BACCALAURÉAT GÉNÉRAL

ÉPREUVE D'ENSEIGNEMENT DE SPÉCIALITÉ

SESSION 2024

PHYSIQUE-CHIMIE

JEUDI 12 SEPTEMBRE 2024

Durée de l'épreuve : **3 heures 30**

L'usage de la calculatrice avec mode examen actif est autorisé.
L'usage de la calculatrice sans mémoire, « type collège » est autorisé.

Dès que ce sujet vous est remis, assurez-vous qu'il est complet.
Ce sujet comporte 10 pages numérotées de 1/10 à 10/10.

L'annexe page 10 est à rendre avec la copie.

Exercice 1 - Vol en montgolfière (11 points)

Inventée à la fin du XVIIIe siècle par les frères Montgolfier, la montgolfière est la première machine ayant permis à l'Homme de voler.

L'objectif de cet exercice est d'étudier l'envol d'une montgolfière ainsi que les transferts thermiques à travers son enveloppe.



D'après le site France Bleu Pyrénées-Orientales

1. L'envol de la montgolfière

Une montgolfière se compose de trois parties principales : une enveloppe dont le volume est considéré constant, un système de chauffage (brûleur avec réservoir de carburant) et une nacelle.

On étudie dans cette partie l'envol de la montgolfière dans le référentiel terrestre supposé galiléen. Dans cette modélisation, les seules forces prises en compte sont le poids de la montgolfière et la poussée d'Archimède exercée par l'air ambiant sur celle-ci.

Données :

- masses molaires atomiques : $M(O) = 16\times10^{-3}$ kg·mol^{-1}, $M(N) = 14\times10^{-3}$ kg·mol^{-1} ;
- intensité de la pesanteur terrestre supposée constante : $g = 9{,}81$ m·s^{-2} :
- l'air, assimilé à un gaz parfait, est composé, en quantité de matière, de 80 % de diazote N_2 et de 20 % de dioxygène O_2 ;
- constante des gaz parfaits : $R = 8{,}31$ J·mol^{-1}·K^{-1} ;
- conversion d'une température θ exprimée en degré Celsius en une température T en Kelvin : $T(K) = \theta(°C) + 273$ °C ;
- la poussée d'Archimède $\overrightarrow{\pi_A}$ est une force, verticale et dirigée vers le haut, que subit tout objet plongé dans un fluide. Pour un objet de volume V totalement immergé dans un fluide de masse volumique ρ, la valeur π_A de la poussée d'Archimède a pour expression :

$$\pi_A = \rho \cdot V \cdot g$$

- caractéristiques de l'air extérieur au niveau du sol :
  - masse volumique : $\rho_{ext} = 1{,}2$ kg·m^{-3} ;
  - température : $\theta_{ext} = 21$ °C ;
  - pression atmosphérique : $p_{atm} = 1{,}0\times10^5$ Pa ;
- la montgolfière étudiée est constituée d'une enveloppe de volume V invariable égal à $2{,}5\times10^3$ m^3 et d'une nacelle de volume négligeable par rapport à celui de l'enveloppe ;
- la masse m_{ens} de l'ensemble comprenant la nacelle, l'enveloppe, le système de chauffage et les passagers est égale à 500 kg.

Q1. Montrer que la valeur de la masse molaire M_{air} de l'air est voisine de 29×10^{-3} kg·mol^{-1}.

Q2. En exploitant l'équation d'état des gaz parfaits, exprimer littéralement la masse m_{int} de l'air contenu à l'intérieur de l'enveloppe en fonction de la pression p_{int} de l'air à l'intérieur, du volume V de l'enveloppe, de la masse molaire M_{air} de l'air, de la constante R des gaz parfaits et de la température T_{int} de l'air situé à l'intérieur de l'enveloppe.

Q3. Exprimer le poids total du système {montgolfière + air intérieur}, noté P_{total}, en fonction des masses m_{ens} et m_{int}.

Q4. Calculer la valeur de la poussée d'Archimède π_A qui s'exerce sur le système {montgolfière + air intérieur}, au niveau du sol.

Q5. Montrer que l'expression de la valeur de la température minimale T_{min} de l'air à l'intérieur de l'enveloppe pour que la montgolfière puisse décoller est :

$$T_{min} = \frac{p_{int} \cdot V \cdot M_{air}}{R \cdot (\frac{\pi_A}{g} - m_{ens})}$$

Calculer la valeur de T_{min}. On admet que la pression p_{int} de l'air à l'intérieur de l'enveloppe est égale à la pression atmosphérique $p_{atm} = 1{,}0 \times 10^5$ Pa.

Alors que la montgolfière est retenue au sol par des sangles, le pilote actionne les brûleurs afin que la température de l'air intérieur de l'enveloppe soit supérieure à la température T_{min}.

À la date $t = 0$, les sangles sont détachées et la montgolfière, initialement immobile, commence son ascension verticale, comme représenté à la figure 1. À cet instant, la valeur de la poussée d'Archimède exercée sur le système est égale à $\pi_A = 2{,}9 \times 10^4$ N et la masse totale du système {montgolfière + air intérieur} est $m_{tot} = 2{,}8 \times 10^3$ kg.

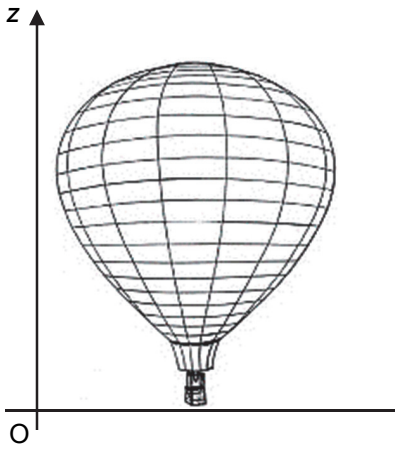


Figure 1. Schéma de la montgolfière à la date $t = 0$

Dans une modélisation simplifiée, on ne tient compte que de la poussée d'Archimède et du poids pour étudier le mouvement du ballon. On suppose également que les valeurs de ces forces restent inchangées au cours du temps.

Q6. Déterminer la valeur de l'accélération du système {montgolfière + air intérieur}. Calculer ensuite la valeur de sa vitesse au bout de 10 s puis au bout de 1 minute d'ascension.

Q7. Commenter les résultats obtenus à la question précédente et proposer une piste d'amélioration du modèle. On pourra s'appuyer sur les vitesses exprimées en km·h^{-1}.

2. Une enveloppe de montgolfière plus performante

Des entreprises spécialisées dans la conception des montgolfières ont développé une nouvelle gamme d'enveloppes. Contrairement aux enveloppes traditionnelles, constituées d'une simple couche de nylon, les nouveaux modèles d'enveloppes sont constitués d'une double couche de nylon. Entre les deux épaisseurs de nylon, une couche d'air permet de limiter le transfert thermique vers l'extérieur de l'enveloppe. La consommation de carburant est ainsi réduite.

Données :

- résistance thermique d'une enveloppe simple couche : $R_{th,1} = 3{,}0 \times 10^{-4}$ K·W^{-1} ;
- on rappelle que le flux thermique ϕ_1 à travers l'enveloppe simple couche du ballon, de l'intérieur vers l'extérieur, est donné par la relation :

$$\phi_1 = \frac{\theta_{int} - \theta_{ext}}{R_{th,1}}$$

où $\theta_{ext} = 21$ °C est la température de l'air extérieur et où $\theta_{int} = 106$ °C est la température de l'air intérieur.

Q8. Préciser, en justifiant, le sens du flux thermique à travers l'enveloppe simple couche du ballon.

Q9. Calculer la valeur du flux thermique ϕ_1 à travers une enveloppe simple couche.

Q10. Le flux thermique ϕ_2 à travers l'enveloppe à double paroi est $\phi_2 = 165$ kW. Commenter.

3. Une gourde en aluminium à bord de la montgolfière

Le pilote de la montgolfière emporte avec lui une gourde en aluminium contenant une boisson chaude. On étudie en laboratoire l'évolution temporelle de la température du système {gourde + boisson} et on modélise le transfert thermique entre ce système et l'extérieur par la loi de Newton, rappelée dans les données ci-dessous.

La température du système à la date t est notée $\theta(t)$. À la date $t = 0$ correspondant au début de l'expérience, la température du système est $\theta_0 = 48$ °C.

Données :

- capacité thermique du système étudié : $C = 2{,}1\times10^3$ J·K^{-1} ;
- surface totale de la gourde exposée à l'air : $S = 0{,}042$ m^2 ;
- la température de l'air extérieur est supposée constante pendant toute la durée de l'expérience et égale à $\theta_{ext} = 21$ °C ;
- la loi de Newton donne l'expression du flux thermique ϕ (en W) reçu par le système {gourde + boisson}, à la température $\theta(t)$, de la part de l'air extérieur, à la température θ_{ext} :

$$\phi = h\cdot S\cdot(\theta_{ext} - \theta(t)) \qquad \text{où } h \text{ est le coefficient d'échange thermique surfacique.}$$

Lors de l'expérience réalisée en laboratoire, l'utilisation d'un système d'acquisition informatisé permet d'obtenir l'évolution de la température du système au cours du temps (figure 2).

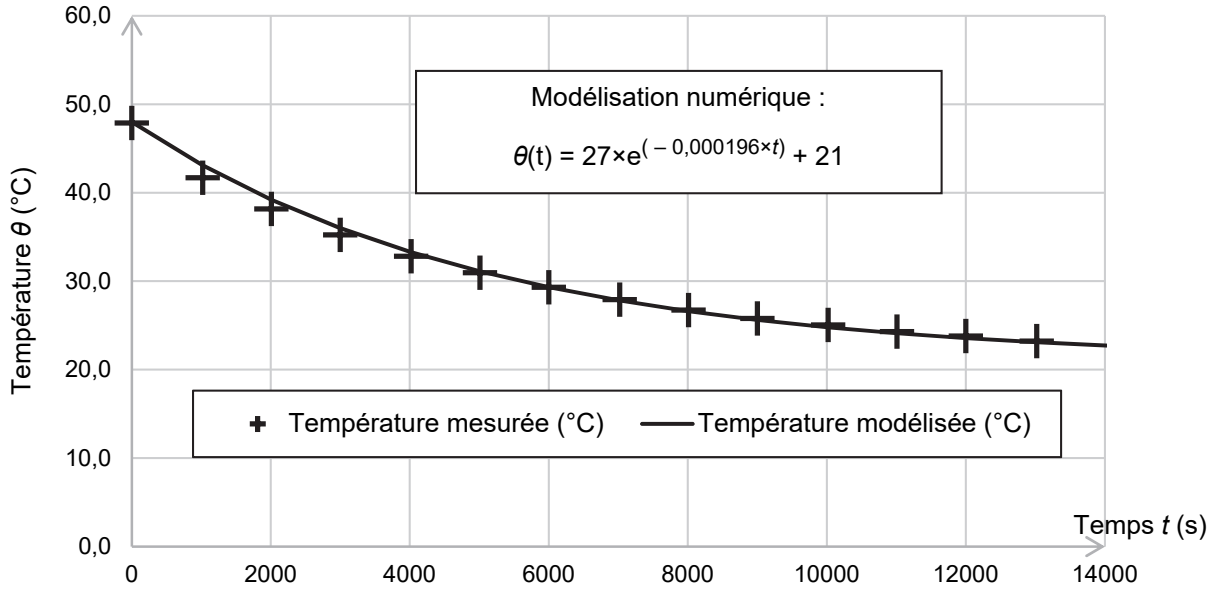


Figure 2. Courbe représentant l'évolution de la température θ du système au cours du temps

On considère deux instants voisins t et $t + \Delta t$, la durée Δt est supposée faible devant une durée caractéristique d'évolution de la température du système.

Q11. Montrer que la température du système vérifie la relation :

$$\theta(t+\Delta t) - \theta(t) = \frac{h\cdot S\cdot(\theta_{ext} - \theta(t))\cdot\Delta t}{C}$$

À partir du résultat précédent, on montre que la température $\theta(t)$ du système lors de son refroidissement vérifie l'équation différentielle suivante :

$$\frac{d\theta(t)}{dt} + \frac{\theta(t)}{\tau} = \frac{\theta_{ext}}{\tau}$$

avec $\tau = \frac{C}{h\cdot S}$ le temps caractéristique du système.

L'équation différentielle précédente admet des solutions générales de la forme $\theta(t) = A\cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + B$.

Q12. Déterminer les expressions littérales des constantes A et B en fonction de θ_0 et θ_{ext} puis calculer leurs valeurs. Commenter.

Q13. Déterminer la valeur du temps caractéristique τ à partir de la modélisation numérique de la figure 2.

Q14. En déduire la valeur du coefficient h d'échange thermique surfacique, puis commenter le résultat obtenu avec les valeurs données dans le tableau ci-dessous.

Conditions environnementales	Coefficient d'échange thermique surfacique entre l'air et une paroi solide en $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$.
Sans courant d'air	de 5 à 10
Avec courant d'air	de 10 à 500

D'après le cours de P.-Y. Lagrée, Coefficient d'échange, Ailettes

Exercice 2 - Traitement contre le varroa (4 points)

Le varroa est un acarien qui s'attaque aux colonies d'abeilles ce qui entraîne un affaiblissement important des jeunes abeilles voire la disparition complète de la colonie si l'invasion de varroas est très importante.

L'apiculteur surveille ses ruches et peut freiner la croissance de la population de varroas grâce à un traitement à base d'acide oxalique. Cependant à trop forte dose, cet acide peut être néfaste pour les abeilles. Le traitement consiste alors à laisser tomber goutte à goutte une solution sucrée d'acide oxalique dans la ruche.

L'objectif de cet exercice est de vérifier qu'une solution d'acide oxalique préparée pour traiter une ruche est conforme aux recommandations d'utilisation.

Données :

- formule brute de l'acide oxalique : $C_2H_2O_4$;
- masse molaire de l'acide oxalique dihydraté ($C_2H_2O_4$, 2 H_2O) : M = 126 g·mol^{-1} ;
- pK_A des couples acide-base associés à l'acide oxalique, à 25 °C :
  - $C_2H_2O_4(aq)/C_2HO_4^-(aq)$: pK_{A1} = 1,3 ;
  - $C_2HO_4^-(aq)/C_2O_4^{2-}(aq)$: pK_{A2} = 4,3.
- le traitement utilisé contre le varroa nécessite une préparation préalable de la part de l'apiculteur afin de fabriquer la solution sucrée d'acide oxalique. Les recommandations sont les suivantes :

Masse d'acide oxalique dihydraté pour 1 L de solution sucrée	30 g	35 g	45 g	60 g
Efficacité contre le varroa	Médiocre	Bonne	Bonne	Excellente
Tolérance des abeilles	Bien tolérée	Correctement tolérée	Mal tolérée	Très mal tolérée

D'après le centre suisse des recherches apicoles 2001

À partir d'une solution S commerciale sucrée d'acide oxalique, on prépare une solution S_1 en diluant 10 fois la solution S.

Q1. Proposer une formule développée de la molécule d'acide oxalique sachant qu'elle comporte deux fonctions acide carboxylique.

Q2. Rédiger un protocole expérimental permettant de préparer un volume de 100,0 mL de solution S_1 à partir de la solution S en justifiant la verrerie choisie.

On dose par titrage avec suivi pH-métrique un volume V = 20,0 mL de solution diluée S_1 par une solution aqueuse titrante d'hydroxyde de sodium de concentration $c = 1{,}0\times10^{-1}$ mol·L^{-1}. La figure 1 ci-dessous présente l'évolution du pH du milieu réactionnel en fonction du volume versé de solution titrante.

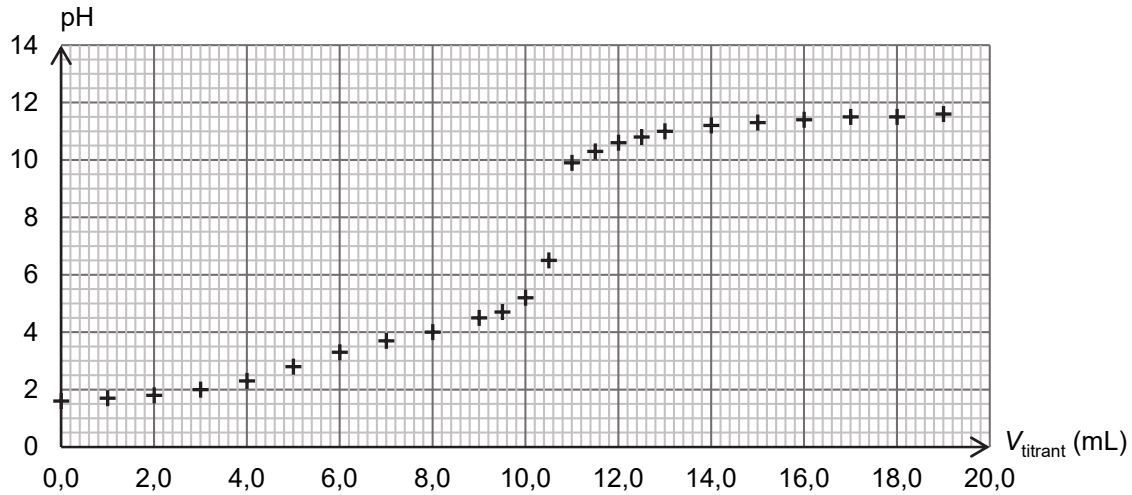


Figure 1. Évolution du pH en fonction du volume versé de solution titrante

Q3. Schématiser et légender le montage du dosage par titrage avec suivi pH-métrique de la solution diluée S_1 par une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium.

Q4. À l'aide d'un diagramme de prédominance, déterminer, en justifiant, la forme acide-base associée à l'acide oxalique qui est présente en plus grande quantité dans la solution diluée S_1 avant l'ajout de la solution aqueuse d'hydroxyde de sodium.

À l'aide d'un programme informatique, il est possible de tracer l'évolution des quantités de matière des différentes formes de l'acide oxalique au cours du titrage. La figure 2 ci-dessous en propose une représentation.

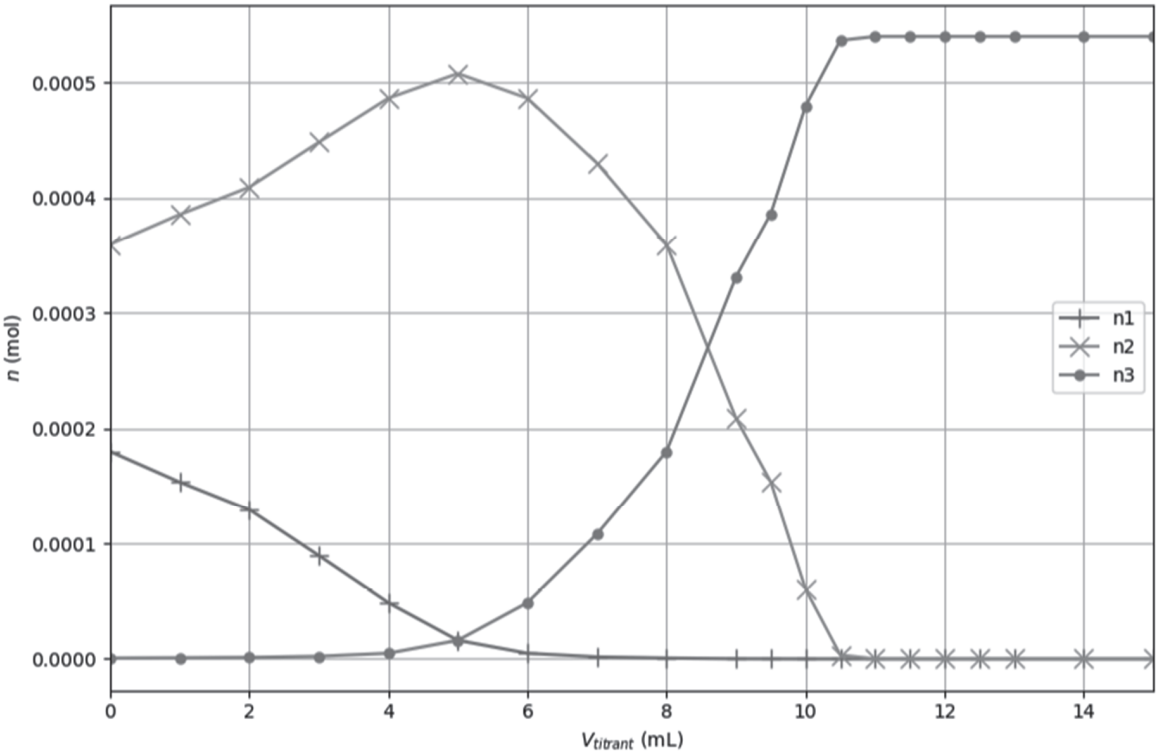


Figure 2. Évolution des quantités de matière des différentes formes de l'acide oxalique au cours du titrage

Q5. Attribuer, en justifiant, chaque courbe n1, n2 et n3 à la forme acido-basique correspondante de l'acide oxalique.

Q6. En utilisant les figures 1 et 2, expliquer comment on peut retrouver la valeur du pK_{A2}.

La transformation chimique mise en jeu lors du titrage est modélisée par la réaction d'équation :

$$C_2H_2O_4(aq) + 2\ OH^-(aq) \rightarrow C_2O_4^{2-}(aq) + 2\ H_2O(\ell)$$

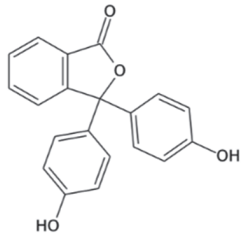
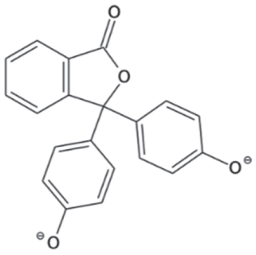
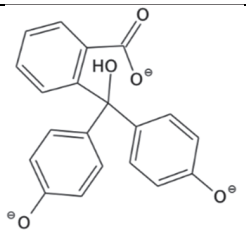
Q7. Exploiter les résultats du titrage pour déterminer la valeur de la concentration en masse en acide oxalique dihydraté de la solution commerciale S. Commenter en vous appuyant sur les recommandations d'utilisation de l'acide oxalique pour un traitement des ruches par goutte à goutte.

Le candidat est invité à prendre des initiatives et à présenter la démarche suivie même si elle n'a pas abouti. La démarche suivie est évaluée et nécessite donc d'être correctement présentée.

Exercice 3 - Suivi cinétique d'une décoloration (5 points)

La phénolphtaléine est une substance utilisée en chimie pour ses propriétés colorantes et acido-basiques. Elle est souvent choisie comme indicateur de pH, notamment pour repérer l'équivalence de certains titrages.

Les espèces associées à la phénolphtaléine en solution aqueuse sont représentées ci-dessous :

 Forme acide notée H_2P prédominante pour un pH < 9,4	 Forme basique notée P^{2-} prédominante pour un pH > 9,4	 Forme basique notée POH^{3-} prédominante en milieu très basique (pH > 12)
Solution incolore	Solution rose	Solution incolore

Les transformations mettant en jeu les espèces H_2P et P^{2-} étant instantanées, la phénolphtaléine est utilisée pour distinguer un milieu basique (rose) d'un milieu acide (incolore).

Mis en milieu très basique (pH > 12), les ions P^{2-} réagissent lentement avec les ions hydroxyde OH^- pour former des ions POH^{3-} selon l'équation ci-après. Cette réaction s'accompagne d'une décoloration progressive de la solution rose de phénolphtaléine, ce qui peut être potentiellement gênant lors des titrages.

$$P^{2-}(aq) + OH^-(aq) \rightarrow POH^{3-}(aq)$$

L'objectif de cet exercice est d'étudier la cinétique de la réaction associée à cette décoloration en milieu très basique.

Données :

- produit ionique de l'eau à 25°C : $K_e = 1{,}0\times10^{-14}$;
- concentration standard : $c° = 1{,}0$ mol·L^{-1} ;
- ci-contre, pictogramme de sécurité de la phénolphtaléine sous forme solide ou en solution de concentration supérieure à 3×10^{-2} mol·L^{-1}.



Protocole du suivi cinétique de la décoloration ;

- dans un bécher, introduire 30 mL d'une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium de concentration $C = 0{,}50$ mol·L^{-1} ;
- déclencher le chronomètre (instant $t = 0$) lorsque l'on introduit dans le bécher 0,50 mL d'une solution basique de phénolphtaléine de concentration en ions P^{2-} égale à $1{,}6\times10^{-3}$ mol·L^{-1} ;
- mélanger rapidement, transvaser dans une cuve spectrophotométrique. Relever l'absorbance du milieu à une longueur d'onde appropriée toutes les 10 secondes pendant quinze minutes.

Dans cette expérience, on considère que les ions hydroxyde OH^- apportés par la solution d'hydroxyde de sodium sont en large excès par rapport aux ions P^{2-}. On considère que leur concentration reste constante pendant toute la durée de l'expérience :

$$[OH^-](t) = C = 0{,}50 \text{ mol·L}^{-1}.$$

1. Étude des conditions initiales

Q1. Préciser la signification du pictogramme de sécurité associé à la phénolphtaléine. Justifier l'un des critères de choix des conditions expérimentales.

Q2. Estimer la valeur du pH de la solution aqueuse d'hydroxyde de sodium utilisée dans l'expérience. Commenter.

Q3. Montrer que, une fois que la solution de phénolphtaléine a été introduite dans la solution d'hydroxyde de sodium à la date $t = 0$, la concentration des ions P^{2-} est $[P^{2-}]_0 = 2{,}6\times10^{-5}$ mol·L^{-1}.

2. Étude cinétique de la décoloration

Les résultats expérimentaux permettent de tracer l'évolution de la vitesse de disparition de l'ion P^{2-} en fonction de sa concentration (figure 1).

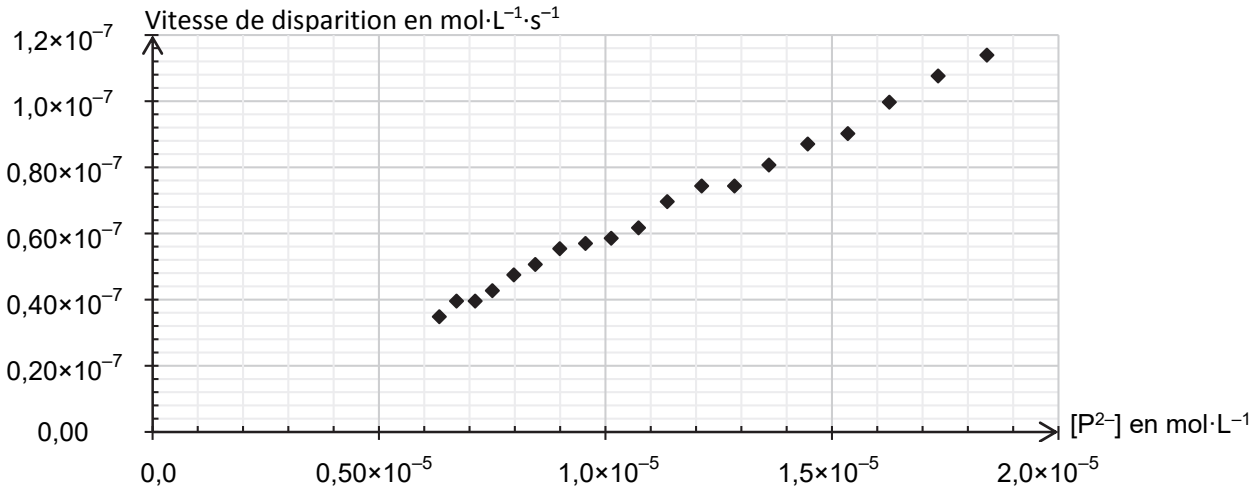


Figure 1. Évolution de la vitesse de disparition de la forme P^{2-} en fonction de la concentration en P^{2-}

On fait l'hypothèse que l'évolution de la concentration suit une loi de vitesse d'ordre 1.

Q4. Expliquer en quoi les résultats expérimentaux donnés en figure 1 sont compatibles avec cette hypothèse.

Dans ce cadre, la concentration en ions P^{2-} à l'instant t, notée $[P^{2-}](t)$, est régie par l'équation différentielle :

$$\frac{d[P^{2-}](t)}{dt} = -k \cdot [P^{2-}](t)$$

Q5. Déterminer le coefficient k à l'aide du graphique de la figure 1.

La figure 2 de **L'ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE** présente l'évolution temporelle de la concentration de la forme P^{2-} de la phénolphtaléine.

Q6. Déterminer, à l'aide de la figure 2 de **L'ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE**, la valeur de la vitesse volumique de disparition v_d de la forme P^{2-} de la phénolphtaléine à la date $t = 200$ s. On fera apparaître la construction effectuée sur le graphique.

Q7. Indiquer, en justifiant la réponse, l'évolution de cette vitesse au cours du temps.

Q8. Définir le temps de demi-réaction $t_{1/2}$ et estimer sa valeur dans le cas de cette transformation chimique, considérée totale.

La concentration en ions P^{2-} de la phénolphtaléine suit la loi d'équation : $[P^{2-}](t)=[P^{2-}]_0 \cdot e^{-k \cdot t}$, où k correspond à la constante déterminée à la question **Q5**.

Q9. Déterminer la relation entre k et $t_{1/2}$.

Q10. Comparer la valeur de $t_{1/2}$ obtenue avec cette relation avec la valeur trouvée à la question **Q8**. Commenter.

Q11. Commenter la valeur de $t_{1/2}$ obtenue au regard de l'utilisation de la phénolphtaléine comme indicateur coloré de certains titrages de solutions acides.

Page blanche laissée intentionnellement.

Ne rien inscrire dessus.

ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE

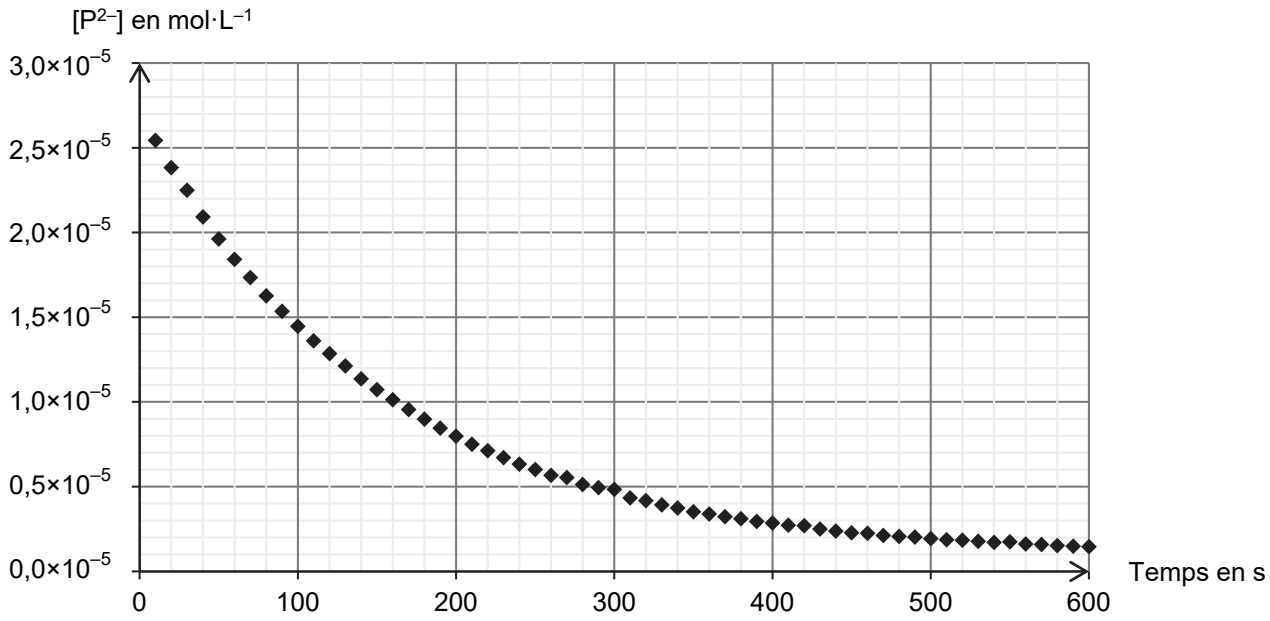


Figure 2. Évolution temporelle de la concentration de la forme P^{2-} de la phénolphtaléine

Modèle CCYC : ©DNE

NOM DE FAMILLE (naissance) : *(en majuscules)*

PRENOM : *(en majuscules)*

N° candidat :

N° d'inscription :

(Les numéros figurent sur la convocation, si besoin demander à un surveillant.)

Liberté · Égalité · Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Né(e) le : ☐☐ / ☐☐ / ☐☐☐☐

1.2