Corrigé

Épreuve d'enseignement de spécialité — Physique-Chimie

Baccalauréat Général — Session 2026 — Jour 2

Antilles-Guyane — 17 juin 2026

Exercice 1 — Sécurité incendie

(11 pts)

1. La sirène d'alarme incendie

Q1. Déterminons la fréquence f_2 du son n° 2

MÉTHODE

Le signal est périodique : on lit la période T_2 sur la figure 1 (durée d'un motif qui se répète), de préférence sur plusieurs périodes pour gagner en précision, puis $f_2 = \dfrac{1}{T_2}$.

Sur la figure 1, trois motifs complets s'étendent d'environ $1{,}2414\,\mathrm{s}$ à $1{,}2460\,\mathrm{s}$, soit $3\,T_2 \approx 6{,}9 \times 10^{-3}\,\mathrm{s}$:

$$T_2 \approx \frac{6{,}9 \times 10^{-3}\,\mathrm{s}}{3} \approx 2{,}3 \times 10^{-3}\,\mathrm{s}, \qquad f_2 = \frac{1}{T_2} \approx \frac{1}{2{,}3 \times 10^{-3}\,\mathrm{s}} \approx 4{,}4 \times 10^{2}\,\mathrm{Hz}.$$

RÉPONSE

$f_2 \approx 4{,}4 \times 10^{2}\,\mathrm{Hz}$ (soit environ $440\,\mathrm{Hz}$). Comme $f_2 < f_1 = 544\,\mathrm{Hz}$, le son n° 2 est **plus grave** que le son n° 1.

Q2. Déterminons l'atténuation par absorption A entre M et N

MÉTHODE

M et N sont à la *même distance* $d = 5{,}0\,\mathrm{m}$ de la sirène : l'atténuation géométrique est identique pour les deux points. La différence des niveaux mesurés ne provient donc que de l'absorption par la cloison.

$$A = L_{\mathsf{M}} - L_{\mathsf{N}} = 92 - 67 = 25\,\mathrm{dB}.$$

RÉPONSE

L'atténuation par absorption vaut $A = 25\,\mathrm{dB}$.

Q3. Calculons le niveau L à $2{,}0\,\mathrm{m}$ et déterminons la classe

MÉTHODE

La nouvelle sirène impose $L'_{\mathsf{M}} = 104\,\mathrm{dB}$ à la distance $d_1 = 5{,}0\,\mathrm{m}$. On en déduit le niveau L à $d_2 = 2{,}0\,\mathrm{m}$ avec la relation fournie $L_2 = L_1 - 20\log\left(\dfrac{d_2}{d_1}\right)$.

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

$$L = 104 - 20 \times (-0{,}398) = 104 + 7{,}96 \approx 112\,\mathrm{dB}.$$

RÉPONSE

Le niveau mesuré à $2{,}0\,\mathrm{m}$ vaut $L \approx 112\,\mathrm{dB}$. D'après la figure 4, $105\,\mathrm{dB} \leqslant L \leqslant 115\,\mathrm{dB}$: la sirène à installer est de **classe C**.

2. Le sprinkler

Q4. Sens du transfert thermique

L'air extérieur est à $\theta_{\text{ext}} = 54\,°\mathrm{C}$ alors que l'ampoule est initialement à $\theta_0 = 22\,°\mathrm{C}$. Un transfert thermique spontané s'effectue toujours du corps le plus chaud vers le corps le plus froid.

RÉPONSE

Le transfert thermique s'effectue **de l'air extérieur vers l'ampoule** (du chaud vers le froid) : l'ampoule se réchauffe, ce qui est cohérent avec la courbe de la figure 6 où $\theta(t)$ augmente.

Q5. Établissons la relation $\dfrac{\Delta\theta}{\Delta t} = \dfrac{\epsilon \cdot S \cdot \sqrt{v}}{C}\,(\theta_{\text{ext}} - \theta(t))$

MÉTHODE

On applique le premier principe à l'ampoule pendant Δt : $\Delta U = W + Q$. Le travail des forces de pression est nul ($W = 0$) et le seul transfert d'énergie est le transfert thermique reçu de l'air : $Q = \phi \cdot \Delta t$.

Pendant Δt, l'énergie reçue par transfert thermique est $Q = \phi\,\Delta t$, et la variation d'énergie interne s'écrit $\Delta U = C\,\Delta\theta$. Le premier principe avec $W = 0$ donne :

$$\Delta U = Q \iff C\,\Delta\theta = \phi\,\Delta t \iff C\,\Delta\theta = \epsilon \cdot S \cdot \sqrt{v}\,(\theta_{\text{ext}} - \theta(t))\,\Delta t.$$

En divisant par $C\,\Delta t$:

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

RÉPONSE

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

Q6. Résolvons l'équation différentielle

MÉTHODE

L'équation $\dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = -\dfrac{1}{\tau}\,\theta + \dfrac{\theta_{\text{ext}}}{\tau}$ est linéaire du premier ordre. Sa solution est la somme de la solution générale de l'équation homogène et d'une solution particulière constante.

La solution de l'équation homogène $\dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = -\dfrac{1}{\tau}\,\theta$ est $\theta_{\text{h}}(t) = K\,\mathrm{e}^{-t/\tau}$ (K constante). Une solution particulière constante θ_{p} vérifie $0 = -\dfrac{\theta_{\text{p}}}{\tau} + \dfrac{\theta_{\text{ext}}}{\tau}$, soit $\theta_{\text{p}} = \theta_{\text{ext}}$. D'où :

$$\theta(t) = \theta_{\text{ext}} + K\,\mathrm{e}^{-t/\tau}.$$

La condition initiale $\theta(0) = \theta_0$ donne $\theta_0 = \theta_{\text{ext}} + K$, soit $K = \theta_0 - \theta_{\text{ext}}$.

RÉPONSE

$$\theta(t) = \theta_{\text{ext}} + (\theta_0 - \theta_{\text{ext}})\,\mathrm{e}^{-t/\tau}.$$

Q7. Calculons $\theta(\tau)$

À la date $t = \tau$, $e^{-t/\tau} = e^{-1} \approx 0{,}368$:

$$\theta(\tau) = \theta_{\text{ext}} + (\theta_0 - \theta_{\text{ext}})\, e^{-1} = 54 + (22 - 54) \times 0{,}368 = 54 - 11{,}8 \approx 42\,°\text{C}.$$

RÉPONSE

$\theta(\tau) \approx 42\,°\text{C}$.

Q8. Déterminons graphiquement τ

MÉTHODE

τ est l'abscisse du point de la courbe (figure 6) dont l'ordonnée vaut $\theta(\tau) \approx 42\,°\text{C}$.

Sur la figure 6, la température atteint $42\,°\text{C}$ pour un temps voisin de $43\,\text{s}$.

RÉPONSE

Par lecture graphique, $\tau \approx 43\,\text{s}$.

Q9. Calculons l'indice de temps de réponse R_{TI}

De $\tau = \dfrac{R_{\text{TI}}}{\sqrt{v}}$ on tire $R_{\text{TI}} = \tau\sqrt{v}$, avec $v = 5{,}0\,\text{m/s}$:

$$R_{\text{TI}} = \tau\sqrt{v} = 43 \times \sqrt{5{,}0} \approx 96\,\text{m}^{1/2}\,\text{s}^{1/2}.$$

RÉPONSE

$R_{\text{TI}} \approx 96\,\text{m}^{1/2}\,\text{s}^{1/2}$ (soit environ $1 \times 10^2\,\text{m}^{1/2}\,\text{s}^{1/2}$, valeur tributaire de la lecture graphique de τ).

Q10. Déterminons l'expression et la valeur de t_{rupt}

MÉTHODE

Le sprinkler installé subit les fumées : $\theta_0 = 15\,°\text{C}$ (température de l'entrepôt), $\theta_{\text{ext}} = 200\,°\text{C}$ (fumées), $v_{\text{fumée}} = 3{,}0\,\text{m/s}$. On calcule d'abord le temps caractéristique propre à cette situation, $\tau = \dfrac{R_{\text{TI}}}{\sqrt{v_{\text{fumée}}}}$ avec $R_{\text{TI}} = 90\,\text{m}^{1/2}\,\text{s}^{1/2}$, puis on résout $\theta(t_{\text{rupt}}) = \theta_{\text{rupt}}$.

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

On part de $\theta(t) = \theta_{\text{ext}} + (\theta_0 - \theta_{\text{ext}})\, e^{-t/\tau}$ et on impose $\theta(t_{\text{rupt}}) = \theta_{\text{rupt}}$:

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

En passant au logarithme népérien :

$$-\frac{t_{\text{rupt}}}{\tau} = \ln\left(\frac{\theta_{\text{rupt}} - \theta_{\text{ext}}}{\theta_0 - \theta_{\text{ext}}}\right) \iff \boxed{t_{\text{rupt}} = \tau\,\ln\left(\frac{\theta_0 - \theta_{\text{ext}}}{\theta_{\text{rupt}} - \theta_{\text{ext}}}\right).}$$

Application numérique :

$$t_{\text{rupt}} = 52 \times \ln\left(\frac{15 - 200}{68 - 200}\right) = 52 \times \ln\left(\frac{185}{132}\right) = 52 \times 0{,}337 \approx 18\,\text{s}.$$

RÉPONSE

$t_{\text{rupt}} = \tau\,\ln\left(\dfrac{\theta_0 - \theta_{\text{ext}}}{\theta_{\text{rupt}} - \theta_{\text{ext}}}\right) \approx 18\,\text{s}$. Le sprinkler se déclenche environ $18\,\text{s}$ après l'arrivée des fumées.

3. La lance à incendie

DONNÉES

$D_V = S \cdot v$; $1\,\text{bar} = 1 \times 10^5\,\text{Pa}$; $S_A = 1{,}6 \times 10^{-3}\,\text{m}^2$; $\rho_{\text{eau}} = 1000\,\text{kg/m}^3$; $g = 9{,}81\,\text{m/s}^2$. Relation de Bernoulli sur une ligne de courant.

Q11. Montrons que $v_A = 5{,}2\,\text{m/s}$

Le débit volumique maximal vaut $D_V = 500\,\text{L/min}$, à convertir en m^3/s :

$$D_V = \frac{500 \times 10^{-3}\,\text{m}^3}{60\,\text{s}} = 8{,}3 \times 10^{-3}\,\text{m}^3/\text{s}.$$

De $D_V = S_A \cdot v_A$ on tire :

$$v_A = \frac{D_V}{S_A} = \frac{8{,}3 \times 10^{-3}}{1{,}6 \times 10^{-3}} \approx 5{,}2\,\text{m/s}.$$

RÉPONSE

$v_A \approx 5{,}2\,\text{m/s}$.

Q12. Montrons que $v_B = 38\,\text{m/s}$

MÉTHODE

La lance est horizontale : $z_A = z_B$. La relation de Bernoulli se simplifie alors et on isole v_B.

Avec $z_A = z_B$:

$$\tfrac{1}{2}\rho\,v_A^2 + P_A = \tfrac{1}{2}\rho\,v_B^2 + P_B \iff v_B^2 = v_A^2 + \frac{2\,(P_A - P_B)}{\rho}.$$

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

$$v_B^2 = 5{,}2^2 + \frac{2 \times (8{,}0 - 1{,}0) \times 10^5}{1000} = 27 + 1400 = 1427\,\text{m}^2/\text{s}^2,$$

$$v_B = \sqrt{1427} \approx 38\,\text{m/s}.$$

RÉPONSE

$v_B \approx 38\,\text{m/s}$.

Q13. Déterminons les coordonnées de l'accélération

MÉTHODE

Les frottements de l'air sont négligés : la goutte n'est soumise qu'à son poids. On applique la deuxième loi de Newton dans le référentiel terrestre galiléen.

$$\sum \vec{F} = m\,\vec{a} \iff m\,\vec{g} = m\,\vec{a} \iff \vec{a} = \vec{g}.$$

Dans le repère $(\text{O}; \vec{\imath}, \vec{k})$, le poids est vertical descendant :

$$\vec{a} = \vec{g}\begin{pmatrix} 0 \\ -g \end{pmatrix}.$$

RÉPONSE

$a_x(t) = 0$ et $a_z(t) = -g$.

Q14. Montrons les équations horaires

MÉTHODE

On intègre successivement l'accélération en vitesse puis en position, en utilisant les conditions initiales : à $t = 0$, $\vec{v}_B \begin{pmatrix} v_B \cos\alpha \\ v_B \sin\alpha \end{pmatrix}$ et le point M est en B $(0\,;z_B)$.

En intégrant $\vec{a}$:

$$\vec{v}(t) \begin{pmatrix} v_B \cos\alpha \\ -g\,t + v_B \sin\alpha \end{pmatrix}.$$

En intégrant de nouveau, avec $x(0) = 0$ et $z(0) = z_B$:

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

RÉPONSE

$$x(t) = v_B \cos(\alpha)\,t, \qquad z(t) = -\tfrac{1}{2}\,g\,t^2 + v_B \sin(\alpha)\,t + z_B.$$

Q15. Déterminons la portée $x_{\max}$ et interprétons l'écart

MÉTHODE

La portée correspond à l'abscisse du point P où la goutte retombe au sol, c'est-à-dire où $z(x) = 0$. On résout l'équation du second degré fournie pour $\alpha = 44{,}7°$.

On résout $z(x) = -6{,}72 \times 10^{-3}\,x^2 + 0{,}990\,x + 1{,}30 = 0$, soit $6{,}72 \times 10^{-3}\,x^2 - 0{,}990\,x - 1{,}30 = 0$:

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

$$\sqrt{\Delta} \approx 1{,}008, \qquad x = \frac{0{,}990 + 1{,}008}{2 \times 6{,}72 \times 10^{-3}} \approx 1{,}5 \times 10^2\ \mathrm{m}.$$

(La seconde racine, négative, est rejetée car non physique.)

RÉPONSE

$x_{\max} \approx 1{,}5 \times 10^2\ \mathrm{m}$ (environ $149\ \mathrm{m}$).

Interprétation : cette valeur est très supérieure à la portée documentée ($40\ \mathrm{m}$, figure 7). L'écart s'explique par le modèle utilisé, qui **néglige les frottements de l'air** et la fragmentation du jet en gouttelettes. En réalité, ces effets dissipent fortement l'énergie cinétique du jet et réduisent considérablement la portée.

Exercice 2 — Le paracétamol

(5 pts)

DONNÉES

$M(C_8H_9NO_2) = 151\,\mathrm{g/mol}$; conductivités ioniques molaires ($\mathrm{S\,m^2/mol}$) : $\lambda(Na^+) = 5{,}01 \times 10^{-3}$, $\lambda(OH^-) = 19{,}8 \times 10^{-3}$, $\lambda(C_8H_8NO_2{}^-) = 1{,}7 \times 10^{-3}$.

1. Contrôle de la teneur en principe actif

Q1. Formule semi-développée et groupes caractéristiques

RÉPONSE

Formule semi-développée du paracétamol :

$$\mathrm{HO{-}C_6H_4{-}NH{-}CO{-}CH_3}.$$

Deux groupes caractéristiques sont présents :

– le groupe **hydroxyle** $-\mathrm{OH}$ porté par le cycle benzénique (fonction *phénol*) ;

– le groupe **amide** $-\mathrm{NH{-}CO}-$ (liaison entre l'atome d'azote et le carbone du groupe carbonyle).

Q2. Justifions l'évolution de la pente avant et après l'équivalence

MÉTHODE

La pente de la courbe $\sigma = f(V)$ dépend des ions dont la quantité varie. On compare les ions effectivement présents (et leur conductivité molaire) avant et après l'équivalence.

• **Avant l'équivalence :** les ions OH^- versés sont consommés par la réaction de titrage ; il se forme des ions paracétamolate $C_8H_8NO_2{}^-$ et il s'accumule des ions Na^+ (spectateurs). La conductivité croît selon $\lambda(Na^+) + \lambda(C_8H_8NO_2{}^-) = (5{,}01 + 1{,}7) \times 10^{-3} = 6{,}7 \times 10^{-3}\,\mathrm{S\,m^2/mol}$.

• **Après l'équivalence :** le paracétamol est entièrement consommé ; les ions OH^- ajoutés ne réagissent plus et s'accumulent, accompagnés des Na^+. La pente est gouvernée par $\lambda(Na^+) + \lambda(OH^-) = (5{,}01 + 19{,}8) \times 10^{-3} = 24{,}8 \times 10^{-3}\,\mathrm{S\,m^2/mol}$.

RÉPONSE

L'ion OH^- est très conducteur. Après l'équivalence, son accumulation rend la pente **nettement plus forte** qu'avant l'équivalence : c'est cette rupture de pente qui matérialise l'équivalence.

Q3. Vérifions que $n_\mathrm{p} = 3{,}43 \times 10^{-3}\,\mathrm{mol}$

MÉTHODE

À l'équivalence, les réactifs sont introduits dans les proportions stœchiométriques : $n_\mathrm{p} = n(OH^-)_\mathrm{versé} = C \cdot V_\mathrm{E}$. Le volume V_E se lit à l'intersection des deux portions de droite tracées sur la courbe de l'annexe 1.

La construction graphique (intersection des deux droites) donne $V_\mathrm{E} \approx 13{,}7\,\mathrm{mL}$. D'où :

$$n_\mathrm{p} = C \cdot V_\mathrm{E} = 0{,}250 \times 13{,}7 \times 10^{-3} \approx 3{,}43 \times 10^{-3}\,\mathrm{mol}.$$

RÉPONSE

$n_\mathrm{p} \approx 3{,}43 \times 10^{-3}\,\mathrm{mol}$, en accord avec la valeur attendue.

Q4. Déterminons m_mes et son incertitude-type

La masse mesurée est $m_{\text{mes}} = n_{\text{P}} \cdot M$:

$$m_{\text{mes}} = 3{,}43 \times 10^{-3}\,\text{mol} \times 151\,\text{g/mol} = 0{,}518\,\text{g} = 518\,\text{mg}.$$

Incertitude-type, avec $V_{\text{E}} = 13{,}7\,\text{mL}$:

$$\frac{u(C)}{C} = \frac{0{,}010}{0{,}250} = 0{,}040, \qquad \frac{u(V_{\text{E}})}{V_{\text{E}}} = \frac{0{,}29}{13{,}7} = 0{,}021,$$

$$u(m_{\text{mes}}) = m_{\text{mes}}\sqrt{\left(\frac{u(C)}{C}\right)^2 + \left(\frac{u(V_{\text{E}})}{V_{\text{E}}}\right)^2} = 518 \times \sqrt{0{,}040^2 + 0{,}021^2} \approx 23\,\text{mg}.$$

RÉPONSE

$m_{\text{mes}} = (518 \pm 23)\,\text{mg}$, soit $m_{\text{mes}} = (5{,}2 \pm 0{,}3) \times 10^2\,\text{mg}$.

Q5. Discutons la compatibilité avec la valeur de référence

La notice indique $m_{\text{ref}} = 500\,\text{mg}$. On calcule le quotient :

$$z = \frac{|m_{\text{mes}} - m_{\text{ref}}|}{u(m_{\text{mes}})} = \frac{|518 - 500|}{23} = \frac{18}{23} \approx 0{,}78.$$

RÉPONSE

$z \approx 0{,}78 < 2$: la masse mesurée est **compatible** avec la valeur de référence de $500\,\text{mg}$ indiquée sur la notice.

2. Étude cinétique

Q6. Expression de la vitesse volumique de disparition

RÉPONSE

La vitesse volumique de disparition du paracétamol est

$$v_{\text{P}} = -\frac{\text{d}[\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_2]}{\text{d}t}.$$

Q7. Montrons que $\frac{\text{d}[\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_2]}{\text{d}t} = -k\,[\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_2]$

Pour une réaction d'ordre 1, la vitesse est proportionnelle à la concentration : $v_{\text{P}} = k\,[\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_2]$. En égalant les deux expressions de v_{P} :

$$-\frac{\text{d}[\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_2]}{\text{d}t} = k\,[\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_2] \iff \frac{\text{d}[\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_2]}{\text{d}t} = -k\,[\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_2].$$

RÉPONSE

$$\frac{\text{d}[\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_2]}{\text{d}t} = -k\,[\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_2].$$

Q8. Montrons sans calcul que la vitesse de disparition diminue

RÉPONSE

La vitesse de disparition $v_{\text{P}} = -\frac{\text{d}[\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_2]}{\text{d}t}$ est égale, en valeur absolue, au coefficient directeur de la tangente à la courbe $[\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_2](t)$. Or, au fil du temps, la courbe **s'aplatit** : ses tangentes sont de moins en moins pentues. La vitesse de disparition du paracétamol **diminue** donc au cours du temps. (De façon cohérente, $v_{\text{P}} = k\,[\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_2]$ décroît puisque $[\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_2]$ décroît.)

Q9. Déterminons la durée pour atteindre c_{lim} et expliquons l'écart

MÉTHODE

On convertit c_{lim} (en masse) en concentration molaire, on inverse la loi exponentielle pour trouver la durée écoulée *depuis le pic*, puis on ajoute les $30\,\text{min}$ séparant la prise du pic.

Concentration molaire limite :

$$[\mathrm{C_8H_9NO_2}]_{\text{lim}} = \frac{c_{\text{lim}}}{M} = \frac{8 \times 10^{-3}\,\text{g/L}}{151\,\text{g/mol}} \approx 53\,\mu\text{mol/L}.$$

La concentration suit $[\mathrm{C_8H_9NO_2}](t) = [\mathrm{C_8H_9NO_2}]_0\,\mathrm{e}^{-kt}$ avec $[\mathrm{C_8H_9NO_2}]_0 = 132\,\mu\text{mol/L}$ et $k = 0{,}28/\text{h}$:

$$53 = 132\,\mathrm{e}^{-0{,}28\,t} \iff \mathrm{e}^{-0{,}28\,t} = \frac{53}{132} \iff t = \frac{1}{0{,}28}\ln\left(\frac{132}{53}\right) \approx 3{,}3\,\text{h}.$$

Le pic étant atteint $30\,\text{min} = 0{,}5\,\text{h}$ après la prise, la durée totale depuis la prise est :

$$t_{\text{tot}} \approx 3{,}3 + 0{,}5 \approx 3{,}8\,\text{h}.$$

RÉPONSE

L'effet antalgique s'atténue fortement environ $3{,}8\,\text{h}$ après la prise.

Écart avec la notice : la recommandation d'attendre au moins $6\,\text{h}$ entre deux prises n'est pas dictée par la durée de l'effet antalgique (qui cesse plus tôt, vers $3{,}8\,\text{h}$), mais par un impératif de **sécurité** : éviter l'accumulation dans l'organisme du produit de dégradation toxique.

Exercice 3 — Traitement de l'eau d'une piscine

(4 pts)

DONNÉES

$M(\mathrm{HClO}) = 52{,}5\,\mathrm{g/mol}$, $M(\mathrm{ClO^-}) = 51{,}5\,\mathrm{g/mol}$; couple $\mathrm{HClO/ClO^-}$, $\mathrm{p}K_\mathsf{A} = 7{,}5$ à $25\,°\mathrm{C}$; $c° = 1\,\mathrm{mol/L}$.

1. Formation des chloramines

Q1. Flèches courbes de l'acte élémentaire n° 1 et nature

RÉPONSE

Acte n° 1 : $\ddot{N}\mathrm{H_3} + \mathrm{HO{-}Cl} \longrightarrow \mathrm{Cl{-}}\overset{+}{N}\mathrm{H_3} + \mathrm{HO^-}$.

- Une première flèche courbe part du **doublet non liant de l'atome d'azote** vers l'atome de chlore (formation de la liaison $\mathrm{N{-}Cl}$).
- Une seconde flèche courbe part de la **liaison** $\mathrm{Cl{-}O}$ vers l'atome d'oxygène (rupture de cette liaison, l'oxygène emportant le doublet et formant $\mathrm{HO^-}$).

Sur l'atome de chlore, le groupe $\mathrm{HO^-}$ est remplacé par le groupe issu de l'ammoniac : il s'agit d'une **substitution** (l'azote, nucléophile, se substitue à l'ion hydroxyde).

Q2. Établissons l'équation de la réaction

MÉTHODE

L'équation globale s'obtient en additionnant les deux actes élémentaires et en simplifiant les espèces intermédiaires (ici $\mathrm{Cl{-}}\overset{+}{N}\mathrm{H_3}$ et $\mathrm{HO^-}$, qui apparaissent puis disparaissent).

$$\mathrm{NH_3} + \mathrm{HO{-}Cl} \longrightarrow \mathrm{Cl{-}}\overset{+}{N}\mathrm{H_3} + \mathrm{HO^-} \quad \text{(acte 1)}$$
$$\mathrm{Cl{-}}\overset{+}{N}\mathrm{H_3} + \mathrm{HO^-} \longrightarrow \mathrm{Cl{-}NH_2} + \mathrm{H_2O} \quad \text{(acte 2)}$$

En sommant, les espèces intermédiaires se simplifient :

RÉPONSE

$$\mathrm{NH_3(aq)} + \mathrm{HClO\,(aq)} \longrightarrow \mathrm{NH_2Cl\,(aq)} + \mathrm{H_2O\,(l)}.$$

La chloramine formée est la monochloramine $\mathrm{NH_2Cl}$.

2. L'ion hypochlorite au service de la désinfection

Q3. Définition d'un acide de Brönsted

RÉPONSE

Un acide au sens de Brönsted est une espèce chimique capable de **céder un (ou plusieurs) proton(s)** $\mathrm{H^+}$ au cours d'une réaction.

Q4. Expression de la constante d'acidité K_A

Pour l'équilibre $\mathrm{HClO\,(aq)} + \mathrm{H_2O\,(l)} \rightleftharpoons \mathrm{ClO^-(aq)} + \mathrm{H_3O^+(aq)}$:

RÉPONSE

$$K_\mathsf{A} = \frac{[\mathrm{ClO^-}]_{\text{éq}}\,[\mathrm{H_3O^+}]_{\text{éq}}}{[\mathrm{HClO}]_{\text{éq}}\,c°}.$$

Q5. Calculons le rapport $\dfrac{[\mathrm{ClO^-}]_{\text{éq}}}{[\mathrm{HClO}]_{\text{éq}}}$ à $\mathrm{pH} = 7{,}4$

MÉTHODE

On part de la relation $\mathrm{pH} = \mathrm{p}K_\mathsf{A} + \log\dfrac{[\mathrm{ClO^-}]_{\text{éq}}}{[\mathrm{HClO}]_{\text{éq}}}$ (forme logarithmique de K_A).

$$\log\frac{[\mathrm{ClO^-}]_{\text{éq}}}{[\mathrm{HClO}]_{\text{éq}}} = \mathrm{pH} - \mathrm{p}K_\mathsf{A} = 7{,}4 - 7{,}5 = -0{,}1,$$
$$\frac{[\mathrm{ClO^-}]_{\text{éq}}}{[\mathrm{HClO}]_{\text{éq}}} = 10^{-0{,}1} \approx 0{,}79.$$

RÉPONSE

$\dfrac{[\mathrm{ClO^-}]_{\text{éq}}}{[\mathrm{HClO}]_{\text{éq}}} \approx 0{,}79.$

Q6. Montrons que $[\mathrm{ClO^-}]_{\text{éq}} = 1{,}7 \times 10^{-5}\ \mathrm{mol/L}$

MÉTHODE

On exprime $[\mathrm{HClO}]_{\text{éq}}$ en fonction de $[\mathrm{ClO^-}]_{\text{éq}}$ grâce au rapport $\dfrac{[\mathrm{ClO^-}]_{\text{éq}}}{[\mathrm{HClO}]_{\text{éq}}} = 0{,}79$, puis on reporte dans l'expression de c_m.

Comme $[\mathrm{HClO}]_{\text{éq}} = \dfrac{[\mathrm{ClO^-}]_{\text{éq}}}{0{,}79}$:

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

$$c_\mathsf{m} = [\mathrm{ClO^-}]_{\text{éq}} \left(\frac{52{,}5}{0{,}79} + 51{,}5\right) = [\mathrm{ClO^-}]_{\text{éq}} \times 118\ \mathrm{g/mol}.$$

Pour $c_{\mathsf{m,seuil}} = 2 \times 10^{-3}\ \mathrm{g/L}$:

$$[\mathrm{ClO^-}]_{\text{éq}} = \frac{c_{\mathsf{m,seuil}}}{118} = \frac{2 \times 10^{-3}}{118} \approx 1{,}7 \times 10^{-5}\ \mathrm{mol/L}.$$

RÉPONSE

$[\mathrm{ClO^-}]_{\text{éq}} \approx 1{,}7 \times 10^{-5}\ \mathrm{mol/L}.$

3. Obtention des ions hypochlorite par électrolyse

Q7. Sens des électrons, sens du courant et polarité

MÉTHODE

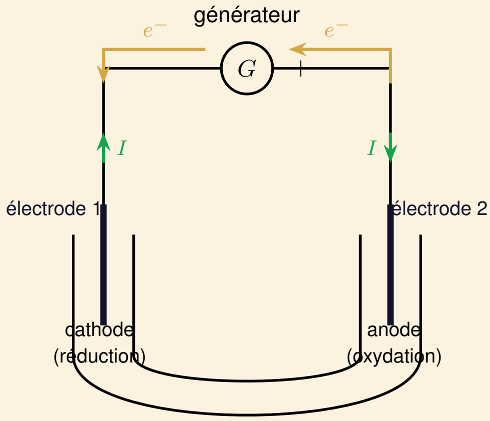
À l'électrode n° 1, les électrons sont *consommés* (réduction) : c'est une cathode. À l'électrode n° 2, les électrons sont *produits* (oxydation) : c'est une anode. En électrolyse, la cathode est reliée au pôle $(-)$ et l'anode au pôle $(+)$ du générateur.

RÉPONSE

– **Polarité :** électrode n° 1 (cathode) reliée au pôle $(-)$; électrode n° 2 (anode) reliée au pôle $(+)$.

– **Électrons (dans les fils) :** ils circulent du pôle $(-)$ vers l'électrode n° 1, et de l'électrode n° 2 vers le pôle $(+)$.

– **Courant I :** de sens opposé aux électrons dans les fils, il sort du pôle $(+)$ vers l'électrode n° 2 et rentre au pôle $(-)$ depuis l'électrode n° 1.



Q8. Calculons la durée Δt de l'électrolyse

MÉTHODE

On détermine la quantité d'ions hypochlorite à produire dans le volume de la piscine, puis la quantité d'électrons correspondante (bilan : $2\,e^-$ échangés pour 1 ion $\mathrm{ClO^-}$ formé), enfin la charge Q et la durée $\Delta t = \dfrac{Q}{I}$.

• **Quantité d'ions hypochlorite**, avec $V = 50\,\mathrm{m^3} = 50\,000\,\mathrm{L}$:

$$n(\mathrm{ClO^-}) = [\mathrm{ClO^-}]_{\text{éq}} \times V = 1{,}7 \times 10^{-5} \times 50000 = 0{,}85\,\mathrm{mol}.$$

• **Quantité d'électrons.** L'électrolyse fournit $\mathrm{Cl_2}$ et $\mathrm{OH^-}$ pour $2\,e^-$ échangés ; puis $\mathrm{Cl_2} + 2\,\mathrm{OH^-} \longrightarrow \mathrm{ClO^-} + \mathrm{Cl^-} + \mathrm{H_2O}$ produit 1 ion $\mathrm{ClO^-}$ par molécule de $\mathrm{Cl_2}$. Ainsi $2\,e^-$ conduisent à 1 ion $\mathrm{ClO^-}$:

$$n(e^-) = 2 \times n(\mathrm{ClO^-}) = 2 \times 0{,}85 = 1{,}7\,\mathrm{mol}.$$

• **Charge puis durée.** Avec $Q = n(e^-)\,N_A\,e$ et $N_A\,e = 9{,}63 \times 10^4\,\mathrm{C/mol}$:

$$Q = 1{,}7 \times 6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19} \approx 1{,}6 \times 10^5\,\mathrm{C},$$

$$\Delta t = \frac{Q}{I} = \frac{1{,}6 \times 10^5}{5{,}0} \approx 3{,}3 \times 10^4\,\mathrm{s} \approx 9{,}1\,\mathrm{h}.$$

RÉPONSE

La durée nécessaire de l'électrolyse est $\Delta t \approx 3{,}3 \times 10^4\,\mathrm{s}$, soit environ $9{,}1\,\mathrm{h}$.