

BACCALAURÉAT GÉNÉRAL

SESSION 2016

PHYSIQUE-CHIMIE

Série S

Durée de l'épreuve : 3 heures 30
Coefficient : 8

L'usage de la calculatrice est autorisé

Ce sujet ne nécessite pas de feuille de papier millimétré

Le sujet comporte trois exercices présentés sur 11 pages numérotées de 1/11 à 11/11, y compris celle-ci.

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

EXERCICE I - LES RAYONS X, OUTIL D'INVESTIGATION (6 points)

Les rayons X, découverts en 1895 par le physicien allemand Wilhelm Röntgen, sont des rayonnements électromagnétiques utilisés principalement en imagerie médicale (radiologie) et en cristallographie (étude des substances cristallines).

L'objectif de cet exercice est d'étudier la production des rayons X et leur utilisation dans l'analyse de la structure des cristaux.

1. Accélération d'un faisceau d'électrons

Les rayons X sont produits dans des dispositifs appelés *tubes de Coolidge* (W.D.COOLIDGE, physicien américain, 1873-1975).

Dans ce dispositif, des électrons émis par un filament chauffé par effet Joule, sont accélérés sous l'effet d'un champ électrique uniforme \vec{E} . Ce champ est créé par une tension électrique U d'environ 100 kV.

Les électrons se dirigent vers une cible de molybdène, métal de symbole Mo, avec laquelle ils interagissent pour produire les rayons X. Se déplaçant à une vitesse très élevée, ces électrons peuvent acquérir une énergie cinétique suffisante pour perturber les couches électroniques internes des atomes de la cible. Ces atomes, dans un état excité, vont alors émettre des rayons X en retournant à leur état fondamental.

La figure 1 ci-dessous reprend de manière simplifiée le principe du tube de Coolidge.

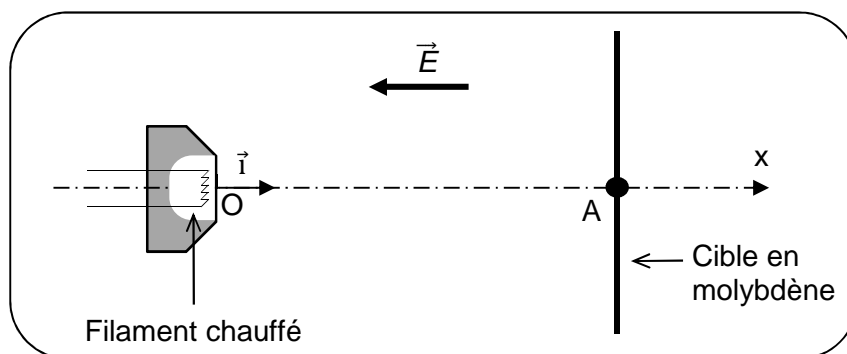


Figure 1

Données :

- entre le filament et la cible, séparées d'une distance $OA = L = 2 \text{ cm}$, règne un champ électrique uniforme \vec{E} dont la valeur est donnée par la relation : $E = \frac{U}{L}$;
- célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$;
- charge électrique élémentaire : $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$;
- masse de l'électron : $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$;
- intensité de la pesanteur : $g = 9,81 \text{ N.kg}^{-1}$;
- durée propre et durée mesurée dans le référentiel d'étude:

Si le référentiel d'étude est galiléen et si le référentiel propre est en mouvement à vitesse constante par rapport à lui, alors la durée mesurée dans le référentiel d'étude vaut :

$$\Delta t_m = \gamma \cdot \Delta t_p \quad \left| \begin{array}{l} \Delta t_p : \text{durée propre entre les deux événements considérés} \\ \Delta t_m : \text{durée mesurée dans le référentiel d'étude supposé galiléen} \end{array} \right.$$

γ est appelé coefficient de Lorentz et s'écrit :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \left| \begin{array}{l} v : \text{vitesse du référentiel propre par rapport au référentiel d'étude} \\ c : \text{vitesse de la lumière dans le vide} \end{array} \right.$$

On se propose d'évaluer l'ordre de grandeur de la vitesse atteinte par les électrons lorsqu'ils arrivent sur la cible en molybdène.

On suppose pour cela qu'un électron est émis au point O avec une vitesse nulle à $t = 0$ s. Il arrive au point A avec une vitesse \vec{v} .

On considère qu'il est soumis à la force électrique \vec{F}_e .

1.1 Donner l'expression vectorielle de la force électrique \vec{F}_e subie par un électron.

Comparer la direction et le sens de la force électrique \vec{F}_e à ceux du champ électrique \vec{E} .

1.2 Montrer que, dans le cas où la tension électrique U appliquée entre le filament et la cible vaut 100 kV, on peut négliger le poids de l'électron devant la force électrique.

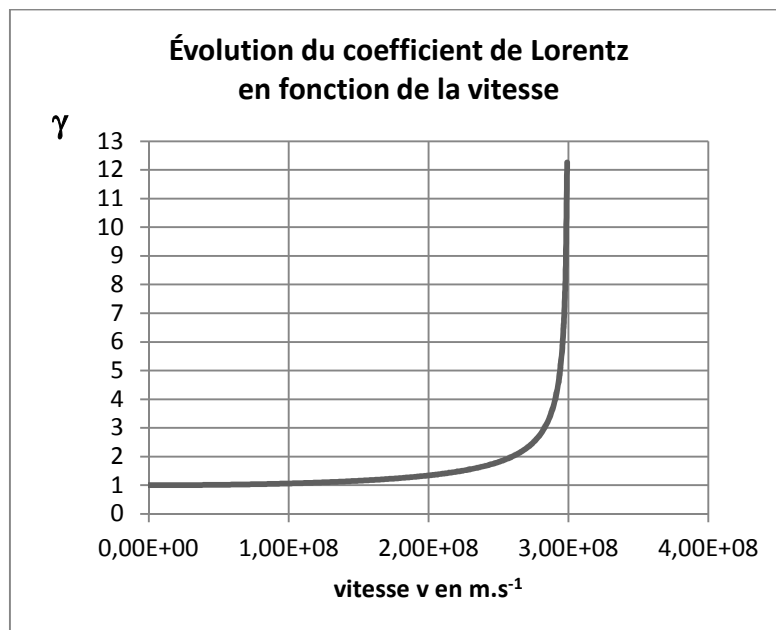
1.3 Montrer que l'expression de la vitesse de l'électron lorsqu'il arrive au point A est :

$$v_A = \sqrt{\frac{2 e \cdot U}{m_e}}$$

Tout élément de la démarche sera valorisé, même si celle-ci n'aboutit pas.

1.4 Calculer la vitesse de l'électron lorsqu'il arrive au point A dans le cas où la tension électrique U appliquée entre le filament et la cible vaut 100 kV.

1.5 Un graphe représentant l'évolution du coefficient de Lorentz en fonction de la vitesse est fourni ci-dessous. Pensez-vous qu'un modèle relativiste conviendrait mieux à l'étude mécanique du mouvement de l'électron ? Justifier votre réponse.

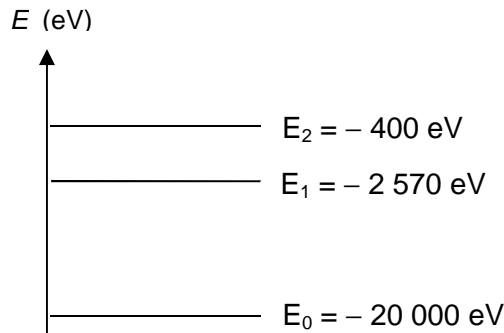


2. Émission de rayons X

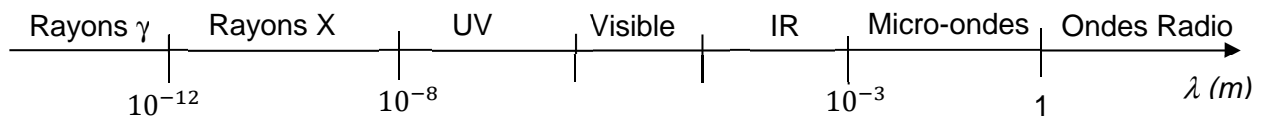
Si l'électron libéré par le filament a une énergie suffisante lorsqu'il arrive sur la cible en molybdène, il peut exciter certains atomes de la cible en perturbant leurs couches électroniques internes. Ces atomes excités émettent des rayons X en revenant à leur état fondamental.

Données :

- constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J.s ;
- $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19}$ J ;
- diagramme simplifié des niveaux d'énergie du molybdène :



- spectre des ondes électromagnétiques (échelle non respectée) :



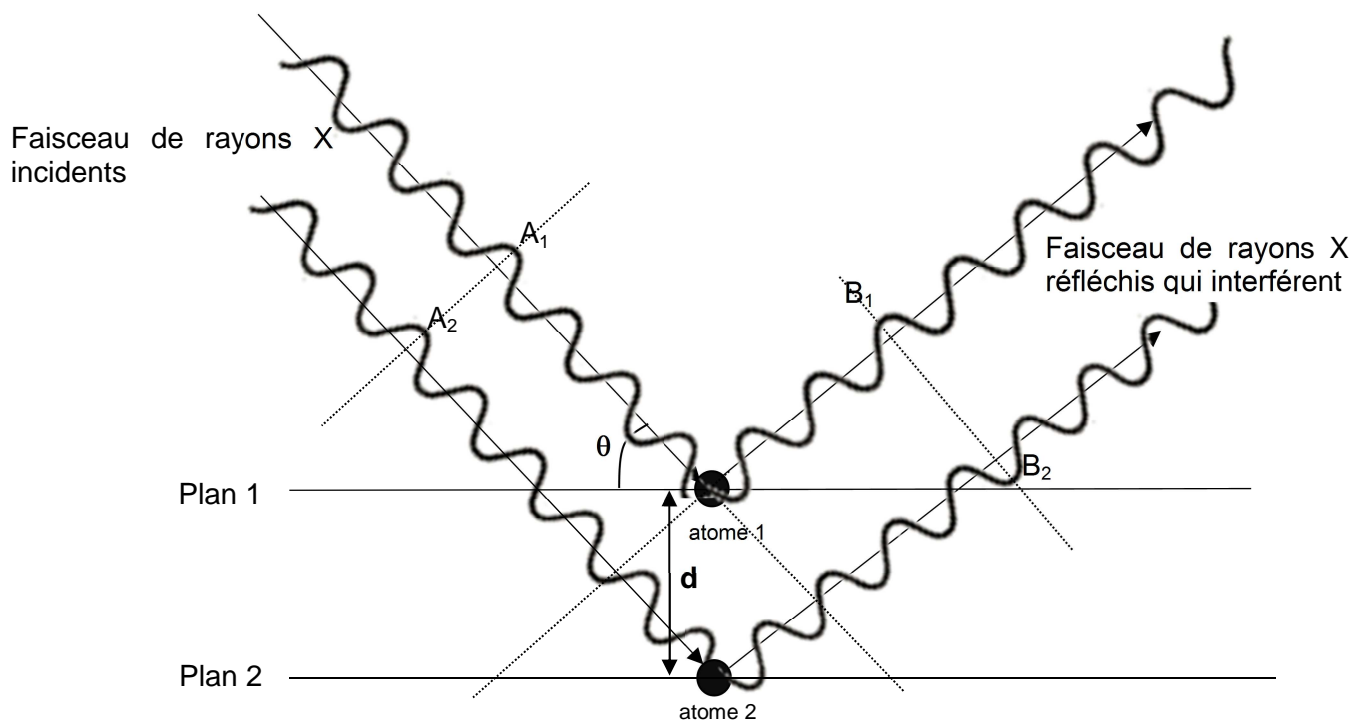
2.1 Reproduire sur votre copie le diagramme d'énergie du molybdène, et y représenter par des flèches toutes les transitions électroniques de l'atome pouvant s'accompagner de l'émission d'un rayonnement.

2.2. Déterminer le domaine des ondes émises correspondant à ces transitions.

3. Application à l'étude des structures cristallines

Les rayons X sont utilisés pour explorer la matière et par exemple pour évaluer la distance d entre deux plans 1 et 2 voisins d'atomes dans un cristal. Lorsqu'on envoie un faisceau de rayons X de longueur d'onde λ sur un cristal, ils sont réfléchis par les atomes qui constituent le cristal. Les ondes réfléchies par les atomes interfèrent.

On peut représenter de façon très simplifiée cette situation par le schéma suivant :



Données :

- la différence de parcours entre deux ondes incidentes qui se réfléchissent sur deux plans successifs est donnée par la relation : $\delta = 2 d \cdot \sin \theta$, où d est la distance entre deux atomes voisins et θ l'angle entre le rayon et le plan.
- dans le cas d'interférences constructives, la différence de parcours vaut : $\delta = k \cdot \lambda$
- dans le cas d'interférences destructives, la différence de parcours vaut : $\delta = \left(k + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda$
où k est un nombre entier positif ou négatif et λ la longueur d'onde des ondes qui interfèrent.

3.1 En exploitant le schéma précédent, préciser :

- Si les deux rayons incidents interfèrent avec les états vibratoires représentés en A_1 et A_2 , on obtient des interférences constructives ou destructives.
- Si les deux rayons réfléchis interfèrent avec les états vibratoires représentés en B_1 et B_2 , on obtient des interférences constructives ou destructives.
- Pourquoi les interférences ne sont pas de même nature entre A_1/A_2 et B_1/B_2 .


3.2 Pour un angle θ de $10,4^\circ$ et une longueur d'onde de $0,154 \text{ nm}$, déterminer la valeur de d dans le cristal, dans le cas où l'on obtient des interférences constructives pour une différence de parcours minimale.

EXERCICE II - AUTOUR DU STYRÈNE (9 points)

Le polystyrène et le polystyrène expansé sont des matériaux fréquemment utilisés dans le domaine de l'isolation et de l'emballage. Ces polymères sont synthétisés à partir d'une même molécule, le styrène. Le styrène est disponible auprès des fournisseurs spécialisés sous la forme d'un liquide commercialisé pur ou dilué dans un solvant spécifique.

Données :

- Produit commercial étudié et extrait de l'étiquette figurant sur la bouteille :



STYRENE

42% stabilisé

Danger

N° CAS: 100-42-5 - Numéro CE: 202-851-5
Formule chimique: C₆H₅CHCH₂

Informations physico-chimiques

Masse molaire : 104.15 g/mol
Masse volumique : 0.906 g/cm³ (20 °C)
Solubilité dans l'eau : 0.24 g/l (20 °C)
Point d'ébullition : 145 °C (1013 hPa)
Point éclair : 31 °C
Température d'inflammation : 480 °C
Point de fusion : -31 °C

5 014016 150821 >

1L

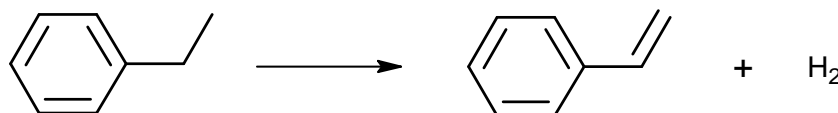
- Électronégativités (de Pauling) pour les atomes d'oxygène : 3,5 et d'hydrogène : 2,1 ;
- Température de fusion de l'éthylbenzène : - 95°C ; température d'ébullition de l'éthylbenzène : 136 °C ; température de fusion des oxydes de zinc : 1975 °C ;
- Produit ionique de l'eau à 25°C : $K_e = 1,0 \times 10^{-14}$.

1. Obtention industrielle du styrène

Le styrène fut célébré par Raymond QUENEAU dans un poème en alexandrins intitulé « *le chant du styrène* » dont un extrait est reproduit ci-dessous :

*Le styrène est produit en grande quantité
À partir de l'éthylbenzène surchauffé.
Faut un catalyseur comme cela se nomme
Oxyde ou bien de zinc ou bien de magnésium.*

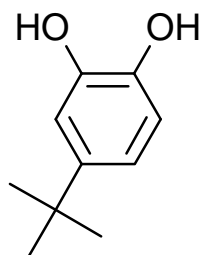
La voie de synthèse du styrène, évoquée dans le poème, est la déshydrogénation de l'éthylbenzène, produit issu de la pétrochimie. Cette transformation peut être modélisée par la réaction d'équation suivante :



- 1.1. Cette réaction correspond-elle à une modification de chaîne ou à une modification de groupe caractéristique ?
- 1.2. Parmi les trois grandes catégories de réactions en chimie organique, déterminer à quelle catégorie appartient cette réaction.
- 1.3. Le poème indique que cette transformation chimique nécessite l'emploi de catalyseurs. Définir un catalyseur.
- 1.4. Dans le cas de la synthèse du styrène, déterminer si la catalyse est homogène, hétérogène ou enzymatique.

2. Préparation du styrène avant utilisation au laboratoire

Le styrène, sensible à la lumière et aux températures élevées, peut se polymériser dans la bouteille en l'absence de précaution. Pour éviter cela, la solution de styrène est « stabilisée » par ajout d'un inhibiteur de polymérisation : le 4-tert-butylpyrocatechol de formule topologique suivante :



Avant utilisation, il est donc nécessaire d'éliminer l'inhibiteur de polymérisation. Pour cela, le protocole suivant est mis en œuvre :

- Sous une hotte ventilée, dans une ampoule à décanter, verser 10 mL du produit commercial à purifier contenant le styrène et le 4-tert-butylpyrocatechol.
- Ajouter 10 mL de solution d'hydroxyde de sodium ($\text{Na}^+_{(\text{aq})} + \text{HO}^-_{(\text{aq})}$) de concentration molaire $1,0 \text{ mol.L}^{-1}$.
- Boucher, agiter l'ampoule, dégazer puis laisser décanter.
- Observer les changements de couleur des deux phases. Éliminer la phase aqueuse.
- Laver la phase organique recueillie avec 20 mL d'eau.
- Récupérer la phase aqueuse dans un bécher et mesurer son pH. Recommencer le lavage à l'eau jusqu'à obtention d'un pH proche de la neutralité.
- Placer le styrène extrait dans un erlenmeyer et ajouter une spatule de chlorure de calcium anhydre.
- Filtrer le mélange et récupérer le styrène purifié.

2.1. Réalisation du protocole

- 2.1.1. Les consignes de sécurité indiquées pour mettre en œuvre ce protocole vous paraissent-elles justifiées ?
- 2.1.2. Proposer d'autres précautions à prendre afin de manipuler en toute sécurité.

2.2. Identifier les groupes caractéristiques présents dans la molécule de 4-tert-butylpyrocatechol.

2.3. Déterminer la polarisation de la liaison O-H. Justifier que l'on trouve dans les tables de données deux pK_A , respectivement 9 et 13, pour le 4-tert-butylpyrocatechol.

2.4. Écrire les deux couples acide-base issus du diacide en notant H_2A le 4-tert-butylpyrocatechol. Établir un diagramme de prédominance faisant intervenir les deux couples.

2.5. Estimer la valeur du pH de la solution d'hydroxyde de sodium utilisée pour le lavage.

2.6. Écrire l'équation de réaction mise en jeu entre le 4-tert-butylpyrocatechol noté H_2A et les ions hydroxyde HO^- , si les ions hydroxyde sont en large excès.

2.7. Expliquer pourquoi le lavage par la solution d'hydroxyde de sodium du produit commercial contenant le styrène permet d'éliminer le 4-tert-butylpyrocatechol.

2.8. En schématisant l'ampoule à décanter, indiquer dans quelle phase se trouve le styrène et dans quelle phase se situe le 4-tert-butylpyrocatechol.

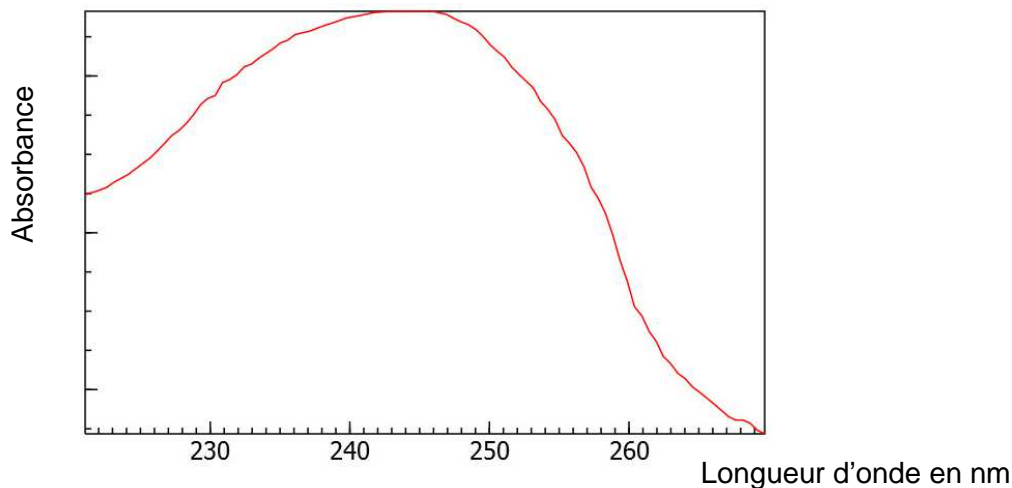
2.9. Expliquer le rôle des lavages supplémentaires à l'eau et du contrôle du pH.

2.10. Expliciter le rôle du chlorure de calcium anhydre.

3. Contrôle de la teneur en styrène dans le flacon commercial

Le produit commercial utilisé indique que le pourcentage massique de styrène est de 42 %. Toutefois, compte tenu des difficultés qui peuvent être rencontrées lors de la conservation du styrène, il est recommandé de déterminer sa concentration avant de l'utiliser. On réalise pour cela une mesure d'absorbance du styrène à l'aide d'un spectrophotomètre UV-visible et on exploite cette mesure à l'aide d'un graphe fourni par le fabricant.

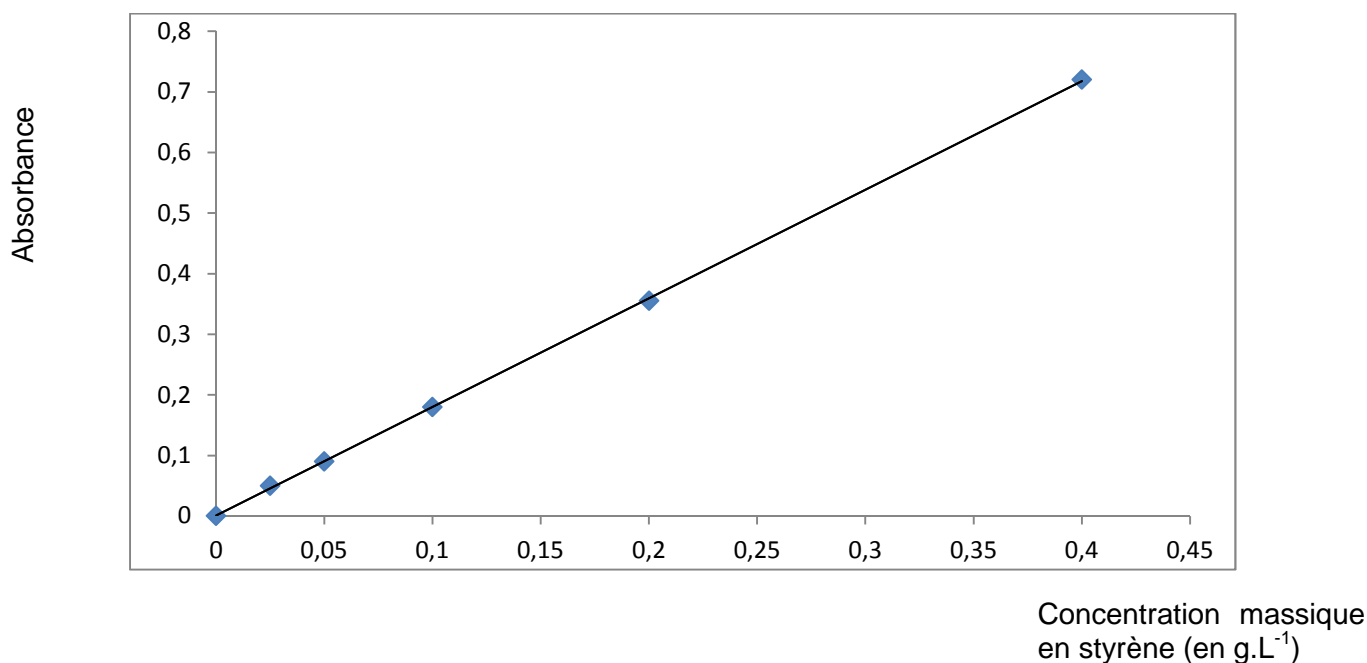
Spectre d'absorption du styrène :



3.1. À quelle longueur d'onde la mesure d'absorbance devra-t-elle être réalisée ? Dans quel domaine les ondes correspondantes appartiennent-elles ?

3.2. D'après le graphe suivant fourni par le fabricant, quelle relation peut-on écrire entre l'absorbance A de la solution et sa concentration C en styrène ? À quelle loi empirique cette relation fait-elle référence ?

Graphe fourni par le fabricant du produit étudié :



3.3. Proposer un protocole détaillé permettant d'obtenir précisément le graphe $A = f(C)$ fourni par le fabricant du produit.

3.4. On prélève alors une masse $m = 10$ mg de résine dans le flacon du produit commercial étudié. Puis, dans le même solvant que celui utilisé pour obtenir le graphe, on dissout ce prélèvement pour former une solution de volume 50,0 mL. La mesure de l'absorbance de l'échantillon obtenu conduit à une valeur de 0,15.

Déterminer si le styrène s'est bien conservé.

EXERCICE III - ÉRAOLE, L'AVION DU FUTUR (5 points)

Éraole est un projet d'avion monoplace hybride à moteur électrique alimenté à l'énergie solaire et au bioalgal.

La nuit, le biocarburant de 3^{ème} génération fait fonctionner un moteur thermique couplé à une génératrice afin de fournir l'énergie électrique nécessaire au moteur électrique qui actionne son hélice.

Le jour, les cellules photovoltaïques viennent compléter l'alimentation du moteur en électricité afin de diminuer la consommation de biocarburant.

L'objectif de ce projet aéronautique est de réaliser la traversée de l'Atlantique (New-York - Paris) avec un bilan carbone neutre. Le premier vol est initialement prévu le 21 juin 2016, jour du solstice d'été.



Sur un site internet d'information scientifique, il est indiqué que « l'apport de l'énergie solaire au cours du vol d'Éraole sera de 25 % ».

En détaillant le raisonnement suivi, déterminer si cette valeur est cohérente avec les informations rassemblées dans les documents ci-dessous.

L'analyse des données ainsi que la démarche suivie seront évaluées et nécessitent d'être correctement présentées. Les calculs numériques seront menés à leur terme. Il est aussi nécessaire d'apporter un regard critique sur le résultat et de discuter la validité des hypothèses de travail formulées.

L'énergie solaire

L'énergie solaire est la principale source d'énergie qui chauffe la surface de la Terre. Le Soleil nous envoie chaque jour une quantité considérable d'énergie.

En moyenne sur la surface du globe (en moyennant jour et nuit, hiver et été, tropiques et pôles), le Soleil envoie 342 watts par mètre carré. Environ 30 % de cette énergie est renvoyée dans l'espace.

D'après le site institutionnel : <http://www.cnrs.fr>

Rendement d'un panneau solaire

Un panneau solaire est une association de cellules photovoltaïques (cellules solaires).

Son rendement η s'exprime en fonction de la puissance électrique $P_{élec}$ fournie par le panneau, de sa surface S et de l'éclairement ε qu'il reçoit :

$$\eta = \frac{P_{élec}}{\varepsilon \times S}$$

avec $P_{élec}$: Puissance en W ; ε : éclairement en $W.m^{-2}$; S : surface (sous un éclairement ε) en m^2 .

L'avion hybride Éraole

La propulsion électrique par hybridation solaire/bioénergie sera assurée par des cellules photovoltaïques associées à des batteries lithium et de la bioénergie issue de micro-algues afin de fournir toute l'énergie nécessaire aux 50 heures de vol.

Caractéristiques techniques d'Éraole

Dimensions de l'avion

- Envergure : 14 m
- Longueur : 7,5 m
- Hauteur : 1,15 m
- Masse au décollage : 750 kg
- Vitesse moyenne : 110 km/h
- Altitude de vol le jour : 10000 ft (3000 m)

Cellules photovoltaïques

- Nombre de cellules photovoltaïques : 1728
- Surface d'une cellule : 249 cm²
- Masse des cellules : 1 100 g/m²
- Épaisseur : 0,6 mm
- Rendement : 24 %

Moteur électrique

- Puissance au décollage : 17 kW
- Puissance en vol de croisière : 12 kW
- Consommation : 1,5 L/h
- Capacité maximale du réservoir : 280 L

Moteur à biocarburant

L'adaptation d'un moteur thermique utilisant un biocarburant élaboré à partir de micro-algues entraînera une génératrice produisant de l'électricité et permettra un bilan carbone neutre.

La batterie sera sélectionnée afin d'alimenter le moteur électrique dans les phases de décollage et de montée. Sa capacité sera donc réduite.

D'après le site internet du projet : <http://fondationoceanvital.com>