BACCALAURÉAT GÉNÉRAL

SESSION 2016

PHYSIQUE-CHIMIE

Série S

DURÉE DE L'ÉPREUVE : **3 h 30** – COEFFICIENT : **8**

Spécialité

L'usage d'une calculatrice EST autorisé.

Ce sujet ne nécessite pas de feuille de papier millimétré.

Ce sujet comporte trois exercices présentés sur 10 pages numérotées de 1 à 10 y compris celle-ci.

La page d'annexe (page 10) EST À RENDRE AVEC LA COPIE, même si elle n'a pas été complétée.

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

EXERCICE I - DES ÉLECTRONS POUR VOIR LE MONDE (5 points)

Du grec ancien *mikros* signifiant *petit* et *skopein* signifiant *examiner*, la microscopie désigne étymologiquement l'observation de petits objets. Dans cet exercice, on cherche à comparer les performances d'un Microscope Électronique à Balayage (MEB) avec celles d'un microscope optique.

- Principe de base du microscope électronique à balayage (MEB) :

Dans un microscope électronique à balayage, le faisceau incident est un faisceau d'électrons. Les électrons sont d'abord extraits un à un d'un filament métallique chauffé à très haute température. Ils sont ensuite accélérés, sur une distance d_1 = 1,0 m, par un champ électrique $\vec{E}$ uniforme. Les électrons ainsi accélérés sont focalisés et guidés par des bobines magnétiques. Ils ont tous la même vitesse et vont ensuite interagir avec une portion de surface de l'échantillon à analyser.

- Pouvoir de résolution d'un microscope :

Le pouvoir de résolution d'un microscope évalue sa capacité à distinguer deux points A et B.
Toute image obtenue par un microscope résulte de l'interaction entre un faisceau incident et la matière de l'échantillon étudié. Ce faisceau incident est un faisceau lumineux dans le cas d'un microscope optique, un faisceau d'électrons dans le cas du MEB. Le phénomène de diffraction du faisceau joue un rôle dans la limitation du pouvoir de résolution d'un microscope. Avec un microscope optique fonctionnant avec la lumière visible, on considère généralement que l'on peut distinguer deux points A et B si la distance qui les sépare est supérieure à la moitié de la longueur d'onde du rayonnement incident. Tandis qu'avec un MEB, cette distance doit être supérieure à environ 50 fois la longueur d'onde de de Broglie associée au faisceau d'électrons.

Données :

- masse d'un électron : $m = 9{,}1 \times 10^{-31}$ kg ;
- charge électrique élémentaire : $e = 1{,}60 \times 10^{-19}$ C ;
- constante de Planck : $h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J.s ;
- intensité de la pesanteur : $g = 9{,}8$ m.s^{-2} ;
- domaine de fréquences des rayons X : 3×10^{16} Hz $< \nu < 3 \times 10^{19}$ Hz.

1. Observation avec un microscope optique

À l'aide des informations du texte introductif, indiquer l'ordre de grandeur de la dimension des plus petits détails que l'on peut distinguer à l'aide d'un microscope optique.

2. Observation de bactéries à l'aide d'un MEB

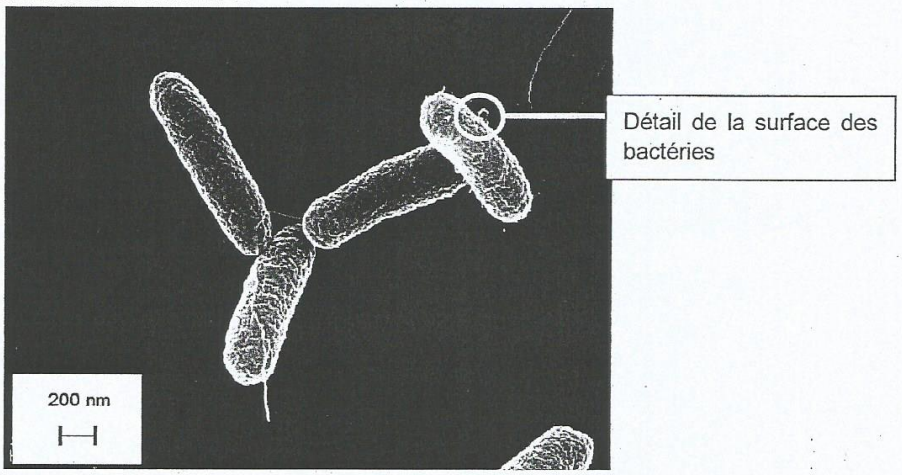


Figure 1. Image de la bactérie *salmonella typhimurium* au MEB.
D'après photo : Volker Brinkmann, Max Planck Institute for Infection Biology, Berlin, Germany

Le corrigé détaillé est sur galilee.ac
Page 2 / 10
Sujet officiel du baccalauréat · Ministère de l'Éducation nationale
Voir le corrigé
scanner ou cliquer

L'image précédente (figure 1) a été obtenue avec un MEB dont le champ électrique a pour valeur $E = 10{,}0\ \text{kV.m}^{-1}$.

2.1. Montrer que, dans les conditions de fonctionnement du MEB, le poids de l'électron est négligeable devant la force électrique.

2.2. Quel phénomène évoqué dans le texte introductif permet d'illustrer le comportement ondulatoire des électrons ?

À l'issue de la phase d'accélération, l'énergie cinétique des électrons à la sortie de l'accélérateur vaut $E_c = 1{,}6 \times 10^{-15}$ J.

2.3. Exprimer la quantité de mouvement p d'un électron en fonction de la longueur d'onde de de Broglie λ qui lui est associée, puis montrer que cette longueur d'onde est donnée par l'expression :

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2\,m\,E_c}}$$

2.4. Comparer la taille des plus petits détails observables avec ce MEB et la taille de ceux observés avec un microscope optique.

2.5. Pourquoi faut-il utiliser un MEB et non un microscope optique afin d'observer les détails de la surface des bactéries *salmonella typhimurium* représentés sur la photo ?

2.6. Indiquer un paramètre expérimental qui peut être modifié afin d'améliorer le pouvoir de résolution du MEB.

Le corrigé détaillé est sur galilee.ac

Page 3 / 10

Sujet officiel du baccalauréat · Ministère de l'Éducation nationale

Voir le corrigé
scanner ou cliquer

EXERCICE II - TOMOGRAPHIE PAR ÉMISSION DE POSITONS (10 points)

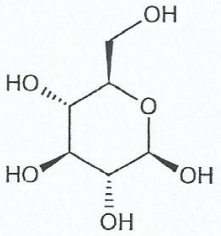
Le ^{18}F-FDG (FluoroDésoxyGlucose) est un dérivé du D-glucose contenant du fluor 18, isotope radioactif du fluor. Injecté à un patient juste avant un examen appelé **PET**-scan (**T**omographie par **É**mission de **P**ositons), le ^{18}F-FDG permet de localiser en direct les zones de l'organisme qui consomment le plus de D-glucose, comme les cellules du cerveau en activité.
Cet exercice se propose d'étudier la synthèse du ^{18}F-FDG à partir de l'isotope 18 du fluor et son utilisation comme marqueur radioactif lors de l'examen PET-scan.
Dans tout ce qui suit, le ^{18}F-FDG sera noté plus simplement FDG.

Données :

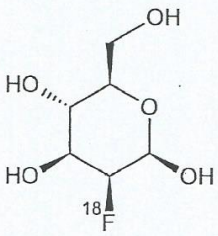
- la valeur de la célérité c de la lumière dans le vide est supposée connue du candidat ;
- charge électrique du proton : $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C ;
- masse du proton : $m_p = 1{,}67 \times 10^{-27}$ kg ;
- 1 eV = $1{,}60 \times 10^{-19}$ J ;
- constante de Planck : h = $6{,}63 \times 10^{-34}$ J.s ;
- constante d'Avogadro : $N_A = 6{,}02 \times 10^{23}$ mol^{-1}.

1. Synthèse du FDG

Le FDG est un dérivé du D-glucose dans lequel l'un des groupes hydroxyle (–OH) est remplacé par un atome de fluor 18 radioactif. La similitude de la structure du FDG et du D-glucose fait que le FDG est absorbé par les cellules biologiques de la même façon que le D-glucose. Cependant, la présence du fluor empêche ces cellules de le dégrader pour produire de l'énergie. Le FDG demeure donc plus longtemps dans les cellules.



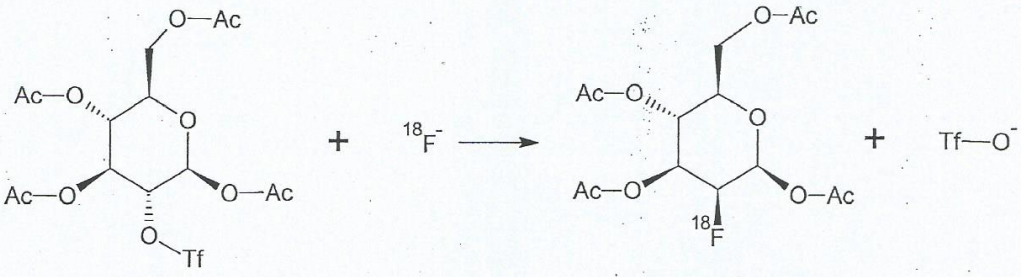
Forme cyclique du D-Glucose



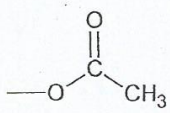
FDG

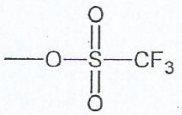
Le FDG est produit au sein même des hôpitaux qui en ont besoin par réaction d'ions fluorure 18 avec un composé A représenté ci-dessous. La réaction se déroule en deux étapes :

Étape 1 :



Composé A — Produit B

où « -O-Ac » représente 

et « -O-Tf » représente 

On obtient ensuite, lors d'une deuxième étape (non décrite ici), le FDG à partir du produit B.

Le corrigé détaillé est sur galilee.ac
Page 4 / 10
Sujet officiel du baccalauréat · Ministère de l'Éducation nationale
Voir le corrigé
scanner ou cliquer

1.1. L'étape 1 est-elle une addition, une élimination ou une substitution ? Justifier.

1.2. À l'aide du formalisme des flèches courbes, matérialiser la formation et la rupture de liaisons de l'étape 1 sur la figure A de L'ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE.

1.3. Sur la figure B de L'ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE, indiquer par un astérisque le(s) atome(s) de carbone asymétrique(s) de la molécule de FDG.

2. Utilisation du FDG pour un diagnostic médical

La tomographie par émission de positons (TEP) est un examen pour le diagnostic médical, reposant sur la détection de positons produits par le FDG. Ce dernier est injecté au patient sous forme d'une solution aqueuse par voie intraveineuse.

Préparation de l'injection :

À l'issue de la synthèse, on obtient une solution aqueuse de FDG de concentration molaire $5{,}0\times10^{-8}$ mol.L^{-1} qu'il faut diluer pour pouvoir l'injecter au patient. Pour cela, on prélève 2,5 mL de solution aqueuse de FDG que l'on introduit dans un flacon. On complète avec une solution saline pour obtenir 15 mL de solution diluée.

2.1. Déterminer la concentration molaire de FDG de la solution contenue dans le flacon.

Pour des raisons de sécurité, l'activité d'un flacon de 15 mL ne doit pas dépasser $A_{max} = 1{,}0\times10^{10}$ Bq. L'activité A d'un flacon de FDG est proportionnelle au nombre N de molécules de FDG qu'il contient. On a $A = \lambda \times N$ où A est exprimée en becquerel (Bq) et $\lambda = 1{,}05\times10^{-4}$ s^{-1}.

2.2. Vérifier que le flacon préparé précédemment respecte les conditions de sécurité.

On souhaite utiliser un flacon de 15 mL ayant une activité A de $7{,}9\times10^{9}$ Bq pour réaliser un examen sur plusieurs patients. Le protocole médical impose qu'on injecte à chaque patient une quantité de FDG dépendant de sa masse corporelle (exprimée en kg). La dose recommandée pour l'examen envisagé est de 3,7 MBq.kg^{-1}.

2.3. Estimer le nombre de patients adultes à qui l'on pourra injecter la dose recommandée avec un flacon.
Le candidat pourra être amené à estimer la valeur d'une donnée manquante.

3. Production des ions $^{18}F^-$ au moyen d'un cyclotron.

Le fluor 18, ^{18}F, nécessaire pour synthétiser le FDG doit être produit artificiellement à l'hôpital. Pour cela, on bombarde au moyen d'un cyclotron, des noyaux d'oxygène 18, ^{18}O, par des protons dont l'énergie cinétique est de 16 MeV.

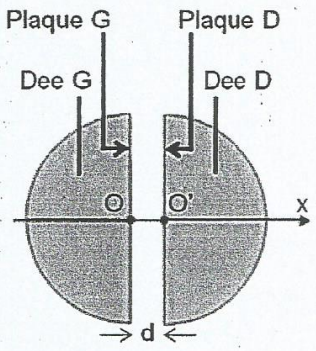


Figure 1. Schéma du cyclotron vu de dessus.

Le cyclotron est un appareil constitué de deux demi-cylindres creux appelés dees. Entre les plaques G et D des dees règne un champ électrique $\vec{E}$ uniforme perpendiculaire à ces plaques.

On fait l'hypothèse que le proton n'est pas relativiste et on admettra que son poids est négligeable devant la force électrique.

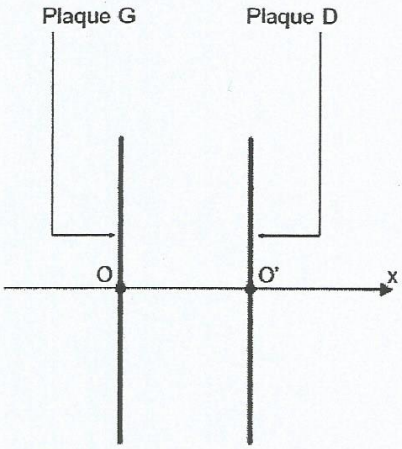
Les protons placés au point O sont accélérés jusqu'au point O' où ils pénètrent dans le dee D.

L'objectif de cette partie est d'étudier le fonctionnement du cyclotron.

Le corrigé détaillé est sur galilee.ac
Page 5 / 10
Sujet officiel du baccalauréat · Ministère de l'Éducation nationale
Voir le corrigé scanner ou cliquer

Données :

- l'intensité E du champ électrique entre les deux plaques D et G, aux bornes desquelles est appliquée une tension U, est donnée par $E = \frac{|U|}{d}$, où d est la distance entre les plaques ; E s'exprime en $V.m^{-1}$, U en volt (V) et d en mètre (m) ;
- distance d entre les plaques D et G : $d = 2$ mm.



À $t = 0$, un proton est introduit dans le cyclotron au point O sans vitesse initiale. La tension accélératrice vaut $U = 30$ kV. On se place sur l'axe Ox horizontal, centré sur O et dirigé vers la droite.

3.1. Sachant que le proton doit être accéléré, compléter le schéma de L'ANNEXE A RENDRE AVEC LA COPIE en y faisant figurer, sans souci d'échelle :

- le vecteur $\vec{F}$ modélisant la force électrique exercée sur le proton en O ;
- un vecteur champ électrique $\vec{E}$ entre les plaques D et G.

Justifier.

3.2. Établir l'expression du vecteur accélération $\vec{a}$ du proton entre O et O' en fonction de $\vec{E}$.

3.3. Montrer que l'abscisse x du proton sur son trajet OO' est donnée par la relation $x(t) = \frac{e|U|}{2 m_p d} t^2$.

3.4. En déduire la valeur de la durée Δt_1 mise par le proton pour aller de O à O'.

Dans le dee D, le proton, soumis à un champ magnétique uniforme d'intensité $B = 1{,}6$ T, a un mouvement circulaire uniforme jusqu'au point A'. Lorsque le proton arrive au point A', le sens du champ électrique $\vec{E}$ est inversé. Le proton subit alors une nouvelle accélération jusqu'au point A.

Le processus d'accélération et de demi-tour successifs se répète un grand nombre de fois jusqu'à ce que le proton sorte de l'accélérateur avec la vitesse souhaitée pour bombarder la cible.
Une dizaine de microsecondes est nécessaire pour atteindre une telle vitesse.

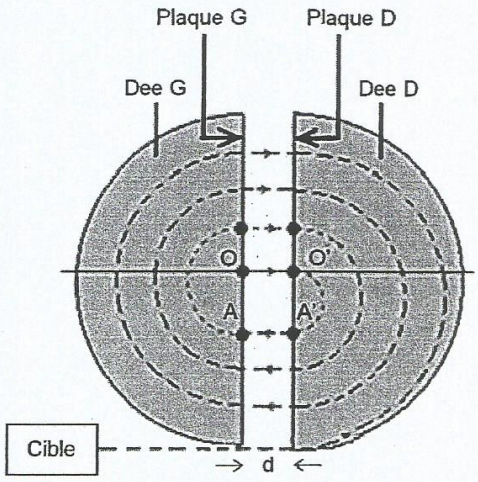


Figure 2. Principe de fonctionnement du cyclotron.

3.5. Le mouvement du proton entre O' et A' est circulaire uniforme. En déduire la relation entre la vitesse v du proton, le rayon R de sa trajectoire et la durée Δt_2 de ce premier demi-tour.

Le corrigé détaillé est sur galilee.ac
Page 6 / 10
Sujet officiel du baccalauréat · Ministère de l'Éducation nationale
Voir le corrigé
scanner ou cliquer

Le rayon R de la trajectoire d'un proton dans un dee est donné par la relation $R = \frac{m_p v}{e B}$, où v est la vitesse du proton.

3.6. Montrer à partir des résultats des questions précédentes que la durée Δt_2 peut s'exprimer sous la forme : $\Delta t_2 = \frac{\pi m_p}{e B}$. En déduire que tous les demi-tours suivants ont la même durée.

3.7. En considérant que la durée Δt_1 d'une phase d'accélération est de l'ordre de 2 ns, montrer que la durée Δt_2 d'un demi-tour est environ dix fois plus grande.
Par la suite, on considèrera que la durée Δt_1 est négligeable devant la durée Δt_2.

La variation d'énergie cinétique du proton à chaque passage d'un dee à l'autre est égale au travail W de la force électrique $\vec{F}$ exercée sur le proton lors de ce passage.

3.8. Évaluer le nombre de tours que doit faire le proton pour qu'il atteigne, à la sortie du cyclotron, une énergie de 16 MeV. Évaluer la durée pour que le proton sorte du cyclotron et comparer la valeur obtenue avec celle du texte décrivant le principe de fonctionnement du cyclotron.

Le corrigé détaillé est sur galilee.ac
Page 7 / 10
Sujet officiel du baccalauréat · Ministère de l'Éducation nationale
Voir le corrigé
scanner ou cliquer

EXERCICE III - UN TRÉSOR DANS NOS ÉGOUTS ? (5 points)

Les eaux usées sont traitées dans les stations d'épuration et les boues d'épuration recueillies en sortie de stations contiennent des métaux précieux. Les boues d'épuration produites en une année par une ville d'un million d'habitants contiendraient pour 13 millions de dollars de métaux ! Des chercheurs proposent un procédé d'extraction des métaux précieux tels que l'or.
L'objectif de cet exercice est d'en étudier une des étapes, celle de la purification de l'or par électrolyse.

Système d'épuration collectif
L'Équivalent-habitant (Eh) est une unité de mesure permettant d'évaluer la capacité d'une station d'épuration. Un Équivalent-habitant génère par jour un rejet moyen de 150 L d'eau et d'environ 60 g de boue. Actuellement la France compte près de 20 000 stations d'épuration, ce qui correspond à une capacité totale d'environ 79 millions d'Équivalents-habitants (Eh).

D'après le site du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie

Affinage électrolytique à anode soluble de l'or
Les métaux précieux, comme l'or, récupérés dans les boues d'épuration contiennent des impuretés. L'affinage consiste à purifier ce métal par électrolyse. Par cette technique, on peut obtenir de l'or à 99,99 % de pureté (or pur) selon un procédé dit à « anode soluble » (figure 1).

L'électrolyte est une solution qui contient notamment des ions or Au^{3+}. L'anode est constituée de l'or à purifier, l'or pur se dépose sur la cathode elle-même en or pur. L'électrolyse s'effectue sous une tension de 0,5 à 0,7 V, avec une valeur de densité de courant J de l'ordre de 600 $A.m^{-2}$.

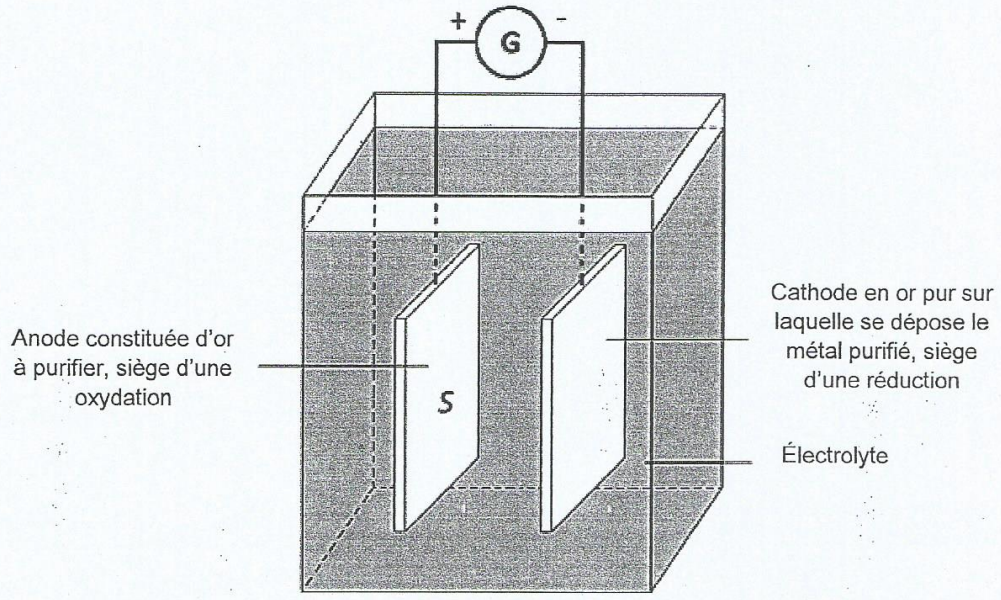


Figure1. Schéma simplifié d'un dispositif d'affinage électrolytique par anode soluble.

D'après techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques & Encyclopédie de sécurité et de santé au travail & Universalis 2015

On admettra que seules les surfaces des électrodes, en face l'une de l'autre, sont actives et que l'épaisseur de l'anode est négligeable devant les dimensions de sa surface.

Le corrigé détaillé est sur galilee.ac
Page 8 / 10
Sujet officiel du baccalauréat · Ministère de l'Éducation nationale
Voir le corrigé scanner ou cliquer

Données :

- masse molaire atomique de l'or : $M(\text{Au}) = 197\ \text{g.mol}^{-1}$;
- constante de Faraday (produit de la charge élémentaire par la constante d'Avogadro) : $F = 9{,}65 \times 10^4\ \text{C.mol}^{-1}$;
- couple redox : $Au^{3+}(aq)$ / Au(s) ;
- une tonne de boues d'épuration contient 0,3 g d'or à purifier ;
- l'intensité I d'un courant électrique peut s'exprimer en fonction de la charge électrique Q échangée au cours de la réaction pendant une durée Δt :

$$I = \frac{Q}{\Delta t}$$

où I s'exprime en ampère (A), Q en coulomb (C) et Δt en seconde (s) ;

- la densité de courant J est donnée par la relation : $J = \frac{I}{S}$, avec I intensité du courant électrique traversant la surface active S.

Questions préliminaires

1. Écrire l'équation de la réaction se produisant à l'anode de l'électrolyseur et celle se produisant à la cathode.
2. Estimer la masse de boue moyenne produite par un Équivalent-habitant en France en un an.
3. Établir la relation donnant la quantité de matière d'électrons échangés pendant la durée Δt en fonction de l'intensité du courant I , de la constante de Faraday F et de Δt.

Problème

On fait l'hypothèse que tout l'or à purifier extrait des boues en un an par le système d'épuration collectif français a été coulé sous la forme d'une unique anode ayant la forme d'une plaque rectangulaire. Cette plaque a été transmise à une entreprise de métallurgie pour affinage électrolytique.
Si l'or à purifier renferme 98,5% d'or pur et si l'affinage complet de l'anode nécessite une durée d'environ deux semaines, quel est l'ordre de grandeur de la surface de cette plaque ?

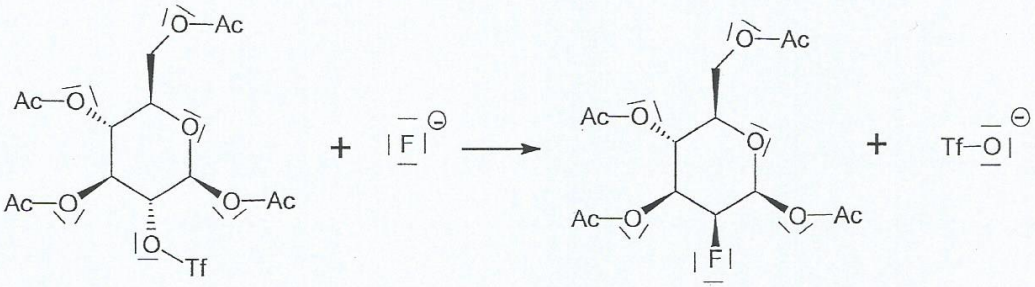
Le candidat est invité à prendre des initiatives et à présenter la démarche suivie, même si elle n'a pas abouti. La démarche est évaluée et nécessite d'être correctement présentée.

Le corrigé détaillé est sur galilee.ac
Page 9 / 10
Sujet officiel du baccalauréat · Ministère de l'Éducation nationale
Voir le corrigé scanner ou cliquer

ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE

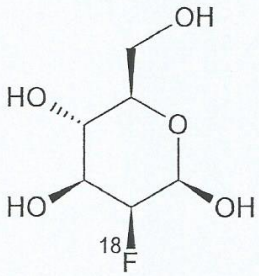
ANNEXE DE L'EXERCICE II

Question 1.2.
Figure A :

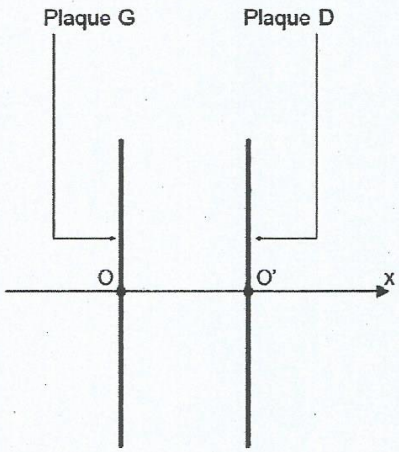


Composé A — Produit B

Question 1.3.
Figure B :



Question 3.1.



Le corrigé détaillé est sur galilee.ac
Page 10 / 10
Sujet officiel du baccalauréat · Ministère de l'Éducation nationale
Voir le corrigé
scanner ou cliquer