# Corrigé complet — Bac S 2010 Liban (ancien programme)

Physique-chimie, enseignement de spécialité **20 points** **3 h 30**


| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Ex 1 | **L'acide éthanoïque**<br>Couple acide-base et diagramme de prédominance · Quotient de réaction et constante d'acidité · Taux d'avancement final · Titrage pH-métrique · Dilution · Estérification et chauffage à reflux | 6,5 pts | 1 h 18 | 19 questions | p. 2 |
| Ex 2 | **L'oscillateur harmonique**<br>Pendule simple et isochronisme · Pendule élastique · Deuxième loi de Newton · Énergie mécanique · Quantification de l'énergie · Transition et longueur d'onde | 6,5 pts | 1 h 05 | 17 questions | p. 9 |
| Ex 3 | **Les ondes sonores**<br>Onde mécanique progressive · Ondes longitudinales et transversales · Retard et célérité · Période, fréquence, longueur d'onde · Milieu dispersif · Diffraction | 4 pts | 52 min | 12 questions | p. 15 |
| Ex 4 | **Spécialité : Au concert**<br>Ondes stationnaires · Hauteur et timbre · Analyse spectrale · Son musical et bruit · Intensité et niveau sonores | 4 pts | 52 min | 15 questions | p. 19 |


**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.

# L'acide éthanoïque

Bac S 2010 Liban (ancien programme) · Exercice 1 **6,5 points** **Durée conseillée 1 h 18**

**1.1** Écrire l'équation de la réaction entre l'acide éthanoïque et l'eau.

L'acide éthanoïque cède un ion $H^+$ à l'eau, qui joue le rôle de base :

$$CH_3CO_2H\,(aq) + H_2O\,(l) = CH_3CO_2^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$$

**COMPRENDRE**
Le signe « = » de l'ancien programme indique une transformation non totale ; on écrit aujourd'hui une double flèche $\rightleftharpoons$.

**1.2** Tracer le diagramme de prédominance du couple acide éthanoïque / ion éthanoate. Quelle espèce prédomine dans la solution ?

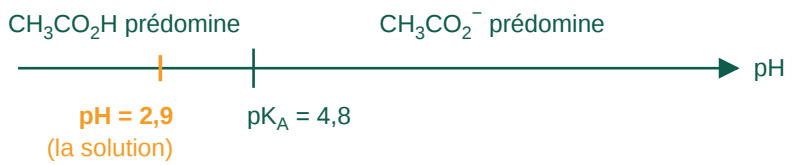
**Données utiles** $pK_A = 4{,}8$ ; pH de la solution : $2{,}9$

L'acide prédomine pour $pH < pK_A$, la base pour $pH > pK_A$ (voir le diagramme).

Ici $pH = 2{,}9 < pK_A = 4{,}8$.

L'espèce prédominante dans la solution est l'acide éthanoïque $CH_3CO_2H$.

**PIÈGE**
Placer la base à gauche. L'acide est toujours du côté des pH faibles, donc à gauche de $pK_A$.




**1.2** · Diagramme de prédominance du couple acide éthanoïque / ion éthanoate

**1.3.1** Compléter le tableau d'évolution du document 1 de l'annexe.

**Données utiles** quantité d'acide apportée : $C \cdot V$

La quantité initiale d'acide est $n_0 = C \cdot V$. Chaque mole d'acide qui réagit forme une mole d'ion éthanoate et une mole d'ion oxonium ; l'eau est le solvant, en large excès.

Tableau complété : voir le document 1 ci-dessous.

| Équation chimique | | $CH_3CO_2H$(aq) | + $H_2O$(ℓ) | = $CH_3CO_2^-$(aq) | + $H_3O^+$(aq) |
|---|---|---|---|---|---|
| État du système | Avancement (mol) | Quantités de matière (mol) | | | |
| État initial | x = 0 | C·V | solvant | 0 | 0 |
| État intermédiaire | x | C·V − x | solvant | x | x |
| État final | $x_{éq}$ | C·V − $x_{éq}$ | solvant | $x_{éq}$ | $x_{éq}$ |

**1.3.1** · Document 1 de l'annexe complété (en orange, ce que l'on écrit)

**1.3.2** Donner l'expression du quotient de réaction à l'équilibre $Q_{r,éq}$, puis montrer que $Q_{r,éq} = \dfrac{x_{éq}^2}{V\,(CV - x_{éq})}$.

L'eau, solvant, n'apparaît pas dans le quotient :

$$Q_{r,éq} = \frac{[CH_3CO_2^-]_{éq} \times [H_3O^+]_{éq}}{[CH_3CO_2H]_{éq}}$$

D'après la dernière ligne du tableau : $[CH_3CO_2^-]_{éq} = [H_3O^+]_{éq} = \dfrac{x_{éq}}{V}$ et $[CH_3CO_2H]_{éq} = \dfrac{CV - x_{éq}}{V}$.

$$Q_{r,éq} = \frac{\frac{x_{éq}}{V} \times \frac{x_{éq}}{V}}{\frac{CV - x_{éq}}{V}} = \frac{x_{éq}^2}{V^2} \times \frac{V}{CV - x_{éq}}$$

$Q_{r,éq} = \dfrac{x_{éq}^2}{V\,(CV - x_{éq})}$ : c'est l'expression attendue.

**MÉTHODE**
Pour passer du tableau au quotient : diviser chaque quantité de matière de la ligne « état final » par le volume $V$ de la solution, puis simplifier les $V$.

**1.3.3** Comment s'exprime $x_{éq}$ en fonction du pH ?

Par définition du pH : $[H_3O^+]_{éq} = 10^{-pH}$ (en $mol \cdot L^{-1}$). Or $[H_3O^+]_{éq} = \dfrac{x_{éq}}{V}$.

$x_{éq} = 10^{-pH} \times V$

**COMPRENDRE**
Avec $V = 1{,}00$ L et $pH = 2{,}9$, on obtient $x_{éq} = 1{,}3 \times 10^{-3}$ mol, très inférieur aux $0{,}100$ mol d'acide apporté.

**1.3.4** Calculer $Q_{r,éq}$. À quelle grandeur caractéristique du couple s'identifie-t-il ? Vérifier l'accord avec une donnée de l'exercice.

**Données utiles** $C = 0{,}100\ mol \cdot L^{-1}$ ; $pH = 2{,}9$ ; $pK_A = 4{,}8$ ; $x_{éq} = 10^{-pH} \times V$ (1.3.3)

En remplaçant $x_{éq}$ par $10^{-pH} \times V$, les volumes se simplifient :

$$Q_{r,éq} = \frac{10^{-2\,pH} \times V^2}{V^2\,(C - 10^{-pH})} = \frac{10^{-2\,pH}}{C - 10^{-pH}}$$

$$Q_{r,éq} = \frac{10^{-2\times 2{,}9}}{0{,}100 - 10^{-2{,}9}} = 1{,}6 \times 10^{-5}$$

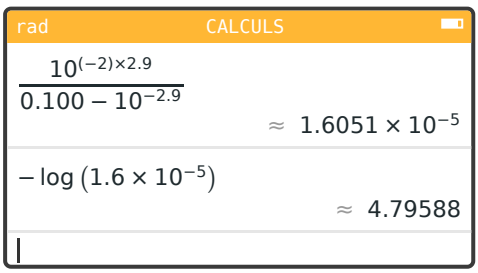
Ce quotient à l'équilibre est la constante d'acidité $K_A$ du couple.
Vérification : $pK_A = -\log K_A = -\log(1{,}6 \times 10^{-5}) = 4{,}8$, valeur donnée par l'énoncé.

$Q_{r,éq} = K_A = 1{,}6 \times 10^{-5}$, soit $pK_A = 4{,}8$ : accord avec la donnée.

**PIÈGE**
Taper $10^{-2,9}$ au carré sans parenthèses, ou oublier de retrancher $10^{-pH}$ au dénominateur.

**COMPRENDRE**
Deux chiffres significatifs au plus : le pH n'est connu qu'au dixième, ce qui limite la précision de $10^{-pH}$. Une constante d'équilibre s'écrit sans unité.

**À LA CALCULATRICE**



**1.4** Définir et calculer le taux d'avancement final $\tau$. La transformation est-elle totale ?

**Données utiles** $C = 0{,}100\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ; $\text{pH} = 2{,}9$ ; $x_{\text{éq}} = 10^{-\text{pH}} \times V$ (1.3.3)

Le taux d'avancement final est le rapport de l'avancement final à l'avancement maximal : $\tau = \dfrac{x_{\text{éq}}}{x_{\max}}$.

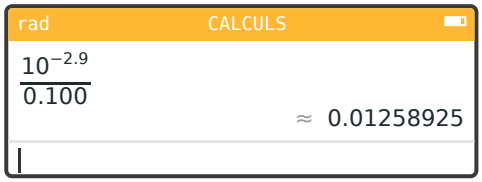
Si la transformation était totale, tout l'acide serait consommé : $CV - x_{\max} = 0$, soit $x_{\max} = CV$.

$$\tau = \frac{10^{-\text{pH}} \times V}{C \times V} = \frac{10^{-\text{pH}}}{C} = \frac{10^{-2{,}9}}{0{,}100} = 1{,}3 \times 10^{-2}$$

$\tau = 1{,}3 \times 10^{-2}$, soit 1,3 % : $\tau < 1$, la transformation n'est pas totale ; elle est très limitée.

**COMPRENDRE**
Seule une molécule d'acide sur 80 environ a réagi avec l'eau : l'acide éthanoïque est un acide faible, ce qui est cohérent avec sa prédominance trouvée en 1.2.

**À LA CALCULATRICE**




**2.1** Préciser, par un raisonnement sans application numérique, quel est le vinaigre de plus faible pH.

**Données utiles** vinaigre d'alcool : 7,5° ; vinaigre de vin : 6,0°

Plus le titre est élevé, plus la masse d'acide éthanoïque dans 100 g de vinaigre est grande, donc plus la concentration apportée en acide est grande.

Une solution plus concentrée du même acide contient davantage d'ions $\text{H}_3\text{O}^+$ par litre : $[\text{H}_3\text{O}^+]$ est plus grande, et comme $\text{pH} = -\log[\text{H}_3\text{O}^+]$, le pH est plus faible.

Le vinaigre de plus faible pH est le vinaigre d'alcool, de titre 7,5°.

**PIÈGE**
Confondre « plus acide » et « pH plus grand ». La fonction $-\log$ est décroissante : plus il y a d'ions oxonium, plus le pH est petit.

**2.2.1** Écrire l'équation de la réaction support du dosage.

L'acide éthanoïque du vinaigre réagit avec les ions hydroxyde de la solution titrante ; les ions sodium sont spectateurs.

$$\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}\,(\text{aq}) + \text{HO}^-\,(\text{aq}) = \text{CH}_3\text{CO}_2^-\,(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}\,(\text{l})$$

**2.2.2** Calculer la constante d'équilibre $K$ associée à l'équation de cette réaction.

**Données utiles** $\text{p}K_A = 4{,}8$ ; $K_e = 1{,}0 \times 10^{-14}$

$$K = \frac{[\text{CH}_3\text{CO}_2^-]_{\text{éq}}}{[\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}]_{\text{éq}} \times [\text{HO}^-]_{\text{éq}}}$$

On multiplie le numérateur et le dénominateur par $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$, pour faire apparaître $K_A$ et $K_e = [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} \times [\text{HO}^-]_{\text{éq}}$ :

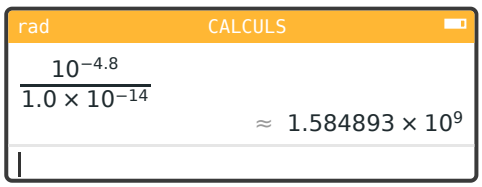
$$K = \frac{[\text{CH}_3\text{CO}_2^-]_{\text{éq}} \times [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}{[\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}]_{\text{éq}}} \times \frac{1}{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} \times [\text{HO}^-]_{\text{éq}}} = \frac{K_A}{K_e} = \frac{10^{-\text{p}K_A}}{K_e}$$

$$K = \frac{10^{-4{,}8}}{1{,}0 \times 10^{-14}} = 1{,}6 \times 10^{9}$$

$K = 1{,}6 \times 10^{9}$

**MÉTHODE**
Pour relier une constante d'équilibre acido-basique à $K_A$ et $K_e$ : multiplier en haut et en bas par $[\text{H}_3\text{O}^+]$, puis reconnaître les produits connus.

**À LA CALCULATRICE**




**2.2.3** La réaction est totale. Quelle autre caractéristique doit-elle posséder pour servir de support à un dosage ?

Chaque ajout de solution titrante doit être consommé aussitôt, pour que la mesure du pH soit stable.

La réaction doit aussi être rapide (et unique : la soude ne doit réagir qu'avec l'acide dosé).

**2.3** On dilue le vinaigre d'un facteur 10. Décrire la préparation de 50,0 mL de vinaigre dilué en précisant la verrerie utilisée.

**Données utiles** volume à préparer : $50{,}0$ mL ; $C_A = \dfrac{C_0}{10}$

La quantité d'acide se conserve lors de la dilution : $C_0 \times V_0 = C_A \times V_{\text{fille}}$, d'où

$$V_0 = \frac{C_A \times V_{\text{fille}}}{C_0} = \frac{V_{\text{fille}}}{10} = \frac{50{,}0}{10} = 5{,}00 \text{ mL}$$

Protocole :

- verser un peu de vinaigre dans un bécher ;
- prélever $5{,}00$ mL avec une pipette jaugée de 5 mL munie d'une propipette ;
- les introduire dans une fiole jaugée de $50{,}0$ mL ;
- ajouter de l'eau distillée aux trois quarts, boucher, agiter ;
- compléter à l'eau distillée jusqu'au trait de jauge, boucher, homogénéiser.

On prélève $V_0 = 5{,}00$ mL de vinaigre (pipette jaugée) que l'on dilue dans une fiole jaugée de $50{,}0$ mL.

**PIÈGE**
Citer une éprouvette graduée ou un bécher pour mesurer les volumes : seule la verrerie jaugée (pipette, fiole) donne la précision exigée, et son nom est attendu.

**2.4.1** Pourquoi rajoute-t-on de l'eau distillée avant le dosage ? Cet ajout modifie-t-il le volume $V_E$ versé à l'équivalence ?

Les $10{,}0$ mL de vinaigre dilué ne suffisent pas pour que la sonde du pH-mètre trempe correctement : l'eau ajoutée augmente le volume de liquide dans le bécher.

L'eau n'apporte ni ne retire d'acide éthanoïque : la quantité d'acide à doser, $C_A \times V_A$, reste la même, donc la quantité d'ions hydroxyde nécessaire aussi.

L'eau sert à immerger la sonde ; elle ne modifie pas $V_E$.

**COMPRENDRE**
C'est pourquoi « environ 20 mL » suffit : ce volume d'eau n'intervient dans aucun calcul, alors que $V_A$ est prélevé à la pipette jaugée.

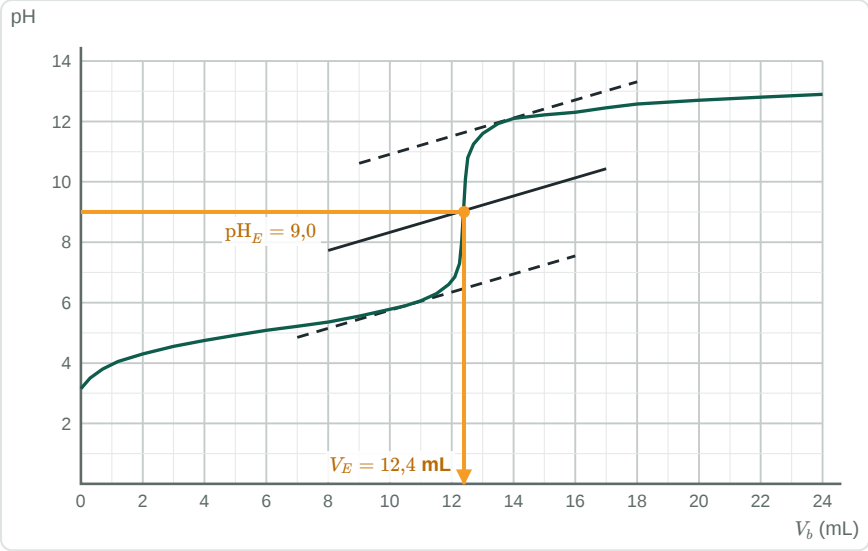
**2.4.2** Déterminer le volume $V_E$ et le pH à l'équivalence en utilisant le graphique.

**Données utiles** courbe $\text{pH} = f(V_b)$ du document 2

Méthode des tangentes parallèles : on trace deux tangentes à la courbe, parallèles entre elles, de part et d'autre du saut de pH, puis la droite parallèle située à égale distance des deux. Elle coupe la courbe au point d'équivalence E.

$V_E = 12{,}4$ mL et $\text{pH}_E \approx 9{,}0$

**COMPRENDRE**
$\text{pH}_E > 7$ : à l'équivalence, la solution contient l'ion éthanoate, qui est une base. Les traits de construction doivent rester visibles sur l'annexe.




**2.4.2** · Document 2 complété : deux tangentes parallèles (tirets), leur parallèle équidistante, et la lecture du point d'équivalence

**2.4.3** En déduire les concentrations $C_A$ du vinaigre dilué et $C_0$ du vinaigre étudié.

**Données utiles** $V_A = 10{,}0$ mL ; $C_B = 1{,}0 \times 10^{-1}$ mol · L$^{-1}$ ; $V_E = 12{,}4$ mL (2.4.2) ; dilution au dixième

À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques de l'équation (une mole pour une mole) : $n(CH_3CO_2H)_{initial} = n(HO^-)_{versé}$, soit $C_A \times V_A = C_B \times V_E$.

$$C_A = \frac{C_B \times V_E}{V_A} = \frac{1{,}0 \times 10^{-1} \times 12{,}4}{10{,}0} = 0{,}124 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

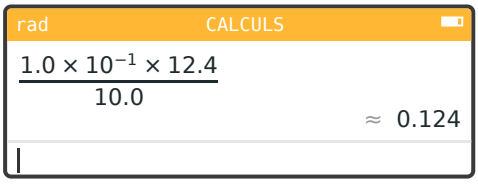
Le vinaigre a été dilué 10 fois : $C_0 = 10 \times C_A = 1{,}24 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

$C_A = 0{,}12 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et $C_0 = 1{,}2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

**PIÈGE**
Utiliser 30 mL (vinaigre dilué et eau ajoutée) à la place de $V_A = 10{,}0$ mL, ou oublier le facteur 10 de la dilution.

**COMPRENDRE**
Les volumes peuvent rester en mL, car seul leur rapport intervient. Le résultat est donné avec deux chiffres significatifs, comme $C_B$, mais on garde $1{,}24$ pour le calcul suivant.

**À LA CALCULATRICE**




**2.4.4** En déduire le titre $t_A$ de ce vinaigre. Conclure sur la nature du vinaigre.

**Données utiles** $C_0 = 1{,}24 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (2.4.3) ; $M = 60{,}0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ; $\rho = 1010 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 1,00° : 1,00 g d'acide pour 100 g de vinaigre

Le titre est la masse d'acide éthanoïque contenue dans $m = 100$ g de vinaigre.

Volume occupé par 100 g de vinaigre : $V_{vin} = \frac{m}{\rho}$.

Masse d'acide dans ce volume : $m_{acide} = n_{acide} \times M = C_0 \times V_{vin} \times M$, soit

$$m_{acide} = \frac{C_0 \times M \times m}{\rho} = \frac{1{,}24 \times 60{,}0 \times 100}{1010} = 7{,}4 \text{ g}$$

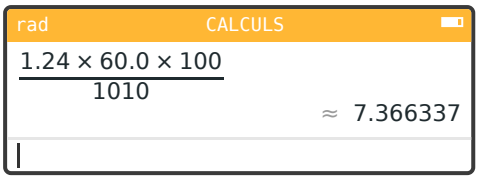
Le titre vaut donc 7,4°, valeur proche de 7,5° et nettement supérieure à 6,0°.

$t_A = 7{,}4^\circ$ : le vinaigre dosé est le vinaigre d'alcool (7,5°).

**PIÈGE**
Calculer la masse d'acide dans 100 mL au lieu de 100 g de vinaigre : la masse volumique sert justement à passer de la masse de vinaigre à son volume.

**COMPRENDRE**
L'écart avec 7,5° (moins de 2 %) s'explique par les incertitudes expérimentales : lecture graphique de $V_E$, volumes prélevés lors de la dilution et du dosage, valeur de $C_B$.

À LA CALCULATRICE




**3.1** Écrire l'équation de la réaction de synthèse de l'éthanoate de pentyle et préciser les noms des réactifs.

L'ester provient de l'acide éthanoïque (groupe $CH_3-CO-$) et d'un alcool à cinq atomes de carbone en chaîne linéaire, dont le groupe hydroxyle est en bout de chaîne.

$$CH_3-CO_2H + HO-(CH_2)_4-CH_3 = CH_3-CO_2-(CH_2)_4-CH_3 + H_2O$$

Réactifs : l'acide éthanoïque et le pentan-1-ol ; produits : l'éthanoate de pentyle et l'eau.

**MÉTHODE**
Lire le nom d'un ester en deux morceaux : « éthanoate » vient de l'acide (éthanoïque), « de pentyle » vient de l'alcool (pentanol). La chaîne liée à l'atome d'oxygène simple est celle de l'alcool.

**3.2** Quelles sont les caractéristiques de cette transformation ?

Il s'agit d'une estérification.

La transformation est lente et limitée (non totale : elle conduit à un état d'équilibre) ; elle est aussi athermique.

**COMPRENDRE**
Elle est limitée par la réaction inverse, l'hydrolyse de l'ester. Chauffer ou ajouter un catalyseur l'accélère sans changer l'état final.

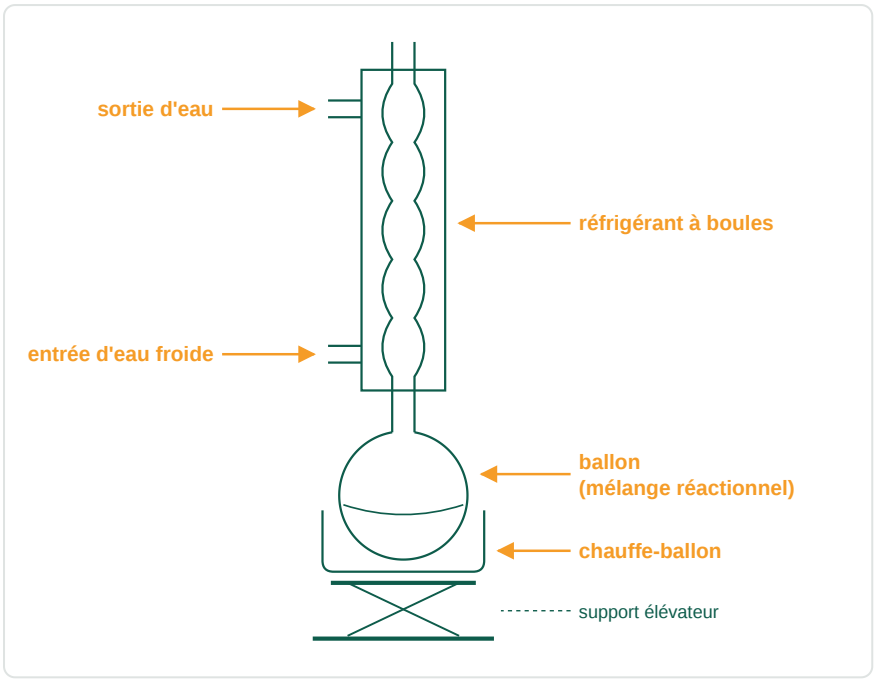
**3.3** Comment s'appelle le montage du document 3 ? Compléter la légende.

Le mélange est chauffé dans un ballon surmonté d'un réfrigérant vertical : les vapeurs se condensent dans le réfrigérant et retombent dans le ballon.

Légende (voir le document 3 complété) : sortie d'eau en haut du réfrigérant, entrée d'eau froide en bas, réfrigérant à boules, ballon contenant le mélange réactionnel, chauffe-ballon.

C'est un montage de chauffage à reflux.

**COMPRENDRE**
Chauffer accélère la transformation ; le reflux évite les pertes de matière par évaporation. L'eau entre toujours par le bas pour que le réfrigérant soit entièrement rempli.




**3.3** · Document 3 de l'annexe : montage de chauffage à reflux, légende complétée en orange

# L'oscillateur harmonique

Bac S 2010 Liban (ancien programme) · Exercice 2 **6,5 points** **Durée conseillée 1 h 05**

**1.1** Calculer la période propre $T_0$ du pendule simple, d'expression $T_0 = 2\pi\sqrt{\dfrac{l}{g}}$.

**Données utiles** $l = 100\ \text{cm}$ ; $g = 9{,}81\ \text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$

La longueur doit être en mètres : $l = 100\ \text{cm} = 1{,}00\ \text{m}$.

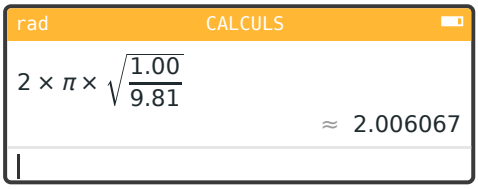
$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} = 2\pi\sqrt{\frac{1{,}00}{9{,}81}}$$

$T_0 = 2{,}01\ \text{s}$

**PIÈGE**
Laisser $l$ en centimètres donne $T_0 \approx 20\ \text{s}$, valeur absurde pour un pendule d'un mètre.

**COMPRENDRE**
Les données $l$ et $g$ ont trois chiffres significatifs : le résultat en garde trois. Cette règle vaut pour tous les calculs de l'exercice.

**À LA CALCULATRICE**




**1.2** Pourquoi peut-on, d'après le tableau du document 1, parler d'isochronisme des petites oscillations ? Justifier.

**Données utiles** $T_0 = 2{,}01\ \text{s}$ (1.1) ; document 1 : $T = 2{,}01\ \text{s}$ à 5°, 10° et 15°, puis $2{,}02$ ; $2{,}03$ ; $2{,}04$ ; $2{,}05\ \text{s}$ de 20° à 35°

Pour les amplitudes de 5°, 10° et 15°, la période mesurée garde la même valeur, $T = 2{,}01\ \text{s}$, égale à la période propre $T_0$ calculée en 1.1.

Au-delà, $T$ augmente lentement avec l'amplitude (de $2{,}02\ \text{s}$ à 20° jusqu'à $2{,}05\ \text{s}$ à 35°).

Aux petites amplitudes (ici jusqu'à 15°), la période ne dépend pas de l'amplitude : c'est l'**isochronisme des petites oscillations**.

**COMPRENDRE**
L'expression de $T_0$ ne contient pas l'amplitude : elle n'est valable que pour de petits angles. À 35°, l'écart avec $T_0$ n'atteint encore que 2 %.

**2.1.1** Comment qualifier, d'après le document 3, les oscillations obtenues ?

La courbe $x(t)$ est une sinusoïde dont l'amplitude reste la même à chaque oscillation (environ $3{,}5\ \text{cm}$).

Les oscillations sont **périodiques, sinusoïdales et non amorties** (oscillations libres).

**COMPRENDRE**
Le coussin d'air supprime presque tous les frottements : c'est pour cela que l'amplitude ne diminue pas sur la durée de l'enregistrement.

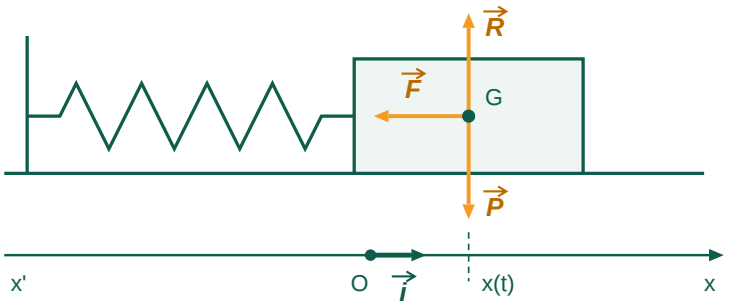
**2.1.2** Faire le bilan des forces s'exerçant sur S et les représenter, sans souci d'échelle, sur le document 2.

Système : le solide S, étudié dans le référentiel terrestre supposé galiléen. Les frottements sont négligés (coussin d'air). S est soumis à trois forces, représentées à partir de G :

- son poids $\vec{P}$, vertical, vers le bas ;
- la réaction $\vec{R}$ du rail (action du coussin d'air), verticale, vers le haut ;
- la force de rappel du ressort $\vec{F} = -k\,x\,\vec{i}$, horizontale.

Sur le document 2, $x > 0$ (ressort étiré) : $\vec{F}$ est dirigée vers O, donc vers la gauche ; $\vec{P}$ et $\vec{R}$ se compensent.

**PIÈGE**
Le sens de $\vec{F}$ dépend du signe de $x$ : le ressort ramène toujours le solide vers O. Ne pas ajouter de « force de vitesse » dans le sens du mouvement.




**2.1.2** · Document 2 complété : en orange, les trois forces appliquées au solide (ressort étiré, $x > 0$)

**2.1.3** Montrer que l'équation différentielle du mouvement s'écrit $\dfrac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} + \dfrac{k}{m}\,x = 0$.

Deuxième loi de Newton appliquée à S, de masse $m$ constante, dans le référentiel terrestre galiléen :

$$\vec{P} + \vec{R} + \vec{F} = m\,\vec{a}_G$$

En projection sur l'axe $(O, \vec{i})$, le poids et la réaction, verticaux, ont une composante nulle :

$$-k\,x = m\,a_x = m\,\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}$$

On divise par $m$ et on regroupe dans le même membre :

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

**MÉTHODE**
Équation différentielle d'un mouvement : 1) système et référentiel ; 2) bilan des forces ; 3) deuxième loi de Newton ; 4) projection sur l'axe du mouvement ; 5) $a_x$ remplacée par $\dfrac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}$.

**2.2.1** Déterminer l'expression de la période propre $T_0$ en fonction de $k$ et de $m$.

L'équation du 2.1.3 a la forme $\dfrac{\mathrm{d}^2Y}{\mathrm{d}t^2} + A\,Y = 0$ avec $Y = x$ et $A = \dfrac{k}{m}$.

Or $A = \dfrac{4\pi^2}{T_0^2}$, donc $\dfrac{4\pi^2}{T_0^2} = \dfrac{k}{m}$, soit $T_0^2 = 4\pi^2\,\dfrac{m}{k}$. Une période est positive :

$$\boxed{T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}}$$

**COMPRENDRE**
Vérification par les unités : $1\ \mathrm{N} = 1\ \mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-2}$, donc $k$ est en $\mathrm{kg}\cdot\mathrm{s}^{-2}$ et $\sqrt{m/k}$ est bien en secondes.

**2.2.2** Calculer la valeur de $T_0$.

**Données utiles** $m = 205\ \mathrm{g}$ ; $k = 10{,}0\ \mathrm{N}\cdot\mathrm{m}^{-1}$

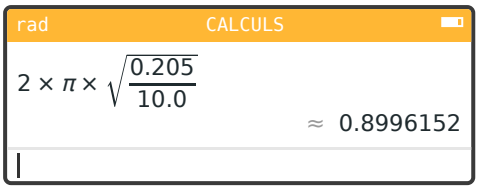
Avec $m = 205\ \mathrm{g} = 0{,}205\ \mathrm{kg}$ :

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{0{,}205}{10{,}0}}$$

$$\boxed{T_0 = 0{,}900\ \mathrm{s}}$$

**PIÈGE**
La masse se convertit en kilogrammes. Avec $m = 205$, on trouverait $28\ \mathrm{s}$, sans rapport avec le document 3.

À LA CALCULATRICE




**2.2.3** Déterminer la valeur expérimentale $T_{0,\text{exp}}$ en explicitant le raisonnement. Comparer avec la valeur calculée en 2.2.2.

**Données utiles** document 3 ; $T_0 = 0{,}900$ s (2.2.2)

Pour réduire l'incertitude de lecture, on mesure plusieurs périodes. Sur le document 3, le premier maximum est à $t = 0$ et le quatrième à $t \approx 2{,}7$ s : cet intervalle contient trois périodes.

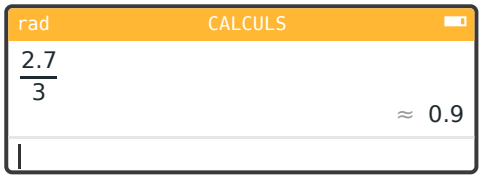
$$T_{0,\text{exp}} = \frac{2{,}7}{3} = 0{,}90 \text{ s}$$

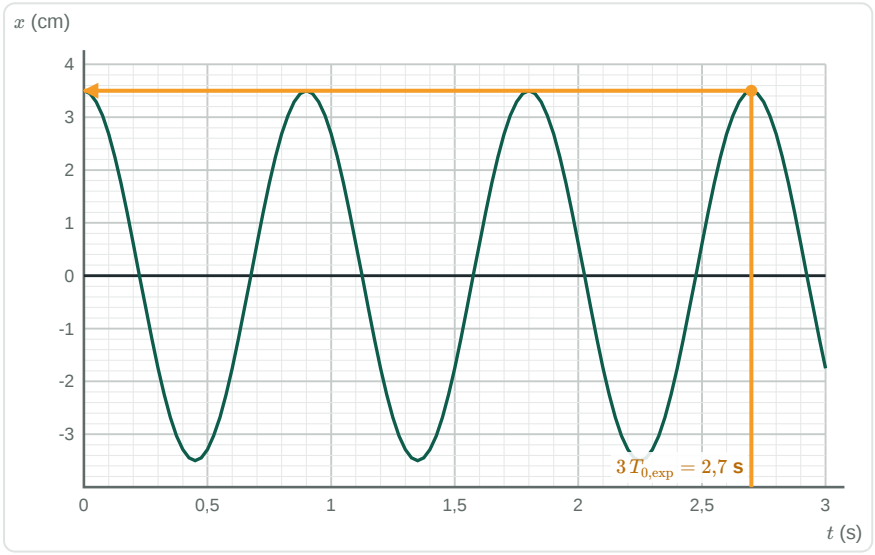
$T_{0,\text{exp}} = 0{,}90$ s : la valeur expérimentale s'accorde avec la valeur calculée $T_0 = 0{,}900$ s, à la précision de la lecture graphique.

**MÉTHODE**

Sur un enregistrement, toujours mesurer la durée de plusieurs périodes entre deux points faciles à repérer (maximums ou passages par zéro dans le même sens), puis diviser par leur nombre.

À LA CALCULATRICE




**2.2.3** · Document 3 : trois périodes mesurées entre le premier et le quatrième maximum

**2.3.1** Comment appelle-t-on les énergies d'expressions $\frac{1}{2}\,k\,x^2$ et $\frac{1}{2}\,m\left(\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\right)^2$ ?

$\frac{1}{2}\,k\,x^2$ est l'**énergie potentielle élastique** $E_{pe}$ du ressort, allongé de $x$.

$\frac{1}{2}\,m\left(\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\right)^2$ est l'**énergie cinétique** $E_c$ du solide, puisque $v_x = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$.

$E_{pe} = \frac{1}{2}\,k\,x^2$ (potentielle élastique) et $E_c = \frac{1}{2}\,m\,v^2$ (cinétique)

**2.3.2** Pour un lâcher sans vitesse initiale, $x(t) = X_m \cos\left(2\pi \dfrac{t}{T_0}\right)$. Montrer que l'énergie mécanique a pour expression $E_m = \dfrac{1}{2} k X_m^2$.

**Données utiles** $\cos^2\alpha + \sin^2\alpha = 1$ ; $\dfrac{4\pi^2}{T_0^2} = \dfrac{k}{m}$ (2.2.1)

Le rail est horizontal : $E_m = E_c + E_{pe} = \dfrac{1}{2} m \left(\dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\right)^2 + \dfrac{1}{2} k x^2$.

Vitesse : $\dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = -\dfrac{2\pi}{T_0} X_m \sin\left(2\pi \dfrac{t}{T_0}\right)$, donc

$$E_c = \frac{1}{2} m \frac{4\pi^2}{T_0^2} X_m^2 \sin^2\left(2\pi \frac{t}{T_0}\right) = \frac{1}{2} k X_m^2 \sin^2\left(2\pi \frac{t}{T_0}\right)$$

car $m \dfrac{4\pi^2}{T_0^2} = k$. De plus $E_{pe} = \dfrac{1}{2} k X_m^2 \cos^2\left(2\pi \dfrac{t}{T_0}\right)$. En additionnant :

$$E_m = \frac{1}{2} k X_m^2 \left[\sin^2\left(2\pi \frac{t}{T_0}\right) + \cos^2\left(2\pi \frac{t}{T_0}\right)\right]$$

$E_m = \dfrac{1}{2} k X_m^2$ : l'énergie mécanique ne dépend pas du temps.

**PIÈGE**
En dérivant le cosinus, ne pas oublier le facteur $\dfrac{2\pi}{T_0}$ : sans lui, les deux termes n'ont pas le même coefficient et la somme ne se simplifie pas.

**MÉTHODE**
Plus rapide : à $t = 0$, la vitesse est nulle et $x = X_m$, donc $E_m = \dfrac{1}{2} k X_m^2$. Sans frottement, $E_m$ se conserve. La question demande toutefois le calcul complet.

**2.3.3** Quelle est la valeur minimale de l'énergie mécanique ?

D'après 2.3.2, $E_m = \dfrac{1}{2} k X_m^2$ : c'est un carré multiplié par une constante positive, donc $E_m \geq 0$. La plus petite valeur est obtenue pour $X_m = 0$, c'est-à-dire lorsque le solide reste immobile en O.

$E_{m,\min} = 0$ J

**COMPRENDRE**
Au cours d'un mouvement donné, $E_m$ reste constante : pour le document 3, $X_m \approx 3{,}5$ cm donne $E_m \approx 6{,}1$ mJ. Le minimum nul sera à comparer au niveau $n = 0$ de la partie 3, qui n'est pas nul.

**2.4.1** Calculer l'énergie mécanique lorsque $X_m = 1{,}00$ cm.

**Données utiles** $k = 10{,}0\ \mathrm{N \cdot m^{-1}}$ ; $E_m = \dfrac{1}{2} k X_m^2$ (2.3.2)

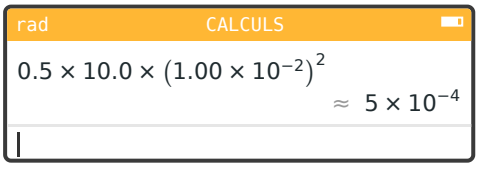
Avec $X_m = 1{,}00\ \mathrm{cm} = 1{,}00 \times 10^{-2}\ \mathrm{m}$ :

$$E_m = \frac{1}{2} k X_m^2 = \frac{1}{2} \times 10{,}0 \times \left(1{,}00 \times 10^{-2}\right)^2$$

$E_m = 5{,}00 \times 10^{-4}$ J

**PIÈGE**
L'amplitude est au carré : oublier de convertir les centimètres en mètres multiplie le résultat par $10^4$.

**À LA CALCULATRICE**




**2.4.2** Combien de valeurs de l'énergie mécanique sont possibles entre $X_m = 0$ et $X_m = 1{,}00$ cm : aucune ou une infinité ? Justifier.

On peut lâcher le solide de n'importe quelle position : l'amplitude $X_m$ peut prendre toutes les valeurs comprises entre $0$ et $1{,}00$ cm. Comme $E_m = \dfrac{1}{2} k X_m^2$, à chaque amplitude correspond une énergie.

Une **infinité** de valeurs sont possibles, entre $0$ et $5{,}00 \times 10^{-4}$ J : l'énergie de l'oscillateur mécanique varie de façon continue.

**3.1** L'énergie de vibration $E_{vib}$ de la molécule est quantifiée. Qu'entend-on par énergie quantifiée ?

Une énergie quantifiée ne peut prendre que certaines valeurs bien déterminées (valeurs discrètes), séparées les unes des autres : toutes les valeurs intermédiaires sont interdites.

**COMPRENDRE**
C'est l'opposé du 2.4.2 : pour le pendule élastique, toutes les énergies sont permises ; pour la molécule, seules celles des niveaux $n = 0, 1, 2, \ldots$ le sont.

**3.2.1** Vérifier que la fréquence $\nu_0$ de l'oscillateur vaut environ $5{,}13 \times 10^{13}$ Hz, puis calculer les énergies manquantes dans le tableau du document 4.

**Données utiles** $T_0 = 1{,}95 \times 10^{-14}$ s ; $h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J · s ; $E_{vib}(n) = \left(n + \frac{1}{2}\right) h\,\nu_0$

Fréquence : $\nu_0 = \dfrac{1}{T_0} = \dfrac{1}{1{,}95 \times 10^{-14}} = 5{,}13 \times 10^{13}$ Hz, valeur attendue.

Niveau $n = 0$ : $E_{vib}(0) = \dfrac{1}{2} h\,\nu_0 = \dfrac{1}{2} \times 6{,}63 \times 10^{-34} \times 5{,}13 \times 10^{13} = 1{,}70 \times 10^{-20}$ J

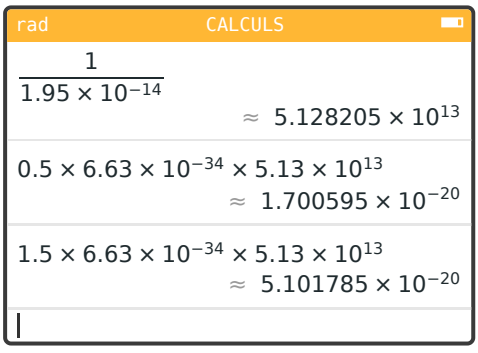
Niveau $n = 1$ : $E_{vib}(1) = \dfrac{3}{2} h\,\nu_0 = \dfrac{3}{2} \times 6{,}63 \times 10^{-34} \times 5{,}13 \times 10^{13} = 5{,}10 \times 10^{-20}$ J

Tableau complété : $E_{vib}(0) = 1{,}70 \times 10^{-20}$ J et $E_{vib}(1) = 5{,}10 \times 10^{-20}$ J

**PIÈGE**
Le tableau est gradué en $10^{-20}$ J : on y inscrit 1,70 et 5,10, sans la puissance de dix.

**COMPRENDRE**
Contrôle avec les valeurs fournies : $E_{vib}(2) = 2{,}5 \times 3{,}40 = 8{,}50$, en accord avec le tableau.

**À LA CALCULATRICE**




**3.2.2** Représenter le diagramme en énergie de la molécule sur le document 4, chaque niveau étant indiqué par un segment horizontal. Que peut-on dire de l'écart entre deux niveaux successifs ?

**Données utiles** $E_{vib}$ en $10^{-20}$ J : 1,70 ; 5,10 (3.2.1) ; 8,50 ; 11,90 ; 15,30

On trace un segment horizontal à la hauteur de chaque énergie du tableau.

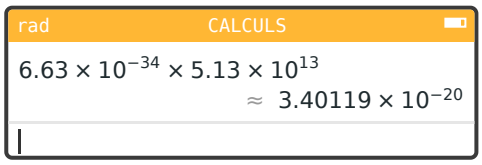
Écart entre deux niveaux voisins :

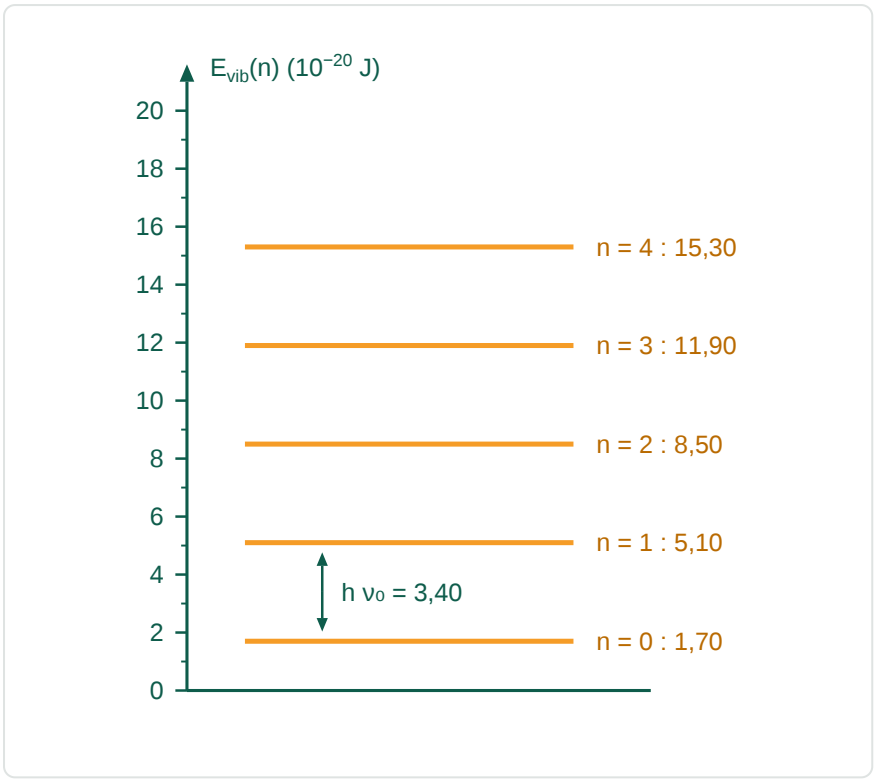
$$E_{vib}(n+1) - E_{vib}(n) = \left(n + \frac{3}{2}\right) h\,\nu_0 - \left(n + \frac{1}{2}\right) h\,\nu_0 = h\,\nu_0$$

L'écart est le même entre tous les niveaux successifs : $h\,\nu_0 = 3{,}40 \times 10^{-20}$ J. Les niveaux sont régulièrement espacés.

**COMPRENDRE**
Le niveau le plus bas n'est pas à zéro : même dans son état fondamental, la molécule vibre encore, avec l'énergie $\frac{1}{2} h\,\nu_0$.

**À LA CALCULATRICE**






**3.2.2** · Document 4 complété : cinq niveaux régulièrement espacés

**3.2.3** La transition du niveau $n = 0$ au niveau $n = 1$ correspond à l'absorption d'une radiation. Calculer sa longueur d'onde dans le vide. Cette radiation est-elle visible ? Justifier.

**Données utiles** $\Delta E = h\,\nu_0 = 3{,}40 \times 10^{-20}$ J (3.2.2) ; $h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J · s ; $c = 3{,}00 \times 10^{8}$ m · s$^{-1}$

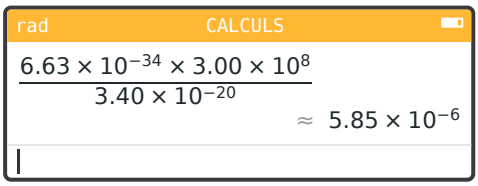
Le photon absorbé apporte exactement l'énergie qui sépare les deux niveaux : $\Delta E = E_{vib}(1) - E_{vib}(0) = \dfrac{h\,c}{\lambda}$, d'où

$$\lambda = \frac{h\,c}{\Delta E} = \frac{6{,}63 \times 10^{-34} \times 3{,}00 \times 10^{8}}{3{,}40 \times 10^{-20}} = 5{,}85 \times 10^{-6}\ \text{m}$$

Le domaine visible s'étend environ de $400$ nm à $800$ nm ; or $\lambda = 5\,850$ nm $> 800$ nm.

$\lambda = 5{,}85 \times 10^{-6}$ m $= 5{,}85\ \mu$m : la radiation n'est pas visible, elle appartient à l'**infrarouge**.

**À LA CALCULATRICE**




**COMPRENDRE**
C'est le principe de la spectroscopie infrarouge : chaque liaison absorbe à la fréquence de sa propre vibration, ce qui permet de l'identifier.

**MÉTHODE**
Comme $\Delta E = h\,\nu_0$, la radiation a la fréquence de l'oscillateur : $\lambda = \dfrac{c}{\nu_0} = c\,T_0$ redonne $5{,}85 \times 10^{-6}$ m en une ligne.

# Les ondes sonores

Bac S 2010 Liban (ancien programme) · Exercice 3 **4 points** **Durée conseillée 52 min**

**1.1** Définir de la manière la plus complète possible une onde mécanique progressive.

Une onde mécanique progressive est le phénomène de propagation d'une perturbation dans un milieu matériel, de proche en proche, sans transport de matière mais avec transport d'énergie.

Perturbation qui se propage dans un milieu matériel, sans transport de matière, avec transport d'énergie.

**PIÈGE**
Oublier « sans transport de matière » ou « milieu matériel » : la question demande la définition la plus complète possible.

**COMPRENDRE**
« Milieu matériel » explique l'observation 1 : entre le Soleil et la Terre règne le vide, aucun son ne peut s'y propager.

**1.2** Compléter les cases blanches du tableau de l'annexe avec les quatre exemples d'ondes proposés.

Onde longitudinale : la perturbation a la même direction que la propagation. Onde transversale : la perturbation est perpendiculaire à la direction de propagation.

- Longitudinale, une dimension : onde lors de la compression-dilatation d'un ressort.
- Longitudinale, trois dimensions : onde sonore.
- Transversale, une dimension : onde le long d'une corde.
- Transversale, deux dimensions : onde à la surface de l'eau.

Tableau de l'annexe complété (voir figure).

**COMPRENDRE**
L'observation 2 montre que l'onde sonore est longitudinale : la flamme oscille dans la direction haut-parleur – bougie, qui est la direction de propagation, et pas perpendiculairement.

**MÉTHODE**
Trier d'abord selon le caractère longitudinal ou transversal, puis compter les directions dans lesquelles l'onde s'étend : une ligne, une surface, tout l'espace.

| | Ondes à une dimension | Ondes à deux dimensions | Ondes à trois dimensions |
|---|---|---|---|
| Ondes longitudinales | Onde lors de la compression-dilatation d'un ressort | | Onde sonore |
| Ondes transversales | Onde le long d'une corde | Onde à la surface de l'eau | |

**1.2** · Annexe complétée (réponses en orange)

**2.1** Comment peut-on déterminer la célérité de l'onde sonore à l'aide des courbes obtenues ?

Chaque courbe reste plate jusqu'à l'arrivée du son sur le microphone. On relève la date de début du signal sur chacun des enregistrements : la différence entre deux dates est le retard $\tau$ du son entre les deux microphones concernés.

Connaissant la distance $d$ qui sépare ces deux microphones :

$v = \frac{d}{\tau}$, avec $\tau$ le retard lu entre les débuts des deux signaux.

**PIÈGE**
Diviser la distance par la date d'arrivée elle-même. L'enregistrement n'a pas démarré à l'instant du coup de cymbale : seule une différence de dates a un sens.

**2.2** Calculer la célérité de l'onde sonore pour la distance $M_1M_2$, puis pour la distance $M_2M_3$.

**Données utiles** $M_1M_2 = 2{,}00$ m ; $M_2M_3 = 3{,}00$ m ; échelle des courbes : une graduation pour 1 ms

Dates de début des signaux lues sur les courbes : $t_1 = 1{,}9$ ms ; $t_2 = 7{,}8$ ms ; $t_3 = 16{,}7$ ms.

Entre $M_1$ et $M_2$ : $\tau = t_2 - t_1 = 5{,}9$ ms.

$$v = \frac{M_1M_2}{\tau} = \frac{2{,}00}{5{,}9 \times 10^{-3}} = 3{,}4 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Entre $M_2$ et $M_3$ : $\tau' = t_3 - t_2 = 8{,}9$ ms.

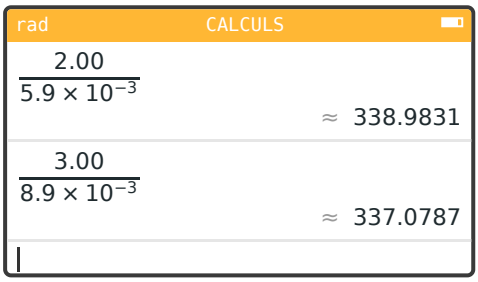
$$v' = \frac{M_2M_3}{\tau'} = \frac{3{,}00}{8{,}9 \times 10^{-3}} = 3{,}4 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$v = 3{,}4 \times 10^2$ m · s$^{-1}$ et $v' = 3{,}4 \times 10^2$ m · s$^{-1}$

**PIÈGE**
Laisser les retards en millisecondes : on obtiendrait des $\text{m} \cdot \text{ms}^{-1}$. Convertir en secondes avant de diviser.

**COMPRENDRE**
Deux chiffres significatifs seulement : les retards sont lus sur le graphique à environ $0{,}2$ ms près, ce qui limite la précision bien plus que les distances.

**À LA CALCULATRICE**




**2.3** Les résultats obtenus sont-ils cohérents ?

**Données utiles** $v$ et $v'$ (2.2)

Les deux célérités sont égales à la précision des lectures graphiques (écart inférieur à 1 %, alors qu'une erreur de $0{,}2$ ms sur un retard change déjà le résultat de 2 à 3 %).

De plus, l'ordre de grandeur est celui de la célérité du son dans l'air à température ambiante, environ $340$ m · s$^{-1}$.

Oui : les deux résultats sont cohérents entre eux et avec la valeur connue de la célérité du son dans l'air.

**COMPRENDRE**
Selon la lecture des dates, on peut trouver des valeurs entre $3{,}2 \times 10^2$ et $3{,}5 \times 10^2$ m · s$^{-1}$ : elles restent compatibles, l'écart venant de l'imprécision du pointage.

**3.1** Déterminer la période puis la fréquence du son émis par le diapason.

**Données utiles** courbes des microphones, axe des temps en ms

Pour gagner en précision, on mesure plusieurs périodes : entre le premier maximum ($0{,}55$ ms) et le cinquième ($9{,}65$ ms), il y a quatre périodes.

$4T = 9{,}65 - 0{,}55 = 9{,}1$ ms, donc $T = \frac{9{,}1}{4} = 2{,}3$ ms $= 2{,}3 \times 10^{-3}$ s.

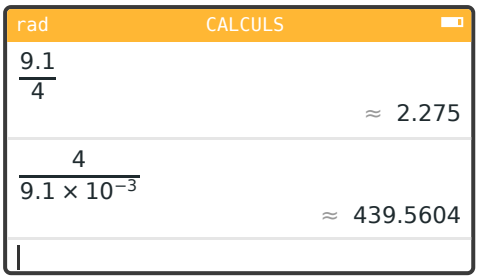
$$f = \frac{1}{T} = \frac{4}{9{,}1 \times 10^{-3}} = 4{,}4 \times 10^2 \text{ Hz}$$

$T = 2{,}3 \times 10^{-3}$ s et $f = 4{,}4 \times 10^2$ Hz

**COMPRENDRE**
On retrouve la fréquence habituelle d'un diapason, $440$ Hz (la note « la »).

**MÉTHODE**
Mesurer la durée du plus grand nombre possible de périodes entières, puis diviser : l'erreur de lecture est répartie sur toutes les périodes.

À LA CALCULATRICE




**3.2** Pourquoi compte-t-on plusieurs retours de phase plutôt qu'un seul ?

L'incertitude sur le repérage d'une position de phase est la même quelle que soit la distance mesurée. En mesurant une distance cinq fois plus grande, l'incertitude relative sur la distance, donc sur la longueur d'onde, est cinq fois plus petite.

Pour améliorer la précision : l'erreur relative sur la distance mesurée est plus faible.

**3.3** Définir la longueur d'onde, puis déduire sa valeur de l'expérience précédente.

**Données utiles** $D = 3{,}86$ m pour cinq retours en phase

La longueur d'onde $\lambda$ est la distance parcourue par l'onde pendant une période $T$ ; c'est aussi la plus petite distance séparant deux points du milieu qui vibrent en phase.

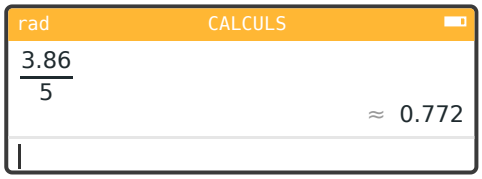
Chaque retour en phase correspond à un éloignement de $M_2$ d'une longueur d'onde. Pour cinq retours : $D = 5\lambda$.

$$\lambda = \frac{D}{5} = \frac{3{,}86}{5} = 0{,}772 \text{ m}$$

$\lambda = 0{,}772$ m

**PIÈGE**
Compter quatre intervalles au lieu de cinq. Les microphones étaient côte à côte au départ : la première nouvelle position en phase est déjà à une longueur d'onde.

À LA CALCULATRICE




**3.4** Calculer alors la célérité de l'onde.

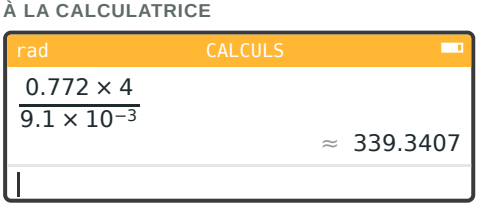
**Données utiles** $\lambda = 0{,}772$ m (3.3) ; $T$ et $f$ (3.1)

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f = 0{,}772 \times \frac{4}{9{,}1 \times 10^{-3}} = 3{,}4 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$v = 3{,}4 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

**COMPRENDRE**
Le résultat est limité à deux chiffres significatifs par la période. On garde la valeur non arrondie de $T$ dans le calcul.

À LA CALCULATRICE



**3.5** D'après les résultats des questions 3.4 et 2.2, le milieu de propagation des ondes sonores est-il dispersif ?

**Données utiles** $v$ (2.2) ; $v$ (3.4)

Un milieu est dispersif si la célérité de l'onde dépend de sa fréquence.

Le son de la cymbale (2.2) et celui du diapason (3.4) n'ont pas la même fréquence ; pourtant les deux expériences donnent la même célérité, $3{,}4 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

La célérité ne dépend pas de la fréquence : l'air n'est pas un milieu dispersif pour les ondes sonores.

**COMPRENDRE**
Conséquence pratique : à un concert, les sons graves et les sons aigus émis au même instant arrivent ensemble à l'auditeur, même au fond de la salle.

**4.1** Quel phénomène physique permet d'expliquer l'observation faite par les amis de Julien ?

La porte ouverte joue le rôle d'une ouverture placée sur le trajet de l'onde sonore. À sa traversée, l'onde change de direction de propagation et s'étale dans le hall, derrière le mur.

Il s'agit de la diffraction de l'onde sonore par l'ouverture de la porte.

**4.2** Les amis ont-ils entendu préférentiellement des sons graves ($f = 100$ Hz) ou très aigus ($f = 10\,000$ Hz) ? Justifier en calculant les longueurs d'onde.

**Données utiles** largeur de la porte $a = 1{,}00$ m ; $v = 3{,}4 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (3.4)

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

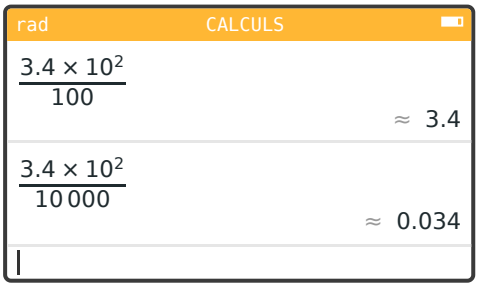
Sons graves : $\lambda_1 = \dfrac{3{,}4 \times 10^2}{100} = 3{,}4$ m. Sons aigus : $\lambda_2 = \dfrac{3{,}4 \times 10^2}{10\,000} = 3{,}4 \times 10^{-2}$ m.

La diffraction est d'autant plus marquée que la longueur d'onde est grande devant la largeur $a$ de l'ouverture. Ici $\lambda_1 > a$ : les sons graves sont fortement diffractés et se répandent dans tout le hall. En revanche $\lambda_2 \ll a$ : les sons aigus sont très peu diffractés et continuent presque en ligne droite.

$\lambda_1 = 3{,}4$ m et $\lambda_2 = 3{,}4 \times 10^{-2}$ m : les amis entendent surtout les sons graves.

**MÉTHODE**
Pour juger de l'importance de la diffraction, comparer toujours la longueur d'onde à la dimension de l'ouverture ou de l'obstacle.

**À LA CALCULATRICE**



# Spécialité : Au concert

Bac S 2010 Liban (ancien programme) · Exercice 4 **4 points** **Durée conseillée 52 min**

**1.1** Quelles sont les deux fonctions que doit remplir un instrument de musique pour produire un son ?

Un instrument doit :

- **vibrer** : un excitateur (corde, colonne d'air, membrane, lame…) est mis en vibration ;
- **émettre** : cette vibration est transmise à l'air environnant, le plus souvent grâce à une caisse de résonance.

Deux fonctions : vibrer et émettre.

**COMPRENDRE**
Une corde seule déplace très peu d'air : sans la caisse de la guitare, qui assure le couplage avec l'air, le son serait presque inaudible.

**1.2.1** Pourquoi dit-on que les ondes dont la corde de guitare est le siège sont stationnaires ?

Le long de la corde, on n'observe aucune propagation apparente de la déformation : certains points restent toujours immobiles (les nœuds), d'autres vibrent toujours avec l'amplitude maximale (les ventres), et ces points ne changent pas de position.

L'onde est dite stationnaire car la position des nœuds et des ventres est fixe : la vibration ne semble pas progresser le long de la corde.

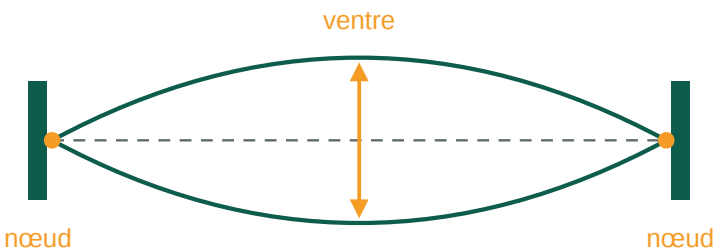
**COMPRENDRE**
L'onde stationnaire résulte de la superposition de deux ondes progressives de même fréquence, qui se propagent en sens opposés après réflexion aux extrémités fixes de la corde.

**1.2.2** Proposer une représentation de la corde pour le mode fondamental en précisant les nœuds et les ventres.

La corde est fixée à ses deux extrémités : ce sont deux nœuds de vibration. Dans le mode fondamental, elle vibre en un seul fuseau, avec un unique ventre en son milieu (voir le schéma).

Mode fondamental : un fuseau, deux nœuds aux extrémités, un ventre au milieu.

**PIÈGE**
Dessiner deux fuseaux, avec un nœud au milieu de la corde : c'est le mode de rang 2, de fréquence double, et non le fondamental.




en pointillés : corde au repos

**1.2.2** · Corde vibrant dans le mode fondamental : positions extrêmes de la corde

**2.1.1** Attribuer chaque courbe (documents 1 et 2) à son instrument, diapason ou guitare, en justifiant.

- Document 1 : la tension est une fonction sinusoïdale du temps. C'est un son pur, celui du **diapason**.
- Document 2 : la tension est périodique mais non sinusoïdale. C'est un son complexe, celui de la **guitare**.

Document 1 : diapason (son pur) ; document 2 : guitare (son complexe).

**2.1.2** Déterminer la fréquence fondamentale du son émis.

**Données utiles** document 1 : 4 périodes entre $t = 0$ et $t \approx 9{,}1$ ms

Pour gagner en précision, on mesure la durée de plusieurs périodes. Sur le document 1, la courbe coupe l'axe en montant à $t = 0$, puis une quatrième fois à $t \approx 9{,}1$ ms : $4T = 9{,}1$ ms.

$$f_1 = \frac{1}{T} = \frac{4}{9{,}1 \times 10^{-3}} = 4{,}4 \times 10^2 \text{ Hz}$$

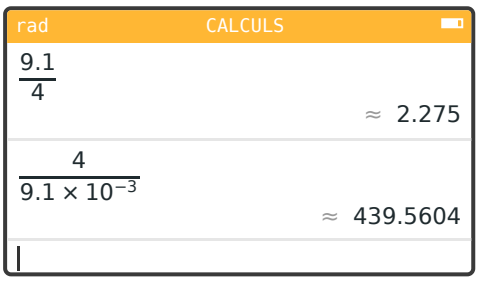
Le motif du document 2 se répète avec la même période : la guitare, accordée sur le diapason, a la même fréquence fondamentale.

$T \approx 2{,}3$ ms et $f_1 \approx 4{,}4 \times 10^2$ Hz, pour les deux sons.

**PIÈGE**
Laisser la période en millisecondes : $f = 1/T$ ne donne des hertz que si $T$ est en secondes. Sur le document 2, ne pas confondre la période avec l'écart entre deux pics voisins.

**COMPRENDRE**
La lecture graphique de $4T$ donne deux chiffres significatifs : le résultat s'écrit $4{,}4 \times 10^2$ Hz. Il est compatible avec les 440 Hz du diapason des musiciens ($la_3$).

**À LA CALCULATRICE**




**2.1.3** Quelle caractéristique du son est associée à la fréquence fondamentale d'un son ?

La fréquence fondamentale fixe la **hauteur** du son : plus elle est élevée, plus le son est aigu.

**COMPRENDRE**
Hauteur, timbre et harmoniques relèvent de l'ancien programme de spécialité : ces notions ne figurent plus dans le programme actuel de spécialité de terminale.

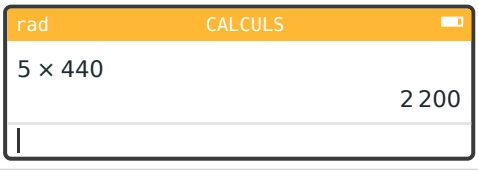
**2.2.1** À quoi correspondent les différents pics du spectre du son de la guitare (document 3) ?

Chaque pic correspond à une composante sinusoïdale du son, appelée harmonique. Le premier pic, de fréquence $f_1 \approx 440$ Hz, est le fondamental (harmonique de rang 1). Les pics suivants, vers 880, 1320, 1760 et 2200 Hz, sont les harmoniques de rang 2 à 5 : leurs fréquences sont des multiples entiers de $f_1$.

Les pics sont le fondamental et les harmoniques, de fréquences $f_n = n \times f_1$ ($n$ entier non nul).

**PIÈGE**
Croire que le fondamental est le pic le plus haut. C'est celui de plus basse fréquence : ici, l'harmonique de rang 2 a une amplitude plus grande que le fondamental.

**À LA CALCULATRICE**




**2.2.2** Quelle caractéristique du son associe-t-on à la présence des pics et à leur amplitude relative ?

Le nombre d'harmoniques et leurs amplitudes relatives déterminent le **timbre** du son.

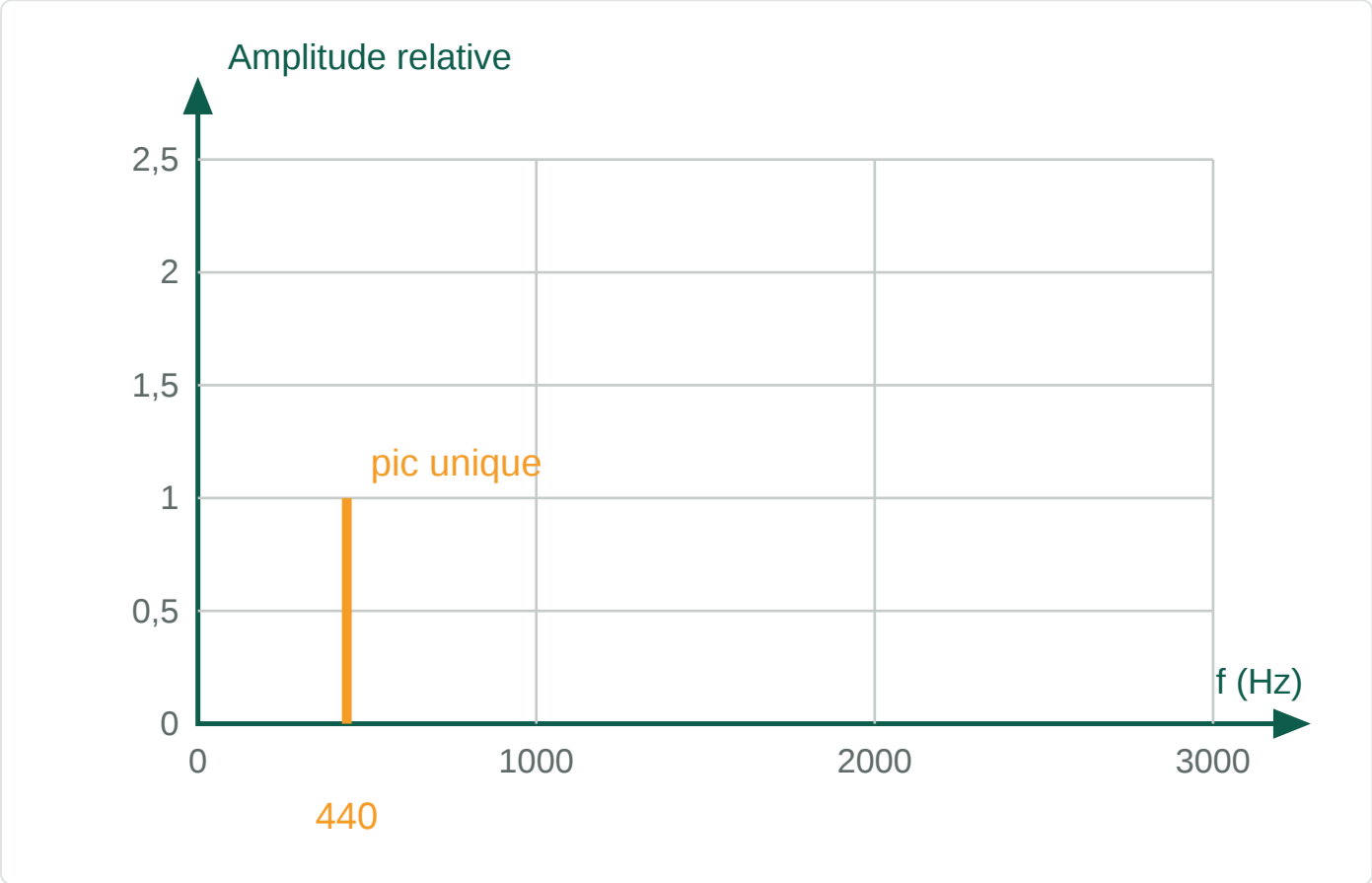
**COMPRENDRE**
Deux instruments jouant la même note ont le même fondamental, donc la même hauteur, mais des spectres différents : c'est le timbre qui permet de les distinguer à l'oreille.

**2.2.3** Compléter, en justifiant, le spectre du diapason sur le document 4 de l'annexe.

**Données utiles** $f_1 \approx 4{,}4 \times 10^2$ Hz (2.1.2) ; amplitude de la tension du document 1 : 1 V

Le son du diapason est pur (tension sinusoïdale) : il ne contient qu'une seule composante, le fondamental. Son spectre se réduit donc à un seul pic, placé à la fréquence $f_1 \approx 440$ Hz. On lui donne l'amplitude relative 1, puisqu'aucun autre pic ne sert de comparaison.

Spectre du diapason : un pic unique à 440 Hz (voir le document 4 complété).




**2.2.3** · Document 4 complété : spectre du diapason

**3.1** Quelle note produit la cloche ?

**Données utiles** document 5 : premier pic vers 130 Hz ; Do 2 : 130,8 Hz

La note est donnée par la fréquence fondamentale, c'est-à-dire par le pic de plus basse fréquence du spectre. Sur le document 5, il se situe à $f_1 \approx 130$ Hz. Dans le tableau, la fréquence la plus proche est 130,8 Hz.

La cloche produit un Do 2.

**3.2** La relation $f_n = n \times f_1$ entre fréquences harmoniques et fréquence fondamentale s'applique-t-elle à la cloche ? Justifier.

**Données utiles** document 5 : pics vers 130, 260, 300, 340, 520 et 600 Hz ; $f_1 \approx 130$ Hz (3.1)

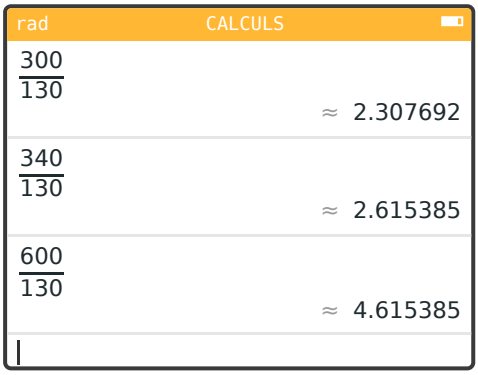
Les multiples de $f_1$ seraient 260, 390, 520 et 650 Hz. Les pics à 260 Hz ($2f_1$) et 520 Hz ($4f_1$) conviennent, mais :

- il n'y a aucun pic à 390 Hz ni à 650 Hz ;
- les pics à 300, 340 et 600 Hz ne sont pas des multiples entiers de 130 Hz ($300/130 \approx 2{,}3$ ; $340/130 \approx 2{,}6$ ; $600/130 \approx 4{,}6$).

Non : plusieurs fréquences du spectre de la cloche ne sont pas des multiples entiers de $f_1$.

**MÉTHODE**
Pour tester $f_n = n \times f_1$, diviser chaque fréquence lue par $f_1$ : il suffit d'un seul quotient non entier pour conclure que la relation ne s'applique pas.

**À LA CALCULATRICE**




**3.3** Commenter l'allure du spectre de la fontaine : peut-on, notamment, y déterminer la fréquence fondamentale ?

Le spectre du document 6 ne présente pas de pics isolés : il est continu, toutes les fréquences comprises entre 300 Hz et 3000 Hz environ sont présentes, avec des amplitudes irrégulières. Aucune fréquence ne se détache comme fondamental suivi de ses harmoniques.

Spectre continu : on ne peut pas y déterminer de fréquence fondamentale.

**COMPRENDRE**
Sans fréquence fondamentale, le signal n'est pas périodique et on ne peut pas attribuer de hauteur, donc de note, au son de la fontaine.

**3.4** Justifier que, pour un physicien, ces deux phénomènes sonores ne sont pas des sons musicaux mais des bruits.

Pour un physicien, un son musical est une vibration périodique : son spectre est formé d'un fondamental et d'harmoniques vérifiant $f_n = n \times f_1$.

- Cloche : le spectre est fait de pics, mais leurs fréquences ne vérifient pas toutes cette relation (3.2).
- Fontaine : le spectre est continu, sans fondamental ni harmoniques (3.3).

Aucun des deux spectres n'est celui d'un son périodique : ce sont des bruits.

**4.1** Compléter le tableau du document 7 de l'annexe (intensité acoustique du son de la guitare).

**Données utiles** $L = 62$ dB ; $I_0 = 10^{-12}$ W · m$^{-2}$

$$I = I_0 \times 10^{L/10} = 10^{-12} \times 10^{62/10} = 1{,}6 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Les trois autres valeurs du tableau se retrouvent de la même façon (document 7 complété ci-dessous).

Guitare : $I = 1{,}6 \times 10^{-6}$ W · m$^{-2}$, soit 1,6 dans le tableau.

**PIÈGE**
Le tableau est exprimé en $10^{-6}$ W · m$^{-2}$ : on y écrit 1,6 et non $1{,}6 \times 10^{-6}$. À la calculatrice, mettre l'exposant $62 \div 10$ entre parenthèses.

| | guitare | percussion | flûte | chant |
|---|---|---|---|---|
| Niveau sonore (dB) | 62 | 65 | 61 | 64 |
| Intensité I ($10^{-6}$ W·m$^{-2}$) | **1,6** | 3,2 | 1,3 | 2,5 |

**4.1** · Document 7 complété

**COMPRENDRE**
Vérification rapide : 62 dB se situe entre 61 dB et 64 dB, donc l'intensité cherchée doit être comprise entre 1,3 et 2,5 (en $10^{-6}\ \mathrm{W\cdot m^{-2}}$).

**À LA CALCULATRICE**

rad CALCULS

$1 \times 10^{-12} \times 10^{\frac{62}{10}} \approx 1.584893 \times 10^{-6}$

**4.2** Choisir, en justifiant, la bonne réponse : le niveau sonore total $L_{tot}$ vaut 63 dB, 65 dB, 69 dB ou 252 dB.

**Données utiles** intensités du document 7 (4.1) ; $I_0 = 10^{-12}\ \mathrm{W\cdot m^{-2}}$

Ce sont les intensités acoustiques qui s'additionnent, pas les niveaux sonores :

$$I_{tot} = (1{,}6 + 3{,}2 + 1{,}3 + 2{,}5) \times 10^{-6} = 8{,}6 \times 10^{-6}\ \mathrm{W\cdot m^{-2}}$$

$$L_{tot} = 10 \log \frac{I_{tot}}{I_0} = 10 \log \frac{8{,}6 \times 10^{-6}}{10^{-12}} = 69\ \mathrm{dB}$$

$L_{tot} = 69$ dB.

**PIÈGE**
Additionner les niveaux : $62 + 65 + 61 + 64 = 252$ dB, valeur absurde (bien au-delà du seuil de douleur). Les niveaux sonores ne s'ajoutent jamais.

**MÉTHODE**
Sans calcul : le niveau total dépasse forcément celui de la source la plus forte (65 dB), ce qui écarte 63 et 65 dB ; 252 dB est la somme interdite. Il ne reste que 69 dB.

**À LA CALCULATRICE**

rad CALCULS

$1.6 + 3.2 + 1.3 + 2.5 \approx 8.6$

$10 \times \log\left(\frac{8.6 \times 10^{-6}}{1 \times 10^{-12}}\right) \approx 69.34498$