

BACCALAURÉAT GÉNÉRAL

SESSION 2012

PHYSIQUE-CHIMIE

Série S

DURÉE DE L'ÉPREUVE : 3 h 30 – COEFFICIENT : 6

L'usage des calculatrices N'EST PAS autorisé

Ce sujet nécessite une feuille de papier millimétré

Les données sont en italique

Ce sujet comporte un exercice de PHYSIQUE ET CHIMIE, un exercice de PHYSIQUE et un exercice de CHIMIE présentés sur 12 pages numérotées de 1 à 12, y compris celle-ci.

Les pages d'annexes (pages 11 et 12) et la feuille de papier millimétré SONT À RENDRE AGRAFÉES À LA COPIE, même si elles n'ont pas été complétées.

Le candidat doit traiter les trois exercices qui sont indépendants les uns des autres.

EXERCICE I. DE L'ÉNERGIE POUR LE STIMULATEUR CARDIAQUE (6,5 points)

Un stimulateur cardiaque est un générateur électrique fournissant une tension qui excite le muscle cardiaque. Les premiers stimulateurs fonctionnaient avec une pile dont la "durée de vie" était trop limitée. Pour pallier ce défaut, deux solutions ont été développées par la suite :

- la première récupère l'énergie libérée lors de la désintégration de noyaux de plutonium 238,
- la seconde consiste à équiper les stimulateurs d'une pile iode / lithium.

L'objectif de cet exercice est d'étudier la pertinence de chacune de ces deux solutions en termes d'énergie, de sécurité, d'encombrement et de durée de vie.

Les parties 1 et 2 de cet exercice sont indépendantes.

Les aides aux calculs peuvent comporter des indications ne correspondant pas aux calculs à effectuer. Les calculs élémentaires ne sont pas donnés.

Partie A. Utilisation de l'énergie libérée par une source de plutonium 238

Certains stimulateurs cardiaques fonctionnent à partir de l'énergie libérée lors de la désintégration α de noyaux de plutonium 238. Celle-ci provoque une légère élévation de température qui, par un système approprié, permet d'alimenter convenablement les stimulateurs en électricité.

Données :

Élément	$_{89}\text{Ac}$	$_{90}\text{Th}$	$_{91}\text{Pa}$	$_{92}\text{U}$	$_{93}\text{Np}$	$_{94}\text{Pu}$	$_{95}\text{Am}$	$_{96}\text{Cm}$
Nom	actinium	thorium	protactinium	uranium	neptunium	plutonium	américium	curium

- Masse molaire atomique : $M(^{238}\text{Pu}) = 238 \text{ g. mol}^{-1}$
- Unité de masse atomique : $1 \text{ u} = 1,7 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- Célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- Électron-volt : $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$
- Constante d'Avogadro : $N_A = 6,0 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Dans toute cette partie, on suppose que les noyaux obtenus lors des réactions nucléaires ne sont pas dans un état excité.

1. Obtention des noyaux de plutonium 238

Le plutonium 238 utilisé dans les stimulateurs cardiaques n'existe pas à l'état naturel. Il est obtenu à la suite de plusieurs réactions nucléaires à partir de l'uranium 235.

1.1. Un noyau d'uranium $^{235}_{92}\text{U}$ se transforme en un noyau d'uranium $^{237}_{92}\text{U}$ par absorption de deux neutrons ^1_0n .

Écrire l'équation de la réaction correspondante. Comment qualifie-t-on les deux noyaux d'uranium ?

1.2. L'uranium $^{237}_{92}\text{U}$ formé est radioactif β^- .

Écrire l'équation de cette désintégration β^- et identifier le noyau fils ^A_ZX .

1.3. On parle de réaction nucléaire provoquée ou spontanée.

Expliquer ces deux termes en vous appuyant sur les deux réactions écrites précédemment.

1.4. Pour obtenir le plutonium 238, deux étapes sont encore nécessaires. Le noyau fils ^A_ZX en capturant un neutron se transforme en neptunium 238. Celui-ci donne ensuite de lui-même naissance à un noyau de plutonium 238 par une transformation radioactive.

En justifiant la réponse, indiquer le type de transformation radioactive (α , β^+ ou β^-) que doit subir le noyau de neptunium 238 pour donner ensuite naissance à un noyau de plutonium 238.

2. Calcul de l'énergie libérée par les noyaux de plutonium 238

L'équation de la désintégration α d'un noyau de plutonium 238 s'écrit : ${}^{238}_{94}\text{Pu} \rightarrow {}^{234}_{92}\text{U} + {}^4_2\text{He}$.

2.1. Donner l'expression littérale de l'énergie libérée ΔE au cours de cette réaction en fonction des masses des différents noyaux concernés.

2.2. On admet que la perte de masse du système au cours de cette réaction vaut $|\Delta m| = 5,9 \times 10^{-3} \text{ u}$.

Calculer la valeur absolue de l'énergie libérée $|\Delta E|$ lors de la désintégration α d'un noyau de plutonium 238 dans l'unité du système international, puis en MeV.

Aide au calcul			
$\frac{5,9}{1,7} = 3,5$	$5,9 \times 1,7 = 1,0 \times 10^1$	$\frac{9,0}{1,6} = 5,6$	$9,0 \times 1,6 = 1,4 \times 10^1$

2.3. L'énergie totale E_t libérée par la source radioactive d'un stimulateur cardiaque est voisine de $2,0 \times 10^{21} \text{ MeV}$.

Montrer que le nombre de noyaux radioactifs N_0 présents initialement dans un stimulateur cardiaque est proche de $3,6 \times 10^{20}$ noyaux.

Aide au calcul		
$2,0 \times 1,8 = 3,6$	$\frac{2,0}{5,6} = 3,6 \times 10^{-1}$	$\frac{6,0}{1,7} = 3,5$

2.4. Calculer la masse m_0 de plutonium 238 présent dans un stimulateur cardiaque neuf.

Ce résultat est-il en adéquation avec la miniaturisation des stimulateurs cardiaques ?

Aide au calcul		
$\frac{238}{6,0} = 4,0 \times 10^1$	$\frac{6,0}{238} = 2,5 \times 10^{-2}$	$6,0 \times 238 = 1,4 \times 10^3$

3. Activité des noyaux de plutonium 238 et "durée d'utilisation" du stimulateur cardiaque

3.1. Les noyaux de plutonium 238 qui constituent la source radioactive permettant d'alimenter les stimulateurs cardiaques ont un temps de demi-vie $t_{1/2} = 88 \text{ ans}$, ce qui correspond à une constante radioactive $\lambda = 7,9 \times 10^{-3} \text{ an}^{-1}$.

Rappeler la loi de décroissance radioactive et définir le temps de demi-vie $t_{1/2}$.

3.2. La "durée d'utilisation" du stimulateur cardiaque est liée à l'activité de la source radioactive qui l'alimente. On note A_0 l'activité initiale de la source radioactive présente dans un stimulateur cardiaque neuf et $A(t)$ son activité à l'instant t . Celle-ci décroît au cours du temps suivant la relation : $A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$. On considère que le stimulateur fonctionne de manière convenable jusqu'à une diminution de 30% de son activité initiale, ce qui correspond à une activité notée A_1 .

3.2.1. Exprimer A_1 en fonction de A_0 puis déterminer graphiquement la "durée d'utilisation" de ce stimulateur cardiaque en années à l'aide de la courbe de l'évolution temporelle de l'activité $A = f(t)$ donnée **SUR LA FIGURE 1 DE L'ANNEXE EN PAGE 11**.

3.2.2. Ce résultat est-il en adéquation avec l'utilisation du plutonium 238 comme source d'alimentation des stimulateurs cardiaques ?

Dans les années 70, l'alimentation des stimulateurs cardiaques à l'aide d'une source radioactive présentait quelques inconvénients, notamment une éventuelle irradiation en cas de défaillance du boîtier hermétique. Une seconde solution consistant à produire de l'énergie à l'aide d'une pile iode / lithium est mise en application actuellement.

Partie B. Utilisation de l'énergie produite par une pile iode / lithium

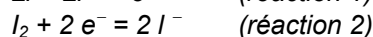
Dans un stimulateur cardiaque, les réactions au sein d'une pile iode / lithium se produisant dans un électrolyte non aqueux, les états physiques des réactifs et produits ne sont pas indiqués. Cependant, dans cette partie, la pile peut être schématisée de manière classique par deux électrodes au contact d'un électrolyte.

Données :

- 1 année = $3,2 \times 10^7$ s
- Charge électrique élémentaire : $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C
- Constante d'Avogadro : $N_A = 6,0 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- Faraday : $1 F = e \cdot N_A = 9,6 \times 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$
- Masse molaire atomique : $M(\text{Li}) = 7,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$
- Couples oxydant / réducteur : Li^+ / Li et I_2 / I^-

1. Réactions aux électrodes

Dans une pile iode / lithium, les réactions se produisant aux électrodes peuvent s'écrire :



1.1. La réaction 1 a-t-elle lieu à l'électrode positive ou à l'électrode négative de la pile?

Quel est le type de cette réaction (oxydation ou réduction) ?

1.2. Écrire l'équation de la réaction modélisant la transformation qui se produit au sein de la pile au cours de son fonctionnement.

1.3. La pile en fonctionnement est-elle le siège d'une transformation spontanée ou forcée ?

La pile en fonctionnement est-elle un système chimique en équilibre ou hors équilibre ?

1.4. Lorsqu'elle est usée, une pile au lithium doit être impérativement recyclée. Des règles de sécurité strictes sont indispensables car, entre autres, le lithium réagit vivement avec l'eau en produisant un gaz ainsi qu'une substance basique.

Justifier l'utilisation d'un électrolyte non aqueux dans le boîtier hermétique métallique d'un stimulateur cardiaque.

2. Fonctionnement de la pile iode / lithium

La "durée de vie" d'une pile iode / lithium dans un stimulateur cardiaque est environ de 10 ans. On cherche à évaluer la masse de lithium nécessaire à son fonctionnement en faisant l'hypothèse que la pile débite un courant dont l'intensité I (supposée constante) vaut 0,20 mA.

2.1. Calculer la quantité d'électricité Q fournie par la pile pendant sa durée totale de fonctionnement dans le stimulateur cardiaque.

2.2. À l'aide de l'équation de la réaction 1, exprimer la quantité de lithium consommé $n_{\text{cons}}(\text{Li})$ en fonction de la quantité d'électrons échangés $n(e^-)$.

2.3. En déduire la masse initiale de lithium $m_i(\text{Li})$ nécessaire dans la pile du stimulateur cardiaque pour assurer son fonctionnement pendant 10 ans.

Aide au calcul			
$9,6 \times 6,4 = 6,1 \times 10^1$	$\frac{9,6}{6,4} = 1,5$	$6,7 \times 7 = 4,7 \times 10^1$	$\frac{6,4}{9,6} = 6,7 \times 10^{-1}$

3. Caractéristiques techniques de la pile iode / lithium

Avant son implantation dans un stimulateur cardiaque, les caractéristiques techniques de la pile sont contrôlées. On trouve sur l'enveloppe extérieure d'une pile iode / lithium différentes informations inscrites par le fabricant qui sont partiellement retranscrites dans le tableau ci-dessous.

Force électromotrice	2,8
Capacité massique	3600

3.1. En reproduisant le schéma de la pile de la **figure 2** sur votre copie, schématiser l'appareil de mesure permettant de vérifier la valeur de la force électromotrice en précisant les branchements à effectuer.

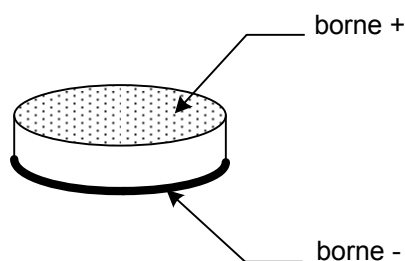


Figure 2

3.2. La capacité massique C_m de la pile correspond à la quantité d'électricité que la pile peut fournir par kilogramme de lithium consommé. Le fabricant l'exprime en $A.h.kg^{-1}$ (ampère heure par kilogramme).

À partir de l'indication du fabricant, calculer la valeur de la quantité d'électricité Q' que peut fournir une pile contenant 5,0 g de lithium.

Est-elle compatible avec celle calculée dans les conditions de la question 2.1. pour une durée d'utilisation de la pile de 10 ans ?

Aide au calcul		
$3,6^2 = 1,3 \times 10^1$	$1,3 \times 5,0 = 6,5$	$\frac{5,0}{1,3} = 3,8$

EXERCICE II. DE LA BOUTEILLE DE LEYDE AUX OSCILLATIONS ELECTRIQUES (5,5 points)

La bouteille de Leyde est considérée comme l'ancêtre du condensateur. Elle est formée d'une électrode supérieure constituée de feuilles d'or suspendues à l'aide d'une chaîne à l'intérieur d'une bouteille en verre. Une deuxième électrode est une feuille métallique en étain enveloppant l'extérieur de la bouteille.

Reliée à un générateur (à friction), la bouteille de Leyde peut accumuler des charges électriques. En 1853, Sir William Thomson étudie un circuit comprenant une bouteille de Leyde et une bobine. Il s'aperçoit qu'avec des bobines de résistance interne suffisamment faible, il apparaît des oscillations électriques peu amorties dans le circuit.

L'objectif de cet exercice est d'étudier les propriétés d'une bouteille de Leyde, de reproduire au laboratoire les oscillations observées par Thomson puis d'en étudier les principales caractéristiques temporelles et énergétiques.

Les aides aux calculs peuvent comporter des indications ne correspondant pas au calcul à effectuer.

1. À propos de la bouteille de Leyde

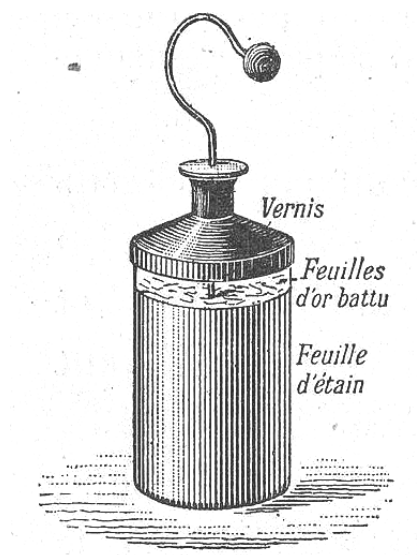


Figure 3 : Bouteille de Leyde

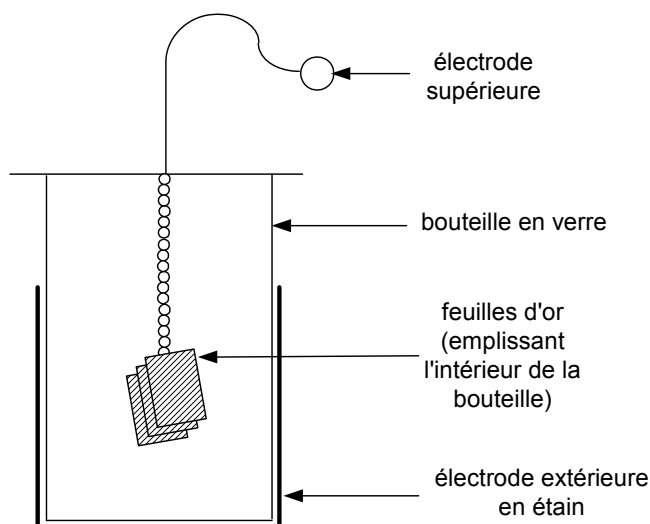


Figure 4 : Vue en coupe d'une bouteille de Leyde

1.1. À l'aide de sa description et des **figures 3 et 4** ci-dessus, indiquer le(s) constituant(s) de la bouteille de Leyde qui joue(nt) le rôle des armatures.

1.2. Le tableau ci-dessous regroupe les mesures de la tension électrique u_c aux bornes d'une bouteille de Leyde en fonction de la charge q portée par son armature positive.

u_c (V)	0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0
q (C)	0	$1,9 \times 10^{-9}$	$4,2 \times 10^{-9}$	$6,1 \times 10^{-9}$	$7,9 \times 10^{-9}$	$10,1 \times 10^{-9}$

1.2.1. Tracer la courbe $q = f(u_c)$ **SUR LA FEUILLE DE PAPIER MILLIMÉTRÉ À RENDRE AGRAFÉE À LA COPIE.**

- 1.2.2. Déduire de la courbe la relation existant entre la tension u_C et la charge q .
 1.2.3. Déterminer alors la valeur de la capacité C du condensateur équivalent à cette bouteille de Leyde.

2. Reproduction de l'expérience de Thomson au laboratoire

On réalise le circuit électrique schématisé **SUR LA FIGURE 5 DE L'ANNEXE EN PAGE 11** qui comprend une bouteille de Leyde assimilée à un condensateur de capacité C inconnue, une bobine d'inductance $L = 0,10 \text{ H}$ et de résistance interne r ainsi qu'un interrupteur K .

On note u_C la tension aux bornes du condensateur.

Le condensateur est initialement chargé.    l'instant initial $t_0 = 0$, l'interrupteur K est fermé.

Pour visualiser l'évolution de la tension u_C au cours du temps, on utilise un système automatique d'acquisition de données.

2.1. Représenter sur la **FIGURE 5 DE L'ANNEXE EN PAGE 11** les branchements (voie 1 et masse)    effectuer pour visualiser la tension u_C .

2.2. La courbe de la **figure 6** représente l'évolution temporelle de la tension u_C lorsque la valeur de la résistance interne de la bobine r est faible.

Quel est le nom du régime observé ?

Donner la cause de la diminution de l'amplitude des oscillations au cours du temps.

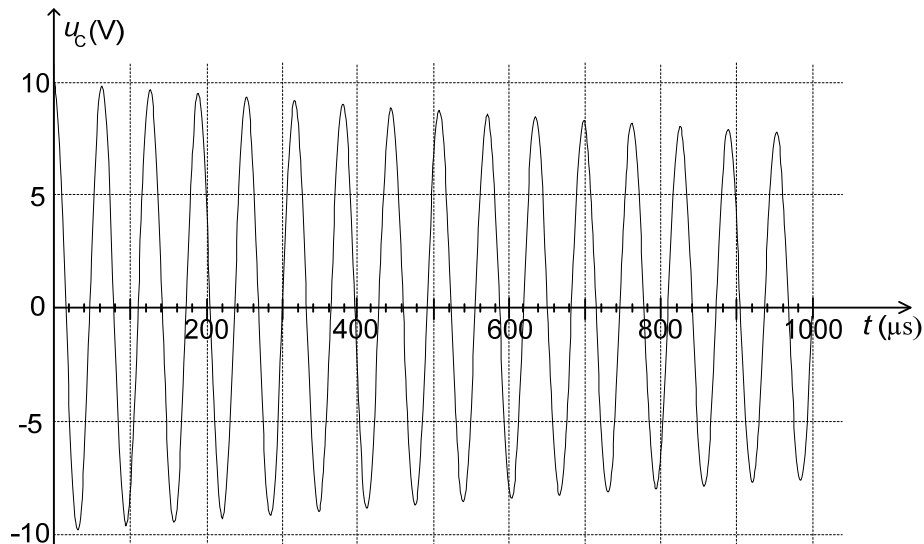


Figure 6

2.3. On mesure une valeur de la pseudo-période $T = 63 \mu\text{s}$. Expliquer comment faut-il opérer pour déterminer précisément cette valeur.

3. Modélisation du circuit réalisé par Thomson

On considère dans toute cette partie que la bobine est idéale, c'est à dire que sa résistance interne r est nulle.

L'objectif de cette question est de déterminer la valeur de la capacité de la bouteille de Leyde du laboratoire.

3.1. Représenter sur la **FIGURE 7 DE L'ANNEXE EN PAGE 11** en convention récepteur les tensions u_C aux bornes du condensateur et u_L aux bornes de la bobine.

3.2. On cherche à déterminer l'équation différentielle régissant la tension u_C aux bornes du condensateur.

3.2.1. Donner l'expression de la tension u_L en fonction de l'intensité i et de l'inductance L .

3.2.2.   tablir la relation existant entre l'intensité i et la tension u_C .

3.2.3. En déduire l'expression de la tension u_L en fonction de la tension u_C .

3.2.4. Montrer que l'équation différentielle vérifiée par la tension u_C aux bornes du condensateur peut se mettre sous la forme $\frac{1}{LC}u_C + \frac{d^2u_C}{dt^2} = 0$.

3.3. Une solution de cette équation différentielle s'écrit $u_C(t) = U_m \cos\left(\frac{2\pi}{T_0}t\right)$.

3.3.1. Que représentent les grandeurs U_m et T_0 ?

3.3.2. Montrer que T_0 a pour expression $T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$.

3.3.3. Vérifier par une analyse dimensionnelle la cohérence de l'expression de T_0 proposée précédemment.

3.3.4. Trouver l'expression littérale donnant C en fonction de T_0 et L .

3.3.5. On rappelle que la valeur de T_0 est proche de la pseudo-période T des oscillations observées dans la question 2 et que la valeur de l'inductance L est de $0,10\text{ H}$.

Calculer la valeur de la capacité C de la bouteille de Leyde au laboratoire. Cette valeur est-elle cohérente avec celle trouvée à la question 1.2.3 ?

Aide au calcul		
$\left(\frac{2\pi}{63}\right)^2 = 9,9 \times 10^{-3}$	$\left(\frac{63}{2\pi}\right)^2 = 1,0 \times 10^2$	$(2\pi \times 63)^2 = 1,6 \times 10^5$

4. Aspect énergétique de l'expérience de Thomson

4.1. Donner les expressions de l'énergie E_C emmagasinée dans un condensateur et de l'énergie E_L emmagasinée dans une bobine.

4.2. La **figure 8** représente l'évolution de l'énergie emmagasinée au cours du temps par un des dipôles (bouteille de Leyde ou bobine) lors de l'expérience de la question 2.

Préciser quel dipôle en justifiant la réponse.

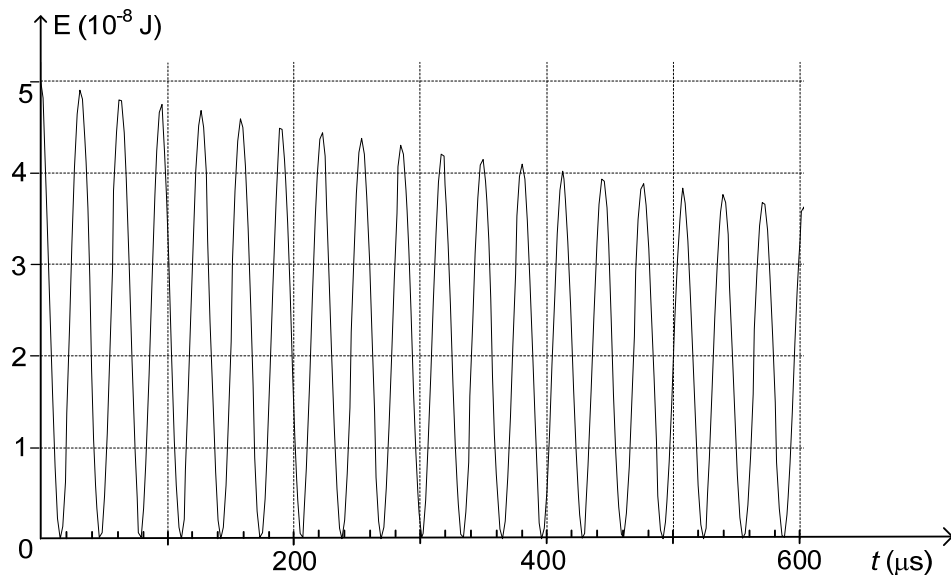


Figure 8

EXERCICE III. SYNTHÈSE DE L'ACÉTATE D'ISOBUTYLE (4 points)

L'acétate d'isobutyle est un composé moléculaire de la famille des esters. C'est un produit utilisé en parfumerie dans la préparation d'essences artificielles ayant l'arôme de poire. Il sert aussi de solvant dans les colles, les peintures, les laques et les vernis, les encres d'imprimerie...

À température ambiante et à pression ordinaire, l'acétate d'isobutyle est un liquide incolore dont l'odeur fruitée est plaisante à faible concentration dans l'air. À forte dose, ce produit est dangereux et son odeur devient désagréable. Ainsi, on évite de travailler dans des sites où les concentrations sont supérieures à 300 ppm* (partie par million).

D'après des informations données par l'INRS.

*une ppm correspond au sens strict à un rapport de 10^{-6} . Ici, 300 ppm correspondent par exemple à 300 mg par kg d'air.

1. Qui se cache derrière ce nom ?

1.1. L'acétate d'isobutyle a pour formule $\text{CH}_3 - \text{COO} - \text{CH}_2 - \text{CH}(\text{CH}_3)_2$. On peut synthétiser cette espèce chimique à partir d'un acide carboxylique et d'un alcool.

Écrire l'équation de la réaction de synthèse de l'ester en utilisant les formules semi développées.

1.2. Donner le nom de chacun des réactifs de cette synthèse.

1.3. La transformation correspondante est-elle totale ?

2. Rendement d'une réaction étudiée au laboratoire

Dans la suite de cet exercice, on notera Ac l'acide carboxylique, Al l'alcool utilisé et Es l'ester produit. Avant de passer au stade industriel de la synthèse, on réalise au laboratoire l'expérience décrite ci-après.

À $t = 0$, on mélange dans un ballon une quantité de matière $n(\text{Ac})_0 = 1,75 \times 10^{-1}$ mol d'acide et une quantité de matière $n(\text{Al})_0 = 1,75 \times 10^{-1}$ mol d'alcool. On rajoute quelques gouttes d'acide sulfurique concentré et des grains de pierre ponce. On fixe le ballon sur un montage à reflux pour porter le milieu réactionnel à ébullition.

2.1. Calculer le volume $V(\text{Ac})$ d'acide carboxylique qu'il faut prélever pour obtenir la quantité de matière $n(\text{Ac})_0$ d'acide carboxylique.

Données :

- densité de l'acide par rapport à l'eau $d = 1,05$;
- masse molaire de l'acide $M = 60,0 \text{ g. mol}^{-1}$
- masse volumique de l'eau $\rho_{\text{eau}} = 1,00 \text{ kg.L}^{-1}$

Aide au calcul		
$\frac{1,75 \times 6,00}{1,05} = 10,0$	$\frac{1,05}{1,75 \times 6,00} = 0,100$	$\frac{1,75 \times 1,05}{6,00} = 0,306$

2.2. Compléter qualitativement le tableau d'avancement **DE LA FIGURE 9 DE L'ANNEXE EN PAGE 12**. On néglige la quantité d'eau apportée par l'acide sulfurique.

2.3. Déterminer l'avancement maximal x_{max} de la réaction.

2.4. Au bout de deux heures, le système n'évolue plus. On effectue un titrage du mélange réactionnel afin de déterminer la quantité de matière d'acide restant : $n(\text{Ac})_{\text{restant}} = 5,83 \times 10^{-2} \text{ mol}$.

2.4.1. Montrer que l'avancement final de la réaction vaut $x_f = 1,17 \times 10^{-1} \text{ mol}$.

2.4.2. En déduire la quantité de matière $n(\text{Es})_{\text{formé}}$ d'ester formé à l'état final.

2.4.3. Calculer le taux d'avancement final τ de cette réaction. Le résultat est-il en accord avec la réponse à la question 1.3 ?

Aide au calcul		
$\frac{1,75}{1,17} = 1,50$	$\frac{1,17}{1,75} = 0,669$	$1,75 \times 1,17 = 2,05$

2.4.4. Sachant que la masse molaire de l'ester est $M(\text{Es}) = 116,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, calculer la masse finale $m(\text{Es})_f$ d'ester formé.

Aide au calcul		
$1,17 \times 1,16 = 1,36$	$\frac{1,17}{1,16} = 1,01$	$\frac{1,16}{1,17} = 0,991$

2.4.5. Cette expérience est réalisée dans un laboratoire considéré comme parallélépipédique dont les dimensions sont $5 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$.

Données : - température d'ébullition de l'acétate d'isobutyle $T_{\text{éb}} = 118^\circ\text{C}$ à la pression normale ;
- liquide facilement inflammable.

a. Calculer le volume d'air contenu dans la pièce.

b. Montrer que la masse d'air contenue dans la pièce vaut $m(\text{air}) = 39 \text{ kg}$ sachant que dans les conditions de l'expérience la masse volumique de l'air est $\rho = 1,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

c. On rappelle qu'une ppm équivaut à 1 mg de vapeur par kilogramme d'air.

Calculer en ppm la teneur en ester contenue dans l'air du laboratoire si tout l'ester se vaporise.

Aide au calcul		
$\frac{1,01}{3,9} = 0,26$	$\frac{1,36}{3,9} = 0,35$	$1,36 \times 3,9 = 5,3$

d. En tenant compte du texte, des données ci-dessus et du résultat précédent, énoncer des précautions à prendre pour manipuler cet ester.

ANNEXE À RENDRE AGRAFÉE AVEC LA COPIE

ANNEXE DE L'EXERCICE I

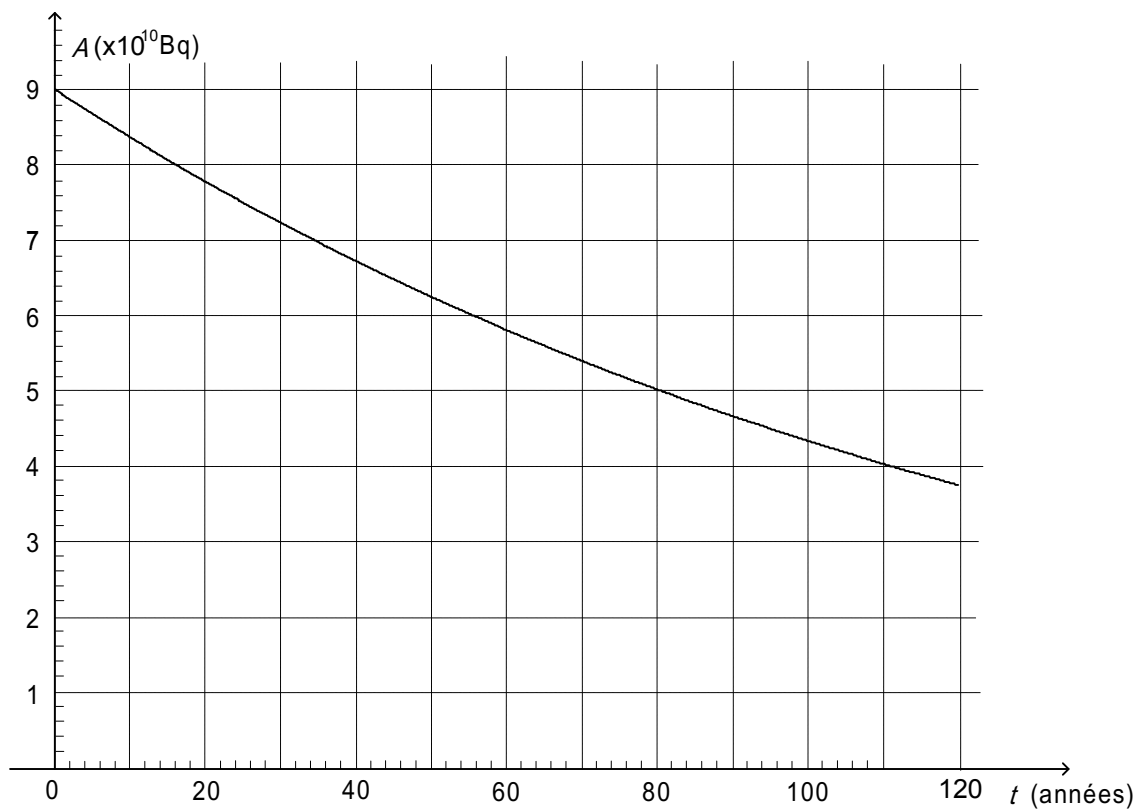


Figure 1 : évolution de l'activité au cours du temps

ANNEXE DE L'EXERCICE II

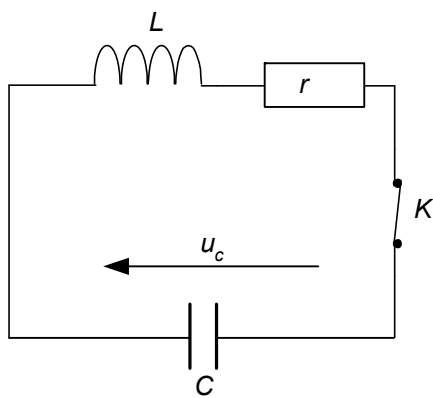


Figure 5

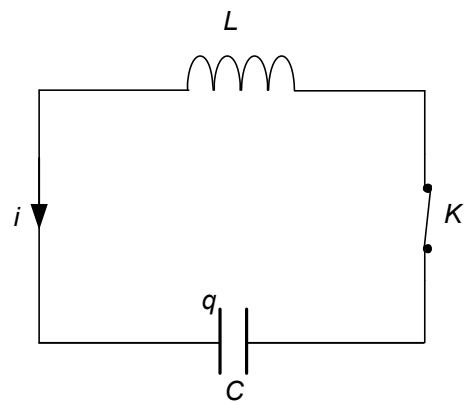


Figure 7

ANNEXE DE L'EXERCICE III

Équation de la réaction		Ac (ℓ) + Al (ℓ) = Es (ℓ) + eau (ℓ)			
État du système	Avancement (mol)	Quantité de matière (mol)			
initial	0				
intermédiaire	x				
final	x _f				

Figure 9