

TERMINALE SPÉCIALITÉ · PHYSIQUE-CHIMIE · CONSTITUTION ET TRANSFORMATIONS DE LA MATIÈRE · CHAPITRE 10



R. RINGUET · 2026 – 2027

Sujet type bac Électrolyse

Deux exercices indépendants : un électrolyseur PEM et la filière hydrogène, la dorure de connecteurs électroniques

Durée : 1 h 30 · calculatrice autorisée · 2 exercices indépendants · barème sur 20

Nom : Prénom : Classe : Note : /20

★ CONSIGNES

Les deux exercices sont indépendants et peuvent être traités dans l'ordre choisi par le candidat. La qualité de la rédaction, la rigueur scientifique et le respect des unités et des chiffres significatifs entrent pour une part importante dans l'appréciation des copies ; toute expression littérale est établie avant l'application numérique et toute démarche, même partielle, est valorisée. Formulaire : incertitude composée : si $y = a b$, alors $u(y)/y = \sqrt{(u(a)/a)^2 + (u(b)/b)^2}$ • écart normalisé $z = |x_1 - x_2| / \sqrt{u(x_1)^2 + u(x_2)^2}$, compatibilité admise si $z < 2$.

Exercice 1 Produire du dihydrogène « vert »

12 pts ●●●

Le dihydrogène est aujourd'hui produit à plus de 95 % à partir de combustibles fossiles, surtout de gaz naturel, avec un fort rejet de dioxyde de carbone. L'électrolyse de l'eau alimentée par de l'électricité renouvelable — l'hydrogène « vert » — en est l'alternative. Cet exercice étudie un électrolyseur à membrane échangeuse de protons (PEM), puis confronte ses performances annoncées à une mesure de laboratoire.

■ **DONNÉES** $F = 96\,500 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$ • $V_m = 24,0 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$ à 20°C sous $1\,013 \text{ hPa}$ • $M(\text{H}_2) = 2,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ • $1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$

■ DOCUMENT 1 — L'électrolyseur à membrane échangeuse de protons

Dans une cellule PEM, deux électrodes poreuses recouvertes de catalyseur sont plaquées de part et d'autre d'une membrane solide qui ne laisse passer que les ions H^+ . De l'eau pure circule du côté de l'anode ; le dioxygène s'y dégage, tandis que le dihydrogène est recueilli du côté de la cathode (figure 1). Les couples mis en jeu sont $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ et H^+/H_2 .

Un module industriel comporte $N = 50$ cellules en série, traversées par le même courant d'intensité $I = 200 \text{ A}$. La combustion du dihydrogène libère $120 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

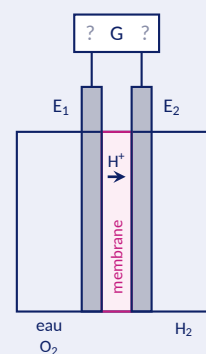


Figure 1 — Coupe d'une cellule PEM

Partie A — La cellule et ses réactions

- 1.1 Écrire la demi-équation de la réaction se produisant à la cathode, puis celle se produisant à l'anode, en milieu acide. En déduire l'équation de la réaction globale de l'électrolyse.
- 1.2 La figure 1 indique que les ions H^+ traversent la membrane de l'électrode E_1 vers l'électrode E_2 . En déduire laquelle des deux est l'anode et laquelle est la cathode, puis recopier la figure 1 en remplaçant les points d'interrogation par la polarité du générateur et en indiquant le sens du courant et celui des électrons dans les fils.

- 1.3** La réaction inverse, entre le dihydrogène et le dioxygène, est spontanée et très exothermique. En déduire, pour la réaction de décomposition de l'eau dans les conditions de fonctionnement de la cellule (dihydrogène et dioxygène présents), la position de Q_r par rapport à K , et justifier en une phrase la présence indispensable du générateur.

Partie B — Performances du module industriel

La figure 2 donne la caractéristique d'une cellule du module : la tension U à ses bornes en fonction de l'intensité I qui la traverse.

- 1.4** Relever sur la figure 2 la tension aux bornes d'une cellule lorsque $I = 200$ A, puis en déduire la tension aux bornes du module de 50 cellules en série.
- 1.5** Calculer la quantité d'électricité qui traverse une cellule en une heure, puis la quantité de matière d'électrons et la quantité de dihydrogène formées dans cette cellule.
- 1.6** En déduire la masse de dihydrogène produite par le module en une heure, ainsi que le volume correspondant, exprimé en m^3 .
- 1.7** Calculer la puissance électrique consommée par le module et l'énergie électrique consommée en une heure. En déduire l'énergie nécessaire à la production d'un kilogramme de dihydrogène, en $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$.
- 1.8** Montrer que le rendement énergétique de l'électrolyseur vaut environ 65 %, et préciser sous quelle forme se retrouve l'énergie non stockée.

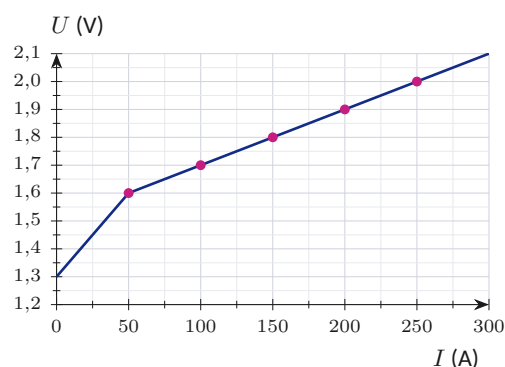


Figure 2 — Caractéristique d'une cellule

Partie C — Vérification au laboratoire

DOCUMENT 2 — La mesure et son exploitation

Une cellule PEM de démonstration est alimentée sous $I = 1,20$ A pendant $\Delta t = 10,0$ min ; le dihydrogène est recueilli par déplacement d'eau dans une éprouvette graduée. Le volume mesuré vaut $V_{\text{mes}} = 86,0$ mL, avec $u(V_{\text{mes}}) = 2,0$ mL. L'ampèremètre donne $u(I) = 0,02$ A et le chronomètre $u(\Delta t) = 1$ s.

Le programme ci-dessous calcule le volume de dihydrogène attendu au cours du temps.

```

1 F, Vm, I = 96500, 24.0, 1.20
2 for t in [120, 240, 360, 480, 600]:
3     n = I * t / (2 * F)
4     V = ... # volume, en mL
5     print(t, round(V, 1))

```

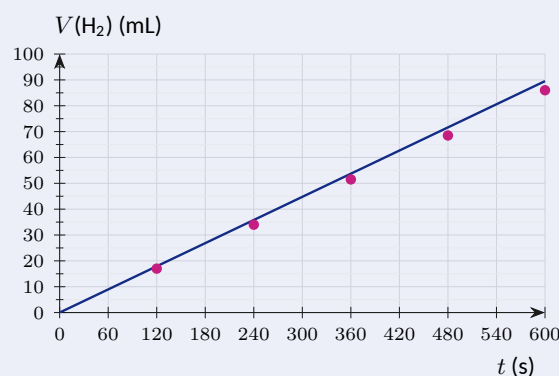


Figure 3 — Volume attendu (trait plein) et volumes mesurés (points)

- 1.9** Compléter la ligne 4 du programme. Calculer « à la main » la valeur affichée pour $t = 600$ s et vérifier qu'elle correspond au tracé de la figure 3.
- 1.10** Calculer l'incertitude-type sur le volume théorique V_{th} ainsi obtenu, puis l'écart normalisé entre V_{mes} et V_{th} . Conclure.
- 1.11** Calculer le rendement faradique de cette cellule de démonstration.
- 1.12** Le dihydrogène est recueilli sur l'eau et l'expérience est menée à 20°C . Citer deux causes possibles de l'écart systématique visible sur la figure 3 et proposer, pour l'une d'elles, une amélioration du protocole.
- 1.13** L'énergie électrique consommée par le module industriel provient d'un parc éolien. Expliquer en quelques lignes pourquoi l'hydrogène ainsi produit est dit « vert », et pourquoi la filière reste néanmoins pénalisée sur

le plan énergétique lorsque le dihydrogène est finalement reconverti en électricité par une pile à combustible de rendement 50 % (on calculera le rendement global de la chaîne).

Exercice 2 La dorure des connecteurs électroniques

8 pts ●●●

Les contacts des connecteurs électroniques sont recouverts d'une très fine couche d'or, qui ne s'oxyde pas et garantit une résistance de contact faible et stable pendant des années. Le dépôt est réalisé par électrolyse dans un bain contenant l'ion complexe dicyanoaurate(I), selon $[\text{Au}(\text{CN})_2]^- (\text{aq}) + \text{e}^- \longrightarrow \text{Au} (\text{s}) + 2 \text{CN}^- (\text{aq})$.

■ **DONNÉES** $F = 96\,500 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$ • $V_m = 24,0 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$ • $M(\text{Au}) = 197,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ • masse volumique de l'or : $19,3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

■ DOCUMENT 3 — Le lot à traiter et le bain de dorure

Un lot de 5 000 connecteurs est traité en une seule opération. La surface à dorer est de $4,0 \text{ cm}^2$ par connecteur et l'épaisseur visée est $e = 0,80 \mu\text{m}$. Le bain est alimenté par un générateur débitant $I = 12 \text{ A}$; son rendement faradique vaut $\rho = 90 \%$, le reste du courant servant à réduire l'eau. L'or vaut $75 \text{ €} \cdot \text{g}^{-1}$. L'anode est une plaque de titane platiné, inattaquable.

- 2.1 Indiquer sur quelle électrode les connecteurs sont placés et à quelle borne du générateur elle est reliée. Combien d'électrons faut-il pour déposer une mole d'or ?
- 2.2 Calculer le volume total d'or à déposer, puis la masse correspondante et la quantité de matière d'or.
- 2.3 En déduire la quantité d'électricité théoriquement nécessaire, puis celle qui est réellement consommée compte tenu du rendement faradique.
- 2.4 Calculer la durée de l'opération, en minutes.
- 2.5 Le reste du courant réduit l'eau à la cathode. Écrire la demi-équation correspondante et calculer le volume de dihydrogène dégagé.
- 2.6 Calculer le coût de l'or déposé pour l'ensemble du lot, puis par connecteur. Sachant qu'un connecteur est vendu $2,50 \text{ €}$, commenter le choix industriel d'une épaisseur aussi faible.
- 2.7 L'anode étant inattaquable, la concentration en ions complexes du bain diminue au fur et à mesure des opérations. Expliquer pourquoi, puis indiquer ce que l'atelier doit faire pour maintenir la qualité des dépôts.
- 2.8 Les cartes électroniques en fin de vie contiennent environ 250 g d'or par tonne, alors qu'un minerai riche en contient 5 g par tonne. Commenter l'intérêt du recyclage et citer un enjeu environnemental propre aux bains de dorure cyanurés.

■ DOCUMENT 4 — Choisir l'épaisseur du dépôt

La couche d'or doit être assez épaisse pour résister à l'usure des insertions répétées : un dépôt trop mince laisse apparaître le métal support, qui s'oxyde et fait croître la résistance de contact.

La figure 4 donne la résistance électrique de contact mesurée après 1 000 insertions, en fonction de l'épaisseur du dépôt d'or. Le cahier des charges du client impose une résistance de contact *strictement inférieure* à $10 \text{ m}\Omega$.

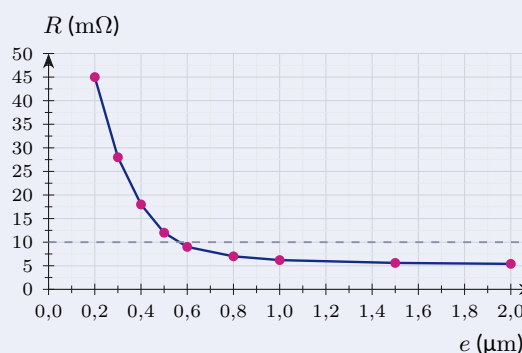


Figure 4 — Résistance de contact après 1 000 insertions

- 2.9 Déterminer graphiquement l'épaisseur minimale de dépôt satisfaisant au cahier des charges. L'épaisseur retenue par l'atelier respecte-t-elle cette exigence ?
- 2.10 Un responsable propose de ramener l'épaisseur à cette valeur minimale. Calculer la masse d'or et le coût économisés sur le lot, ainsi que la nouvelle durée de l'électrolyse. Discuter en deux phrases l'intérêt et le risque de cette décision.