de 10^{27} tonnes.

MÉTHODE
Passage du noyau à l'étoile : calculer la proportion de masse perdue sur une réaction, puis l'appliquer à la masse totale consommée. Le rapport ne dépend pas de l'unité de masse choisie.

Oscillations libres et forcées

Bac S 2003 La Réunion (ancien programme) · Exercice 4 **5,5 points** **Durée conseillée 1 h 05**

A.1 À partir de la mesure observée, calculer la valeur k' de la raideur du ressort.

Données utiles $m = 100$ g ; $l_0 = 10{,}0$ cm ; $l = 12{,}4$ cm ; $g = 10\ \text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$; aide : $\dfrac{1}{2{,}4} = 0{,}42$

Système {masse m}, référentiel terrestre supposé galiléen. Forces : le poids $\vec{P}$ (vertical, vers le bas) et la force de rappel $\vec{F}$ du ressort (verticale, vers le haut).

La masse est immobile : d'après le principe d'inertie, $\vec{P} + \vec{F} = \vec{0}$, donc $F = P$, soit $k'\,(l - l_0) = m\,g$.

$$k' = \frac{m\,g}{l - l_0} = \frac{0{,}100 \times 10}{(12{,}4 - 10{,}0) \times 10^{-2}} = \frac{1{,}0}{2{,}4 \times 10^{-2}} = 0{,}42 \times 10^{2}$$

$$\boxed{k' = 42\ \text{N}\cdot\text{m}^{-1}}$$

PIÈGE
Laisser m en grammes ou l'allongement en centimètres : on trouverait une raideur fausse d'un facteur 10 ou 1000. Tout se convertit en kg et en m.

COMPRENDRE
Deux chiffres significatifs, comme g et l'allongement $2{,}4$ cm. L'oscillateur masse-ressort ne figure plus au programme actuel de spécialité ; l'équilibre d'un solide soumis à deux forces, lui, se traite toujours ainsi.

MÉTHODE
Sans calculatrice, on isole les puissances de dix : $\dfrac{1{,}0}{2{,}4 \times 10^{-2}} = \dfrac{1}{2{,}4} \times 10^{2}$, puis on utilise l'aide de calcul fournie en fin d'énoncé.

A.2 Quelle est l'erreur relative commise par rapport à la valeur de k indiquée par le fournisseur ?

Données utiles $k = 40\ \text{N}\cdot\text{m}^{-1}$; $k' = 42\ \text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ (A.1)

$$\frac{|k' - k|}{k} = \frac{42 - 40}{40} = \frac{2}{40} = 0{,}05$$

L'erreur relative est de $5\ \%$: la mesure confirme la valeur du fournisseur à $5\ \%$ près.

PIÈGE
Diviser par la valeur mesurée k' : la référence est la valeur annoncée par le fournisseur, c'est elle qui va au dénominateur.

B.1 Indiquer comment mesurer la période des oscillations de la masse m suspendue au ressort et donner sa valeur.

Données utiles figure a de l'annexe

La période T est la durée qui sépare deux passages consécutifs de la masse par la même position, dans le même sens. Pour gagner en précision, on mesure la durée de plusieurs périodes puis on divise.

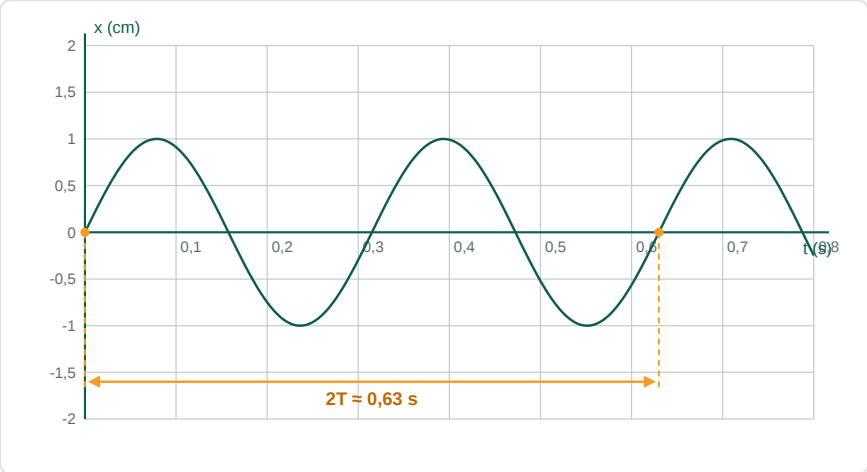
Sur la figure a, la courbe part de $x = 0$ en montant à $t = 0$ et repasse par $x = 0$ en montant, pour la deuxième fois, à $t \approx 0{,}63$ s : cela représente deux périodes.

$$T = \frac{0{,}63}{2}$$

$$\boxed{T \approx 0{,}32\ \text{s}}$$

PIÈGE
Prendre la durée entre deux annulations successives de x : la masse y passe une fois en montant, une fois en descendant, on ne lit alors qu'une demi-période.

MÉTHODE
Repérer les passages par $x = 0$ plutôt que les sommets : la courbe y est la plus raide, la date se lit donc plus nettement que sur un maximum arrondi.



B.1 · Figure a : deux périodes entre deux passages par $x = 0$ dans le même sens

B.2 Cette valeur est-elle en accord avec la valeur théorique $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{m}{k}}$?

Données utiles $m = 100$ g ; $k = 40\ \text{N}\cdot\text{m}^{-1}$; $\pi = 3{,}14$; $T \approx 0{,}32$ s (B.1)

$$\frac{m}{k} = \frac{0{,}100}{40} = 2{,}5 \times 10^{-3} = 25 \times 10^{-4}\ \text{s}^2 \quad \text{donc} \quad \sqrt{\frac{m}{k}} = 5{,}0 \times 10^{-2}\ \text{s}$$

$$T = 2\pi \times 5{,}0 \times 10^{-2} = \frac{\pi}{10} = 0{,}31\ \text{s}$$

L'écart avec la mesure est de $0{,}01$ s, soit environ $3\ \%$: il est de l'ordre de la précision de lecture du graphique.

$T_{\text{théorique}} = 0{,}31$ s : la valeur mesurée ($0{,}32$ s) est en accord avec la théorie.

COMPRENDRE
Avec la raideur mesurée $k' = 42\ \text{N}\cdot\text{m}^{-1}$, la période calculée serait encore un peu plus courte. Un écart de quelques pour cent reste compatible avec les incertitudes sur k et sur la lecture.

MÉTHODE
Pour une racine sans calculatrice, écrire le nombre avec une puissance de dix paire : 25×10^{-4} donne 5×10^{-2}.

B.3 Sachant que le newton a la dimension $\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, montrer que T s'exprime en secondes.

k s'exprime en $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$, soit $\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{m}^{-1} = \text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$.

Le rapport $\dfrac{m}{k}$ s'exprime donc en $\dfrac{\text{kg}}{\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}} = \text{s}^2$, et sa racine carrée en s.

Le facteur 2π n'a pas d'unité.

$T = 2\pi\sqrt{\dfrac{m}{k}}$ s'exprime bien en secondes.

PIÈGE
Oublier de dire que 2π est un nombre sans dimension : la justification est alors incomplète.

B.4 On remplace la solution par une solution S' plus visqueuse. Dessiner sur la figure b de l'annexe l'allure de la courbe obtenue après une nouvelle acquisition.

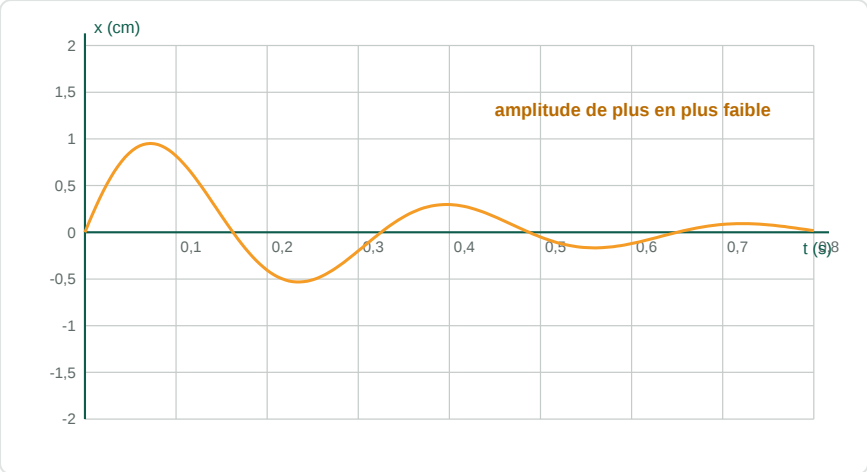
Dans une solution plus visqueuse, les frottements subis par la tige sont plus importants : les oscillations sont amorties.

L'acquisition démarre toujours au passage par la position d'équilibre : la courbe part de $x = 0$. La masse oscille encore de part et d'autre de $x = 0$, mais l'amplitude diminue à chaque oscillation (elle reste inférieure à 1 cm dès le premier maximum).

Courbe pseudo-périodique : oscillations d'amplitude décroissante, de pseudo-période voisine de T (voir figure b).

PIÈGE
Tracer une sinusoïde simplement plus petite, d'amplitude constante : l'amortissement se traduit par des maximums de plus en plus bas.

COMPRENDRE
Les frottements font perdre de l'énergie mécanique à l'oscillateur à chaque aller-retour. Si l'amortissement était très fort, la masse reviendrait à l'équilibre sans osciller (régime apériodique).



B.4 · Figure b complétée : oscillations amorties (régime pseudo-périodique)

C.1 Quel nom donne-t-on au moteur muni de l'excentrique ?

Le moteur impose sa fréquence au ressort et à la masse.

C'est l'**excitateur**.

C.2 Quel nom donne-t-on au système (ressort + masse) ?

Ce système oscille à la fréquence imposée par le moteur, avec une amplitude qui dépend de cette fréquence.

C'est le **résonateur**.

C.3 Quel phénomène obtient-on à $f = 3{,}2$ Hz ?

Données utiles tableau : $x_{\max} = 2{,}3$ cm pour $f = 3{,}2$ Hz, valeurs plus faibles pour toutes les autres fréquences

D'après le tableau, l'amplitude $x_{\max}$ passe par un maximum ($2{,}3$ cm) pour $f = 3{,}2$ Hz.

Il s'agit du phénomène de **résonance** (résonance d'amplitude).

COMPRENDRE
Les oscillations forcées ont toujours la fréquence de l'excitateur ; c'est leur amplitude qui change avec la fréquence et devient maximale à la résonance.

C.4 En déduire la période des oscillations à la résonance.

Données utiles $f = 3{,}2$ Hz ; aide : $\frac{1}{3{,}2} = \frac{\pi}{10}$; $\pi = 3{,}14$

$$T_R = \frac{1}{f} = \frac{1}{3{,}2} = \frac{\pi}{10}$$

$T_R = 0{,}31$ s

C.5 Comparer cette période à celle des oscillations libres.

Données utiles $T_R = 0{,}31$ s (C.4) ; oscillations libres : $T \approx 0{,}32$ s mesurée (B.1), $0{,}31$ s calculée (B.2)

La période à la résonance ($0{,}31$ s) est égale, aux incertitudes de mesure près, à la période des oscillations libres ($0{,}31$ s calculée, $0{,}32$ s mesurée).

$T_R \approx T$: la résonance se produit quand la période de l'excitateur est égale à la période propre du résonateur.

C.6 Quel(s) changement(s) observerait-on si on utilisait la solution visqueuse S' ?

Avec la solution S', l'amortissement est plus important.

L'amplitude à la résonance serait plus faible et le maximum moins marqué : $x_{\max}$ varierait moins autour de $3{,}2$ Hz (résonance « floue »). La fréquence de résonance resterait voisine de la fréquence propre.

Résonance moins aiguë, d'amplitude plus faible ; avec un amortissement très fort, elle disparaît.

PIÈGE
Affirmer que la fréquence de résonance change nettement : l'amortissement agit surtout sur la hauteur et la largeur du pic, très peu sur sa position.

D.1 Expliquer le phénomène d'oscillations de forte amplitude à la vitesse V_R, en précisant le rôle joué par la piste déformée.

En roulant à vitesse constante, les roues rencontrent les bosses à intervalles de temps réguliers : la piste impose à la suspension des secousses périodiques. Elle joue le rôle d'**excitateur**, l'automobile (masse suspendue aux ressorts) celui de **résonateur**.

La fréquence des secousses dépend de la vitesse. Pour la vitesse V_R, elle est égale à la fréquence propre f_0 du véhicule.

Il y a alors **résonance** : l'amplitude des oscillations de l'automobile devient très grande et la tenue de route se dégrade.

COMPRENDRE
Les amortisseurs servent à limiter l'amplitude à la résonance, comme la solution visqueuse en C.6. Rouler plus vite ou plus lentement que V_R éloigne de la résonance.

D.2 Exprimer la vitesse V_R en fonction de f_0 et L, puis la calculer en $\mathrm{km \cdot h^{-1}}$.

Données utiles $f_0 = 5{,}0$ Hz ; $L = 80$ cm

À la vitesse V, la durée entre deux bosses successives est $\Delta t = \dfrac{L}{V}$: la fréquence des secousses est $f = \dfrac{1}{\Delta t} = \dfrac{V}{L}$.

À la résonance, $f = f_0$, donc $\dfrac{V_R}{L} = f_0$, soit $V_R = L\,f_0$.

$$V_R = 0{,}80 \times 5{,}0 = 4{,}0\ \mathrm{m \cdot s^{-1}} = 4{,}0 \times 3{,}6\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$$

$$\boxed{V_R = L\,f_0 = 14\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}}$$

PIÈGE
Laisser L en centimètres, ou diviser par $3{,}6$ au lieu de multiplier : $1\ \mathrm{m \cdot s^{-1}} = 3{,}6\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$.

COMPRENDRE
Le produit vaut $14{,}4$, arrondi à deux chiffres significatifs comme f_0 et L. C'est une vitesse faible : sur la tôle ondulée, on quitte la résonance en roulant nettement plus vite.