

BACCALAURÉAT GÉNÉRAL — SESSION 2026
Physique-Chimie — Enseignement de spécialité
AMÉRIQUE DU NORD — JOUR 1 (SUJET 26-PYCJ1AN1)

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.

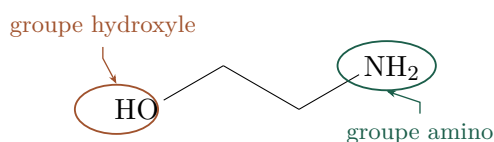
Répartition des points : Exercice 1 — 9 points • Exercice 2 — 6 points • Exercice 3 — 5 points.
Durée : 3 h 30.

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

Exercice 1 — Valorisation du dioxyde de carbone dans les cimenteries (9 points)

1. Captage de la molécule de dioxyde de carbone par la molécule d'éthanolamine

Q.1 Reproduire la formule topologique de l'éthanolamine, entourer les groupes caractéristiques et nommer les familles fonctionnelles correspondantes.



La molécule d'éthanolamine possède deux groupes caractéristiques :

- le groupe **hydroxyle** $-\text{OH}$, porté par un atome de carbone lié à un seul autre atome de carbone : famille des **alcools** (alcool primaire) ;
- le groupe **amino** $-\text{NH}_2$: famille des **amines** (amine primaire).

Note du professeur

On demande la *famille fonctionnelle* (alcool, amine) et pas seulement le nom du groupe (hydroxyle, amino) : il faut donner les deux pour obtenir la totalité des points.



Q.2 Vérifier que la concentration en quantité de matière de la solution commerciale à 20 % en masse vaut $C = 3,3 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

La densité de la solution vaut $d = 1,0$, donc sa masse volumique est :

$$\rho_{\text{sol}} = d \times \rho_{\text{eau}} = 1,0 \times 1,00 = 1,0 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$$

Masse d'un volume $V = 1,0 \text{ L} = 1,0 \times 10^3 \text{ mL}$ de solution :

$$m_{\text{sol}} = \rho_{\text{sol}} \times V = 1,0 \times 1,0 \times 10^3 = 1,0 \times 10^3 \text{ g}$$

La solution est à 20 % en masse d'éthanolamine, donc la masse d'éthanolamine dissoute vaut :

$$m = \frac{20}{100} \times m_{\text{sol}} = 0,20 \times 1,0 \times 10^3 = 2,0 \times 10^2 \text{ g}$$

Quantité de matière correspondante :

$$n = \frac{m}{M(\text{C}_2\text{H}_7\text{NO})} = \frac{2,0 \times 10^2}{61,0} = 3,28 \text{ mol}$$

Concentration en quantité de matière :

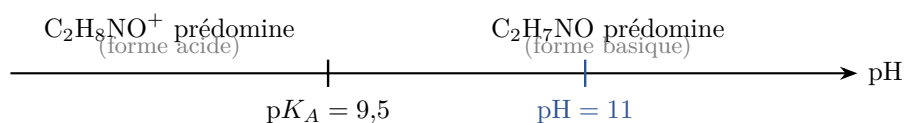
$$C = \frac{n}{V} = \frac{3,28}{1,0} = 3,3 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

La valeur annoncée $C = 3,3 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ est bien vérifiée.

Note du professeur

Piège classique : le pourcentage est *massique* et porte sur la masse *de solution*, pas sur celle d'eau. La densité d est un nombre *sans unité* ; c'est $\rho = d \times \rho_{\text{eau}}$ qui a une unité.

Q.3 Tracer le diagramme de prédominance du couple acide-base de l'éthanolamine.



Pour $\text{pH} < pK_A$ la forme acide $\text{C}_2\text{H}_8\text{NO}^+$ prédomine ; pour $\text{pH} > pK_A$ c'est la forme basique $\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$ qui prédomine.



Q.4 Sous quelle forme l'éthanolamine est-elle majoritairement présente à $\text{pH} = 11$?

On compare le pH de la solution au $\text{p}K_A$ du couple :

$$\text{pH} = 11 > \text{p}K_A = 9,5$$

D'après le diagramme de prédominance, l'espèce qui prédomine est donc la **forme basique** de l'éthanolamine, c'est-à-dire $\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$.

À $\text{pH} = 11$, l'éthanolamine est majoritairement sous sa forme basique $\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$ (aq).

Q.5 Donner l'expression du taux d'avancement final.

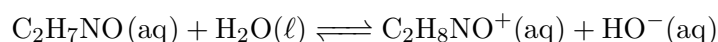
Le taux d'avancement final τ est le quotient de l'avancement final par l'avancement maximal :

$$\tau = \frac{x_f}{x_{\max}}$$

C'est un nombre sans dimension, compris entre 0 et 1.

Q.6 Exprimer $x_{\max}$ en fonction de C et V .

Équation de la réaction de l'éthanolamine avec l'eau :



État	Avancement	$\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$	H_2O	$\text{C}_2\text{H}_8\text{NO}^+$	HO^-
Initial	0	$n_i = C \cdot V$	solvant (excès)	0	0
En cours	x	$C \cdot V - x$	excès	x	x
Final réel	x_f	$C \cdot V - x_f$	excès	x_f	x_f
Maximal	$x_{\max}$	$C \cdot V - x_{\max} = 0$	excès	$x_{\max}$	$x_{\max}$

L'eau est le solvant : elle est en très large excès. Le réactif limitant est donc l'éthanolamine. Si la transformation était totale, l'éthanolamine serait entièrement consommée :

$$C \cdot V - x_{\max} = 0 \quad \text{soit} \quad x_{\max} = C \cdot V$$

Q.7 Montrer que $\tau = \frac{K_e \cdot c^\circ}{C \cdot 10^{-\text{pH}}}$.

D'après le tableau d'avancement, l'avancement final est relié à la quantité d'ions hydroxyde formés :

$$x_f = n_f(\text{HO}^-) = [\text{HO}^-]_f \times V$$



Or, par définition du produit ionique de l'eau :

$$K_e = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{HO}^-]}{(c^\circ)^2} \implies [\text{HO}^-] = \frac{K_e (c^\circ)^2}{[\text{H}_3\text{O}^+]}$$

et, par définition du pH, $[\text{H}_3\text{O}^+] = c^\circ \times 10^{-\text{pH}}$. D'où :

$$[\text{HO}^-] = \frac{K_e (c^\circ)^2}{c^\circ \times 10^{-\text{pH}}} = \frac{K_e \cdot c^\circ}{10^{-\text{pH}}}$$

On en déduit le taux d'avancement (le volume V se simplifie : τ ne dépend pas du volume étudié) :

$$\tau = \frac{x_f}{x_{\max}} = \frac{[\text{HO}^-]_f \times V}{C \times V} = \frac{[\text{HO}^-]_f}{C} \implies \boxed{\tau = \frac{K_e \cdot c^\circ}{C \cdot 10^{-\text{pH}}}}$$

Q.8 Calculer τ et commenter.

$$\tau = \frac{K_e \cdot c^\circ}{C \cdot 10^{-\text{pH}}} = \frac{1,0 \times 10^{-14} \times 1,0}{3,3 \times 10^{-11}} = 3,0 \times 10^{-4}$$

$$\tau = 3,0 \times 10^{-4}, \text{ soit environ } 0,030 \, \%.$$

Commentaire. Le taux d'avancement est très inférieur à 1 : seule une molécule d'éthanolamine sur environ $3,3 \times 10^3$ réagit effectivement avec l'eau. La transformation est donc très limitée, ce qui est cohérent avec le fait que l'éthanolamine est une **base faible** : elle ne réagit que très partiellement avec l'eau.

Note du professeur

$\tau \ll 1 \Rightarrow$ transformation non totale $\Rightarrow$ base faible. Attention à l'unité de τ : c'est un nombre *sans unité* (on peut l'exprimer en %).

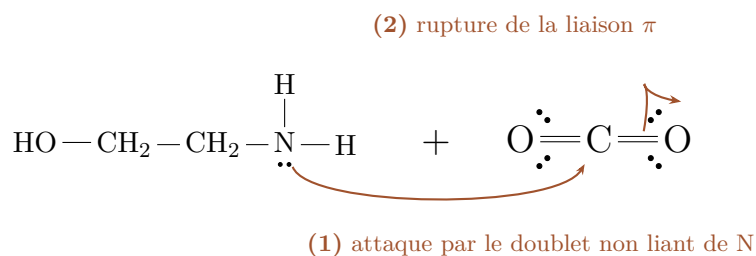
Q.9 Identifier un intermédiaire réactionnel du mécanisme et justifier.

L'espèce chimique $\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\overset{+}{\text{N}}\text{H}_2-\text{COO}^-$ (l'amphion formé à l'étape 1) est un **intermédiaire réactionnel**.

Justification : elle est *produite* lors de l'étape 1 puis *consommée* lors de l'étape 2. Elle n'apparaît donc ni parmi les réactifs, ni parmi les produits de l'équation de la réaction globale : c'est la définition d'un intermédiaire réactionnel.



Q.10 Recopier l'étape 1 et représenter les flèches courbes traduisant les transferts électroniques, en justifiant leur sens.



Produit obtenu : $\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\overset{+}{\text{N}}\text{H}_2-\text{COO}^-$

Justification du sens des flèches courbes. Une flèche courbe représente le déplacement d'un *doublet d'électrons*, toujours orienté d'un **site donneur** de doublet d'électrons vers un **site accepteur** :

- flèche (1) : l'atome d'azote porte un **doublet non liant** et il est plus électronégatif que les atomes de carbone et d'hydrogène auxquels il est lié : il porte donc une charge partielle δ^- et constitue un **site donneur**. L'atome de carbone du CO_2 est lié à deux atomes d'oxygène plus électronégatifs que lui : il porte une charge partielle δ^+ et constitue un **site accepteur**. Le doublet non liant de l'azote attaque cet atome de carbone et crée la liaison $\text{N}-\text{C}$;
- flèche (2) : pour que l'atome de carbone ne dépasse pas quatre liaisons (règle de l'octet), le doublet π d'une des liaisons $\text{C}=\text{O}$ se déplace sur l'atome d'oxygène, plus électronégatif, qui porte alors une charge négative.

Note du professeur

Les flèches courbes partent *toujours* d'un doublet (non liant ou liant) et *jamais* d'une charge + ou d'un atome. On les fait pointer vers l'atome (ou vers l'emplacement) où le doublet arrive.

2. Contrôle qualité d'une solution d'éthanolamine

Q.11 Choisir le matériel permettant de préparer 250,0 mL de la solution S_{50} diluée 50 fois.

Lors d'une dilution, la quantité de matière de soluté se conserve :

$$C_{\text{mère}} \times V_{\text{prélevé}} = C_{\text{filles}} \times V_{\text{filles}} \quad \text{avec} \quad F = \frac{C_{\text{mère}}}{C_{\text{filles}}} = \frac{V_{\text{filles}}}{V_{\text{prélevé}}} = 50$$

d'où le volume de solution S à prélever :

$$V_{\text{prélevé}} = \frac{V_{\text{filles}}}{F} = \frac{250,0}{50} = 5,00 \text{ mL}$$

Matériel : une pipette jaugée de 5,00 mL et une fiole jaugée de 250,0 mL (+ un bécher de 50 mL pour prélever la solution S).

Justification : pour préparer une solution de concentration connue avec précision, on utilise exclusivement de la **verrerie jaugée** (pipette jaugée et fiole jaugée), dont l'incertitude est bien plus faible que celle de la verrerie graduée (pipettes graduées, éprouvettes) ou des béchers, qui ne servent qu'à contenir un liquide.



Q.12 Définir l'équivalence d'un titrage.

L'équivalence d'un titrage est l'état du système chimique pour lequel les réactifs titrant et titré ont été introduits (et donc consommés) dans les **proportions stœchiométriques** de l'équation de la réaction support du titrage.

Avant l'équivalence, le réactif titré est en excès ; après l'équivalence, c'est le réactif titrant qui est en excès. À l'équivalence, les deux réactifs sont totalement consommés.

Q.13 Déterminer le volume équivalent V_E à partir de la courbe de titrage.

Méthode employée : méthode de la courbe dérivée. Le volume équivalent correspond au saut de pH, c'est-à-dire au point d'inflexion de la courbe $\text{pH} = f(V)$. Ce point d'inflexion se repère par l'**extremum de la courbe dérivée** $\frac{d(\text{pH})}{dV}$: ici, le titrage d'une base par un acide fait *diminuer* le pH, la dérivée est donc négative et l'on cherche son **minimum**.

En projetant le minimum de la courbe dérivée sur l'axe des abscisses, on lit :

$$V_E = 14,3 \text{ mL} \quad (\text{lecture graphique à } \pm 0,2 \text{ mL près})$$

Remarque : cette valeur est cohérente avec le saut de pH observé sur la courbe $\text{pH} = f(V)$, entre $V \approx 13 \text{ mL}$ et $V \approx 15,5 \text{ mL}$. La méthode des tangentes parallèles conduirait au même résultat.

Note du professeur

On attend explicitement la *méthode* : « extremum de la courbe dérivée » ou « méthode des tangentes ». Une lecture voisine (14,0 à 14,5 mL) reste acceptée et ne change pas la conclusion de la question suivante.

Q.14 En déduire le titre massique en éthanolamine de la solution S .

Démarche suivie : (1) exploiter la relation à l'équivalence pour obtenir la concentration de S_{50} ; (2) remonter à la concentration de S grâce au facteur de dilution ; (3) convertir cette concentration en titre massique.

Étape 1 — concentration de la solution diluée S_{50} .

D'après l'équation du titrage $\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}(\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) \longrightarrow \text{C}_2\text{H}_8\text{NO}^+(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\ell)$, les nombres stœchiométriques des deux réactifs valent 1. À l'équivalence :

$$n(\text{C}_2\text{H}_7\text{NO})_{\text{titré}} = n(\text{H}_3\text{O}^+)_{\text{versé}} \quad \Longrightarrow \quad C_{50} \times V_B = C_A \times V_E$$

$$C_{50} = \frac{C_A \times V_E}{V_B} = \frac{0,10 \times 14,3}{25,0} = 5,72 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

Étape 2 — concentration de la solution S .

La solution S a été diluée 50 fois pour obtenir S_{50} , donc :

$$C_S = 50 \times C_{50} = 50 \times 5,72 \times 10^{-2} = 2,86 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

Étape 3 — titre massique.

Considérons un volume $V = 1,0 \text{ L}$ de solution S . Il contient une masse d'éthanolamine :

$$m = C_S \times M \times V = 2,86 \times 61,0 \times 1,0 = 1,74 \times 10^2 \text{ g}$$

La masse de ce litre de solution vaut, comme à la question Q.2 :

$$m_{\text{sol}} = d \times \rho_{\text{eau}} \times V = 1,0 \times 10^3 \text{ g}$$

Le titre massique est le quotient de ces deux masses :

$$t = \frac{m}{m_{\text{sol}}} = \frac{1,74 \times 10^2}{1,0 \times 10^3} = 0,174$$

$t \approx 17 \%$ en masse d'éthanolamine dans la solution S .

Note du professeur

Question à prise d'initiative : la *présentation de la démarche* est notée. On annonce les étapes, on écrit chaque relation littérale avant l'application numérique, et l'on conclut par une phrase. Le résultat final est arrondi à 2 chiffres significatifs, imposés par $C_A = 0,10 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, mais les valeurs intermédiaires ne doivent pas être arrondies en cours de calcul. Une lecture de V_E comprise entre 14,0 et 14,5 mL conduit à un titre compris entre 17 % et 18 % : la conclusion de la question suivante est inchangée.

Q.15 Commenter le résultat obtenu.

Le titre massique mesuré, $t \approx 17 \%$, est **inférieur** à la valeur nominale de 20 % : la solution S s'est effectivement altérée au cours du temps, sa concentration en éthanolamine a diminué.

En se référant au tableau, cette valeur se situe entre 15 % et 20 % :

- l'**efficacité de captation** du CO_2 est comprise entre « faible » et « bonne » : elle est donc dégradée par rapport à une solution à 20 % ;
- la **tolérance à la corrosion** des équipements est en revanche comprise entre « acceptable » et « très bonne » : la solution ne présente pas de risque pour l'installation.

La solution reste utilisable sans danger pour les équipements, mais le captage du CO_2 y serait moins performant.

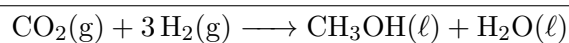
Le technicien a donc intérêt à **réajuster la solution** en y ajoutant de l'éthanolamine pour revenir à un titre de l'ordre de 20 %, valeur qui offre le meilleur compromis entre une bonne efficacité de captation et une corrosion acceptable.

3. Production de méthanol à partir du dioxyde de carbone capté



Q.16 Écrire l'équation de la réaction de formation du méthanol.

Les réactifs sont le dioxyde de carbone CO_2 et le dihydrogène H_2 ; les produits sont le méthanol CH_3OH et l'eau H_2O . Après ajustement des nombres stœchiométriques :



Vérification de la conservation des éléments : C : $1 = 1$; O : $2 = 1 + 1$; H : $3 \times 2 = 6 = 4 + 2$. ✓

Q.17 Déterminer la durée nécessaire à la production de 37 500 tonnes de dihydrogène.

Masse de dihydrogène à produire, exprimée en kilogrammes :

$$m(\text{H}_2) = 37\,500 \text{ t} = 37\,500 \times 10^3 = 3,75 \times 10^7 \text{ kg}$$

La production d'un kilogramme de dihydrogène nécessite une énergie de 55 kW·h. L'énergie électrique totale nécessaire vaut donc :

$$E = 55 \times m(\text{H}_2) = 55 \times 3,75 \times 10^7 = 2,0625 \times 10^9 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

Les électrolyseurs fonctionnent à la puissance $P = 330 \text{ MW} = 3,30 \times 10^5 \text{ kW}$. Comme $E = P \times \Delta t$:

$$\Delta t = \frac{E}{P} = \frac{2,0625 \times 10^9}{3,30 \times 10^5} = 6,25 \times 10^3 \text{ h}$$

$\Delta t \approx 6,3 \times 10^3 \text{ h}$ (soit 6 250 h), c'est-à-dire environ $2,6 \times 10^2$ jours (près de 9 mois).

Note du professeur

Le kilowattheure est une *énergie* : on peut travailler entièrement en kW·h et en kW sans convertir en joules, à condition d'être cohérent. Si l'on préfère les unités du système international : $E = 2,0625 \times 10^9 \times 3,6 \times 10^6 = 7,43 \times 10^{15} \text{ J}$ et $P = 3,30 \times 10^8 \text{ W}$, ce qui redonne $\Delta t = 2,25 \times 10^7 \text{ s} = 6,25 \times 10^3 \text{ h}$.

Q.18 La puissance des électrolyseurs est-elle suffisante ?

L'usine doit produire ces 37 500 tonnes de dihydrogène **chaque année**. Or une année compte :

$$\Delta t_{\text{an}} = 365 \times 24 = 8,76 \times 10^3 \text{ h}$$

Comparons les deux durées :

$$\Delta t = 6,25 \times 10^3 \text{ h} < \Delta t_{\text{an}} = 8,76 \times 10^3 \text{ h}$$

Oui : la puissance de 330 MW est suffisante pour produire les 37 500 t de dihydrogène par an.

Les électrolyseurs devraient fonctionner $\frac{6,25 \times 10^3}{8,76 \times 10^3} \approx 0,71$, soit environ 71 % du temps : il



reste une marge d'environ 29 % de l'année, ce qui est appréciable pour les opérations de maintenance et les éventuels arrêts de production.

Exercice 2 — L'effet photoélectrique et ses applications (6 points)

1. Une approche historique de l'effet photoélectrique

Q.1 Décrire l'effet photoélectrique.

L'effet photoélectrique est l'**émission d'électrons par un métal éclairé par un rayonnement électromagnétique**.

Cette émission ne se produit que si la **fréquence** ν du rayonnement est **supérieure à une fréquence seuil** ν_s , caractéristique du métal éclairé, et ce quelle que soit l'intensité lumineuse : une lumière très intense de fréquence trop faible n'arrache aucun électron.

Ce phénomène s'interprète par l'**aspect corpusculaire de la lumière** : la lumière est constituée de photons transportant chacun un quantum d'énergie $E = h\nu$. Un photon cède la totalité de son énergie à un unique électron du métal ; si cette énergie est au moins égale au travail d'extraction W_{ext} , l'électron est arraché.

Q.2 Calculer la fréquence seuil ν_s du zinc.

À la fréquence seuil, l'énergie du photon est exactement égale au travail d'extraction :

$$h\nu_s = W_{\text{ext}}(\text{Zn}) \quad \Rightarrow \quad \nu_s = \frac{W_{\text{ext}}(\text{Zn})}{h}$$

En convertissant le travail d'extraction en joules : $W_{\text{ext}} = 4,3 \times 1,60 \times 10^{-19} = 6,88 \times 10^{-19} \text{ J}$.

$$\nu_s = \frac{6,88 \times 10^{-19}}{6,63 \times 10^{-34}} = 1,038 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

$$\nu_s = 1,0 \times 10^{15} \text{ Hz} \quad (\text{valeur non arrondie conservée : } 1,038 \times 10^{15} \text{ Hz})$$

Q.3 En déduire la longueur d'onde seuil et le domaine correspondant.

Dans le vide, longueur d'onde et fréquence sont liées par $\lambda = \frac{c}{\nu}$, d'où :

$$\lambda_s = \frac{c}{\nu_s} = \frac{3,00 \times 10^8}{1,038 \times 10^{15}} = 2,9 \times 10^{-7} \text{ m} = 2,9 \times 10^2 \text{ nm}$$

$$\lambda_s \approx 2,9 \times 10^2 \text{ nm} \quad (\text{valeur non arrondie : } 289 \text{ nm})$$



Cette longueur d'onde est comprise entre 100 nm et 400 nm : elle appartient donc au domaine des **ultraviolets (UV)**, immédiatement au-delà du violet en énergie (le visible commence à 400 nm).

Q.4 Justifier que l'effet photoélectrique se produit pour $\lambda = 250 \text{ nm}$.

Calculons l'énergie d'un photon de cette radiation :

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{250 \times 10^{-9}} = 7,96 \times 10^{-19} \text{ J}$$

soit, en électronvolts :

$$E = \frac{7,96 \times 10^{-19}}{1,60 \times 10^{-19}} = 4,97 \text{ eV}$$

Comparons au travail d'extraction du zinc :

$$E = 4,97 \text{ eV} > W_{\text{ext}}(\text{Zn}) = 4,3 \text{ eV}$$

Chaque photon transporte une énergie supérieure au travail d'extraction : l'effet photoélectrique se produit bien.

(On peut aussi comparer les longueurs d'onde : $\lambda = 250 \text{ nm} < \lambda_s = 289 \text{ nm}$, donc $\nu > \nu_s$.)

Note du professeur

Attention au sens de la comparaison : plus λ est *petite*, plus ν et l'énergie du photon sont *grandes*. La condition d'émission s'écrit $\nu > \nu_s$, ce qui équivaut à $\lambda < \lambda_s$.

Q.5 Établir l'expression de la vitesse d'éjection des électrons.

Bilan d'énergie pour un photon absorbé par un électron. L'énergie du photon incident sert d'une part à extraire l'électron du métal (travail d'extraction), d'autre part à lui communiquer de l'énergie cinétique :

$$E_{\text{photon}} = W_{\text{ext}} + E_c \quad \text{soit} \quad h\nu = h\nu_s + \frac{1}{2}m_e v^2$$

On isole l'énergie cinétique :

$$\frac{1}{2}m_e v^2 = h\nu - h\nu_s = h(\nu - \nu_s)$$

$$v^2 = \frac{2h(\nu - \nu_s)}{m_e} \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2h(\nu - \nu_s)}{m_e}}$$

(on ne garde que la racine positive, v étant une valeur de vitesse).



Q.6 Calculer la valeur de cette vitesse.

Fréquence de la radiation utilisée :

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3,00 \times 10^8}{250 \times 10^{-9}} = 1,20 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

$$\nu - \nu_s = 1,20 \times 10^{15} - 1,038 \times 10^{15} = 1,62 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \times 6,63 \times 10^{-34} \times 1,62 \times 10^{14}}{9,11 \times 10^{-31}}} = \sqrt{2,36 \times 10^{11}}$$

$$v \approx 4,9 \times 10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Note du professeur

Ici, ν et ν_s sont deux nombres proches : leur *différence* perd des chiffres significatifs. Il faut donc conserver la valeur non arrondie $\nu_s = 1,038 \times 10^{15} \text{ Hz}$ dans la calculatrice ; en utilisant l'arrondi $\nu_s = 1,0 \times 10^{15} \text{ Hz}$ on trouverait $5,4 \times 10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, soit une erreur de plus de 10 %.

Pour information (hors attendus du programme) : cette vitesse ne représente que 0,2 % de la vitesse de la lumière, ce qui justifie l'emploi de l'expression classique $E_c = \frac{1}{2}m_e v^2$.

Q.7 Quel paramètre influence la vitesse, et dans quel sens le modifier ?

D'après l'expression $v = \sqrt{\frac{2h(\nu - \nu_s)}{m_e}}$, seule la **fréquence** ν de la radiation (et donc, de façon équivalente, sa longueur d'onde $\lambda = c/\nu$) intervient : ν_s , h et m_e sont des constantes fixées par le métal et par la nature de l'électron.

v est une fonction croissante de ν : pour augmenter la vitesse d'éjection des électrons, il faut donc augmenter la fréquence de la radiation, c'est-à-dire diminuer sa longueur d'onde.

Paramètre : la fréquence ν (à augmenter) — soit la longueur d'onde λ (à diminuer).

Remarque : l'intensité lumineuse n'a aucune influence sur la vitesse des électrons émis ; elle ne modifie que leur nombre, donc l'intensité du courant mesuré par l'ampèremètre.

2. Étude d'un panneau photovoltaïque

Q.8 Déterminer le rendement du panneau dans les conditions optimales, pour un éclairement $E = 800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Surface utile du panneau :

$$S = L \times \ell = 1,346 \times 1,112 = 1,50 \text{ m}^2$$

Puissance lumineuse reçue :

$$P_{\text{lum}} = E \times S = 800 \times 1,50 = 1,20 \times 10^3 \text{ W}$$



Puissance électrique fournie dans les conditions optimales : d'après la figure 2, la courbe $P = f(U)$ tracée pour un éclairement de $800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ passe par un maximum :

$$P_{\text{élec, max}} \approx 140 \text{ W} \quad (\text{pour } U \approx 22 \text{ V})$$

Rendement :

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{reçue}}} = \frac{P_{\text{élec, max}}}{P_{\text{lum}}} = \frac{140}{1,20 \times 10^3} = 0,12$$

$\eta \approx 0,12$, soit un rendement d'environ 12 %.

Ce rendement, inférieur à 1, est cohérent : une grande partie de l'énergie lumineuse reçue n'est pas convertie en énergie électrique (photons non absorbés, dissipation thermique par effet Joule).

Note du professeur

« Conditions optimales de fonctionnement » = point de la caractéristique où la puissance électrique fournie est *maximale*. Il faut donc lire le *sommet* de la courbe correspondant à $800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, sur l'axe de droite. Le rendement est sans unité.

Q.9 Déterminer le nombre de panneaux à installer et commenter.

Démarche suivie : (1) calculer l'énergie électrique annuelle à produire ; (2) calculer l'énergie électrique produite par un panneau en un an ; (3) faire le quotient et arrondir à l'entier supérieur.

Étape 1 — besoin annuel à couvrir.

Le particulier souhaite couvrir la moitié de sa consommation annuelle :

$$E_{\text{à produire}} = \frac{7\,500}{2} = 3,75 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h par an}$$

Étape 2 — production annuelle d'un panneau.

L'énergie lumineuse reçue en un an par un panneau de surface $S = 1,50 \text{ m}^2$, pour un ensoleillement moyen de $4,1 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$ par jour, vaut :

$$E_{\text{reçue}} = 4,1 \times 365 \times S = 4,1 \times 365 \times 1,50 = 2,24 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

Avec un rendement *moyen annuel* $\eta_{\text{an}} = 10 \% = 0,10$, l'énergie électrique produite par panneau est :

$$E_{\text{panneau}} = \eta_{\text{an}} \times E_{\text{reçue}} = 0,10 \times 2,24 \times 10^3 = 2,24 \times 10^2 \text{ kW} \cdot \text{h par an}$$

Étape 3 — nombre de panneaux.

$$N = \frac{E_{\text{à produire}}}{E_{\text{panneau}}} = \frac{3,75 \times 10^3}{2,24 \times 10^2} = 16,7$$

Le nombre de panneaux étant nécessairement entier, et le besoin devant être couvert, on arrondit à l'entier supérieur :

Il faut installer $N = 17$ panneaux photovoltaïques.



Commentaire. Ces 17 panneaux occupent une surface de $17 \times 1,50 \approx 26 \text{ m}^2$ de toiture : c'est une surface importante mais tout à fait compatible avec le toit d'une maison individuelle, le projet est donc réalisable.

Ce résultat reste toutefois une estimation : le calcul suppose une orientation et une inclinaison idéales des panneaux, l'absence d'ombrage et une valeur moyenne d'ensoleillement. De plus, la production est très saisonnière (beaucoup plus forte en été) et n'a pas lieu au même moment que la consommation : il faut donc soit stocker l'énergie, soit l'échanger avec le réseau électrique.

Note du professeur

Ne pas confondre les deux rendements de cet exercice : les 12 % de la question Q.8 sont obtenus dans les *conditions optimales* (éclairage de $800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, point de puissance maximale), alors que les 10 % utilisés ici sont le rendement *moyen sur l'année*, plus faible car le panneau fonctionne la plupart du temps hors des conditions optimales. C'est bien la valeur de l'énoncé (10 %) qu'il faut employer à la question Q.9.

Exercice 3 — La Wemba-mania (5 points)

Q.1 Déterminer la nature du mouvement du ballon selon l'axe Ox .

D'après la figure 2, la modélisation de la coordonnée x du centre d'inertie G est $x(t) = 4,0 \times t$: c'est une fonction **linéaire** du temps.

La coordonnée $v_x = \frac{dx}{dt}$ est donc **constante** : les vecteurs vitesse successifs ont la même projection sur Ox , la distance parcourue selon Ox pendant des durées égales est la même.

Selon l'axe Ox , le mouvement du ballon est rectiligne uniforme.

Note du professeur

« Rectiligne » se justifie par le fait que l'on raisonne sur la projection du mouvement sur l'axe Ox ; « uniforme » par la constance de v_x . La trajectoire du ballon dans le plan, elle, est parabolique : ne pas confondre les deux.

Q.2 Déterminer v_x .

La coordonnée v_x du vecteur vitesse est la dérivée de x par rapport au temps, c'est-à-dire le coefficient directeur de la droite de la figure 2 :

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \frac{d}{dt}(4,0 t) = 4,0$$

$$v_x = 4,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \text{ (constante)}$$



Q.3 Déterminer v_{y0} .

D'après la figure 3, $v_y(t) = -9,7t + 5,0$. La coordonnée initiale s'obtient pour $t = 0$ (ordonnée à l'origine de la droite) :

$$v_{y0} = v_y(0) = -9,7 \times 0 + 5,0 = 5,0$$

$$v_{y0} = 5,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Q.4 En déduire la valeur v_0 de la vitesse initiale et l'angle α avec l'horizontale.

Le vecteur vitesse initiale a pour coordonnées $\vec{v}_0 \begin{pmatrix} v_x = 4,0 \\ v_{y0} = 5,0 \end{pmatrix}$. Sa norme s'obtient par le théorème de Pythagore :

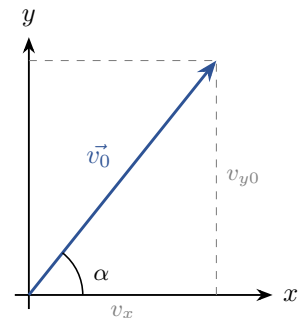
$$v_0 = \sqrt{v_x^2 + v_{y0}^2} = \sqrt{4,0^2 + 5,0^2} = \sqrt{41}$$

$$v_0 = 6,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

L'angle α avec l'horizontale vérifie :

$$\tan \alpha = \frac{v_{y0}}{v_x} = \frac{5,0}{4,0} = 1,25$$

$$\alpha = \arctan(1,25) = 51^\circ$$



$$v_0 = 6,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \quad \text{et} \quad \alpha \approx 51^\circ$$

Q.5 Donner les coordonnées du vecteur accélération du ballon.

Système : le ballon, de masse m , assimilé à son centre d'inertie G .

Référentiel : terrestre, supposé galiléen.

Bilan des forces : le ballon n'est soumis qu'à son poids $\vec{P} = m\vec{g}$ (les frottements de l'air et la poussée d'Archimède sont négligés).

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 $\vec{g}$ est vertical, dirigé vers le bas, donc dans le repère (xOy) où l'axe Oy est orienté vers le haut :

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

Le mouvement est une chute libre : $\vec{a} = \vec{g}$, indépendante de la masse du ballon.



Q.6 Établir les équations horaires du mouvement.

Le vecteur vitesse est la primitive du vecteur accélération par rapport au temps. En tenant compte des conditions initiales $v_x(0) = 4,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et $v_y(0) = 5,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (questions Q.2 et Q.3) :

$$\vec{v} \begin{cases} v_x(t) = 4,0 \\ v_y(t) = -g t + 5,0 = -9,81 t + 5,0 \end{cases}$$

Le vecteur position est à son tour la primitive du vecteur vitesse. Les conditions initiales sont celles du point G_0 : $x_0 = 0 \text{ m}$ et $y_0 = h = 3,05 \text{ m}$.

$$\overrightarrow{OG} \begin{cases} x(t) = 4,0 t + x_0 = 4,0 t \\ y(t) = -\frac{1}{2} g t^2 + 5,0 t + y_0 = -\frac{9,81}{2} t^2 + 5,0 t + 3,05 \end{cases}$$

Or $\frac{9,81}{2} = 4,905 \approx 4,9$, d'où :

$$x(t) = 4,0 t \quad \text{et} \quad y(t) = -4,9 t^2 + 5,0 t + 3,05$$

Les équations horaires proposées par l'énoncé sont bien retrouvées.

Note du professeur

Cohérence expérimentale : le logiciel donne $v_y = -9,7 t + 5,0$, or le modèle théorique prévoit un coefficient $-g = -9,81$. L'écart relatif n'est que de 1 %, ce qui valide le modèle de la chute libre (les frottements de l'air sont bien négligeables ici).

Q.7 Établir l'équation de la trajectoire du ballon.

Pour obtenir l'équation de la trajectoire $y = f(x)$, on élimine le temps entre les deux équations horaires. De $x = 4,0 t$ on tire :

$$t = \frac{x}{4,0}$$

En reportant dans l'expression de $y(t)$:

$$y = -4,9 \left(\frac{x}{4,0} \right)^2 + 5,0 \times \frac{x}{4,0} + 3,05 = -\frac{4,9}{16} x^2 + \frac{5,0}{4,0} x + 3,05$$

$$y = -0,306 x^2 + 1,25 x + 3,05$$

$$y = -0,31 x^2 + 1,3 x + 3,05$$

La trajectoire du ballon est donc bien une **parabole**, comme attendu pour une chute libre avec vitesse initiale non verticale.



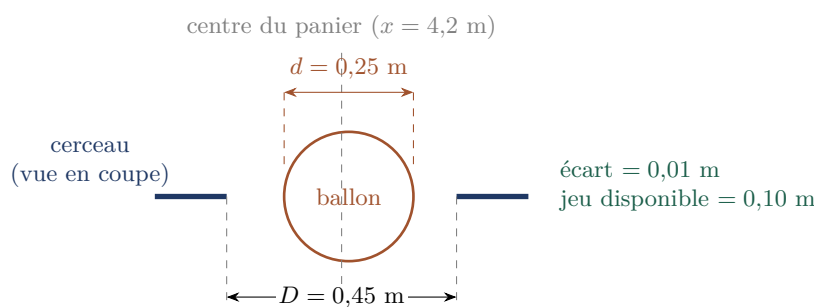
Q.8 Le lancer franc est-il réussi sans que le ballon touche le cercle métallique ?

Démarche suivie : (1) traduire la réussite du panier par une condition géométrique ; (2) déterminer l'abscisse du centre du ballon lorsqu'il atteint la hauteur du cerceau ; (3) comparer l'écart obtenu à la condition établie.

Étape 1 — condition de réussite.

Le cerceau est horizontal, à la hauteur $h = 3,05$ m, et son centre se situe à $x_{\text{panier}} = 4,2$ m de la ligne de lancer franc. Le ballon (diamètre $d = 25$ cm = $0,25$ m) passe à travers le cerceau (diamètre $D = 0,45$ m) sans le toucher si, lorsque le centre du ballon franchit le plan du cerceau, la distance horizontale entre le centre du ballon et le centre du panier est inférieure à :

$$\frac{D - d}{2} = \frac{0,45 - 0,25}{2} = 0,10 \text{ m}$$

**Étape 2 — abscisse du ballon à la hauteur du cerceau.**

On cherche l'abscisse x pour laquelle $y = h = 3,05$ m :

$$-0,31x^2 + 1,3x + 3,05 = 3,05 \quad \Longleftrightarrow \quad -0,31x^2 + 1,3x = 0$$

$$x(-0,31x + 1,3) = 0 \quad \Rightarrow \quad x = 0 \quad \text{ou} \quad x = \frac{1,3}{0,31} = 4,19 \text{ m}$$

La solution $x = 0$ correspond au point de lâcher G_0 ; la solution physique recherchée est donc $x = 4,19$ m.

Le ballon est bien en phase *descendante* en ce point : le sommet de la parabole est atteint en $x_S = \frac{1,3}{2 \times 0,31} = 2,1$ m, où $y_S = 4,4$ m $>$ $3,05$ m. Le ballon passe donc largement au-dessus du cerceau avant de redescendre dans le panier.

Étape 3 — comparaison.

L'écart horizontal entre le centre du ballon et le centre du panier vaut :

$$|x - x_{\text{panier}}| = |4,19 - 4,2| = 0,01 \text{ m} = 1 \text{ cm}$$

$$0,01 \text{ m} < 0,10 \text{ m}$$

L'écart est inférieur au jeu disponible : le ballon passe dans le panier sans toucher le cercle métallique. Le lancer franc est réussi.



Note du professeur

Question à prise d'initiative : le point clé est de *formuler la condition de réussite* avant tout calcul. Répondre « $y(4,2) = 3,04 \text{ m} \approx 3,05 \text{ m}$ » sans comparer l'écart à $(D - d)/2$ ne permet pas de conclure « sans toucher le cerceau », qui est ce que demande l'énoncé.

Attention, ce calcul est très sensible aux arrondis : on soustrait deux nombres très proches. Il faut utiliser *le modèle fourni par l'énoncé* à la question Q.7, $y = -0,31x^2 + 1,3x + 3,05$. Si l'on conserve les valeurs non arrondies de la calculatrice ($y = -0,306x^2 + 1,25x + 3,05$), on obtient $x = \frac{1,25}{0,306} = 4,08 \text{ m}$, soit un écart de $0,12 \text{ m} > 0,10 \text{ m}$ et donc la conclusion *inverse* (panier manqué). Ce n'est pas la réponse attendue : c'est bien l'équation arrondie donnée dans le sujet qui sert de modèle, et c'est sur elle que repose la conclusion.

Récapitulatif des résultats numériques

Exercice 1. $C = 3,3 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ • $\tau = 3,0 \times 10^{-4}$ • $V_E = 14,3 \text{ mL}$ • $t \approx 17 \%$ • $\Delta t \approx 6,3 \times 10^3 \text{ h}$ (puissance suffisante).

Exercice 2. $\nu_s = 1,0 \times 10^{15} \text{ Hz}$ • $\lambda_s = 2,9 \times 10^2 \text{ nm (UV)}$ • $v = 4,9 \times 10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ • $\eta \approx 12 \%$ • $N = 17$ panneaux.

Exercice 3. $v_x = 4,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ • $v_{y0} = 5,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ • $v_0 = 6,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $\alpha = 51^\circ$ • $x = 4,19 \text{ m}$ à la hauteur du cerceau : panier réussi.

