Calculatrice autorisée

Exercice 1 : Le tueur silencieux

3,5 points

Dans le sang, le dioxygène voyage sous deux formes : dissous, noté $O_2(aq)$, ou fixé sur l'hémoglobine des globules rouges. On propose ici un modèle simplifié de ce transport, puis de l'intoxication par le monoxyde de carbone, gaz inodore et incolore surnommé « le tueur silencieux ».

Une molécule d'hémoglobine comporte plusieurs sous-unités ; on ne s'intéresse qu'à l'une d'elles, notée Hb (aq). Une sous-unité qui a fixé une molécule de dioxygène est une sous-unité d'oxyhémoglobine, notée $HbO_2(aq)$. Le sang est assimilé à une solution aqueuse.

Partie A : Le dioxygène et l'hémoglobine

Dans les poumons, la fixation du dioxygène sur l'hémoglobine est modélisée par la réaction d'équation :

$$Hb\,(aq) + O_2(aq) \rightleftharpoons HbO_2(aq) \qquad \text{(équation 1)} \qquad \text{de constante d'équilibre } K_1 = 3{,}0 \times 10^5.$$

1) Écrire l'expression du quotient de réaction Q_r associé à l'équation 1.

Arrivé au contact des tissus d'un organe, le sang leur cède une partie de son dioxygène dissous, dont la concentration chute ; cette quantité ne suffit pourtant pas aux besoins de l'organe. Le système atteint alors l'état suivant : $[O_2] = 4{,}0 \times 10^{-5}\,\text{mol·L}^{-1}$, $[Hb] = 3{,}5 \times 10^{-4}\,\text{mol·L}^{-1}$ et $[HbO_2] = 8{,}4 \times 10^{-3}\,\text{mol·L}^{-1}$.

2) Montrer par un calcul que, dans cet état, l'oxyhémoglobine libère le dioxygène qu'elle transporte.

Partie B : L'intoxication au monoxyde de carbone

Une combustion incomplète (chaudière mal réglée, brasero dans une pièce fermée, fumée de cigarette) produit du monoxyde de carbone CO. Dissous dans le sang, il se fixe lui aussi sur l'hémoglobine :

$$Hb\,(aq) + CO\,(aq) \rightleftharpoons HbCO\,(aq) \qquad \text{(équation 2)} \qquad \text{de constante d'équilibre } K_2 = 7{,}5 \times 10^7.$$

Le tableau ci-dessous relie la valeur du rapport $\dfrac{[HbCO]_{éq}}{[Hb]_{éq}}$ aux effets sur l'organisme.

$\dfrac{[HbCO]_{éq}}{[Hb]_{éq}}$	de $1{,}1 \times 10^4$ à $2{,}6 \times 10^4$	de $2{,}6 \times 10^4$ à $2{,}6 \times 10^5$	supérieur à $2{,}6 \times 10^5$
Effets	maux de tête	intoxication grave	mort rapide

3) Une prise de sang réalisée chez une personne qui a respiré un air chargé en monoxyde de carbone indique une concentration en monoxyde de carbone dissous $[CO] = 5{,}0 \times 10^{-4}\,\text{mol·L}^{-1}$. Quels effets ressent cette personne ?

4) Le dioxygène et le monoxyde de carbone se disputent donc l'hémoglobine (équations 1 et 2). L'équilibre qui s'établit est modélisé par l'équation :

$$HbO_2(aq) + CO\,(aq) \rightleftharpoons HbCO\,(aq) + O_2(aq) \qquad \text{(équation 3)}$$

Exprimer la constante d'équilibre K_3 associée à l'équation 3 en fonction de K_1 et de K_2.

5) Une personne intoxiquée au monoxyde de carbone est placée dans un caisson hyperbare : on y impose une forte concentration en dioxygène, ce qui augmente la concentration du dioxygène dissous dans son sang. Expliquer, sans calcul, comment agit le caisson.

Exercice 2 : Mon poisson s'est noyé…

10 points

Pour rester en bonne santé, les poissons d'un aquarium ont besoin d'une eau dont le pH reste stable : on recommande qu'il ne varie pas de plus de $0{,}5$ unité. Le pH doit donc être contrôlé souvent, et corrigé si besoin.

Un aquariophile débutant élève des guppys, des néons cardinal et un scalaire au milieu de plantes aquatiques. Il constate que le pH de son eau vaut environ $6{,}6$ le matin et $7{,}4$ le soir. Le tableau donne les conditions de vie conseillées pour chaque espèce.

Poisson	pH	Température (°C)
néon cardinal	$5{,}0$ à $7{,}0$	25 à 30
scalaire	$4{,}5$ à $7{,}0$	27 à 30
guppy	$6{,}0$ à $8{,}0$	18 à 30

Sur les forums d'aquariophilie, trois façons d'ajuster le pH sont proposées :

- **technique 1** : verser un peu d'une solution d'acide sulfurique, vendue sous le nom de « pH minus » ; c'est un acide fort, qui modifie le pH vite, parfois plus que voulu ;
- **technique 2** : faire buller du dioxyde de carbone dans l'eau ;
- **technique 3** : plonger de la craie dans l'eau de l'aquarium.

Données

- La craie est faite presque uniquement de carbonate de calcium $CaCO_3$, solide ionique formé d'ions calcium Ca^{2+} et d'ions carbonate CO_3^{2-} ; $M(CaCO_3) = 100\,\text{g·mol}^{-1}$.
- Couples acide/base : H_2CO_3(aq)/HCO_3^-(aq), $pK_{A1} = 6{,}4$; HCO_3^-(aq)/CO_3^{2-}(aq), $pK_{A2} = 10{,}3$.
- Concentration standard : $c^\circ = 1\,\text{mol·L}^{-1}$.

1) Un flacon de « pH minus » contient des ions oxonium H_3O^+ à la concentration de $2{,}0\,\text{mol·L}^{-1}$. Sur un forum, on conseille de le diluer 25 fois dans un récipient propre, avec de l'eau prélevée dans l'aquarium, avant de verser le mélange dans le bac. Déterminer le pH de la solution versée dans l'aquarium.

2) Le dioxyde de carbone injecté se dissout dans l'eau, où il forme de l'acide carbonique H_2CO_3 :

$$CO_2(aq) + H_2O(l) \rightleftharpoons H_2CO_3(aq)$$

a. À l'aide des couples acide/base mis en jeu, écrire l'équation de la réaction entre l'acide carbonique et l'eau.

b. On prépare une solution S en dissolvant de l'acide carbonique dans l'eau : volume $V = 200\,\text{mL}$, concentration en soluté apporté $C = 30\,\text{mmol·L}^{-1}$. On note n_0 la quantité d'acide carbonique apportée. Établir le tableau d'avancement de la réaction entre l'acide carbonique et l'eau, en faisant figurer l'état initial, l'état final réel (avancement x_f) et l'état final en cas de transformation totale (avancement x_{max}).

c. Exprimer, en fonction de x_f et de V, les concentrations finales des espèces dissoutes dans la solution S (le solvant mis à part).

d. Montrer que la constante d'acidité du couple H_2CO_3/HCO_3^- s'écrit

$$K_{A1} = \frac{x_f^2}{c^\circ\, V\,(n_0 - x_f)}.$$

e. Avec les valeurs de l'énoncé (x_f en mole, V en litre), cette relation devient :

$$x_f^2 + 8{,}0 \times 10^{-8}\, x_f - 4{,}8 \times 10^{-10} = 0.$$

Montrer que $x_f \approx 2{,}2 \times 10^{-5}\,\text{mol}$, puis en déduire les concentrations des espèces présentes dans la solution S à l'état final.

f. À l'équilibre, le pH mesuré de la solution S vaut $4{,}0$. Retrouver cette valeur à partir des résultats de la question précédente.

g. Calculer le taux d'avancement final de la réaction entre l'acide carbonique et l'eau. Justifier que l'acide carbonique est un acide faible.

3) Tracer, sur un axe gradué en pH, les domaines de prédominance des espèces H_2CO_3, HCO_3^- et CO_3^{2-}. En déduire l'espèce qui prédomine le matin, puis le soir, dans l'eau de l'aquarium étudié.

4) On s'intéresse dans cette question au seul couple HCO_3^-/CO_3^{2-}.

a. Écrire l'équation de la réaction entre l'ion hydrogénocarbonate HCO_3^- et l'eau.

b. Établir l'expression du pH d'une solution contenant des ions hydrogénocarbonate et carbonate en fonction de pK_{A2}, de $[HCO_3^-]$ et de $[CO_3^{2-}]$.

c. Quel est le pH d'une solution qui contient exactement autant d'ions carbonate que d'ions hydrogénocarbonate ? Justifier.

5) On considère un aquarium de $150\,\text{L}$ dont l'eau a un pH égal à $3{,}0$, et l'on étudie l'effet de la technique 3. Un bâton de craie a une masse d'environ $10\,\text{g}$: un cinquième de bâton apporte donc environ $2{,}0\,\text{g}$ de carbonate de calcium, dont la dissolution, supposée totale, a pour équation $CaCO_3(s) \longrightarrow Ca^{2+}(aq) + CO_3^{2-}(aq)$.

Les ions carbonate ainsi libérés réagissent totalement avec les ions oxonium de l'eau selon la réaction d'équation :

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

L'ajout d'un cinquième de bâton de craie suffit-il à rendre l'eau neutre ? *Toute trace de démarche sera valorisée.*

Exercice 3 : Un détecteur de fumées radioactif

6,5 points

Tout logement doit être équipé d'un détecteur de fumées depuis 2016. On étudie le principe des anciens modèles ioniques, interdits depuis fin 2017 car ils contiennent une source radioactive.

Une source émet des particules α (noyaux d'hélium $^4_2He^{2+}$) qui traversent une chambre à ionisation remplie d'air. Sur leur passage, elles arrachent des électrons aux molécules de diazote et de dioxygène ; ioniser une molécule de dioxygène demande $12\,\text{eV}$. Le champ électrique uniforme qui règne entre deux plaques reliées à une pile met en mouvement les ions et les électrons créés : un faible courant circule (figure 1). Si de la fumée entre dans la chambre, ses particules captent une partie des ions et des électrons : l'intensité du courant baisse, ce qui déclenche l'alarme.

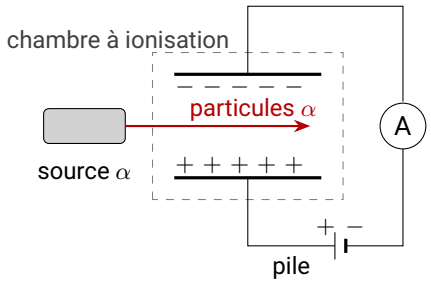


Figure 1 – Chambre à ionisation

On étudie, dans le référentiel terrestre supposé galiléen, une particule α qui entre dans la chambre en l'absence de fumée. À la date $t = 0$, elle passe au point O avec une vitesse $\vec{v}_0$ parallèle aux plaques C et D (figure 2), de valeur $v_0 = 1{,}5 \times 10^7\,\text{m·s}^{-1}$. Les plaques, distantes de $d = 2{,}5\,\text{cm}$ et de longueur $L = 3{,}0\,\text{cm}$, sont soumises à une tension constante $U = 15\,\text{V}$. On néglige les chocs avec les molécules de l'air, ainsi que le poids de la particule devant la force électrique $\vec{F}_e$ qu'elle subit.

Données

- $1\,\text{eV} = 1{,}6 \times 10^{-19}\,\text{J}$.
- Charge élémentaire : $e = 1{,}6 \times 10^{-19}\,\text{C}$.
- Particule α : charge $q = +2e$; masse $m_\alpha = 6{,}64 \times 10^{-27}\,\text{kg}$.
- Condensateur plan : la valeur du champ électrique entre les plaques est $E = \dfrac{U}{d}$.
- Intensité de la pesanteur : $g = 9{,}81\,\text{m·s}^{-2}$.

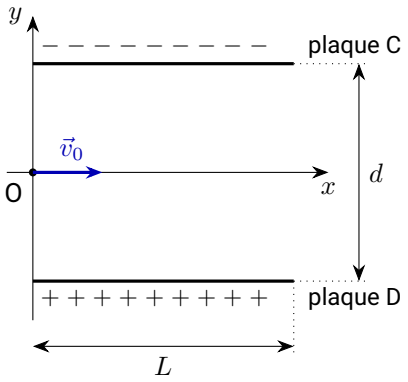


Figure 2 (à compléter sur le sujet)

1) Montrer que l'énergie cinétique initiale d'une particule α suffit pour ioniser des molécules de dioxygène.

2) Vérifier par un calcul que l'hypothèse faite sur le poids de la particule α est justifiée.

3) Représenter, sur la figure 2, le champ électrique $\vec{E}$ entre les plaques et la force électrique $\vec{F}_e$ subie par la particule α au point O. Justifier.

4) Établir que les équations horaires du mouvement de la particule α s'écrivent $x(t) = v_0\,t$ et $y(t) = \dfrac{e\,U}{m_\alpha\,d}\,t^2$.

5) Déterminer la valeur de l'ordonnée y_L de la particule lorsqu'elle a parcouru la distance L suivant l'axe Ox. Expliquer pourquoi son mouvement peut être considéré comme rectiligne dans la chambre à ionisation.

6) Proposer la modification d'un paramètre du dispositif qui augmenterait la déviation de la particule α. Justifier brièvement.