

BACCALAURÉAT GÉNÉRAL — SESSION 2026
Physique-Chimie — Enseignement de spécialité
ANTILLES-GUYANE — JOUR 2 (SUJET 26-PYCJ2AG1)

CORRIGÉ DÉTAILLÉ

Rédaction conforme à une copie notée 20/20

Comment utiliser ce corrigé. Le texte contenu dans les **cadres bleus** correspond à ce qu'il faut *effectivement écrire sur la copie* : phrase d'introduction, formule littérale, application numérique, résultat avec unité et bon nombre de chiffres significatifs, puis conclusion. Les encadrés orange « Note du professeur » ne font pas partie de la copie : ce sont des conseils de méthode et des pièges à éviter.

Répartition des points : Exercice 1 — 11 points • Exercice 2 — 5 points • Exercice 3 — 4 points.
Durée : 3 h 30.

Corrigé non officiel, proposé par Génies des Sciences. Il ne s'agit pas du barème du jury.

Exercice 1 — Sécurité incendie (11 points)

1. La sirène d'alarme incendie

Q1 Déterminer la fréquence f_2 du son n° 2 et préciser si cette fréquence est associée à un son plus grave ou plus aigu que le son n° 1.

Le signal étant périodique, on mesure sa période sur la figure 1. Pour gagner en précision, on relève **plusieurs** périodes plutôt qu'une seule : entre le premier et le dernier front descendant, on compte **3 périodes** :

$$3T = 1,2471 - 1,2402 = 6,9 \times 10^{-3} \text{ s} \quad \Rightarrow \quad T = \frac{6,9 \times 10^{-3}}{3} = 2,29 \times 10^{-3} \text{ s}$$

La fréquence est l'inverse de la période — on conserve ici la valeur non arrondie de T , sans quoi l'erreur se répercute sur f_2 :

$$f_2 = \frac{1}{T} = \frac{1}{2,29 \times 10^{-3}}$$

$$f_2 = 4,4 \times 10^2 \text{ Hz}$$

Comparaison. $f_2 = 4,4 \times 10^2 \text{ Hz} < f_1 = 544 \text{ Hz}$. Or plus la fréquence d'un son est *faible*, plus ce son est *grave*.

Le son n° 2 est donc plus grave que le son n° 1.

Note du professeur

Toujours mesurer *plusieurs* périodes puis diviser : une lecture sur une seule période, avec des fronts épais de 0,1 ms, donnerait une incertitude trois fois plus grande. Ici, une lecture entre



$4,2 \times 10^2$ et $4,5 \times 10^2$ Hz est acceptable et ne change pas la conclusion. Attention en revanche à ne pas arrondir T à 2,3 ms *avant* de l'inverser : on tomberait à $4,3 \times 10^2$ Hz.

Q2 Déterminer la valeur de l'atténuation par absorption du niveau d'intensité sonore entre les points M et N, notée A , en décibels.

Les points M et N sont situés à la **même distance** $d = 5,0$ m de la sirène : l'atténuation géométrique (due à l'éloignement) est donc identique pour les deux. La différence observée entre les deux niveaux ne peut provenir que de l'**absorption** par la cloison qui les sépare.

$$A = L_M - L_N = 92 - 67$$

$$A = 25 \text{ dB}$$

Q3 Calculer la valeur du niveau d'intensité sonore L mesuré à 2,0 m du son émis par la sirène à installer, puis déterminer sa classe.

La nouvelle sirène doit produire $L'_M = 104$ dB à la distance $d_1 = 5,0$ m. On cherche le niveau L à la distance $d_2 = 2,0$ m, en appliquant la relation fournie :

$$L = L'_M - 20 \log\left(\frac{d_2}{d_1}\right) = 104 - 20 \log\left(\frac{2,0}{5,0}\right) = 104 - 20 \log(0,40)$$

$$L = 104 - 20 \times (-0,398) = 104 + 8,0$$

$$L = 1,12 \times 10^2 \text{ dB}$$

Détermination de la classe. D'après le tableau de la figure 4 :

$$105 \text{ dB} \leq L = 112 \text{ dB} \leq 115 \text{ dB}$$

La sirène à installer appartient à la classe C.

Note du professeur

Le signe est le piège : on se *rapproche* de la source ($d_2 < d_1$), donc le niveau doit *augmenter*. Comme $\log(0,40) < 0$, le terme $-20 \log(d_2/d_1)$ est bien positif. Un contrôle de cohérence indispensable avant de conclure.

2. Le sprinkler, un dispositif d'extinction automatique



Q4 Indiquer dans quel sens s'effectue le transfert thermique entre l'ampoule du sprinkler et l'air extérieur dans l'expérience réalisée au laboratoire. Justifier.

Comparons les températures initiales : l'ampoule est à $\theta_0 = 22\text{ °C}$, l'air chaud à $\theta_{\text{ext}} = 54\text{ °C}$. L'air extérieur est donc le corps *chaud*, l'ampoule le corps *froid*.

Or un transfert thermique s'effectue spontanément du corps chaud vers le corps froid.

Le transfert thermique s'effectue de l'air extérieur vers l'ampoule.

Justification expérimentale : la courbe de la figure 6 montre que la température de l'ampoule *augmente* (de 22 °C à environ 53 °C) : l'ampoule reçoit bien de l'énergie.

Q5 En appliquant le premier principe de la thermodynamique à l'ampoule pendant une durée Δt , montrer que $\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\epsilon \cdot S \cdot \sqrt{v}}{C} \cdot (\theta_{\text{ext}} - \theta(t))$.

Système : l'ampoule du sprinkler, de capacité thermique C .

Pendant la durée Δt , sa température varie de $\Delta\theta$. Le premier principe, en négligeant le travail et les autres transferts d'énergie, s'écrit :

$$\Delta U = Q \quad \text{avec} \quad \Delta U = C \cdot \Delta\theta$$

Le transfert thermique reçu pendant Δt s'obtient à partir du flux thermique, qui est une puissance ($\phi = Q/\Delta t$) :

$$Q = \phi \times \Delta t = \epsilon \cdot S \cdot \sqrt{v} \cdot (\theta_{\text{ext}} - \theta(t)) \times \Delta t$$

En égalant les deux expressions :

$$C \cdot \Delta\theta = \epsilon S \sqrt{v} (\theta_{\text{ext}} - \theta(t)) \Delta t \quad \Rightarrow \quad \boxed{\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\epsilon \cdot S \cdot \sqrt{v}}{C} \cdot (\theta_{\text{ext}} - \theta(t))}$$

Q6 Résoudre l'équation différentielle pour établir que $\theta(t) = \theta_{\text{ext}} + (\theta_0 - \theta_{\text{ext}}) e^{-t/\tau}$.

On vérifie que la fonction proposée satisfait l'équation différentielle et la condition initiale.

1. Dérivation.

$$\frac{d\theta}{dt}(t) = (\theta_0 - \theta_{\text{ext}}) \times \left(-\frac{1}{\tau}\right) e^{-t/\tau} = -\frac{1}{\tau} \underbrace{(\theta_0 - \theta_{\text{ext}}) e^{-t/\tau}}_{= \theta(t) - \theta_{\text{ext}}}$$

$$\frac{d\theta}{dt}(t) = -\frac{1}{\tau} \theta(t) + \frac{\theta_{\text{ext}}}{\tau}$$

C'est exactement l'équation différentielle de l'énoncé. ✓

2. Condition initiale. À $t = 0$: $\theta(0) = \theta_{\text{ext}} + (\theta_0 - \theta_{\text{ext}}) e^0 = \theta_0$. ✓

La fonction proposée est bien solution de l'équation différentielle.



Q7 À la date $t = \tau$, calculer la valeur $\theta(\tau)$ de la température de l'ampoule.

$$\theta(\tau) = \theta_{\text{ext}} + (\theta_0 - \theta_{\text{ext}}) e^{-1} = 54 + (22 - 54) \times 0,368 = 54 - 32 \times 0,368$$

$$\theta(\tau) = 42 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Autrement dit, au bout de la durée τ , l'ampoule a effectué 63 % de son échauffement total.

Q8 En déduire, à partir d'une lecture graphique sur la courbe de la figure 6, la valeur du temps caractéristique τ .

On repère l'ordonnée $\theta = 42 \text{ }^{\circ}\text{C}$ sur la courbe de la figure 6, puis on projette le point correspondant sur l'axe des abscisses :

$$\tau \approx 42 \text{ s} \quad (\text{lecture graphique à } \pm 4 \text{ s près})$$

Q9 Calculer la valeur de l'indice de temps de réponse R_{TI} du sprinkler étudié.

En isolant R_{TI} dans la relation fournie, avec $v = 5,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$:

$$\tau = \frac{R_{\text{TI}}}{\sqrt{v}} \quad \Rightarrow \quad R_{\text{TI}} = \tau \times \sqrt{v} = 42 \times \sqrt{5,0} = 42 \times 2,24$$

$$R_{\text{TI}} = 94 \text{ m}^{1/2} \cdot \text{s}^{1/2}$$

Cette valeur est du même ordre que celle annoncée ensuite par l'énoncé pour le sprinkler étudié ($R_{\text{TI}} = 90 \text{ m}^{1/2} \cdot \text{s}^{1/2}$) : l'écart, de l'ordre de 5 %, est compatible avec l'imprécision de la lecture graphique de la question Q8 (une erreur de 2 s sur τ déplace R_{TI} de 4 unités).

Q10 Déterminer l'expression de la durée t_{rupt} nécessaire pour que le sprinkler se déclenche à partir du moment où les fumées arrivent à son contact, en fonction de θ_{rupt} , θ_0 , θ_{ext} et τ . Calculer sa valeur.

Démarche suivie : (1) identifier les nouvelles conditions (entrepôt et fumées) ; (2) calculer le temps caractéristique correspondant ; (3) inverser la loi $\theta(t)$ pour isoler t_{rupt} ; (4) appliquer numériquement.

Étape 1 — nouvelles conditions.

Le sprinkler est initialement à la température de l'entrepôt, $\theta_0 = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Les fumées jouent maintenant le rôle du fluide extérieur : $\theta_{\text{ext}} = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, à la vitesse $v_{\text{fumée}} = 3,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. L'ampoule se rompt à $\theta_{\text{rupt}} = 68 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Étape 2 — temps caractéristique dans ces conditions.



Le R_{TI} est une caractéristique *propre au sprinkler*, mais τ dépend de la vitesse du fluide :

$$\tau = \frac{R_{TI}}{\sqrt{v_{\text{fumée}}}} = \frac{90}{\sqrt{3,0}} = 52 \text{ s}$$

Étape 3 — expression de t_{rupt} .

On écrit que la température atteint θ_{rupt} à la date t_{rupt} :

$$\theta_{\text{rupt}} = \theta_{\text{ext}} + (\theta_0 - \theta_{\text{ext}}) e^{-t_{\text{rupt}}/\tau} \quad \Rightarrow \quad e^{-t_{\text{rupt}}/\tau} = \frac{\theta_{\text{rupt}} - \theta_{\text{ext}}}{\theta_0 - \theta_{\text{ext}}}$$

On applique le logarithme népérien, puis on isole t_{rupt} :

$$t_{\text{rupt}} = \tau \cdot \ln\left(\frac{\theta_0 - \theta_{\text{ext}}}{\theta_{\text{rupt}} - \theta_{\text{ext}}}\right)$$

Étape 4 — application numérique.

$$t_{\text{rupt}} = 52 \times \ln\left(\frac{15 - 200}{68 - 200}\right) = 52 \times \ln\left(\frac{-185}{-132}\right) = 52 \times \ln(1,40) = 52 \times 0,338$$

$$t_{\text{rupt}} = 18 \text{ s}$$

Le sprinkler se déclenche donc moins de 20 secondes après l'arrivée des fumées : le dispositif est remarquablement réactif, ce qui est essentiel pour limiter la propagation de l'incendie.

Note du professeur

Deux pièges. **(1)** τ change entre les questions Q8 et Q10, car la vitesse du fluide n'est plus la même (5,0 puis 3,0 m·s⁻¹) : c'est R_{TI} , et non τ , qui caractérise le sprinkler. **(2)** Le rapport $\frac{\theta_{\text{rupt}} - \theta_{\text{ext}}}{\theta_0 - \theta_{\text{ext}}}$ est un quotient de deux nombres *négatifs* : il est bien positif, son logarithme existe. Le présenter sous la forme inverse, comme ci-dessus, évite le signe « moins » devant le logarithme.

3. La lance à incendie

Q11 En utilisant l'expression du débit volumique, montrer que la vitesse de l'eau au point A vaut $v_A = 5,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ lorsque le débit volumique de la lance est maximal.

Conversion du débit volumique maximal en unités du système international :

$$D_V = 500 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} = \frac{500 \times 10^{-3}}{60} = 8,33 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

De la relation $D_V = S \cdot v$ on tire, avec $S_A = 1,6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$:

$$v_A = \frac{D_V}{S_A} = \frac{8,33 \times 10^{-3}}{1,6 \times 10^{-3}}$$

$$v_A = 5,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} : \text{la valeur annoncée est bien vérifiée.}$$



Q12 En utilisant la relation de Bernoulli et les valeurs des pressions données figure 8, montrer que la vitesse de l'eau à la sortie de la lance au point B est $v_B = 38 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

D'après la figure 8, les points A et B sont à la **même altitude** : $z_A = z_B$. Les termes $\rho g z$ se simplifient donc dans la relation de Bernoulli :

$$\frac{1}{2}\rho v_A^2 + P_A = \frac{1}{2}\rho v_B^2 + P_B$$

On isole v_B^2 :

$$v_B^2 = v_A^2 + \frac{2(P_A - P_B)}{\rho_{\text{eau}}}$$

Avec $P_A = 8,0 \text{ bar} = 8,0 \times 10^5 \text{ Pa}$ et $P_B = 1,0 \text{ bar} = 1,0 \times 10^5 \text{ Pa}$:

$$v_B^2 = (5,2)^2 + \frac{2 \times (8,0 \times 10^5 - 1,0 \times 10^5)}{1,0 \times 10^3} = 27 + 1,4 \times 10^3 = 1,43 \times 10^3$$

$v_B = 38 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$: la valeur annoncée est bien vérifiée.

On remarque que le terme de vitesse en A (27) est négligeable devant le terme de pression ($1,4 \times 10^3$) : c'est bien la *chute de pression* dans la lance qui accélère l'eau.

Q13 En appliquant la deuxième loi de Newton, déterminer les coordonnées $a_x(t)$ et $a_z(t)$ du vecteur accélération $\vec{a}$ du point M.

Système : la goutte d'eau, de masse m , assimilée à son centre de masse M.

Référentiel : terrestre, supposé galiléen.

Bilan des forces : les frottements de l'air étant négligés, la goutte n'est soumise qu'à son poids $\vec{P} = m\vec{g}$.

D'après la deuxième loi de Newton :

$$\sum \vec{F}_{\text{ext}} = m\vec{a} \quad \Rightarrow \quad m\vec{g} = m\vec{a} \quad \Rightarrow \quad \vec{a} = \vec{g}$$

Le vecteur $\vec{g}$ étant vertical et dirigé vers le bas, alors que $\vec{k}$ est orienté vers le haut :

$$\vec{a} \begin{cases} a_x(t) = 0 \\ a_z(t) = -g = -9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} \end{cases}$$

Le mouvement est une chute libre : l'accélération est indépendante de la masse de la goutte.



Q14 Montrer que les équations horaires $x(t)$ et $z(t)$ du centre de masse M sont celles données par l'énoncé.

Vitesse. Le vecteur vitesse est la primitive du vecteur accélération. Les constantes d'intégration sont les coordonnées du vecteur vitesse initiale $\vec{v}_B$, qui fait un angle α avec l'horizontale :

$$\vec{v} \begin{cases} v_x(t) = v_B \cos \alpha \\ v_z(t) = -gt + v_B \sin \alpha \end{cases}$$

Position. Le vecteur position est à son tour la primitive du vecteur vitesse. À $t = 0$, le point M se trouve en B , d'abscisse $x_B = 0$ et d'altitude $z_B = 1,30$ m :

$$\begin{cases} x(t) = v_B \cos(\alpha) \cdot t \\ z(t) = -\frac{1}{2}gt^2 + v_B \sin(\alpha) \cdot t + z_B \end{cases}$$

Les équations horaires de l'énoncé sont bien retrouvées.

Q15 Déterminer la valeur de la portée maximale, notée $x_{\max}$. Interpréter l'écart observé avec la valeur fournie dans la documentation de la figure 7.

Étape 1 — condition définissant la portée.

La portée est la distance OP : c'est l'abscisse du point où le jet atteint le sol, c'est-à-dire où $z = 0$.

$$-6,72 \times 10^{-3} x^2 + 0,990 x + 1,30 = 0$$

Étape 2 — résolution.

Calculons le discriminant de ce trinôme du second degré :

$$\Delta = (0,990)^2 - 4 \times (-6,72 \times 10^{-3}) \times 1,30 = 0,980 + 0,0349 = 1,015$$

$$\sqrt{\Delta} = 1,007$$

$$x = \frac{-0,990 \pm 1,007}{2 \times (-6,72 \times 10^{-3})} \implies x_1 = -1,3 \text{ m} \quad \text{ou} \quad x_2 = 1,49 \times 10^2 \text{ m}$$

La solution négative n'a pas de sens physique (elle correspond au point situé « derrière » le pompier) : on la rejette.

$$x_{\max} = 1,5 \times 10^2 \text{ m}$$

Étape 3 — interprétation de l'écart.

La documentation annonce une portée maximale de 40 m : la valeur calculée est près de **4 fois plus grande**.

L'écart s'explique par les **frottements de l'air**, que le modèle néglige explicitement (question Q13). Or ils sont ici considérables :

- la vitesse de sortie est très élevée ($38 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, soit environ $1,4 \times 10^2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$), et la force de frottement croît très vite avec la vitesse ;



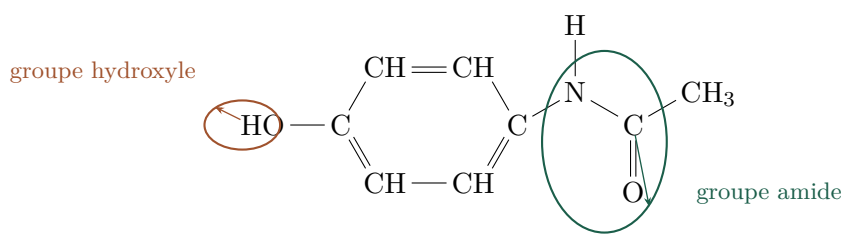
- le jet se fragmente rapidement en fines gouttelettes, dont la surface totale exposée à l'air est bien plus grande que celle d'un jet compact : elles sont donc fortement freinées.

Le modèle de la chute libre surestime largement la portée : il ne peut fournir qu'une borne supérieure.

Exercice 2 — Le paracétamol (5 points)

1. Contrôle de la teneur en principe actif

- Q1** Écrire la formule semi-développée du paracétamol, puis entourer et nommer les groupes caractéristiques présents dans cette molécule.



Dans cette formule semi-développée, toutes les liaisons entre atomes autres que C–H sont représentées ; seules les liaisons C–H sont sous-entendues (d'où l'écriture « CH » aux sommets du cycle).

Le paracétamol comporte deux groupes caractéristiques :

- le groupe **hydroxyle** –OH, porté par le cycle benzénique ;
- le groupe **amide** –CO–NH– : un atome de carbone doublement lié à un atome d'oxygène et simplement lié à un atome d'azote.

- Q2** À l'aide des conductivités ioniques molaires et en négligeant l'effet de la dilution, justifier qualitativement l'évolution de la pente de la courbe au cours du titrage, avant et après l'équivalence.

La conductivité de la solution est la somme des contributions de tous les ions présents : $\sigma = \sum_i \lambda_i [X_i]$. Il faut donc suivre quels ions apparaissent et disparaissent.

Avant l'équivalence.

Les ions hydroxyde versés sont *immédiatement consommés* par la réaction de titrage : ils ne s'accumulent pas. En revanche s'accumulent les ions sodium Na^+ (spectateurs, apportés par la solution titrante) et les ions $\text{C}_8\text{H}_8\text{NO}_2^-$ (formés par la réaction). La conductivité augmente



donc avec une pente proportionnelle à :

$$\lambda(\text{Na}^+) + \lambda(\text{C}_8\text{H}_8\text{NO}_2^-) = (5,01 + 1,7) \times 10^{-3} = 6,7 \times 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$$

Après l'équivalence.

Tout le paracétamol a été consommé : les ions hydroxyde versés ne réagissent plus et s'accumulent, en même temps que les ions sodium. La pente devient alors proportionnelle à :

$$\lambda(\text{Na}^+) + \lambda(\text{HO}^-) = (5,01 + 19,8) \times 10^{-3} = 24,8 \times 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$$

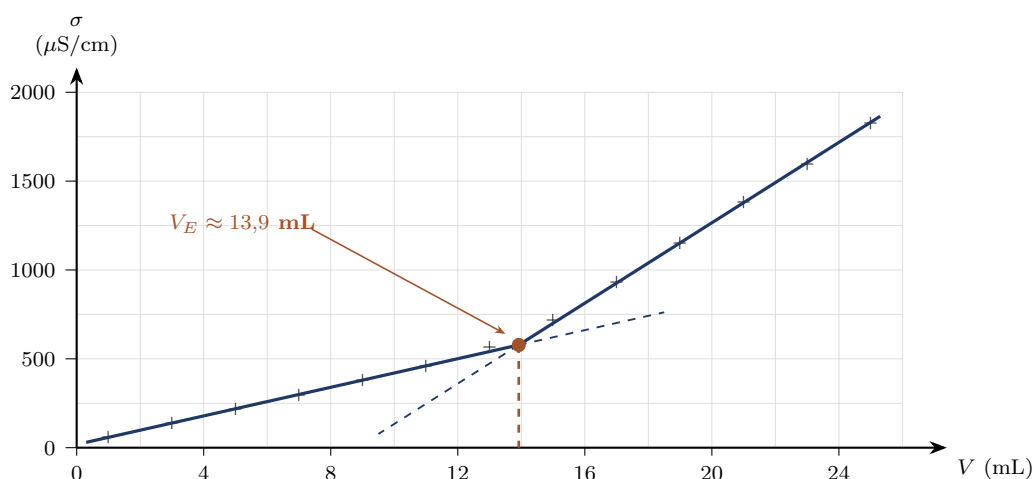
En négligeant la dilution, la pente est environ $\frac{24,8}{6,7} \approx 3,7$ fois plus grande après l'équivalence qu'avant : la courbe présente une nette rupture de pente vers le haut à l'équivalence.

Cette forte augmentation s'explique par la conductivité ionique molaire de l'ion hydroxyde, très supérieure à celle des autres ions présents.

Sur la courbe expérimentale de l'annexe 1, le rapport mesuré est plutôt de l'ordre de 3 : l'écart provient précisément de la dilution, que l'énoncé demande de négliger.

Q3 En faisant figurer la construction graphique sur la courbe de l'annexe 1, vérifier que la quantité de matière n_p de paracétamol contenu dans le sachet vaut $3,43 \times 10^{-3} \text{ mol}$.

Construction. On trace les deux portions de droite mises en évidence à la question Q2 (avant et après l'équivalence) et l'on relève l'abscisse de leur point d'intersection.



Lecture graphique : $V_E \approx 13,9 \text{ mL}$ (à $\pm 0,3 \text{ mL}$ près)

Vérification. D'après l'équation de titrage, les nombres stoechiométriques du paracétamol et de l'ion hydroxyde valent tous deux 1. À l'équivalence :

$$n_p = n(\text{HO}^-)_{\text{versé}} = C \times V_E = 0,250 \times 13,9 \times 10^{-3} = 3,48 \times 10^{-3} \text{ mol}$$



$n_p \approx 3,5 \times 10^{-3}$ mol : la valeur annoncée $3,43 \times 10^{-3}$ mol est bien vérifiée.

L'écart, de l'ordre de 1,5 %, est très inférieur à l'incertitude de lecture du volume équivalent ($u(V_E) = 0,29$ mL, soit 2 %). Pour la suite, on reprend la valeur de l'énoncé, $n_p = 3,43 \times 10^{-3}$ mol, qui correspond à $V_E = 13,7$ mL.

Q4 Déterminer la valeur de la masse de paracétamol m_{mes} contenue dans le sachet et son incertitude-type associée. Écrire le résultat de la mesure avec un nombre adapté de chiffres significatifs, en milligrammes.

Masse mesurée.

$$m_{mes} = n_p \times M(C_8H_9NO_2) = 3,43 \times 10^{-3} \times 151 = 0,518 \text{ g} = 518 \text{ mg}$$

Incertitude-type.

Calculons d'abord les deux incertitudes relatives :

$$\frac{u(C)}{C} = \frac{0,010}{0,250} = 0,040 \quad \text{et} \quad \frac{u(V_E)}{V_E} = \frac{0,29}{13,7} = 0,021$$

$$u(m_{mes}) = m_{mes} \times \sqrt{\left(\frac{u(C)}{C}\right)^2 + \left(\frac{u(V_E)}{V_E}\right)^2} = 518 \times \sqrt{(0,040)^2 + (0,021)^2} = 518 \times 0,045$$

$$u(m_{mes}) = 23 \text{ mg}$$

Écriture du résultat.

La valeur mesurée s'arrondit au même rang que son incertitude-type :

$$m_{mes} = (518 \pm 23) \text{ mg}$$

Q5 Discuter de la compatibilité entre la valeur de la masse de paracétamol mesurée et la valeur de référence indiquée sur la notice.

La notice indique $m_{ref} = 500$ mg. Calculons le quotient z :

$$z = \frac{|m_{mes} - m_{ref}|}{u(m_{mes})} = \frac{|518 - 500|}{23} = \frac{18}{23}$$

$$z = 0,78 < 2$$

Le quotient étant inférieur à 2, l'écart entre la masse mesurée et la valeur de référence s'explique entièrement par les incertitudes de mesure.

**La valeur mesurée est compatible avec l'indication de la notice :
la teneur en principe actif du sachet est conforme.**



2. Étude cinétique

Q6 Écrire l'expression de la vitesse volumique de disparition v_P du paracétamol en fonction de sa concentration.

La vitesse volumique de disparition d'une espèce est l'**opposé** de la dérivée par rapport au temps de sa concentration — l'opposé, afin que la vitesse soit positive alors que la concentration diminue :

$$v_P = - \frac{d[C_8H_9NO_2]}{dt}$$

Elle s'exprime ici en $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$.

Q7 En utilisant la réponse précédente et sachant que l'évolution suit une loi de vitesse d'ordre 1, montrer que $\frac{d[C_8H_9NO_2]}{dt} = -k \cdot [C_8H_9NO_2]$.

Une loi de vitesse d'ordre 1 signifie que la vitesse est **proportionnelle** à la concentration du réactif, la constante de proportionnalité étant la constante de vitesse k :

$$v_P = k \cdot [C_8H_9NO_2]$$

En égalant avec l'expression de la question Q6 :

$$- \frac{d[C_8H_9NO_2]}{dt} = k \cdot [C_8H_9NO_2] \quad \Rightarrow \quad \frac{d[C_8H_9NO_2]}{dt} = -k \cdot [C_8H_9NO_2]$$

Q8 En utilisant la courbe de la figure 1, montrer sans calcul que la vitesse de disparition du paracétamol diminue au cours du temps.

D'après la question Q6, la vitesse volumique de disparition est l'opposé du **coefficient directeur de la tangente** à la courbe $[C_8H_9NO_2] = f(t)$.

Or la courbe de la figure 1 est décroissante et sa pente devient de moins en moins raide : les tangentes successives sont de plus en plus proches de l'horizontale, la courbe « s'aplatit » nettement entre $t = 0$ et $t = 6$ h.

La valeur absolue du coefficient directeur des tangentes diminue : la vitesse de disparition du paracétamol diminue au cours du temps.

Ce résultat est cohérent avec la loi d'ordre 1 établie à la question Q7 : $v_P = k[C_8H_9NO_2]$, et la concentration diminue.



Q9 Déterminer la valeur de la durée nécessaire pour que la valeur limite c_{lim} soit atteinte depuis la prise du médicament. Expliquer l'écart avec les recommandations de la notice.

Démarche suivie : (1) convertir la concentration en masse limite en concentration en quantité de matière ; (2) inverser la loi de décroissance exponentielle pour obtenir la durée écoulée depuis le pic ; (3) ajouter les 30 minutes séparant la prise du pic ; (4) comparer aux recommandations.

Étape 1 — conversion de c_{lim} .

$$[\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_2]_{\text{lim}} = \frac{c_{\text{lim}}}{M(\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_2)} = \frac{8 \times 10^{-3}}{151} = 5,3 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} = 53 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

Étape 2 — durée écoulée depuis le pic.

La concentration au pic vaut $[\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_2]_0 = 132 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, et $k = 0,28 \text{ h}^{-1}$:

$$53 = 132 e^{-kt} \quad \Rightarrow \quad e^{-kt} = \frac{53}{132} = 0,40$$

$$t = -\frac{\ln(0,40)}{k} = \frac{0,91}{0,28} = 3,3 \text{ h}$$

Étape 3 — durée depuis la prise du médicament.

La date $t = 0$ correspond au pic, atteint 30 minutes (0,5 h) après la prise :

$$\Delta t = 3,3 + 0,5$$

$$\Delta t = 3,8 \text{ h, soit environ 3 h 45 min après la prise}$$

(valeur non arrondie : 3,76 h = 3 h 46 min)

Étape 4 — comparaison avec les recommandations.

La notice impose d'attendre **au moins six heures** entre deux prises, alors que l'effet antalgique s'atténue fortement dès 3 h 45. Il existe donc une période d'environ **deux heures** pendant laquelle le patient ne bénéficie plus de l'effet du médicament sans pouvoir en reprendre.

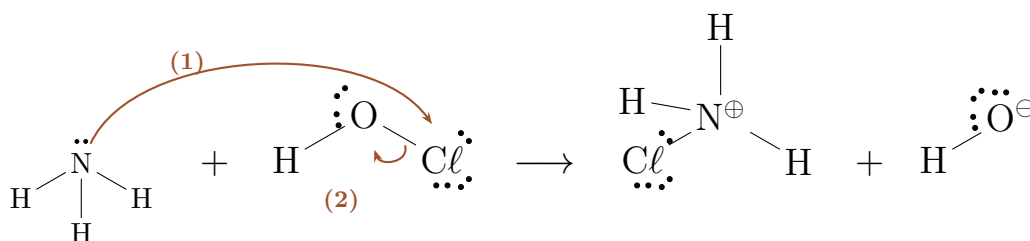
Explication. Ce n'est pas l'*efficacité* qui fixe l'intervalle entre deux prises, mais la **sécurité**. L'énoncé rappelle que le paracétamol est transformé en produits dont l'un est toxique. Le délai de six heures et la limite d'un gramme par prise servent à laisser à l'organisme le temps d'éliminer le paracétamol et ses métabolites, afin d'éviter que le produit toxique ne s'accumule — au prix d'une couverture antalgique incomplète.



Exercice 3 — Traitement de l'eau d'une piscine (4 points)

1. Formation des chloramines

Q1 Sur l'annexe 2, représenter les flèches courbes pour l'acte élémentaire n° 1. Indiquer, en justifiant, s'il s'agit d'une substitution, d'une addition ou d'une élimination.



Sens des flèches courbes.

- (1) : le doublet non liant de l'atome d'azote de NH_3 (site *donneur*, riche en électrons) attaque l'atome de chlore, appauvri en électrons par l'atome d'oxygène plus électronégatif auquel il est lié (site *accepteur*). Une liaison N–Cl se crée ;
- (2) : simultanément, le doublet liant de la liaison O–Cl se déplace vers l'atome d'oxygène, plus électronégatif : cette liaison se rompt et il se forme l'ion HO^- .

Catégorie de réaction. Sur l'atome de chlore, le groupe –OH a été *remplacé* par le groupe $-\text{NH}_3^+$: un groupe d'atomes a été échangé contre un autre, sans modification du nombre de liaisons multiples.

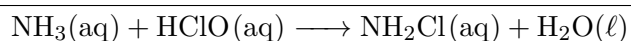
Il s'agit d'une réaction de substitution.

Q2 Établir l'équation de la réaction modélisée par le mécanisme réactionnel fourni.

On additionne membre à membre les deux actes élémentaires :



Les espèces ClNH_3^+ et HO^- , produites au premier acte puis intégralement consommées au second, sont des **intermédiaires réactionnels** : elles se simplifient.



Vérification : N : 1 = 1 ; H : 3 + 1 = 2 + 2 ; O : 1 = 1 ; Cl : 1 = 1. ✓

Le produit NH_2Cl est la monochloramine, responsable de l'odeur « de chlore » et des irritations des yeux évoquées dans l'énoncé.



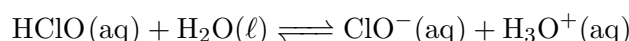
2. L'ion hypochlorite au service de la désinfection

Q3 Donner la définition d'un acide au sens de Brönsted.

Un **acide** au sens de Brönsted est une espèce chimique capable de **céder un ou plusieurs protons** H^+ au cours d'une transformation chimique.

Q4 Exprimer la constante d'acidité K_A du couple acide hypochloreux / ion hypochlorite.

L'équation de la réaction de l'acide hypochloreux avec l'eau s'écrit :



La constante d'acidité est la constante d'équilibre associée à cette équation. Chaque concentration y est rapportée à la concentration standard c° , et l'eau (solvant) n'y figure pas :

$$K_A = \frac{[\text{ClO}^-]_{\text{éq}} \times [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}{[\text{HClO}]_{\text{éq}} \times c^\circ}$$

Q5 Calculer le rapport des concentrations $\frac{[\text{ClO}^-]_{\text{éq}}}{[\text{HClO}]_{\text{éq}}}$ lorsque le pH de l'eau de piscine est égal à 7,4.

En isolant le rapport cherché dans l'expression de la question Q4 :

$$\frac{[\text{ClO}^-]_{\text{éq}}}{[\text{HClO}]_{\text{éq}}} = \frac{K_A \times c^\circ}{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}$$

Avec $K_A = 10^{-\text{p}K_A} = 10^{-7,5}$ et $[\text{H}_3\text{O}^+] = c^\circ \times 10^{-\text{pH}} = c^\circ \times 10^{-7,4}$:

$$\frac{[\text{ClO}^-]_{\text{éq}}}{[\text{HClO}]_{\text{éq}}} = \frac{10^{-7,5}}{10^{-7,4}} = 10^{-0,1}$$

$$\frac{[\text{ClO}^-]_{\text{éq}}}{[\text{HClO}]_{\text{éq}}} = 0,79$$

Ce rapport est légèrement inférieur à 1 : c'est cohérent avec le diagramme de prédominance, puisque $\text{pH} = 7,4 < \text{p}K_A = 7,5$, l'acide hypochloreux prédomine — mais de très peu.



Q6 Montrer que pour atteindre le seuil $c_m \text{ seuil} = 2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de « chlore libre », il est nécessaire que $[\text{ClO}^-]_{\text{éq}}$ soit égale à $1,7 \times 10^{-5} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

D'après la question Q5, $[\text{HClO}]_{\text{éq}} = \frac{[\text{ClO}^-]_{\text{éq}}}{0,79}$. En reportant dans la relation fournie :

$$c_m = [\text{HClO}]_{\text{éq}} M(\text{HClO}) + [\text{ClO}^-]_{\text{éq}} M(\text{ClO}^-) = [\text{ClO}^-]_{\text{éq}} \left(\frac{M(\text{HClO})}{0,79} + M(\text{ClO}^-) \right)$$

$$c_m = [\text{ClO}^-]_{\text{éq}} \left(\frac{52,5}{0,79} + 51,5 \right) = [\text{ClO}^-]_{\text{éq}} \times 1,18 \times 10^2$$

On isole la concentration cherchée, avec $c_m \text{ seuil} = 2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} = 2 \times 10^{-3} \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$:

$$[\text{ClO}^-]_{\text{éq}} = \frac{2 \times 10^{-3}}{1,18 \times 10^2}$$

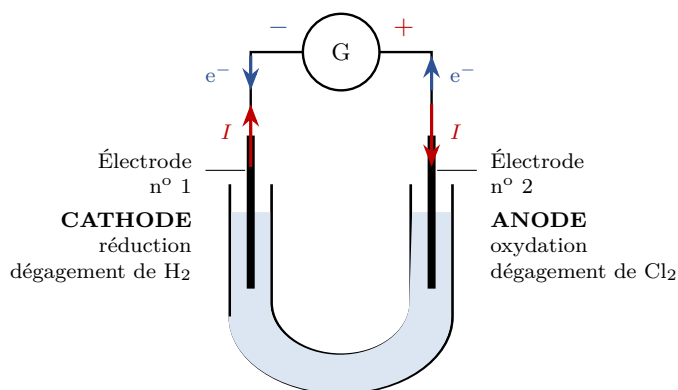
$[\text{ClO}^-]_{\text{éq}} = 1,7 \times 10^{-5} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$:
la valeur annoncée est bien vérifiée.

3. Obtention des ions hypochlorite par électrolyse

Q7 Indiquer sur le schéma de l'annexe 3 le sens de circulation des électrons, le sens du courant et la polarité du générateur.

Raisonnement. On part des équations fournies pour identifier la nature de chaque électrode :

- électrode n° 1 : $2 \text{H}_2\text{O}(\ell) + 2 \text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2(\text{g}) + 2 \text{HO}^-(\text{aq})$ — les électrons sont *consommés*, c'est une **réduction** : cette électrode est la **cathode**, reliée à la borne **négative** du générateur ;
- électrode n° 2 : $2 \text{Cl}^-(\text{aq}) \longrightarrow \text{Cl}_2(\text{g}) + 2 \text{e}^-$ — les électrons sont *produits*, c'est une **oxydation** : cette électrode est l'**anode**, reliée à la borne **positive**.



Borne + du côté de l'électrode n° 2, borne – du côté de l'électrode n° 1.
Le courant sort de la borne + ; les électrons circulent en sens inverse dans les fils.



Q8 Calculer la durée Δt nécessaire de l'électrolyse pour atteindre le seuil de la norme AFSSET.

Démarche suivie : (1) calculer la quantité d'ions hypochlorite à produire dans le volume de la piscine ; (2) remonter, par les deux équations, à la quantité d'électrons échangés ; (3) en déduire la quantité d'électricité puis la durée.

Étape 1 — quantité d'ions hypochlorite à produire.

Le volume de la piscine vaut $V = 50 \text{ m}^3 = 5,0 \times 10^4 \text{ L}$:

$$n(\text{ClO}^-) = [\text{ClO}^-]_{\text{éq}} \times V = 1,7 \times 10^{-5} \times 5,0 \times 10^4 = 0,85 \text{ mol}$$

Étape 2 — quantité d'électrons échangés.

D'après l'équation $\text{Cl}_2(\text{g}) + 2 \text{HO}^-(\text{aq}) \longrightarrow \text{ClO}^-(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\ell)$, il faut une mole de dichlore par mole d'ions hypochlorite formée :

$$n(\text{Cl}_2) = n(\text{ClO}^-) = 0,85 \text{ mol}$$

D'après la réaction à l'anode, $2 \text{Cl}^-(\text{aq}) \longrightarrow \text{Cl}_2(\text{g}) + 2 \text{e}^-$, il se forme une mole de dichlore pour deux moles d'électrons :

$$n(\text{e}^-) = 2 \times n(\text{Cl}_2) = 2 \times 0,85 = 1,7 \text{ mol}$$

Étape 3 — quantité d'électricité et durée.

$$Q = n(\text{e}^-) \times N_A \times e = 1,7 \times 6,02 \times 10^{23} \times 1,6 \times 10^{-19} = 1,64 \times 10^5 \text{ C}$$

$$Q = I \cdot \Delta t \quad \Rightarrow \quad \Delta t = \frac{Q}{I} = \frac{1,64 \times 10^5}{5,0} = 3,3 \times 10^4 \text{ s}$$

$$\Delta t = 3,3 \times 10^4 \text{ s, soit environ 9,1 heures}$$

Il faut donc faire fonctionner l'électrolyseur près de neuf heures pour atteindre le seuil minimal de « chlore libre » — ce qui explique que ces dispositifs fonctionnent en continu, plusieurs heures par jour, pour compenser aussi la consommation du chlore par les matières organiques.

Récapitulatif des résultats numériques

Exercice 1. $T = 2,3 \text{ ms} \rightarrow f_2 = 4,3 \times 10^2 \text{ Hz}$ (plus grave) • $A = 25 \text{ dB}$ • $L = 112 \text{ dB}$, classe C • transfert de l'air vers l'ampoule • $\theta(\tau) = 42^\circ \text{C} \rightarrow \tau \approx 40 \text{ s}$ • $R_{\text{TI}} = 89 \text{ m}^{1/2} \cdot \text{s}^{1/2}$ • $t_{\text{rupt}} = 18 \text{ s}$ • $v_A = 5,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $v_B = 38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ • $x_{\text{max}} = 1,5 \times 10^2 \text{ m}$ (contre 40 m : frottements négligés).

Exercice 2. Groupes hydroxyle et amide • rapport des pentes $\approx 3,7$ • $V_E = 13,7 \text{ mL} \rightarrow n_p = 3,43 \times 10^{-3} \text{ mol}$ • $m_{\text{mes}} = (518 \pm 23) \text{ mg}$ • $z = 0,78 < 2$: conforme • $\Delta t = 3,8 \text{ h} \approx 3 \text{ h } 45$ après la prise (contre 6 h préconisées : contrainte de toxicité).

Exercice 3. Substitution • $\text{NH}_3(\text{aq}) + \text{HClO}(\text{aq}) \longrightarrow \text{NH}_2\text{Cl}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\ell)$ • $[\text{ClO}^-] / [\text{HClO}] = 0,79$ • $[\text{ClO}^-]_{\text{éq}} = 1,7 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ • électrode 1 = cathode (borne -), électrode 2 = anode (borne +) • $n(\text{e}^-) = 1,7 \text{ mol}$, $Q = 1,64 \times 10^5 \text{ C}$, $\Delta t = 3,3 \times 10^4 \text{ s} \approx 9,1 \text{ h}$.

