# Corrigé complet — Bac S 2004 Asie (ancien programme)

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


| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Ex 1 | **Suivi d'une réaction lente**<br>Dilution · Oxydoréduction · Avancement et réactif limitant · Absorbance · Temps de demi-réaction · Vitesse volumique de réaction | 6 pts | 1 h 18 | 14 questions | p. 2 |
| Ex 2 | **Etude expérimentale d'une bobine**<br>Bobine et inductance · Loi d'Ohm · Loi d'additivité des tensions · Dipôle RL · Constante de temps · Régime permanent | 6 pts | 1 h 18 | 14 questions | p. 7 |
| Ex 3 | **Spécialité : Lentilles et miroirs**<br>Miroir plan · Lentille convergente et relation de conjugaison · Miroir sphérique · Microscope et cercle oculaire · Lunette afocale · Grossissement | 4 pts | 52 min | 9 questions | p. 12 |
| Ex 4 | **Energies d'un système solide-ressort**<br>Oscillateur solide-ressort · Deuxième loi de Newton · Équation différentielle · Période propre et pseudo-période · Énergies cinétique, potentielle élastique et mécanique · Frottement fluide | 4 pts | 52 min | 11 questions | p. 17 |


**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.

# Suivi d'une réaction lente

Bac S 2004 Asie (ancien programme) · Exercice 1 **6 points** **Durée conseillée 1 h 18**

**1** Décrire, en précisant le matériel utilisé, le protocole de préparation de 50,0 mL de solution de permanganate de potassium de concentration $c_1$.

**Données utiles** $c_0 = 1{,}00 \times 10^{-2}\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ; $c_1 = 2{,}00 \times 10^{-3}\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ; volume à préparer $V = 50{,}0\ \text{mL}$

C'est une dilution : la quantité de soluté prélevée se retrouve intégralement dans la solution fille, donc $c_0\,V_0 = c_1\,V$.

$$V_0 = \frac{c_1\,V}{c_0} = \frac{2{,}00 \times 10^{-3} \times 50{,}0}{1{,}00 \times 10^{-2}} = 10{,}0\ \text{mL}$$

Protocole :

- verser un peu de solution mère dans un bécher de 75 mL ;
- y prélever 10,0 mL avec la pipette jaugée de 10 mL (munie d'une propipette) ;
- introduire ce prélèvement dans la fiole jaugée de 50 mL ;
- ajouter de l'eau distillée aux trois quarts, boucher, agiter ;
- compléter à l'eau distillée jusqu'au trait de jauge, boucher, homogénéiser.

$V_0 = 10{,}0$ mL prélevés à la pipette jaugée de 10 mL, dilués dans la fiole jaugée de 50 mL.

**PIÈGE**
Choisir l'éprouvette graduée ou le bécher pour mesurer un volume : seule la verrerie jaugée (pipette, fiole) donne la précision attendue. On ne pipette jamais directement dans le flacon de solution mère.

**COMPRENDRE**
Les données ont trois chiffres significatifs : le résultat s'écrit 10,0 mL. Le facteur de dilution vaut $c_0/c_1 = 5$ : on retrouve $50{,}0/5 = 10{,}0$ mL.

**À LA CALCULATRICE**

rad CALCULS
$\frac{2.00 \times 10^{-3} \times 50.0}{1.00 \times 10^{-2}}$
$\approx$ 10

**2.1** Écrire les deux demi-équations d'oxydoréduction, puis l'équation de la réaction entre les ions permanganate et l'acide oxalique.

**Données utiles** couples $\text{MnO}_4^-\,(\text{aq})$ / $\text{Mn}^{2+}\,(\text{aq})$ et $\text{CO}_2\,(\text{aq})$ / $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4\,(\text{aq})$

Réduction de l'ion permanganate, à multiplier par 2 :

$$\text{MnO}_4^-\,(\text{aq}) + 8\,\text{H}^+\,(\text{aq}) + 5\,\text{e}^- = \text{Mn}^{2+}\,(\text{aq}) + 4\,\text{H}_2\text{O}\,(\text{l})$$

Oxydation de l'acide oxalique, à multiplier par 5 :

$$\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4\,(\text{aq}) = 2\,\text{CO}_2\,(\text{aq}) + 2\,\text{H}^+\,(\text{aq}) + 2\,\text{e}^-$$

Les 10 électrons cédés sont tous captés ; après simplification des ions $\text{H}^+$ ($16 - 10 = 6$), toutes les espèces étant en solution aqueuse sauf l'eau :

$$2\,\text{MnO}_4^- + 5\,\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 + 6\,\text{H}^+ \longrightarrow 2\,\text{Mn}^{2+} + 10\,\text{CO}_2 + 8\,\text{H}_2\text{O}$$

**PIÈGE**
Laisser des électrons dans l'équation de la réaction, ou oublier de simplifier les $\text{H}^+$ présents des deux côtés.

**MÉTHODE**
Pour une demi-équation : équilibrer l'élément principal, puis O avec $\text{H}_2\text{O}$, puis H avec $\text{H}^+$, enfin les charges avec des électrons. Vérifier ensuite charges et éléments dans l'équation finale.

**2.2** Quelle est, à l'instant $t = 0$, la quantité de matière $n_{01}$ d'ions permanganate ?

**Données utiles** $c_1 = 2{,}00 \times 10^{-3}\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ; $V_1 = 20{,}0\ \text{mL}$

$$n_{01} = c_1\,V_1 = 2{,}00 \times 10^{-3} \times 20{,}0 \times 10^{-3}$$

$n_{01} = 4{,}00 \times 10^{-5}$ mol

**À LA CALCULATRICE**

rad CALCULS
$2.00 \times 10^{-3} \times 20.0 \times 10^{-3}$
$\approx$ $4 \times 10^{-5}$

**PIÈGE**
Le volume doit être converti en litres. Ne pas utiliser le volume du mélange (40,0 mL) : la concentration $c_1$ est celle de la solution avant mélange.

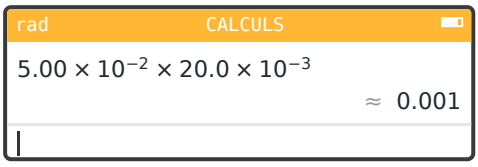
**2.3** Quelle est, à l'instant $t = 0$, la quantité de matière $n_{02}$ d'acide oxalique ?

**Données utiles** $c_2 = 5{,}00 \times 10^{-2}$ mol · L$^{-1}$ ; $V_2 = 20{,}0$ mL

$n_{02} = c_2\, V_2 = 5{,}00 \times 10^{-2} \times 20{,}0 \times 10^{-3}$

$n_{02} = 1{,}00 \times 10^{-3}$ mol

À LA CALCULATRICE




**2.4** Calculer l'avancement maximal $x_{max}$. En déduire le réactif limitant.

**Données utiles** $n_{01} = 4{,}00 \times 10^{-5}$ mol (2.2) ; $n_{02} = 1{,}00 \times 10^{-3}$ mol (2.3)

D'après l'équation, à l'avancement $x$ il reste $n_{01} - 2x$ d'ions permanganate et $n_{02} - 5x$ d'acide oxalique (les ions $H^+$ sont en excès).

- Si $MnO_4^-$ est limitant : $n_{01} - 2x_{max} = 0$, soit $x_{max} = \dfrac{n_{01}}{2} = \dfrac{4{,}00 \times 10^{-5}}{2} = 2{,}00 \times 10^{-5}$ mol.
- Si $H_2C_2O_4$ est limitant : $n_{02} - 5x_{max} = 0$, soit $x_{max} = \dfrac{n_{02}}{5} = \dfrac{1{,}00 \times 10^{-3}}{5} = 2{,}00 \times 10^{-4}$ mol.

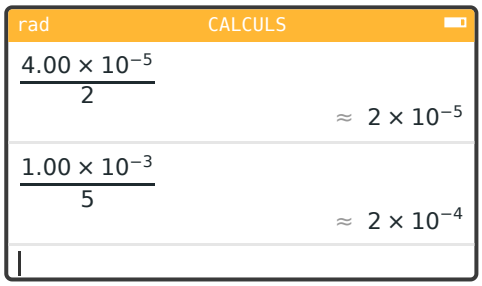
On retient la plus petite des deux valeurs.

$x_{max} = 2{,}00 \times 10^{-5}$ mol : l'ion permanganate est le réactif limitant.

**PIÈGE**

Comparer directement $n_{01}$ et $n_{02}$ sans diviser par les nombres stœchiométriques 2 et 5. Ici la conclusion serait la même, mais ce n'est plus vrai à la question 3.6.

À LA CALCULATRICE




**2.5** Comment va évoluer la couleur du mélange lorsque la transformation se déroule ?

La seule espèce colorée est l'ion permanganate (violet) ; l'acide oxalique et les produits formés, dont $Mn^{2+}$, sont incolores. Cet ion est consommé peu à peu, et totalement puisqu'il est limitant.

La teinte violette s'éclaircit progressivement, jusqu'à ce que le mélange devienne incolore.

**3.1** Quelle est l'espèce chimique principalement responsable de l'absorbance $A$ de la solution ?

Une solution absorbe dans le visible si elle contient une espèce colorée. Ici, une seule espèce du mélange est colorée.

L'ion permanganate $MnO_4^-$, seule espèce colorée, est responsable de l'absorbance.

**3.2** En quoi la courbe $A = f(t)$ permet-elle de retrouver le réactif limitant ?

**Données utiles** courbe 1 ; $x(t) = \left(2 \times 10^{-5} - A(t) \times 10^{-5}\right)$ mol

Sur la courbe 1, l'absorbance décroît et s'annule vers $t = 1200$ s. Or $A$ est proportionnelle à la concentration en ions permanganate : à l'état final, $[MnO_4^-]_f = 0$. Ces ions ont entièrement disparu.

La relation donnée le confirme : pour $A = 0$, $x_f = 2 \times 10^{-5}$ mol, valeur égale à $x_{max}$ calculé en 2.4.

$A_f = 0$ : l'ion permanganate est totalement consommé, c'est bien le réactif limitant.

**COMPRENDRE**
La relation de l'énoncé vient de $A$ proportionnelle à $n_{01} - 2x$, avec $A_0 = 2{,}0$ pour $n_{01} = 4{,}00 \times 10^{-5}$ mol : $A = (n_{01} - 2x) \times 0{,}5 \times 10^5$.

**3.3** Définir puis déterminer, en justifiant, le temps de demi-réaction.

**Données utiles** courbe 2 ; $x_{max} = 2{,}00 \times 10^{-5}$ mol $= 20{,}0$ $\mu$mol (2.4)

Le temps de demi-réaction $t_{1/2}$ est la durée au bout de laquelle l'avancement vaut la moitié de sa valeur finale. La transformation étant totale, $x_f = x_{max}$ :

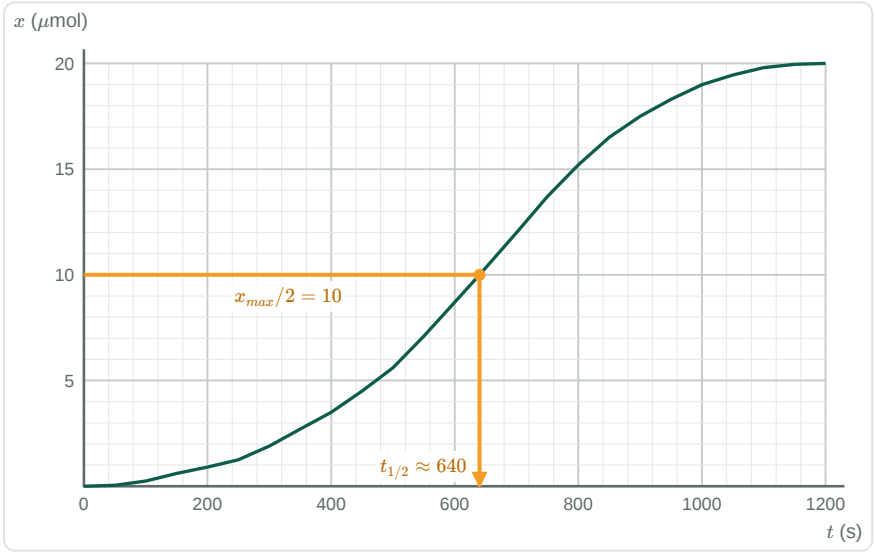
$$x(t_{1/2}) = \frac{x_{max}}{2} = \frac{20{,}0}{2} = 10{,}0 \ \mu\text{mol}$$

Sur la courbe 2, on trace l'horizontale d'ordonnée 10 $\mu$mol jusqu'à la courbe, puis on lit l'abscisse du point d'intersection (construction à laisser sur l'annexe).

$t_{1/2} \approx 6{,}4 \times 10^2$ s

**PIÈGE**
Prendre la moitié de la durée totale ($1200/2 = 600$ s) : $t_{1/2}$ se lit à partir de la moitié de l'avancement final, pas de la moitié du temps.

**COMPRENDRE**
Même lecture possible sur la courbe 1 : à $t_{1/2}$, la moitié des ions permanganate a disparu, donc $A = A_0/2 = 1{,}0$. La lecture graphique justifie deux chiffres significatifs.




**3.3** · Courbe 2 de l'annexe : lecture du temps de demi-réaction

**3.4** Définir la vitesse volumique de réaction en fonction de $x(t)$.

La vitesse volumique de réaction est la dérivée de l'avancement par rapport au temps, divisée par le volume $V$ du mélange réactionnel (ici $V = V_1 + V_2$) :

$$v(t) = \frac{1}{V}\frac{dx}{dt}, \text{ en mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

**COMPRENDRE**
Lien avec la vitesse volumique de disparition du permanganate : $[MnO_4^-] = \frac{n_{01} - 2x}{V}$, donc $-\frac{d[MnO_4^-]}{dt} = 2\,v$.

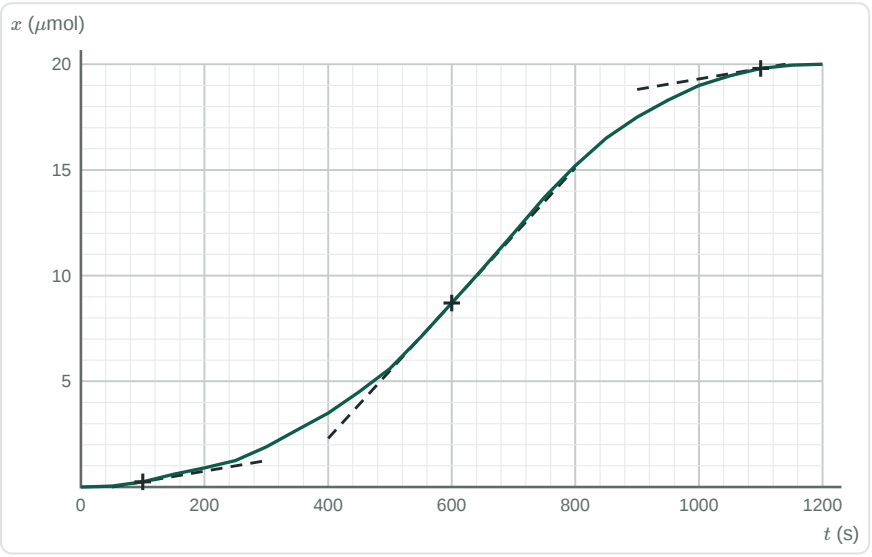
**3.5** En comparant qualitativement les vitesses de réaction aux dates $t_1 = 100$ s, $t_2 = 600$ s et $t_3 = 1100$ s, dire comment évolue la vitesse au cours du temps.

Le volume $V$ étant constant, $v$ est proportionnelle à $\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$, c'est-à-dire au coefficient directeur de la tangente à la courbe 2 à la date considérée.

On trace les trois tangentes : celle en $t_1$ est presque horizontale, celle en $t_2$ est nettement plus inclinée, celle en $t_3$ est de nouveau presque horizontale. Donc $v(t_1) < v(t_2)$ et $v(t_2) > v(t_3)$.

La vitesse, faible au début, augmente, passe par un maximum (vers 600 s), puis diminue jusqu'à s'annuler.

**COMPRENDRE**
D'ordinaire la vitesse décroît dès le début, car les réactifs s'épuisent. Ici elle commence par croître : un produit, l'ion $\mathrm{Mn}^{2+}$, catalyse la réaction (autocatalyse). D'où l'allure inhabituelle signalée par l'énoncé.




**3.5** · Courbe 2 de l'annexe : tangentes aux dates $t_1$, $t_2$ et $t_3$ (en tirets)

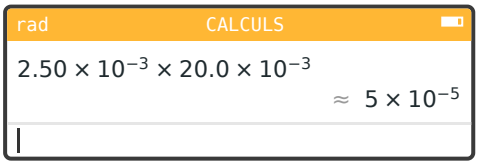
**3.6.1** Calculer la nouvelle quantité de matière initiale d'acide oxalique.

**Données utiles** $c'_2 = 2{,}50 \times 10^{-3}\ \mathrm{mol \cdot L^{-1}}$ ; $V_2 = 20{,}0$ mL

$$n'_{02} = c'_2 V_2 = 2{,}50 \times 10^{-3} \times 20{,}0 \times 10^{-3}$$

$$n'_{02} = 5{,}00 \times 10^{-5}\ \mathrm{mol}$$

**À LA CALCULATRICE**




**3.6.2** En déduire le réactif limitant.

**Données utiles** $n_{01} = 4{,}00 \times 10^{-5}$ mol (2.2) ; $n'_{02} = 5{,}00 \times 10^{-5}$ mol (3.6.1)

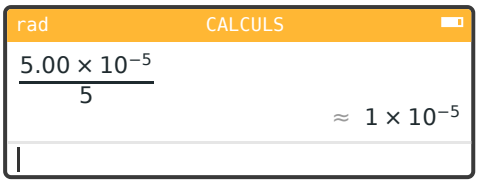
- Si $\mathrm{MnO_4^-}$ est limitant : $x_{max} = \frac{n_{01}}{2} = 2{,}00 \times 10^{-5}$ mol (inchangé).
- Si $\mathrm{H_2C_2O_4}$ est limitant : $x_{max} = \frac{n'_{02}}{5} = \frac{5{,}00 \times 10^{-5}}{5} = 1{,}00 \times 10^{-5}$ mol.

La plus petite valeur est la seconde.

L'acide oxalique est le réactif limitant, avec $x'_{max} = 1{,}00 \times 10^{-5}$ mol.

**PIÈGE**
Conclure que le permanganate est limitant parce que $n_{01} < n'_{02}$. Il faut 5 moles d'acide oxalique pour 2 moles de permanganate : c'est $n'_{02}/5$ qu'on compare à $n_{01}/2$.

À LA CALCULATRICE




**3.6.3** Quelle est l'absorbance finale ?

**Données utiles** $x(t) = \left(2 \times 10^{-5} - A(t) \times 10^{-5}\right)$ mol ; $x'_{max} = 1{,}00 \times 10^{-5}$ mol (3.6.2)

La quantité initiale d'ions permanganate est inchangée, donc la relation entre $x$ et $A$ reste valable. On isole $A$ :

$$A(t) = \frac{2 \times 10^{-5} - x(t)}{10^{-5}}$$

La transformation est totale : à l'état final, $x_f = x'_{max} = 1{,}00 \times 10^{-5}$ mol.

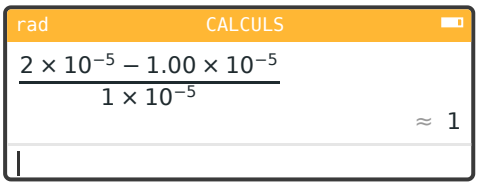
$$A_f = \frac{2 \times 10^{-5} - 1{,}00 \times 10^{-5}}{10^{-5}}$$

$A_f = 1{,}0$

**COMPRENDRE**

Vérification : il reste $n_{01} - 2x'_{max} = 2{,}00 \times 10^{-5}$ mol d'ions permanganate, la moitié de la quantité initiale. L'absorbance finale vaut donc la moitié de $A_0 = 2{,}0$ : le mélange reste violet.

À LA CALCULATRICE



# Etude expérimentale d'une bobine

Bac S 2004 Asie (ancien programme) · Exercice 2 **6 points** **Durée conseillée 1 h 18**

**1.1** Vérifier à l'aide de la figure 2 que la fréquence du GBF est bien réglée sur 1,0 kHz.

Le courant $i(t)$ a la même période que la tension du GBF. Deux minimums successifs de $i$ (points C et B) sont séparés d'une période :

$T = 1{,}6 - 0{,}6 = 1{,}0 \text{ ms} = 1{,}0 \times 10^{-3} \text{ s}$

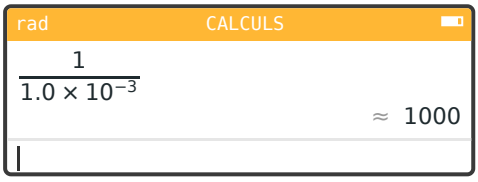
$f = \dfrac{1}{T} = \dfrac{1}{1{,}0 \times 10^{-3}}$

$f = 1{,}0 \times 10^{3} \text{ Hz} = 1{,}0 \text{ kHz}$ : la valeur annoncée est vérifiée.

**PIÈGE**
Convertir la période en secondes avant de calculer : avec $T$ en ms, on obtient des kHz, pas des hertz.

**COMPRENDRE**
Les lectures graphiques sont faites à deux chiffres significatifs : les résultats de l'exercice en gardent deux.

**À LA CALCULATRICE**




**1.2** Quelle est l'expression de la tension mesurée sur la voie 2 ? En déduire les opérations que le logiciel doit effectuer pour afficher l'intensité.

**Données utiles** $R = 1{,}0 \times 10^{4}\ \Omega$

La voie 2 mesure la tension $u_2$ aux bornes du conducteur ohmique. Sur la figure 1, la flèche de $u_2$ est dans le même sens que $i$ : la loi d'Ohm s'écrit avec un signe moins.

$u_2 = -R\,i$

Le logiciel doit donc changer le signe de $u_2$ et diviser par $R$ :

$u_2 = -R\,i$, donc $i = -\dfrac{u_2}{R} = -\dfrac{u_2}{1{,}0 \times 10^{4}}$

**PIÈGE**
Écrire $u_2 = R\,i$ sans regarder les flèches. La relation $u = R\,i$ suppose une flèche de tension opposée au sens du courant (convention récepteur).

**COMPRENDRE**
Un système d'acquisition ne mesure que des tensions. La masse est placée entre la bobine et $R$ pour relever en même temps $u_1$ et $u_2$.

**1.3** Exprimer la tension $u_L$ aux bornes de la bobine en fonction de ses caractéristiques, de l'intensité $i$ et de sa dérivée.

La flèche de $u_1 = u_L$ est opposée au sens de $i$ (convention récepteur) :

$u_L = r\,i + L\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$

**COMPRENDRE**
La bobine et le circuit RL ne figurent plus au programme actuel de spécialité. Le raisonnement reste proche de celui du circuit RC : loi des mailles, régime permanent, constante de temps.

**1.4.1** Les crêtes de $i(t)$ sont arrondies : la tangente au sommet est horizontale. En déduire une expression simplifiée de $u_L$ quand l'intensité est extrémale.

Une tangente horizontale signifie $\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = 0$. Le terme $L\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$ s'annule :

$u_L = r\,i$ quand $i$ est extrémale.

**1.4.2** En mesurant $u_L$ sur la figure 2 quand l'intensité est extrémale, à $t = 1{,}6$ ms par exemple, montrer que $r \ll R$.

**Données utiles** $R = 1{,}0 \times 10^4\ \Omega$ ; $u_L = r\,i$ (1.4.1)

À $t = 1{,}6$ ms (point B) : $i = -400\ \mu\text{A}$.

À cette date, $u_L$ est trop faible pour être lue avec précision (échelle de droite, 50 mV par graduation). Elle est négative et sa valeur absolue ne dépasse pas une graduation : $|u_L| \leqslant 50\ \text{mV}$.

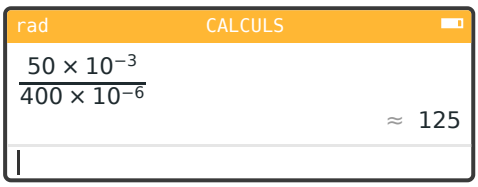
$r = \dfrac{u_L}{i}$ donc $r \leqslant \dfrac{50 \times 10^{-3}}{400 \times 10^{-6}} \approx 1{,}3 \times 10^2\ \Omega$

$r \leqslant 1{,}3 \times 10^2\ \Omega$, soit au plus environ 1 % de $R = 1{,}0 \times 10^4\ \Omega$ : $r \ll R$.

**PIÈGE**
La courbe $u_L(t)$ se lit sur l'échelle de droite, en mV ; l'intensité se lit sur celle de gauche, en $\mu$A.

**MÉTHODE**
Quand une valeur est trop petite pour être lue, on en donne un majorant. Un encadrement suffit pour comparer deux ordres de grandeur.

**À LA CALCULATRICE**




**1.5** Sur la demi-période comprise entre C et D, mesurer $u_L$, calculer $\dfrac{\text{d}i}{\text{d}t}$ et en déduire la valeur de $L$ (on néglige le terme en $r$ et les arrondis des crêtes).

**Données utiles** C : $t_C = 0{,}6$ ms, $i_C = -400\ \mu\text{A}$ ; D : $t_D = 1{,}1$ ms, $i_D = 400\ \mu\text{A}$

Entre C et D, $u_L$ est constante : $u_L = 200\ \text{mV} = 0{,}20\ \text{V}$ (échelle de droite).

Sur cette portion, $i(t)$ est une droite, sa dérivée est le coefficient directeur :

$$\frac{\text{d}i}{\text{d}t} = \frac{i_D - i_C}{t_D - t_C} = \frac{\big(400 - (-400)\big) \times 10^{-6}}{(1{,}1 - 0{,}6) \times 10^{-3}} = 1{,}6\ \text{A} \cdot \text{s}^{-1}$$

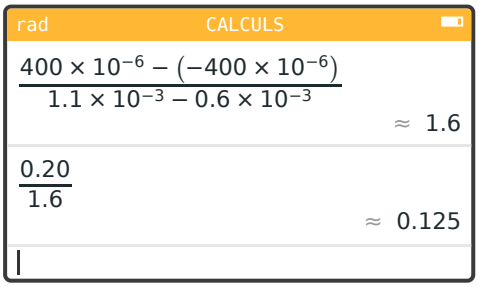
Terme en $r$ négligé : $u_L = L\dfrac{\text{d}i}{\text{d}t}$, donc $L = \dfrac{u_L}{\text{d}i/\text{d}t} = \dfrac{0{,}20}{1{,}6}$

$L = 0{,}125\ \text{H} \approx 0{,}13\ \text{H}$

**PIÈGE**
Oublier les conversions : $i$ en ampères ($\mu\text{A} = 10^{-6}$ A), $t$ en secondes, $u_L$ en volts. Sans elles, $L$ est fausse d'un facteur mille.

**COMPRENDRE**
Un courant en dents de scie a une dérivée constante par morceaux : $u_L$ est un créneau, positif quand $i$ augmente, négatif quand $i$ diminue.

**À LA CALCULATRICE**



**1.6** Le constructeur indique $r = 12\ \Omega$. Calculer $u_L$ à la même date qu'à la question 1.4.2 et montrer que la valeur est en accord avec la mesure faite alors.

**Données utiles** $r = 12\ \Omega$ ; $i = -400\ \mu\text{A}$ à $t = 1{,}6$ ms (1.4.2)

À $t = 1{,}6$ ms, l'intensité est extrémale : $u_L = r\,i$.

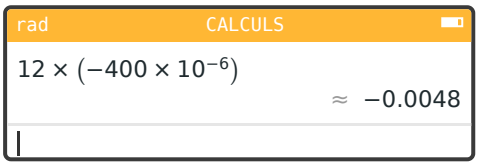
$u_L = 12 \times (-400 \times 10^{-6}) = -4{,}8 \times 10^{-3}$ V

Cette valeur est négative et très inférieure, en valeur absolue, à une graduation (50 mV) : elle est compatible avec la lecture de la question 1.4.2.

$u_L = -4{,}8$ mV, en accord avec $|u_L| \leqslant 50$ mV.

**COMPRENDRE**
Une tension de 4,8 mV représente un dixième de graduation sur la figure 2 : elle ne peut pas y être mesurée, seulement encadrée.

**À LA CALCULATRICE**




**2.1** Établir l'expression de l'intensité du courant en régime permanent en fonction des caractéristiques du circuit.

Loi d'additivité des tensions, interrupteur fermé : $E = u_L + u$, avec $u = R'\,i$ et $u_L = r\,i + L\,\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$.

$$E = (r + R')\,i + L\,\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

En régime permanent, $i$ est constante et vaut $I$ : $\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = 0$, donc $E = (r + R')\,I$.

$$I = \frac{E}{r + R'}$$

**PIÈGE**
Oublier la résistance $r$ de la bobine. En régime permanent, la bobine se comporte comme un conducteur ohmique de résistance $r$.

**2.2** Vérifier que l'intensité en régime permanent lue sur la figure 4 est en accord avec les données de l'énoncé.

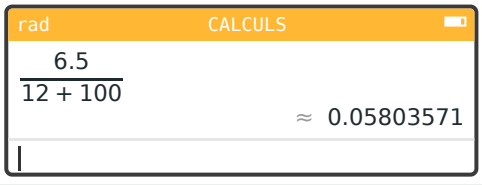
**Données utiles** $E = 6{,}5$ V ; $R' = 100\ \Omega$ ; $r = 12\ \Omega$ ; $I = \dfrac{E}{r + R'}$ (2.1)

Lecture sur la figure 4 : l'asymptote horizontale se situe un peu en dessous de 60 mA, à $I \approx 58$ mA.

Calcul : $I = \dfrac{6{,}5}{12 + 100} = 5{,}8 \times 10^{-2}$ A

$I = 58$ mA par le calcul comme sur le graphe : les valeurs sont en accord.

**À LA CALCULATRICE**




**2.3.1** Rappeler l'expression de la constante de temps d'un dipôle RL.

La constante de temps est le quotient de l'inductance par la résistance totale du circuit :

$$\tau = \frac{L}{R' + r}$$

**PIÈGE**
Diviser par $R'$ seul : c'est la résistance totale du circuit, $R' + r$, qui intervient.

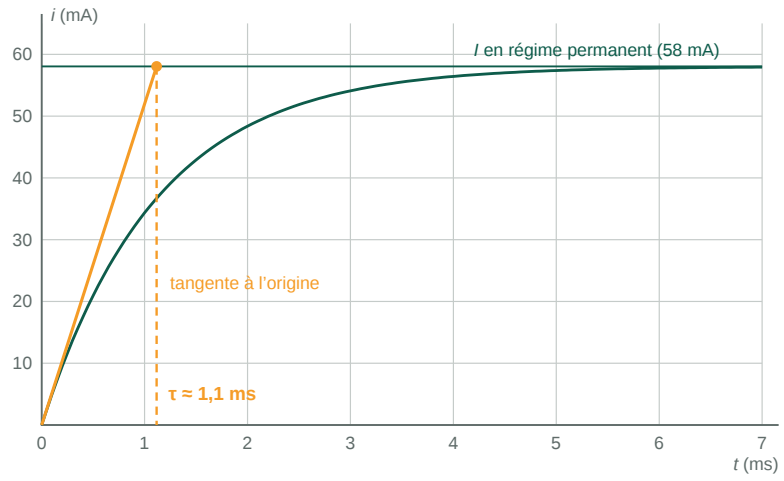
**COMPRENDRE**
Analyse dimensionnelle : $L\,\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$ et $R\,i$ sont deux tensions, donc $\dfrac{L}{R}$ est homogène à un temps.

**2.3.2** Déterminer graphiquement la valeur de la constante de temps en faisant figurer la méthode sur la figure 5 de l'annexe.

On trace la tangente à la courbe à l'origine. Elle coupe l'asymptote horizontale $I = 58$ mA en un point dont l'abscisse est $\tau$.

Lecture sur l'axe des temps :

$\tau \approx 1{,}1$ ms




**2.3.2** · Figure 5 (annexe) : tangente à l'origine et lecture de $\tau$

**COMPRENDRE**
Vérification avec la valeur de $L$ trouvée en 1.5 : $\tau = \frac{0{,}125}{112} \approx 1{,}1 \times 10^{-3}$ s. Les deux parties de l'exercice sont cohérentes.

**MÉTHODE**
Autre méthode : à $t = \tau$, l'intensité vaut 63 % de $I$, soit $0{,}63 \times 58 \approx 37$ mA. L'abscisse du point de la courbe d'ordonnée 37 mA donne aussi $\tau$.

**À LA CALCULATRICE**

rad CALCULS
$0.63 \times 58$
$\approx 36.54$
$\frac{0.125}{112}$
$\approx 0.001116071$

**2.4.1** On règle $R'$ sur $150\ \Omega$. Calculer la nouvelle intensité du courant en régime permanent.

**Données utiles** $E = 6{,}5$ V ; $R' = 150\ \Omega$ ; $r = 12\ \Omega$

$$I' = \frac{E}{r + R'} = \frac{6{,}5}{12 + 150}$$

$I' = 4{,}0 \times 10^{-2}$ A $= 40$ mA

**À LA CALCULATRICE**

rad CALCULS
$\frac{6.5}{12 + 150}$
$\approx 0.04012346$

**2.4.2** Calculer la constante de temps du nouveau dipôle RL.

**Données utiles** $L = 0{,}125$ H (1.5, valeur non arrondie) ; $R' = 150\ \Omega$ ; $r = 12\ \Omega$

$$\tau' = \frac{L}{R' + r} = \frac{0{,}125}{150 + 12}$$

$\tau' = 7{,}7 \times 10^{-4}$ s $= 0{,}77$ ms

**COMPRENDRE**
Augmenter la résistance diminue à la fois l'intensité finale et la constante de temps : le régime permanent est plus bas et atteint plus vite.

**À LA CALCULATRICE**

rad CALCULS
$\frac{0.125}{150 + 12}$
$\approx 7.716049 \times 10^{-4}$

**2.4.3** Représenter avec soin la courbe $i = f(t)$ correspondante sur la figure 5 de l'annexe.

**Données utiles** $I' = 40$ mA (2.4.1) ; $\tau' = 0{,}77$ ms (2.4.2)

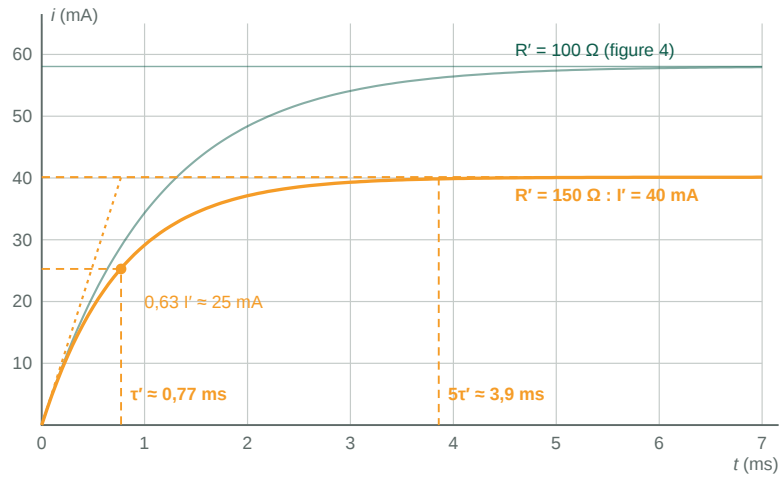
Repères pour le tracé :

- la courbe part de l'origine ($i = 0$ à $t = 0$) ;
- asymptote horizontale $I' = 40$ mA ;
- à $t = \tau' \approx 0{,}77$ ms : $i = 0{,}63 \times I' \approx 25$ mA ;
- à $t = 5\,\tau' \approx 3{,}9$ ms, le régime permanent est pratiquement atteint ;
- la tangente à l'origine coupe l'asymptote à $t = \tau'$.

Courbe croissante partant de l'origine, passant par (0,77 ms ; 25 mA) et rejoignant l'asymptote $I' = 40$ mA vers 3,9 ms.

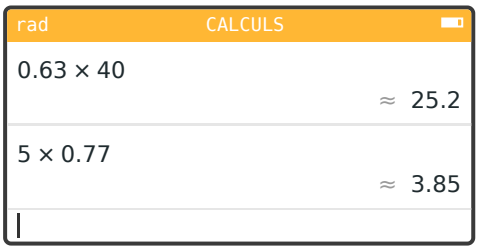
**COMPRENDRE**

À $t = 0$, $i = 0$ donc $E = L\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$ : la pente initiale $\dfrac{E}{L}$ ne dépend pas de $R'$. Les deux courbes ont la même tangente à l'origine.




**2.4.3** · Figure 5 (annexe) : nouvelle courbe pour $R' = 150\ \Omega$, en orange

**À LA CALCULATRICE**



# Spécialité : Lentilles et miroirs

Bac S 2004 Asie (ancien programme) · Exercice 3 **4 points** **Durée conseillée 52 min**

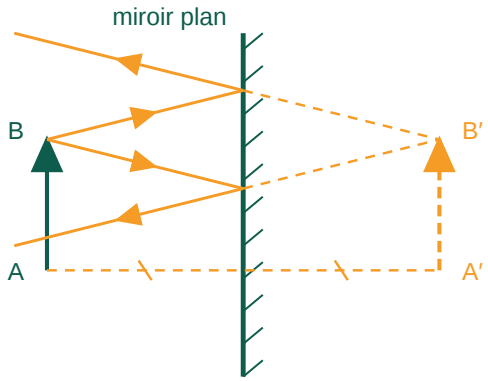
**1** Vrai ou faux : suivant sa position par rapport au miroir, l'image $A'B'$ d'un objet $AB$ donnée par un miroir plan peut être plus grande ou plus petite que l'objet.

Loi de la réflexion : chaque rayon repart avec un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence. Les prolongements des rayons réfléchis issus de $B$ se coupent en $B'$, symétrique de $B$ par rapport au plan du miroir. Il en va de même pour $A$ et $A'$.

Une symétrie conserve les longueurs : $A'B' = AB$, quelle que soit la distance de l'objet au miroir.

**FAUX** : l'image donnée par un miroir plan a toujours la même taille que l'objet.

**COMPRENDRE**
L'image est virtuelle : elle se trouve derrière le miroir, là où se coupent les prolongements des rayons et non les rayons eux-mêmes. On ne peut pas la recueillir sur un écran.




**1** · Miroir plan : l'image $A'B'$ est la symétrique de l'objet $AB$ par rapport au miroir

**2** Vrai ou faux : la lentille convergente de distance focale $f' = 10$ cm a une vergence $C = 0{,}10\ \delta$.

**Données utiles** $f' = 10\ \text{cm} = 0{,}10\ \text{m}$

La vergence est l'inverse de la distance focale exprimée en mètres :

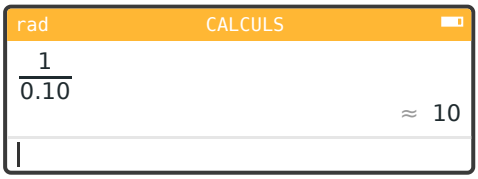
$$C = \frac{1}{f'} = \frac{1}{0{,}10} = 10\ \delta$$

**FAUX** : $C = 10\ \delta$, et non $0{,}10\ \delta$.

**PIÈGE**
La valeur $0{,}10$ est la distance focale en mètres, pas son inverse. Laisser $f'$ en centimètres donne aussi $0{,}10$, mais en $\text{cm}^{-1}$ : la dioptrie est le $\text{m}^{-1}$.

**COMPRENDRE**
$f'$ est donnée avec deux chiffres significatifs : les résultats de l'exercice en gardent deux.

**À LA CALCULATRICE**



**3** Vrai ou faux : l'image $A'B'$ d'un objet placé devant la lentille, à 60 cm du centre optique, se forme derrière la lentille, à 12 cm du centre optique.

**Données utiles** $f' = \overline{OF'} = 10$ cm ; $\overline{OA} = -60$ cm

Relation de conjugaison : $\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}}$, donc $\frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{\overline{OF'}} + \frac{1}{\overline{OA}}$.

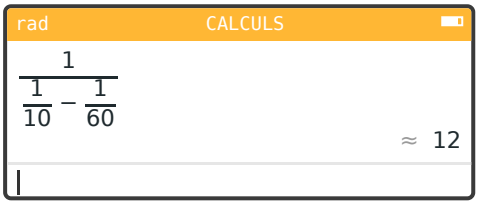
$$\frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{10} + \frac{1}{-60} = \frac{5}{60}\ \text{cm}^{-1} \quad \text{soit} \quad \overline{OA'} = 12\ \text{cm}$$

$\overline{OA'} > 0$ : l'image est après la lentille dans le sens de la lumière.

**VRAI** : $\overline{OA'} = +12$ cm, l'image se forme 12 cm derrière la lentille.

**PIÈGE**
L'objet est avant la lentille : $\overline{OA} = -60$ cm. Avec $+60$ cm, on trouve $8{,}6$ cm et on conclut à tort que l'affirmation est fausse.

**À LA CALCULATRICE**




**4** Vrai ou faux : après avoir traversé la lentille, le rayon (1) passe par le point $B'$ (schéma de l'annexe).

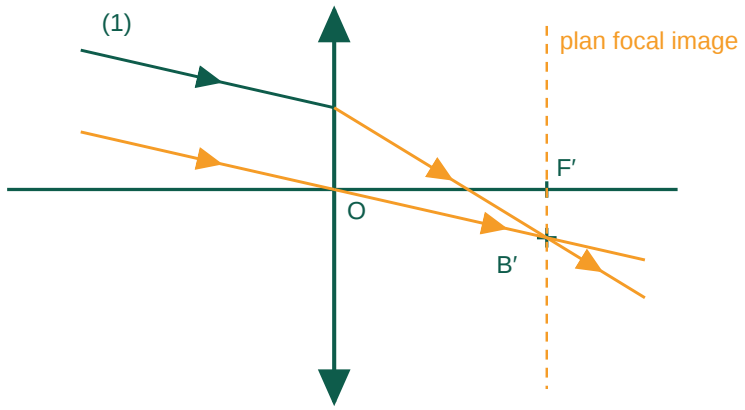
On trace le rayon parallèle à (1) qui passe par le centre optique $O$ : il n'est pas dévié.

Deux rayons incidents parallèles viennent d'un même point objet à l'infini : après la lentille, ils se croisent en un point du plan focal image, le plan perpendiculaire à l'axe optique passant par $F'$.

Sur l'annexe, le rayon passant par $O$ coupe ce plan au point $B'$. Le rayon (1) émerge donc en passant par $B'$.

**VRAI** : le rayon (1) ressort de la lentille en passant par $B'$.

**MÉTHODE**
Pour tracer l'émergent d'un rayon quelconque : mener la parallèle passant par $O$, repérer son intersection avec le plan focal image, puis y faire passer le rayon étudié.




**4** · Annexe complétée : le rayon parallèle à (1) passant par O coupe le plan focal image en $B'$

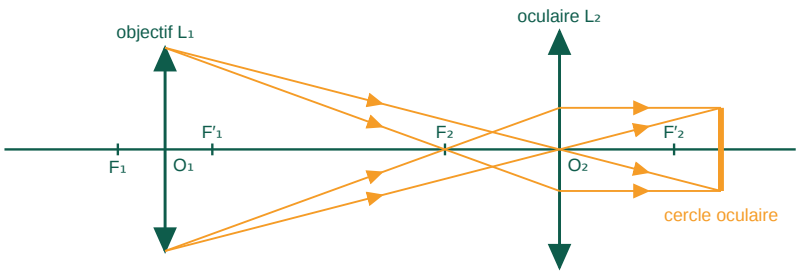
**5** Vrai ou faux : dans un microscope, où la distance objectif-oculaire est fixe, le diamètre du cercle oculaire dépend de la position et de la taille de l'objet observé.

Le cercle oculaire est l'image de la monture de l'objectif donnée par l'oculaire.

Sa position ne dépend que de la distance $O_1O_2$, qui est fixe, et de la distance focale de l'oculaire. Son diamètre ne dépend que du diamètre de l'objectif et de ces deux mêmes distances. L'objet observé n'intervient nulle part.

**FAUX** : le cercle oculaire est fixé par l'instrument seul, pas par l'objet observé.

**COMPRENDRE**
Toute la lumière qui a traversé l'objectif ressort par le cercle oculaire : c'est là que l'on place la pupille de l'œil pour recevoir le plus de lumière possible.




**5** · Annexe complétée : le cercle oculaire est l'image de la monture de l'objectif donnée par l'oculaire

**6** Vrai ou faux : l'image $A'B'$ de l'objet $AB$ donnée par le miroir sphérique (sommet $S$, centre $C$, foyer $F$) est située dans le même plan vertical que l'objet $AB$.

Sur l'annexe, le point $A$ est confondu avec le centre $C$ du miroir. On construit l'image de $B$ avec deux rayons :

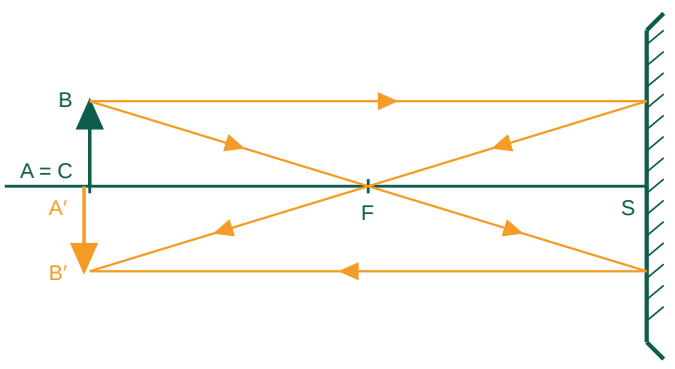
- le rayon issu de $B$ parallèle à l'axe se réfléchit en passant par le foyer $F$ ;
- le rayon issu de $B$ passant par $F$ se réfléchit parallèlement à l'axe.

Les deux rayons réfléchis se coupent en $B'$, à la verticale de $B$, de l'autre côté de l'axe. Le point $A'$, sur l'axe, est alors confondu avec $A$ et $C$.

**VRAI** : $A'B'$ est dans le plan de $AB$, renversée et de même taille.

**PIÈGE**
Le rayon issu de $B$ passant par $C$ est ici vertical : il ne rencontre pas le miroir et ne sert à rien pour la construction. Il faut utiliser le foyer $F$, milieu de $[CS]$.

**COMPRENDRE**
Un rayon passant par le centre $C$ arrive perpendiculairement au miroir et revient sur lui-même : le point $C$ est sa propre image. C'est pourquoi un objet placé en $C$ a son image dans le même plan.




**6** · Annexe complétée : $A'B'$ est dans le plan de $AB$, renversée et de même taille

**7** Vrai ou faux : dans la lunette afocale de l'annexe, tous les rayons issus de $B$ qui traversent l'objectif $L_1$ traversent l'oculaire $L_2$.

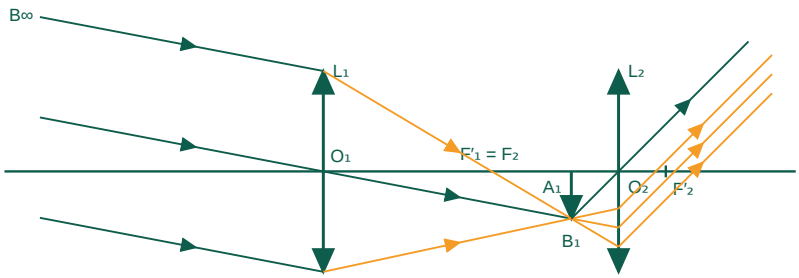
Le point $B$ est à l'infini : les rayons qu'il envoie sont parallèles et convergent, après $L_1$, au point $B_1$ du plan focal image de l'objectif.

Le faisceau qui traverse $L_1$ est limité par les deux rayons passant par les bords de l'objectif. On les trace jusqu'à $B_1$ puis on les prolonge : ils atteignent tous les deux $L_2$ entre ses bords. Tous les autres rayons, compris entre ces deux-là, traversent donc aussi l'oculaire.

**VRAI** : tout le faisceau issu de $B$ reçu par l'objectif traverse l'oculaire.

**COMPRENDRE**
$B_1$ est dans le plan focal objet de l'oculaire : les rayons ressortent de $L_2$ parallèles entre eux, dans la direction de la droite $(B_1O_2)$. L'image finale est à l'infini.

**MÉTHODE**
Pour savoir si un faisceau passe par une lentille, il suffit de tracer ses deux rayons extrêmes, ceux qui s'appuient sur les bords de la lentille précédente.




**7** · Annexe complétée : le faisceau issu de $B_\infty$ converge en $B_1$, puis atteint l'oculaire entre ses bords

**8** Vrai ou faux : pour une lunette afocale, le grossissement $G = \dfrac{\alpha'}{\alpha}$ s'exprime aussi par $G = \dfrac{f_1'}{f_2'}$.

Dans le triangle $O_1A_1B_1$, rectangle en $A_1$, avec $O_1A_1 = f_1'$ : $\tan\alpha = \dfrac{A_1B_1}{f_1'}$, soit $\alpha = \dfrac{A_1B_1}{f_1'}$.

Dans le triangle $O_2A_1B_1$, rectangle en $A_1$, avec $O_2A_1 = f_2'$ : $\tan\alpha' = \dfrac{A_1B_1}{f_2'}$, soit $\alpha' = \dfrac{A_1B_1}{f_2'}$.

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{A_1B_1}{f_2'} \times \frac{f_1'}{A_1B_1} = \frac{f_1'}{f_2'}$$

**VRAI** : $G = \dfrac{f_1'}{f_2'}$

**COMPRENDRE**
La lunette astronomique afocale et son grossissement figurent toujours au programme de spécialité : cette démonstration est à savoir refaire. L'approximation $\tan\alpha \approx \alpha$ n'est valable que pour de petits angles exprimés en radians.

**9** Vrai ou faux : l'image $A_1B_1$ donnée par l'objectif mesure 13,5 mm.

**Données utiles** $f'_1 = 0{,}75$ m ; $\alpha = 9{,}0 \times 10^{-3}$ rad ; $\alpha = \dfrac{A_1B_1}{f'_1}$ (affirmation 8)

$$A_1B_1 = f'_1 \times \alpha = 0{,}75 \times 9{,}0 \times 10^{-3} = 6{,}75 \times 10^{-3} \text{ m}$$

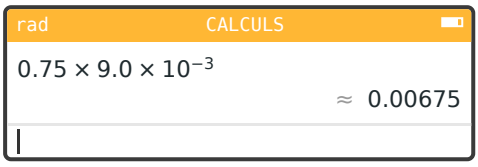
Avec deux chiffres significatifs : $A_1B_1 = 6{,}8$ mm.

**FAUX** : $A_1B_1 = 6{,}8$ mm, et non 13,5 mm.

**PIÈGE**

13,5 mm est exactement le double du résultat. Le diamètre apparent $\alpha$ est l'angle entre les rayons venus des deux extrémités $A$ et $B$ de l'astre : il ne faut pas le doubler.

**À LA CALCULATRICE**



# Energies d'un système solide-ressort

Bac S 2004 Asie (ancien programme) · Exercice 4 **4 points** **Durée conseillée 52 min**

**1** (Partie I, sans frottement, 1.a et 1.b) Faire l'inventaire des forces exercées sur le mobile, puis reproduire la figure 1 et représenter ces forces sans souci d'échelle.

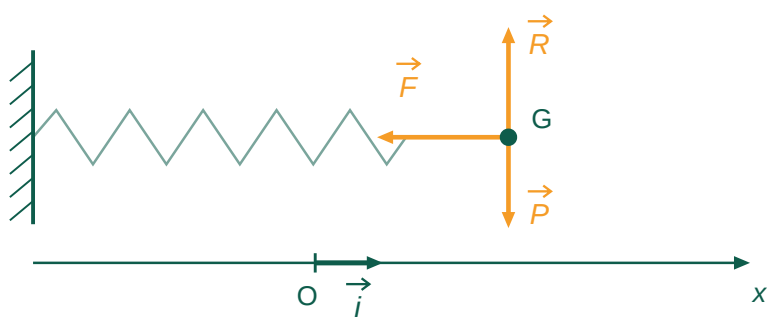
Système {mobile}, étudié dans le référentiel terrestre supposé galiléen. Sans frottement, il subit trois forces, appliquées en G :

- son poids $\vec{P}$, vertical, vers le bas ;
- la réaction $\vec{R}$ de la tige, perpendiculaire à la tige (pas de frottement), donc verticale, vers le haut ;
- la force de rappel $\vec{F}$ du ressort, horizontale, dirigée vers O : $\vec{F} = -k\,x\,\vec{i}$.

Trois forces : $\vec{P}$, $\vec{R}$ et $\vec{F} = -k\,x\,\vec{i}$ (voir la figure).

**PIÈGE**
Dessiner $\vec{F}$ dans le sens du déplacement. La force de rappel ramène toujours G vers O : elle est opposée à l'allongement, d'où le signe « $-$ ».

**COMPRENDRE**
L'oscillateur solide-ressort ne figure plus au programme actuel de spécialité. Les outils employés ici (deuxième loi de Newton, énergies cinétique et mécanique, travail des frottements) restent, eux, exigibles.




**1** · Figure 1 reproduite, mobile écarté du côté des $x$ positifs : les trois forces (en orange), sans souci d'échelle

**2** (Partie I) En appliquant la seconde loi de Newton au mobile, établir l'équation différentielle du mouvement.

Seconde loi de Newton, la masse étant constante : $\vec{P} + \vec{R} + \vec{F} = m\,\vec{a}$.

Projection sur l'axe $(Ox)$ : $\vec{P}$ et $\vec{R}$ sont verticaux, leurs composantes sont nulles. Il reste $-k\,x = m\,a_x$ avec $a_x = \dfrac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}$.

$$\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} + \frac{k}{m}\,x = 0$$

**MÉTHODE**
Toujours le même enchaînement : système, référentiel, bilan des forces, loi de Newton écrite en vecteurs, puis projection sur l'axe du mouvement. L'équation différentielle apparaît en remplaçant $a_x$ par la dérivée seconde de $x$.

**3** (Partie I) Vérifier que $x = x_M \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}}\,t + \varphi\right)$ est solution de cette équation différentielle quelles que soient les constantes $x_M$ et $\varphi$.

On dérive deux fois par rapport au temps :

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = -x_M\sqrt{\frac{k}{m}}\,\sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}}\,t + \varphi\right)$$

$$\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} = -x_M\,\frac{k}{m}\,\cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}}\,t + \varphi\right) = -\frac{k}{m}\,x$$

$\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} + \frac{k}{m}\,x = -\frac{k}{m}\,x + \frac{k}{m}\,x = 0$ à tout instant, pour tous $x_M$ et $\varphi$ : la fonction proposée est solution.

**PIÈGE**
Oublier le facteur $\sqrt{k/m}$ qui sort à chaque dérivation : la dérivée de $\cos(\omega t + \varphi)$ est $-\omega\sin(\omega t + \varphi)$. Deux dérivations donnent $\omega^2 = k/m$.

**4** (Partie I) Le mobile est lâché à $t = 0$ sans vitesse initiale depuis la position $x_0$, avec $x_M > 0$. Déterminer numériquement $x_M$ et $\varphi$.

**Données utiles** $x_0 = +2{,}0$ cm ; $v(0) = 0$

Vitesse initiale nulle : $v_x(0) = -x_M\sqrt{\frac{k}{m}}\,\sin\varphi = 0$. Comme $x_M \neq 0$, $\sin\varphi = 0$, soit $\varphi = 0$ ou $\varphi = \pi$.

Position initiale : $x(0) = x_M\cos\varphi = x_0 > 0$. Avec $x_M > 0$, il faut $\cos\varphi > 0$ : on retient $\varphi = 0$, d'où $x_M = x_0$.

$x_M = 2{,}0$ cm et $\varphi = 0$ rad

**MÉTHODE**
Deux constantes inconnues, donc deux conditions initiales : la vitesse à $t = 0$ fixe $\varphi$, la position à $t = 0$ fixe $x_M$. Les conditions de signe ($x_M > 0$, $x_0 > 0$) départagent les valeurs possibles de $\varphi$.

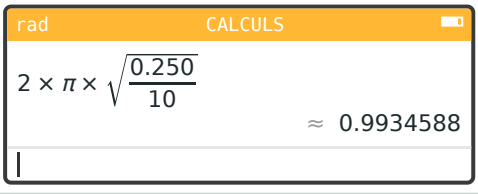
**5** (Partie I) Calculer la période propre $T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ du mouvement.

**Données utiles** $m = 250$ g $= 0{,}250$ kg ; $k = 10$ N · m$^{-1}$

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{0{,}250}{10}}$$

$T_0 = 0{,}99$ s

**À LA CALCULATRICE**




**PIÈGE**
Laisser la masse en grammes : avec $m = 250$ on trouverait 31 s. Dans cette formule, $m$ est en kg et $k$ en N · m$^{-1}$.

**COMPRENDRE**
Deux chiffres significatifs, comme $k = 10$ N · m$^{-1}$, la donnée la moins précise. La période propre ne dépend pas de l'amplitude $x_M$.

**1** (Partie II, avec frottement) À l'aide de la figure 2, déterminer la pseudo-période $T$ du mouvement. Comparer sa valeur à celle de la période propre.

**Données utiles** figure 2 ; $T_0 = 0{,}99$ s (I.5)

Sur la figure 2, $x$ est maximale à $t = 0$, puis à $t = 1{,}0$ s et à $t = 2{,}0$ s. Deux pseudo-périodes durent donc 2,0 s :

$$T = \frac{2{,}0}{2} = 1{,}0\text{ s}$$

$T = 1{,}0$ s $\approx T_0$ : à la précision de la lecture, la pseudo-période est égale à la période propre.

**MÉTHODE**
Mesurer la durée de plusieurs pseudo-périodes entre deux maximums (ou deux passages par zéro dans le même sens), puis diviser : l'incertitude de lecture est divisée d'autant.

**2** (Partie II) Identifier par leur lettre (A ou B) les courbes $E_c(t)$ et $E_p(t)$ de la figure 3 en justifiant.

$E_c = \frac{1}{2} m v^2$ et $E_p = \frac{1}{2} k x^2$.

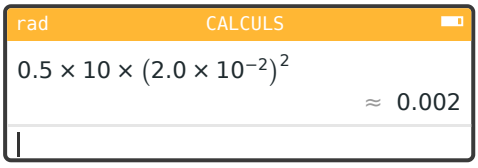
À $t = 0$, le mobile est lâché sans vitesse : $E_c(0) = 0$. Il est alors à son abscisse maximale $x_0$ : $E_p$ est maximale et vaut $E_m$, soit $\frac{1}{2} \times 10 \times (2{,}0 \times 10^{-2})^2 = 2{,}0 \times 10^{-3}$ J $= 2{,}0$ mJ.

La courbe A part de $2{,}0$ mJ, la courbe B part de zéro.

Courbe A : $E_p(t)$ ; courbe B : $E_c(t)$.

**COMPRENDRE**
Les deux énergies s'échangent : quand l'une est maximale, l'autre est nulle. Elles s'annulent deux fois par pseudo-période, car elles dépendent de $x^2$ et de $v^2$.

**À LA CALCULATRICE**




**3** (Partie II) Pourquoi l'énergie mécanique du système diminue-t-elle au cours du temps ?

La force de frottement $\vec{f} = -\mu \vec{v}$ est toujours opposée au mouvement : son travail est négatif (résistant). Cette force n'est pas conservative, et la variation de l'énergie mécanique est égale à son travail.

$E_m$ diminue : les frottements dissipent peu à peu l'énergie mécanique du système, transférée au milieu extérieur sous forme thermique.

**PIÈGE**
Répondre « à cause des frottements » sans plus : il faut dire que leur travail est résistant et que l'énergie perdue est dissipée sous forme thermique.

**4** (Partie II) En utilisant la figure 2 et en justifiant, indiquer auquel des instants $t_1$ et $t_2$ la valeur de la vitesse du mobile est : a) maximale ; b) nulle.

La vitesse est $v_x = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$ : c'est le coefficient directeur de la tangente à la courbe $x(t)$, et la valeur de la vitesse est $v = |v_x|$.

a) À $t_1$, la courbe coupe l'axe des temps ($x = 0$) et sa tangente est la plus inclinée : $|v_x|$ est maximale.

b) À $t_2$, $x$ passe par un minimum : la tangente est horizontale, $v_x = 0$.

a) vitesse maximale à $t_1$ ; b) vitesse nulle à $t_2$.

**PIÈGE**
À $t_1$, la pente est négative : $v_x$ est minimale, mais c'est la valeur $v = |v_x|$ qui est demandée, et elle est maximale. À ne pas confondre non plus avec $x = 0$, qui n'implique pas $v = 0$.

**5** (Partie II) Que peut-on en conclure quant à la valeur de la force de frottement à chacun de ces instants ?

$\vec{f} = -\mu \vec{v}$ donne, en valeur, $f = \mu v$ : la force de frottement est proportionnelle à la vitesse.

À $t_1$, $v$ est maximale donc $f$ est maximale ; à $t_2$, $v = 0$ donc $f = 0$.

**6** (Partie II) Justifier alors la forme « en escalier » de la courbe $E_m(t)$ de la figure 3.

L'énergie mécanique ne diminue que par le travail de $\vec{f}$, d'autant plus important, pendant une même durée, que $f$ et $v$ sont grandes.

Autour de $t_2$ (et à chaque extremum de $x$), $v \approx 0$ : $f$ est nulle et ne travaille pas, $E_m$ reste pratiquement constante. C'est un palier.

Autour de $t_1$ (et à chaque passage par O), $v$ et $f$ sont maximales : $E_m$ diminue le plus vite. C'est une « marche ».

Paliers quand $v = 0$ (aucune dissipation), descentes rapides quand $v$ est maximale : $E_m(t)$ décroît en escalier, deux marches par pseudo-période.

**COMPRENDRE**

La puissance de la force de frottement vaut $\vec{f} \cdot \vec{v} = -\mu v^2$ : c'est la pente de la courbe $E_m(t)$. Elle est nulle quand $v = 0$ et la plus négative quand $v$ est maximale.