

## Exercice 1 : Le polonium 210

(6 points)

A propos du polonium 210, on peut trouver dans l'encyclopédie WIKIPEDIA le texte suivant :  
« C'est le premier élément découvert par Pierre et Marie Curie en 1889 dans leurs recherches sur la radioactivité [...]. Ce n'est que plus tard qu'ils découvrirent le radium. Le mot polonium a été choisi en hommage aux origines polonaises de Marie Sklodowska-Curie. [...] C'est un émetteur de rayonnement alpha. Le  $^{210}\text{Po}$  a une demi-vie de 138 jours. [...] Il se désintègre en émettant des particules alpha dont l'énergie est de 5,3 millions d'électrons volts. [...] L'exposition aux rayonnements ionisants augmente le risque de cancer, d'anomalies génétiques, et pourrait avoir de nombreuses conséquences sanitaires autres que les cancers. Le polonium 210 présente une forte activité [...].  
Un seul gramme de polonium 210 présente une activité de 166 000 milliards de becquerels et par conséquent émet 166 000 milliards de particules alpha par seconde. »

### Données :

Quelques éléments :  $_{81}\text{Tl}$  ;  $_{82}\text{Pb}$  ;  $_{83}\text{Bi}$  ;  $_{85}\text{At}$  ;  $_{86}\text{Rn}$

Masses de quelques noyaux ou particules :  $m({}_4^9\text{Be}) = 9,00998 \text{ u}$  ;  $m({}_2^4\text{He}) = 4,00151 \text{ u}$  ;  
 $m({}_6^{12}\text{C}) = 11,99671 \text{ u}$  ;  $m({}_0^1\text{n}) = 1,00866 \text{ u}$ .

Masse molaire atomique :  $M({}^{210}\text{Po}) = 210 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$

### Quelques constantes et unités :

Célérité de la lumière dans le vide :  $c = 2,99792 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Nombre d'Avogadro :  $N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Unité de masse atomique :  $1 \text{ u} = 1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg}$

- 1 Indiquer la composition d'un noyau de polonium 210 ( ${}_{84}^{210}\text{Po}$ ).
- 2 Ecrire l'équation de désintégration d'un noyau  ${}_{84}^{210}\text{Po}$  en précisant les lois de conservation utilisées (on supposera que le noyau fils formé est à l'état fondamental).
- 3 L'élément polonium possède entre autres isotopes le noyau de  ${}_{84}^{212}\text{Po}$ .  
Définir la notion des noyaux isotopiques.
- 4 Définir le temps de demi-vie,  $t_{1/2}$ , d'un noyau radioactif.
- 5
  - 5.1 Enoncer la loi de décroissance radioactive, en précisant la signification de chacun des termes.
  - 5.2 Sachant que l'activité  $A(t)$  d'une source radioactive vérifie  $A(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$ , montrer que l'activité  $A(t)$  d'une source radioactive est proportionnelle au nombre  $N(t)$  de noyaux radioactifs présents dans cette source.
  - 5.3 Ecrire la relation entre la constante radioactive et le temps de demi-vie puis calculer la valeur de la constante radioactive en  $\text{s}^{-1}$  du  ${}_{84}^{210}\text{Po}$ .

## 6

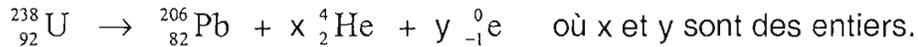
**6.1** Calculer le nombre  $N$  de noyaux présents dans une masse  $m = 1,00$  g de polonium 210.

**6.2** Justifier, par un calcul, la phrase « un seul gramme de polonium 210 présente une activité de 166 000 milliards de becquerels ».

**7** Le polonium 210 est l'un des produits issus des désintégrations successives de l'uranium 238 lesquelles conduisent à l'isotope stable  $^{206}_{82}\text{Pb}$  du plomb.

Ces désintégrations sont de type  $\alpha$  et  $\beta^-$ .

On peut assimiler l'ensemble à une réaction unique :



Déterminer le nombre  $x$  de désintégrations  $\alpha$  et le nombre  $y$  de désintégrations  $\beta^-$ .

Pour effectuer ce calcul, la connaissance de l'ordre des désintégrations n'est pas nécessaire.

**8** Emetteur  $\alpha$ , le polonium a de nombreuses utilisations.

Il a été employé comme source de rayonnement  $\alpha$  par Irène et Frédéric Joliot-Curie dans les expériences qui ont conduit à la découverte de la radioactivité artificielle en 1934.

Associé au béryllium, il constitue une source de neutrons produits par la réaction nucléaire :



**8.1** Exprimer l'énergie de cette réaction,  $E$ , à partir des données.

**8.2** Calculer sa valeur en joules.

**8.3** Commenter le signe de la valeur obtenue pour  $E$ .

## EXERCICE II. NUCLÉAIRE AU SERVICE DE LA MÉDECINE (5,5 points)

La médecine nucléaire désigne l'ensemble des applications où des substances radioactives sont associées au diagnostic et à la thérapie. Depuis les années 1930, la médecine nucléaire progresse grâce à la découverte et à la maîtrise de nouveaux isotopes.

La radiothérapie vise à administrer un radiopharmaceutique dont les rayonnements ionisants sont destinés à traiter un organe cible dans un but curatif ou palliatif. Ainsi on utilise du rhénium 186 dans le but de soulager la maladie rhumatoïde et du phosphore 32 pour réduire la production excessive de globules rouges dans la moelle osseuse.

D'après le site : <http://www.asn.fr>

La première partie de cet exercice traite de l'utilisation du rhénium 186 et la seconde partie de l'utilisation du phosphore 32. On s'intéresse à l'aspect physique des phénomènes, les aspects biologiques ne sont pas pris en compte.

### Données :

- temps de demi-vie du rhénium 186 :  $t_{1/2}({}^{186}_{2}\text{Re}) = 3,7 \text{ j}$  (jours) ;
- constantes radioactives :  $\lambda({}^{186}_{2}\text{Re}) = 2,2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  ;  $\lambda({}^{32}_{15}\text{P}) = 5,6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  ;
- masse molaire du rhénium 186 :  $M({}^{186}_{2}\text{Re}) = 186 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$  ;
- masses de quelques noyaux et particules :  
 $m({}^{32}_{15}\text{P}) = 5,30803 \times 10^{-26} \text{ kg}$  ;  $m({}^{32}_{16}\text{S}) = 5,30763 \times 10^{-26} \text{ kg}$  ;  $m({}^0_1\text{e}) = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$  ;
- célérité de la lumière dans le vide :  $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ;
- constante d'Avogadro :  $N_A = 6,0 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  ;
- électron-volt :  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ .

### 1. Injection intra-articulaire d'une solution contenant du rhénium 186

1.1. Le rhénium 186 ( ${}^{186}_{2}\text{Re}$ ) est un noyau radioactif  $\beta^-$ .

Sur le diagramme  $(N, Z)$  de la **figure 3** ci-contre où  $N$  représente le nombre de neutrons et  $Z$  le nombre de protons, la courbe tracée permet de situer la vallée de stabilité des isotopes. Le point représentatif du noyau de rhénium 186 est placé au-dessus de cette courbe.

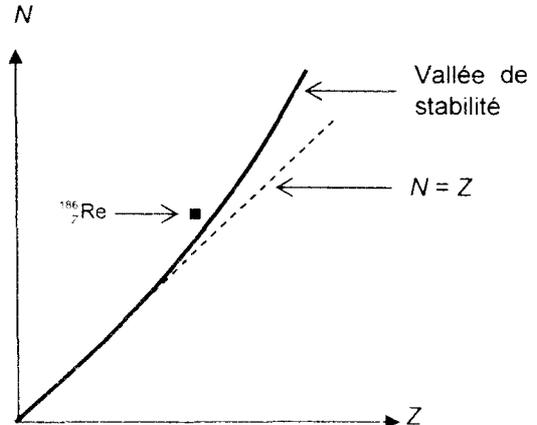


Figure 3. Diagramme  $(N, Z)$

1.1.1. Dédurre de ce diagramme si cet isotope radioactif possède un excès de neutron(s) ou un excès de proton(s) par rapport à un isotope stable du même élément.

1.1.2. Quel nom porte la particule émise au cours d'une désintégration  $\beta^-$  ?

1.1.3. Écrire l'équation de la désintégration du noyau de rhénium 186 noté ( ${}^{186}_{2}\text{Re}$ ) sachant que le noyau fils obtenu correspond à un isotope de l'osmium noté ( ${}^A_{76}\text{Os}$ ). En énonçant les lois utilisées, déterminer les valeurs de  $A$  et de  $Z$ .

On admet que le noyau fils obtenu lors de cette transformation n'est pas dans un état excité.

1.2. Le produit injectable se présente sous la forme d'une solution contenue dans un flacon de volume  $V_{\text{flacon}} = 10 \text{ mL}$  ayant une activité  $A_0 = 3700 \text{ MBq}$  à la date de calibration, c'est-à-dire à la sortie du laboratoire pharmaceutique. Pourquoi est-il précisé "à la date de calibration" en plus de l'activité ?

1.3. Calcul du volume de la solution à injecter

1.3.1. L'activité  $A(t)$  d'un échantillon radioactif peut s'exprimer par la relation suivante  $A(t) = \lambda \cdot N(t)$  où  $N(t)$  représente le nombre de noyaux radioactifs à la date  $t$  et  $\lambda$  la constante radioactive. Calculer la masse  $m$  de rhénium 186 contenu dans le flacon de volume  $V_{\text{flacon}}$  à la date de calibration.

1.3.2. En s'aidant des données, quelle est la valeur de l'activité  $A_1$  de l'échantillon contenu dans le flacon au bout de 3,7 jours après la date de calibration ?

1.3.3. L'activité de l'échantillon à injecter dans l'articulation d'une épaule est  $A_{\text{thérapie}} = 70 \text{ MBq}$ . En supposant que l'injection a lieu 3,7 jours après la date de calibration, calculer le volume  $V$  de la solution à injecter dans l'épaule.

## 2. Injection intraveineuse d'une solution contenant du phosphore 32

Carte d'identité du phosphore 32 :

nom de l'isotope	Phosphore 32
symbole	${}^{32}_{15}\text{P}$
type de radioactivité	$\beta^-$
énergie du rayonnement émis	1,7 MeV
équation de la désintégration	${}^{32}_{15}\text{P} \rightarrow {}^{32}_{16}\text{S} + {}^0_{-1}\text{e}$
demi-vie	14 jours

L'injection en voie veineuse d'une solution contenant du phosphore 32 radioactif permet dans certains cas de traiter une production excessive de globules rouges au niveau des cellules de la moelle osseuse.

2.1. Donner la composition du noyau de phosphore 32.

2.2. À l'aide des masses données en début d'exercice et de la carte d'identité du phosphore 32, vérifier par un calcul la valeur  $E$  de l'énergie du rayonnement émis par la désintégration du phosphore 32.

2.3. Pour la très grande majorité d'entre eux, les noyaux fils obtenus lors de cette transformation ne sont pas dans un état excité. À quel type de rayonnement particulièrement pénétrant le patient n'est-il pas exposé ?

2.4. Rappeler la loi de décroissance du nombre  $N(t)$  de noyaux radioactifs d'un échantillon en fonction de  $\lambda$  et  $N_0$  (nombre de noyaux radioactifs à la date  $t = 0$ ).

2.5. Définir le temps de demi-vie radioactive  $t_{1/2}$  et établir la relation qui existe entre la demi-vie et la constante de désintégration radioactive  $\lambda$ .

2.6. Vérifier, par un calcul, la valeur approchée du temps de demi-vie proposée dans la carte d'identité ci-dessus.

## EXERCICE II : LA TRANSMUTATION POUR ÉLIMINER LES DÉCHETS NUCLÉAIRES ? (5 points)

La transmutation est la transformation d'un noyau en un autre par une réaction nucléaire induite par des particules avec lesquelles on le bombarde. Appliquée au traitement des déchets nucléaires, elle consiste à utiliser ce type de réaction pour transformer les isotopes radioactifs à vie longue en isotopes à vie nettement plus courte voire stables, ou encore en combustible nucléaire, en vue de réduire le nombre de radiotoxiques à long terme. [...]

De par l'absence de charge électrique, le neutron est de loin la particule la plus utilisée. Il est disponible en grande quantité dans les réacteurs nucléaires où il est utilisé pour générer des réactions de fission et produire ainsi de l'énergie et où d'ailleurs il induit en permanence des transmutations, la plupart non recherchées. La meilleure voie de recyclage des déchets ne serait-elle pas de les réinjecter dans l'installation qui les a créés ?

Lorsqu'un neutron entre en collision avec un noyau, il peut rebondir sur le noyau ou bien pénétrer dans celui-ci. Dans le second cas, le noyau, en absorbant le neutron acquiert un excès d'énergie qu'il va libérer de différentes manières :

- en éjectant des particules (un neutron par exemple) et en émettant éventuellement un rayonnement ;
- en émettant seulement un rayonnement ; on parle dans ce cas de capture puisque le neutron reste captif du noyau ;
- en se scindant en deux noyaux de taille plus petite et en émettant deux à trois neutrons ; on parle alors de réaction de fission durant laquelle une importante quantité d'énergie est libérée.

La transmutation d'un radionucléide peut se réaliser soit par capture d'un neutron, soit par fission. [...]

*D'après document CEA.*

Données :

nom	neptunium	plutonium	américium	curium	berkélium
symbole	Np	Pu	Am	Cm	Bk
numéro atomique	93	94	95	96	97

Représentation de quelques particules :

nom	neutron	proton	électron	positon	noyau d'hélium
symbole	${}^1_0\text{n}$	${}^1_1\text{p}$	${}^0_{-1}\text{e}$	${}^0_1\text{e}$	${}^4_2\text{He}$

1 an = 365 jours.

### 1. Questions sur le texte

1.1. À la ligne 3 du texte, il est fait allusion au terme "isotopes radioactifs".

1.1.1. Que signifie l'expression "noyaux isotopes" ?

1.2.2. Donner la définition de "noyau radioactif".

1.2. Le texte parle de "vie longue" ou de "vie nettement plus courte" (lignes 3 et 4). Remplacer le mot "vie" par une expression plus appropriée.

1.3. On parle de "réaction de fission" (lignes 17 et 18). Donner la définition de "réaction de fission".

### 2. Étude d'un exemple : l'américium 241

Pour répondre aux questions suivantes, on s'aidera du tableau fourni.

On y étudie un mécanisme simplifié de la disparition de l'américium 241.

2.1. Dans un réacteur à neutrons lents, l'américium 241 ( ${}^{241}_{95}\text{Am}$ ) peut capter un neutron. Il se transforme en un nouveau noyau que nous noterons  $X_1$ .

2.1.1. Donner la composition du noyau d'américium 241.

2.1.2. Énoncer les lois de conservation qui permettent d'écrire l'équation d'une réaction nucléaire.

2.1.3. Écrire l'équation de la réaction de capture d'un neutron par un noyau d'américium 241. Identifier le noyau  $X_1$  obtenu.

2.2. Le noyau  $X_1$  est radioactif, émetteur  $\beta^-$ . Il apparaît un noyau  $X_2$  et une particule.

2.2.1. Quelle est la particule émise lors d'une désintégration  $\beta^-$  ?

2.2.2. Écrire l'équation de la réaction nucléaire correspondante. Identifier le noyau  $X_2$ .

2.3. La quasi-totalité des noyaux  $X_2$  obtenus subit une désintégration  $\alpha$ . Un noyau  $X_3$  est produit ainsi qu'une particule.

2.3.1. Quelle est la particule émise lors d'une désintégration  $\alpha$  ?

2.3.2. Identifier le noyau  $X_3$ . Justifier la réponse.

### 3. Intérêt du traitement des déchets nucléaires

La demi-vie radioactive ( $t_{1/2}$ ) de l'américium 241 vaut 432 ans ; celle du noyau  $X_1$  vaut 16 heures et celle du noyau  $X_2$  vaut 163 jours.

La loi de décroissance radioactive s'écrit :  $N = N_0 \cdot e^{-\frac{(\ln 2)t}{t_{1/2}}}$ .

3.1. Dans cette expression, donner la signification de  $N_0$  et  $N$ .

3.2. On considère un échantillon d'américium et un échantillon d'élément  $X_2$  contenant tous deux à un instant considéré comme origine des temps  $1,0 \times 10^{10}$  noyaux. Calculer le nombre de noyaux de chaque élément présents 10 ans plus tard dans les deux échantillons.

3.3. Conclure sur l'intérêt de cette méthode d'élimination des déchets nucléaires.

3.4. Justifier la phrase suivante en quelques mots : "Dans un échantillon issu d'américium 241, le nombre de noyaux  $X_1$  est toujours négligeable". On utilisera les valeurs des demi-vies radioactives.