Correction détaillée - Physique-Chimie

Baccalauréat général - Spécialité - Session 2026

Amérique du Nord - Jour 2

Rédaction complète, niveau Terminale, question par question.

Table des matières

Exercice 1 - « J'ai froid aux pieds sur le carrelage, je préfère le parquet ! »

1. Détermination de l'effusivité d'un matériau

Q.1 On donne l'expression de l'effusivité :

$$E = \sqrt{\lambda\, c_v}.$$

Les unités sont :

$$[\lambda] = \mathrm{J\,K^{-1}\,m^{-1}\,s^{-1}} \qquad \text{et} \qquad [c_v] = \mathrm{J\,K^{-1}\,m^{-3}}.$$

Donc :

$$[\lambda c_v] = \mathrm{J^2\,K^{-2}\,m^{-4}\,s^{-1}}.$$

Ainsi :

$$[E] = \sqrt{\mathrm{J^2\,K^{-2}\,m^{-4}\,s^{-1}}} = \mathrm{J\,K^{-1}\,m^{-2}\,s^{-1/2}}.$$

Résultat : L'effusivité s'exprime bien en $\mathrm{J\,K^{-1}\,m^{-2}\,s^{-1/2}}$.

Q.2 Le morceau de carrelage est initialement à $39,7\,°\mathrm{C}$, alors que l'eau est à $25,4\,°\mathrm{C}$. Le carrelage est donc le corps chaud et l'eau le corps froid.

Le transfert thermique spontané s'effectue toujours du corps le plus chaud vers le corps le plus froid.

Résultat : L'énergie thermique est transférée du carrelage vers l'eau, jusqu'à l'équilibre thermique.

Q.3 Le premier principe de la thermodynamique s'écrit, pour un système fermé :

$$\Delta U = W + Q.$$

Avec :

- ΔU : variation de l'énergie interne du système, en joule (J) ;
- W : travail reçu par le système, en joule (J) ;
- Q : transfert thermique reçu par le système, en joule (J).

On applique ce principe au système {eau + carrelage} contenu dans le calorimètre. L'énoncé précise que l'on néglige tout travail et tout transfert thermique avec l'extérieur. On a donc :

$$W = 0 \qquad \text{et} \qquad Q_{\text{extérieur}} = 0.$$

Par conséquent, l'énergie interne totale du système {eau + carrelage} se conserve :

$$\Delta U_{\text{eau}} + \Delta U_{\text{carrelage}} = 0.$$

Résultat : Dans le calorimètre supposé isolé, l'énergie gagnée par l'eau est égale à l'énergie perdue par le carrelage.

Q.4 Pour l'eau, on utilise :

$$\Delta U_{\text{eau}} = m_{\text{eau}}\, c_{\text{eau}}\, \Delta T.$$

D'après l'énoncé :

$$m_{\text{eau}} = 720\,\mathrm{g} = 0,720\,\mathrm{kg}, \qquad c_{\text{eau}} = 4,18 \times 10^3\,\mathrm{J\,K^{-1}\,kg^{-1}}.$$

La température de l'eau passe de $25,4\,°\mathrm{C}$ à $25,9\,°\mathrm{C}$, donc :

$$\Delta T = 25,9 - 25,4 = 0,5\,\mathrm{K}.$$

Ainsi :

$$\Delta U_{\text{eau}} = 0,720 \times 4,18 \times 10^3 \times 0,5 = 1,5048 \times 10^3\,\mathrm{J}.$$

Résultat : $\Delta U_{\text{eau}} \approx 1,50 \times 10^3$ J. Cette valeur est positive car l'eau reçoit de l'énergie.

Q.5 D'après la question Q.3 :

$$\Delta U_{\text{eau}} + \Delta U_{\text{carrelage}} = 0,$$

donc :

$$\Delta U_{\text{carrelage}} = -\Delta U_{\text{eau}} = -1,50 \times 10^3\,\text{J}.$$

Pour le carrelage :

$$\Delta U_{\text{carrelage}} = C_{\text{carrelage}}\,(T_f - T_i).$$

Or :

$$T_f - T_i = 25,9 - 39,7 = -13,8\,\text{K}.$$

Donc :

$$-1,5048 \times 10^3 = C_{\text{carrelage}} \times (-13,8).$$

Ainsi :

$$C_{\text{carrelage}} = \frac{1,5048 \times 10^3}{13,8} = 109\,\text{J}\,\text{K}^{-1}.$$

Résultat : La capacité thermique du morceau de carrelage vaut $C_{\text{carrelage}} = 109\,\text{J}\,\text{K}^{-1}$.

Q.6 La capacité thermique volumique est définie par :

$$c_v = \frac{C}{V}.$$

Pour le morceau de carrelage :

$$C_{\text{carrelage}} = 109\,\text{J}\,\text{K}^{-1}, \qquad V = 5,50 \times 10^{-5}\,\text{m}^3.$$

Donc :

$$c_{v,\text{carrelage}} = \frac{109}{5,50 \times 10^{-5}} = 1,98 \times 10^6\,\text{J}\,\text{K}^{-1}\,\text{m}^{-3}.$$

Résultat : $c_{v,\text{carrelage}} \approx 1,98 \times 10^6\,\text{J}\,\text{K}^{-1}\,\text{m}^{-3}$.

Q.7 On utilise :

$$E = \sqrt{\lambda c_v}.$$

Pour le carrelage :

$$\lambda_{\text{carrelage}} = 1,3\,\text{J}\,\text{K}^{-1}\,\text{m}^{-1}\,\text{s}^{-1}, \qquad c_{v,\text{carrelage}} = 1,98 \times 10^6\,\text{J}\,\text{K}^{-1}\,\text{m}^{-3}.$$

Ainsi :

$$E_{\text{carrelage}} = \sqrt{1,3 \times 1,98 \times 10^6} = \sqrt{2,57 \times 10^6} \approx 1,60 \times 10^3\,\text{J}\,\text{K}^{-1}\,\text{m}^{-2}\,\text{s}^{-1/2}.$$

Résultat : $E_{\text{carrelage}} = 1,60 \times 10^3\,\text{J}\,\text{K}^{-1}\,\text{m}^{-2}\,\text{s}^{-1/2}$.

Q.8 On compare les deux effusivités mesurées :

$$E_{\text{carrelage}} = 1,60 \times 10^3 \qquad \text{et} \qquad E_{\text{bois}} = 0,476 \times 10^3.$$

L'effusivité du carrelage est donc beaucoup plus élevée que celle du bois. Cela signifie que le carrelage absorbe rapidement l'énergie thermique au niveau de la zone de contact sans se réchauffer fortement en surface. À l'inverse, le bois a une effusivité plus faible : sa surface se réchauffe plus vite au contact d'un corps chaud et absorbe moins rapidement l'énergie thermique.

Résultat : Les valeurs sont cohérentes avec le texte d'introduction : le carrelage, d'effusivité plus grande, donne une sensation plus froide que le bois.

2. Mesure et calcul de la température de contact

Q.9 La relation entre la température en kelvin et la température en degré Celsius est :

$$T(\mathrm{K}) = \theta(^\circ\mathrm{C}) + 273.$$

On donne :

$$\theta_{\text{mesure.SB}} = 28,3\,^\circ\mathrm{C}.$$

Donc :

$$T_{\text{mesure.SB}} = 28,3 + 273 = 301,3\,\mathrm{K}.$$

Résultat : $T_{\text{mesure.SB}} = 301,3\,\mathrm{K}$.

Q.10 On utilise la relation :

$$T_{\text{calcul.AB}} = \frac{E_A T_A + E_B T_B}{E_A + E_B}.$$

Ici, les deux matériaux sont le silicone et le bois. Les températures initiales en kelvin valent :

$$T_{i,\text{silicone}} = 34,1 + 273 = 307,1\,\mathrm{K}, \qquad T_{i,\text{bois}} = 19,6 + 273 = 292,6\,\mathrm{K}.$$

Les effusivités valent :

$$E_{\text{silicone}} = 0,756 \times 10^3, \qquad E_{\text{bois}} = 0,476 \times 10^3.$$

Le facteur 10^3 étant commun, il peut être simplifié :

$$T_{\text{calcul.SB}} = \frac{0,756 \times 307,1 + 0,476 \times 292,6}{0,756 + 0,476}.$$

Donc :

$$T_{\text{calcul.SB}} = \frac{232,17 + 139,28}{1,232} = 301,5\,\mathrm{K}.$$

Résultat : $T_{\text{calcul.SB}} \approx 301,5\,\mathrm{K}$, soit environ $28,5\,^\circ\mathrm{C}$.

Q.11 Pour le contact silicone-bois :

$$T_{\text{mesure.SB}} = 301,3\,\mathrm{K}, \qquad T_{\text{calcul.SB}} = 301,5\,\mathrm{K}.$$

L'écart vaut :

$$|301,5 - 301,3| = 0,2\,\mathrm{K}.$$

Pour le contact silicone-carrelage :

$$T_{\text{mesure.SC}} = 297,2\,\mathrm{K}, \qquad T_{\text{calcul.SC}} = 297,4\,\mathrm{K}.$$

L'écart vaut également :

$$|297,4 - 297,2| = 0,2\,\mathrm{K}.$$

L'incertitude type associée à chaque mesure de température vaut $0,2\,^\circ\mathrm{C}$, c'est-à-dire $0,2\,\mathrm{K}$ pour une variation de température.

Résultat : Les valeurs mesurées et calculées sont compatibles. Le modèle de température de contact est donc cohérent avec les mesures expérimentales.

Q.12 Pour le contact silicone-bois, on trouve environ :

$$T_{\text{contact bois}} \approx 301,5\,\mathrm{K} = 28,5\,^\circ\mathrm{C}.$$

Pour le contact silicone-carrelage, on trouve :

$$T_{\text{contact carrelage}} \approx 297,4\,\mathrm{K} = 24,4\,^\circ\mathrm{C}.$$

La température de contact est donc plus faible avec le carrelage qu'avec le bois. Comme le carrelage possède une effusivité plus grande, il absorbe plus rapidement l'énergie thermique du pied. La surface de contact se refroidit davantage, ce qui donne une sensation de froid.

Résultat : Même si le carrelage et le parquet sont initialement à la même température, le carrelage paraît plus froid car il prélève plus rapidement de l'énergie thermique au pied.

3. Transfert conducto-convectif

Q.13 Avec un solide, le transfert thermique se fait essentiellement par conduction au niveau de la zone de contact. Dans un liquide, comme l'eau du thermostat, il peut aussi y avoir des mouvements de matière : les zones d'eau refroidies ou réchauffées se déplacent.

Résultat : Le transfert supplémentaire est la convection thermique, liée au mouvement du fluide liquide. On parle donc de transfert conducto-convectif.

Q.14 Le flux thermique ϕ représente une énergie transférée par unité de temps. Pour une durée très petite Δt, le transfert thermique vaut donc :

$$Q = \phi\,\Delta t.$$

Sous forme différentielle, on peut écrire :

$$\delta Q = \phi\,dt.$$

Résultat : $Q = \phi\,\Delta t$ pour une durée très petite Δt.

Q.15 On applique le premier principe au système {silicone}. On néglige le travail mécanique, donc :

$$dU = \delta Q.$$

Or, pour un système incompressible :

$$dU = C_{\text{silicone}}\,d\theta.$$

D'après la loi de Newton donnée dans l'énoncé :

$$\phi = h_{\text{eau-silicone}}\,S\,(\theta_T - \theta).$$

Comme $\delta Q = \phi\,dt$, on obtient :

$$C_{\text{silicone}}\,d\theta = h_{\text{eau-silicone}}\,S\,(\theta_T - \theta)\,dt.$$

En divisant par dt puis par C_{silicone}, il vient :

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{h_{\text{eau-silicone}}S}{C_{\text{silicone}}}(\theta_T - \theta).$$

On développe :

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{h_{\text{eau-silicone}}S}{C_{\text{silicone}}}\theta = \frac{h_{\text{eau-silicone}}S}{C_{\text{silicone}}}\theta_T.$$

En posant :

$$\tau = \frac{C_{\text{silicone}}}{h_{\text{eau-silicone}}S},$$

on a :

$$\frac{1}{\tau} = \frac{h_{\text{eau-silicone}}S}{C_{\text{silicone}}}.$$

Donc l'équation différentielle devient :

$$\boxed{\frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{\tau}\theta = \frac{1}{\tau}\theta_T}.$$

Résultat : On retrouve bien l'équation différentielle demandée, avec $\tau = \dfrac{C_{\text{silicone}}}{h_{\text{eau-silicone}}S}$.

Q.16 Sur l'annexe, la température mesurée diminue rapidement au début, puis de plus en plus lentement, pour tendre vers la température du thermostat, proche de 0 °C. Cette allure est caractéristique d'une évolution exponentielle décroissante.

La courbe modélisée suit correctement les points expérimentaux : elle reproduit bien la forte diminution initiale puis le ralentissement progressif du refroidissement. Les petits écarts peuvent être dus aux incertitudes expérimentales, au positionnement du thermomètre ou aux limites du modèle.

Résultat : Le modèle exponentiel est satisfaisant pour décrire le refroidissement de la poche de silicone.

Q.17 La solution du modèle est :

$$\theta(t) = (\theta(0) - \theta_T)e^{-t/\tau} + \theta_T.$$

Graphiquement, le temps caractéristique τ peut être déterminé de deux façons équivalentes :

- en traçant la tangente à l'origine : son intersection avec l'asymptote $\theta = \theta_T$ donne $t = \tau$;
- ou en cherchant l'instant où l'écart $\theta(t) - \theta_T$ vaut $\frac{1}{e}$ de l'écart initial $\theta(0) - \theta_T$.

D'après l'équation inscrite sur l'annexe :

$$\theta(t) = 11,6 \exp\left(-\frac{t}{1,04 \times 10^3}\right) + 16,3 \times 10^{-3}.$$

Le dénominateur de l'exponentielle correspond directement au temps caractéristique :

$$\tau = 1,04 \times 10^3\,\mathrm{s}.$$

On peut aussi vérifier graphiquement :

$$\theta_T \approx 0,016\,^\circ\mathrm{C} \approx 0\,^\circ\mathrm{C}, \qquad \theta(0) - \theta_T \approx 11,6\,^\circ\mathrm{C}.$$

Au temps $t = \tau$, l'écart à la température finale vaut environ :

$$\frac{11,6}{e} \approx 4,3\,^\circ\mathrm{C}.$$

Sur la courbe, cette température est atteinte pour $t \approx 1,0 \times 10^3$ s.

Résultat : $\tau \approx 1,04 \times 10^3$ s, soit environ 17 min.

Q.18 On utilise la relation :

$$\tau = \frac{C_{\text{silicone}}}{h_{\text{eau-silicone}} S}.$$

On isole $h_{\text{eau-silicone}}$:

$$h_{\text{eau-silicone}} = \frac{C_{\text{silicone}}}{\tau S}.$$

Avec :

$$C_{\text{silicone}} = 179\,\mathrm{J\,K^{-1}}, \qquad S = 0,0172\,\mathrm{m^2}, \qquad \tau = 1,04 \times 10^3\,\mathrm{s}.$$

Donc :

$$h_{\text{eau-silicone}} = \frac{179}{(1,04 \times 10^3) \times 0,0172} = 10,0\,\mathrm{J\,s^{-1}\,K^{-1}\,m^{-2}}.$$

Résultat : $h_{\text{eau-silicone}} \approx 10,0\,\mathrm{J\,s^{-1}\,K^{-1}\,m^{-2}}$, c'est-à-dire $10,0\,\mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-1}}$.

Q.19 On donne :

$$h_{\text{air-silicone}} = 3,51\,\mathrm{J\,s^{-1}\,K^{-1}\,m^{-2}}.$$

Or :

$$h_{\text{eau-silicone}} \approx 10,0\,\mathrm{J\,s^{-1}\,K^{-1}\,m^{-2}}.$$

Donc :

$$\frac{h_{\text{eau-silicone}}}{h_{\text{air-silicone}}} = \frac{10,0}{3,51} \approx 2,85.$$

Le coefficient de transfert est donc presque trois fois plus grand dans l'eau que dans l'air. À écart de température identique, le flux thermique est plus important dans l'eau.

Résultat : Le pied se refroidit plus vite dans l'eau que dans l'air.

Exercice 2 - HOPE, l'espoir du dihydrogène vert

Q.1 L'éolienne a produit 922 MW h pendant le mois de décembre 2023. Le mois de décembre contient 31 jours. L'énergie moyenne produite par jour est donc :

$$E_{\text{jour}} = \frac{922}{31} = 29,7\,\text{MW h}.$$

Résultat : L'éolienne produit en moyenne environ 29, 7 MW h par jour, soit environ 30 MW h par jour.

Q.2 Sur le document 2 de l'annexe, le générateur possède une borne positive à gauche et une borne négative à droite.

Dans les fils métalliques :

- le courant électrique conventionnel circule de la borne + vers la borne − ;
- les électrons circulent en sens inverse, de la borne − vers la borne +.

Ainsi, le courant sort de la borne +, va vers l'électrode de gauche, traverse l'électrolyseur, puis revient vers la borne −. Les électrons se déplacent dans les fils en sens opposé : ils partent de la borne − vers l'électrode de droite, et quittent l'électrode de gauche vers la borne +.

Résultat : Courant conventionnel : de + vers −. Électrons : de − vers +. L'électrode de gauche est l'anode positive ; l'électrode de droite est la cathode négative.

Q.3 Les couples d'oxydoréduction sont :

$$H^+\,(aq)\,/\,H_2(g) \qquad \text{et} \qquad O_2(g)\,/\,H_2O\,(l).$$

À la cathode, qui est l'électrode négative, il y a réduction. Les ions H^+ captent des électrons pour former du dihydrogène :

$$\boxed{2\,H^+\,(aq) + 2\,e^- \longrightarrow H_2(g)}.$$

À l'anode, qui est l'électrode positive, il y a oxydation. L'eau cède des électrons pour former du dioxygène :

$$\boxed{2\,H_2O\,(l) \longrightarrow O_2(g) + 4\,H^+\,(aq) + 4\,e^-}.$$

Résultat : Sur l'annexe : électrode gauche positive = oxydation de l'eau ; électrode droite négative = réduction des ions H^+ en H_2.

Q.4 Pour additionner les deux demi-équations, il faut échanger le même nombre d'électrons. On multiplie la demi-équation de réduction par 2 :

$$4\,H^+\,(aq) + 4\,e^- \longrightarrow 2\,H_2(g).$$

On ajoute ensuite :

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

Après simplification des électrons et des ions H^+, on obtient :

$$\boxed{2\,H_2O\,(l) \longrightarrow 2\,H_2(g) + O_2(g)}.$$

Résultat : La transformation globale est l'électrolyse de l'eau : $2\,H_2O\,(l) \longrightarrow 2\,H_2(g) + O_2(g)$.

Q.5 La charge électrique transférée vaut :

$$Q = I\Delta t.$$

La quantité de matière d'électrons échangés est :

$$n(e^-) = \frac{Q}{F} = \frac{I\Delta t}{F}.$$

Attention : ici, I doit être en ampère et Δt en seconde.

$$I = 7,25\,\text{mA} = 7,25 \times 10^{-3}\,\text{A}.$$

La durée vaut :

$$\Delta t = 6\,\text{min}\,47\,\text{s} = 6 \times 60 + 47 = 407\,\text{s}.$$

Donc :

$$n(e^-) = \frac{7,25 \times 10^{-3} \times 407}{96500} = 3,06 \times 10^{-5}\,\text{mol}.$$

Résultat : $n(e^-) \approx 3,06 \times 10^{-5}\,\text{mol}$.

Q.6 D'après la demi-équation de réduction :

$$2\,\text{H}^+\,(\text{aq}) + 2\,\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2(\text{g}).$$

Deux moles d'électrons permettent de former une mole de dihydrogène. Donc :

$$n(\text{H}_2) = \frac{n(e^-)}{2} = \frac{3,06 \times 10^{-5}}{2} = 1,53 \times 10^{-5}\,\text{mol}.$$

La masse molaire du dihydrogène vaut :

$$M(\text{H}_2) = 2M(\text{H}) = 2,0\,\text{g}\,\text{mol}^{-1}.$$

Donc :

$$m(\text{H}_2) = n(\text{H}_2)M(\text{H}_2) = 1,53 \times 10^{-5} \times 2,0 = 3,06 \times 10^{-5}\,\text{g}.$$

Résultat : La masse de dihydrogène produite au laboratoire vaut bien $3,06 \times 10^{-5}\,\text{g}$.

Q.7 On commence par calculer l'énergie électrique consommée pendant l'expérience de laboratoire :

$$E_{\text{lab}} = UI\Delta t.$$

Avec :

$$U = 4,74\,\text{V}, \qquad I = 7,25 \times 10^{-3}\,\text{A}, \qquad \Delta t = 407\,\text{s}.$$

Donc :

$$E_{\text{lab}} = 4,74 \times 7,25 \times 10^{-3} \times 407 = 14,0\,\text{J}.$$

Cette énergie permet de produire :

$$m_{\text{lab}} = 3,06 \times 10^{-5}\,\text{g}.$$

On cherche l'énergie nécessaire pour produire :

$$m_{\text{industriel}} = 400\,\text{kg} = 4,00 \times 10^{5}\,\text{g}.$$

En supposant que les conditions énergétiques restent proportionnelles à la masse produite :

$$E_{400\,\text{kg}} = E_{\text{lab}} \times \frac{m_{\text{industriel}}}{m_{\text{lab}}}.$$

Ainsi :

$$E_{400\,\text{kg}} = 14,0 \times \frac{4,00 \times 10^{5}}{3,06 \times 10^{-5}} = 1,83 \times 10^{11}\,\text{J}.$$

On convertit en MW h. Or :

$$1\,\text{MW}\,\text{h} = 10^{6} \times 3600 = 3,60 \times 10^{9}\,\text{J}.$$

Donc :

$$E_{400\,\mathrm{kg}} = \frac{1,83 \times 10^{11}}{3,60 \times 10^{9}} = 50,8\,\mathrm{MW\,h}.$$

Résultat : Dans les conditions de l'expérience, il faudrait environ $1,83 \times 10^{11}$ J, soit $50,8\,\mathrm{MW\,h}$, pour produire 400 kg de dihydrogène.

Q.8 D'après Q.1, l'éolienne produit en moyenne :

$$E_{\mathrm{jour}} \approx 29,7\,\mathrm{MW\,h/jour}.$$

D'après Q.7, l'énergie nécessaire pour produire 400 kg de dihydrogène dans les conditions de l'expérience vaut :

$$E_{400\,\mathrm{kg}} \approx 50,8\,\mathrm{MW\,h}.$$

On constate que :

$$50,8 > 29,7.$$

L'énergie moyenne produite par l'éolienne en une journée est donc insuffisante si l'on conserve les mêmes conditions énergétiques que celles du laboratoire.

Le rapport vaut :

$$\frac{50,8}{29,7} \approx 1,7.$$

Il faudrait donc environ $1,7$ fois plus d'énergie, c'est-à-dire presque deux fois l'énergie quotidienne moyenne fournie par cette éolienne, pour atteindre cette production dans ces conditions.

Résultat : Le résultat n'est pas suffisant pour produire 400 kg de H_2 par jour avec une seule éolienne dans les conditions du laboratoire. En pratique, l'installation industrielle peut toutefois avoir un meilleur rendement et utiliser plusieurs sources d'énergie.

Exercice 3 - La lessive de cendre

1. Étude de l'ion carbonate

Q.1 Selon Brønsted, une base est une espèce chimique capable de capter un proton H^+.

Résultat : Une espèce basique au sens de Brønsted est un accepteur de proton H^+.

Q.2 Le carbonate de potassium se dissout selon :

$$K_2CO_3(s) \longrightarrow 2\,K^+\,(aq) + {CO_3}^{2-}\,(aq).$$

Une mole de K_2CO_3 libère donc une mole d'ions carbonate ${CO_3}^{2-}$.
La quantité de matière de carbonate de potassium introduite vaut :

$$n(K_2CO_3) = \frac{m}{M} = \frac{3,0}{138,0} = 2,17 \times 10^{-2}\,\text{mol}.$$

Donc :

$$n({CO_3}^{2-}) = 2,17 \times 10^{-2}\,\text{mol}.$$

Le volume de la fiole est :

$$V = 100,0\,\text{mL} = 0,1000\,\text{L}.$$

La concentration en ions carbonate vaut donc :

$$C({CO_3}^{2-}) = \frac{n}{V} = \frac{2,17 \times 10^{-2}}{0,1000} = 2,17 \times 10^{-1}\,\text{mol}\,\text{L}^{-1}.$$

Résultat : $[{CO_3}^{2-}]_{\text{apportée}} \approx 0,217\,\text{mol}\,\text{L}^{-1}$, soit $0,22\,\text{mol}\,\text{L}^{-1}$ avec deux chiffres significatifs.

Q.3 L'ion carbonate ${CO_3}^{2-}$ est une base : il capte un proton de l'eau. L'eau joue alors le rôle d'acide et se transforme en ion hydroxyde HO^-.

$$\boxed{{CO_3}^{2-}\,(aq) + H_2O\,(l) \rightleftharpoons {HCO_3}^-\,(aq) + HO^-\,(aq)}.$$

Résultat : La réaction acido-basique avec l'eau forme des ions hydrogénocarbonate et des ions hydroxyde.

Q.4 On donne :

$$pH = 11,8.$$

À 25 °C, on a :

$$pK_e = 14,0.$$

Donc :

$$pOH = pK_e - pH = 14,0 - 11,8 = 2,2.$$

Or :

$$[HO^-] = 10^{-pOH}.$$

Ainsi :

$$[HO^-] = 10^{-2,2} = 6,3 \times 10^{-3}\,\text{mol}\,\text{L}^{-1}.$$

Résultat : $[HO^-] = 6,3 \times 10^{-3}\,\text{mol}\,\text{L}^{-1}$.

Q.5 On compare :

$$[HO^-] = 6,3 \times 10^{-3}\,\text{mol}\,\text{L}^{-1}$$

et :

$$[{CO_3}^{2-}]_{\text{apportée}} = 0,217\,\text{mol}\,\text{L}^{-1}.$$

Le rapport vaut :

$$\frac{[\mathrm{HO^-}]}{[\mathrm{CO_3}^{2-}]_{\text{apportée}}} = \frac{6,3\times10^{-3}}{0,217} \approx 2,9\times10^{-2}.$$

Cela représente seulement environ 2,9 %. La concentration en ions hydroxyde formés est donc très inférieure à la concentration en ions carbonate introduits.

La réaction de l'ion carbonate avec l'eau est donc limitée : tous les ions carbonate ne réagissent pas avec l'eau.

Résultat : L'ion carbonate est une base faible. On peut donc assimiler la lessive de cendre à une solution contenant principalement des ions carbonate.

2. Titrage des espèces basiques contenues dans la lessive de cendre

Q.6 Les deux couples acide-base faisant intervenir les espèces carbonatées sont :

$$\mathrm{H_2CO_3(aq)\,/\,HCO_3^-\,(aq)} \qquad \text{et} \qquad \mathrm{HCO_3^-\,(aq)\,/\,CO_3^{2-}\,(aq)}.$$

L'ion carbonate peut capter un premier proton :

$$\mathrm{CO_3^{2-}\,(aq) + H^+ \longrightarrow HCO_3^-\,(aq)}.$$

Puis l'ion hydrogénocarbonate peut capter un second proton :

$$\mathrm{HCO_3^-\,(aq) + H^+ \longrightarrow H_2CO_3(aq)}.$$

On peut aussi faire apparaître le couple de l'eau $\mathrm{H_2O/HO^-}$, demandé dans l'énoncé, en écrivant que l'eau peut céder un proton aux espèces carbonatées :

$$\mathrm{CO_3^{2-}\,(aq) + H_2O\,(l) \longrightarrow HCO_3^-\,(aq) + HO^-\,(aq)},$$

$$\mathrm{HCO_3^-\,(aq) + H_2O\,(l) \longrightarrow H_2CO_3(aq) + HO^-\,(aq)}.$$

Lors du titrage, l'acide titrant est l'ion oxonium $\mathrm{H_3O^+}$, qui neutralise les ions hydroxyde formés :

$$\mathrm{H_3O^+\,(aq) + HO^-\,(aq) \longrightarrow 2\,H_2O\,(l)}.$$

Au total, deux protons sont nécessaires pour transformer $\mathrm{CO_3^{2-}}$ en $\mathrm{H_2CO_3}$. L'addition des étapes conduit à :

$$\boxed{\mathrm{CO_3^{2-}\,(aq) + 2\,H_3O^+\,(aq) \longrightarrow H_2CO_3(aq) + 2\,H_2O\,(l)}}.$$

Résultat : L'équation support du titrage montre qu'une mole d'ions carbonate réagit avec deux moles d'ions oxonium.

Q.7 À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques. L'équation support est :

$$\mathrm{CO_3^{2-} + 2\,H_3O^+ \longrightarrow H_2CO_3 + 2\,H_2O}.$$

Donc, à l'équivalence :

$$n(\mathrm{H_3O^+})_{\text{versée}} = 2n(\mathrm{CO_3^{2-}})_{\text{dans le prélèvement}}.$$

La quantité d'ions oxonium versée à l'équivalence vaut :

$$n(\mathrm{H_3O^+}) = c_A V_{eq}.$$

Avec :

$$c_A = 5,00\times10^{-3}\,\mathrm{mol\,L^{-1}}, \qquad V_{eq} = 17,0\,\mathrm{mL} = 17,0\times10^{-3}\,\mathrm{L}.$$

Donc :

$$n(\mathrm{H_3O^+}) = 5,00\times10^{-3}\times17,0\times10^{-3} = 8,50\times10^{-5}\,\mathrm{mol}.$$

Ainsi :

$$n(CO_3{}^{2-}) = \frac{8,50 \times 10^{-5}}{2} = 4,25 \times 10^{-5}\,\text{mol}.$$

Cette quantité est contenue dans :

$$V_1 = 10,0\,\text{mL} = 1,00 \times 10^{-2}\,\text{L}$$

de solution S_1. Donc :

$$C_1 = \frac{n(CO_3{}^{2-})}{V_1} = \frac{4,25 \times 10^{-5}}{1,00 \times 10^{-2}} = 4,25 \times 10^{-3}\,\text{mol}\,\text{L}^{-1}.$$

Or S_1 est obtenue par dilution par 10 de la solution S_0. Donc :

$$C_0 = 10C_1 = 4,25 \times 10^{-2}\,\text{mol}\,\text{L}^{-1}.$$

Résultat : La concentration en ions carbonate de la lessive de cendre S_0 vaut $C_0 = 4,25 \times 10^{-2}\,\text{mol}\,\text{L}^{-1}$.

Q.8 L'eau est qualifiée de dure. D'après l'étiquette, il faut introduire une quantité d'espèces basiques comprise entre :

$$6,0 \times 10^{-3}\,\text{mol} \qquad \text{et} \qquad 1,0 \times 10^{-2}\,\text{mol}.$$

On assimile les espèces basiques de la lessive de cendre aux ions carbonate. La concentration de la solution S_0 vaut :

$$C_0 = 4,25 \times 10^{-2}\,\text{mol}\,\text{L}^{-1}.$$

Le volume nécessaire est donné par :

$$V = \frac{n}{C_0}.$$

Pour la borne basse :

$$V_{\text{min}} = \frac{6,0 \times 10^{-3}}{4,25 \times 10^{-2}} = 0,141\,\text{L} = 141\,\text{mL}.$$

Pour la borne haute :

$$V_{\text{max}} = \frac{1,0 \times 10^{-2}}{4,25 \times 10^{-2}} = 0,235\,\text{L} = 235\,\text{mL}.$$

Résultat : Pour une eau dure, il faudrait introduire environ entre 140 mL et 235 mL de lessive de cendre.

Ce volume est du même ordre de grandeur que celui d'une lessive commerciale, mais il peut être supérieur à la plage usuelle de 50 à 150 mL, surtout pour la borne haute. La lessive de cendre étudiée est donc utilisable en principe, mais elle est moins concentrée en espèces basiques qu'une lessive commerciale classique : il faut en verser une quantité plus importante.

Fin de la correction.