Combustible MOX pour limiter les déchets radioactifs

Bac 2025 Amérique du Nord Jour 2 · Exercice 2 **5 points** **Durée conseillée 53 min**

Q.1 Donner la composition du noyau d'uranium 235.

Le noyau s'écrit $^{235}_{92}\mathrm{U}$: $Z = 92$ protons et $A = 235$ nucléons.

Nombre de neutrons : $N = A - Z = 235 - 92 = 143$.

Le noyau d'uranium 235 contient **92 protons** et **143 neutrons**.

PIÈGE
Annoncer 235 neutrons : 235 est le nombre de nucléons (protons et neutrons ensemble). Les électrons n'appartiennent pas au noyau, inutile de les citer.

Q.2 Indiquer, en justifiant, le ou les noyaux radioactifs isotopes de l'uranium 235 parmi ceux du tableau 1.

Deux noyaux isotopes ont le même numéro atomique Z (même élément) mais des nombres de nucléons A différents.

Dans le tableau 1, un seul autre noyau a $Z = 92$: l'uranium 238, $^{238}_{92}\mathrm{U}$.

Le seul isotope de l'uranium 235 dans le tableau est l'**uranium 238**.

PIÈGE
Citer le neptunium 235 ou le plutonium 235 : ils ont le même A que l'uranium 235, mais $Z = 93$ et $Z = 94$. Ce sont d'autres éléments.

Q.3 Expliquer pourquoi l'uranium 238 est toujours présent à l'état naturel depuis l'origine de la Terre, contrairement au plutonium 239.

Données utiles âge de la Terre : $4{,}5 \times 10^9$ ans ; $t_{1/2}(^{238}\mathrm{U}) = 4{,}5 \times 10^9$ ans ; $t_{1/2}(^{239}\mathrm{Pu}) = 24\,110$ ans

Au bout d'une durée $t_{1/2}$, la moitié des noyaux radioactifs initialement présents s'est désintégrée.

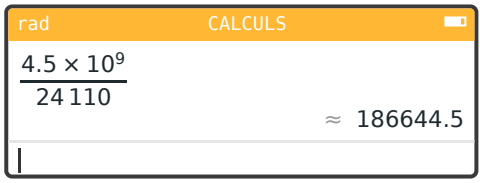
Uranium 238 : sa demi-vie est égale à l'âge de la Terre. Une seule demi-vie s'est écoulée : il reste encore environ la moitié des noyaux présents à l'origine.

Plutonium 239 : l'âge de la Terre représente $\dfrac{4{,}5 \times 10^9}{24\,110} \approx 1{,}9 \times 10^5$ demi-vies. Le nombre de noyaux a été divisé par 2 près de $190\,000$ fois de suite : il n'en reste plus.

La demi-vie de l'uranium 238 est de l'ordre de l'âge de la Terre, celle du plutonium 239 est environ $190\,000$ fois plus courte : le plutonium 239 d'origine a entièrement disparu.

MÉTHODE
Pour juger si un noyau radioactif subsiste, comparer la durée écoulée à sa demi-vie. Au-delà d'une vingtaine de demi-vies, il reste moins d'un millionième de la population initiale.

À LA CALCULATRICE



Q.4 Expliquer en quoi la fission de l'uranium 235 peut être qualifiée de réaction en chaîne.

La fission d'un noyau d'uranium 235 est provoquée par **un** neutron et en libère **trois**.

Chacun de ces neutrons peut à son tour percuter un autre noyau d'uranium 235 et provoquer une nouvelle fission, qui libère encore trois neutrons, et ainsi de suite.

La réaction produit elle-même les neutrons qui la déclenchent : elle s'entretient et se propage d'un noyau à l'autre, c'est une réaction en chaîne.

COMPRENDRE
Le neutron figure des deux côtés de l'équation, mais on ne le simplifie pas : celui de gauche déclenche la fission, les trois de droite sont produits et disponibles pour d'autres noyaux.

Q.5 Écrire, à l'aide du diagramme N/Z, les trois équations des réactions successives menant de l'uranium 238 au plutonium 239, puis nommer la particule émise lors d'une désintégration β^-.

Chaque équation respecte la conservation du nombre de nucléons A et du nombre de charge Z.

Capture d'un neutron par l'uranium 238 :

$$^{238}_{92}\mathrm{U} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow ^{239}_{92}\mathrm{U}$$

D'après le document 1, l'uranium 239 est radioactif β^- :

$$^{239}_{92}\mathrm{U} \longrightarrow ^{239}_{93}\mathrm{Np} + ^{0}_{-1}\mathrm{e}$$

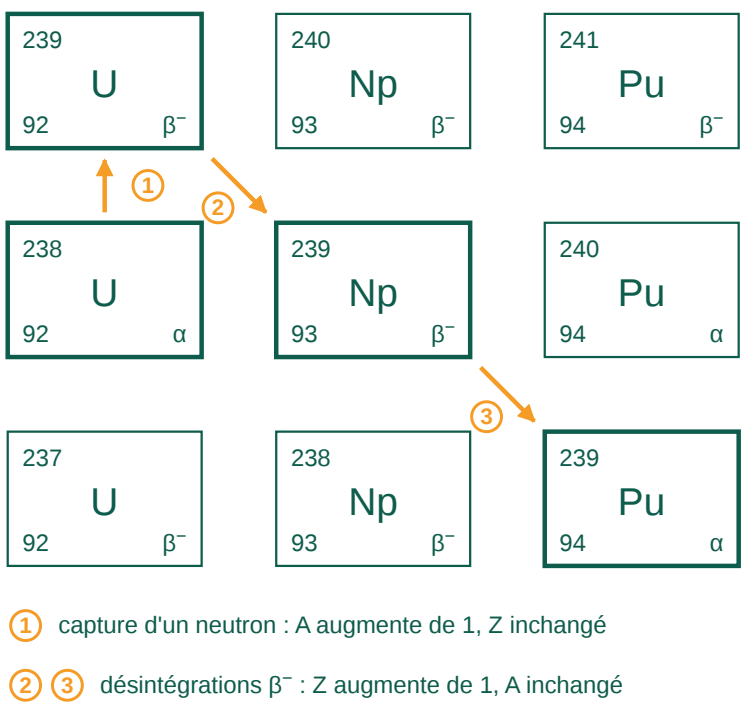
Le neptunium 239 est lui aussi radioactif β^- :

$$^{239}_{93}\mathrm{Np} \longrightarrow ^{239}_{94}\mathrm{Pu} + ^{0}_{-1}\mathrm{e}$$

La particule émise lors d'une désintégration β^- est un **électron**, noté $^{0}_{-1}\mathrm{e}$.

PIÈGE
Écrire $^{0}_{1}\mathrm{e}$: c'est un positon, émis en radioactivité β^+. On obtiendrait alors $Z = 91$ au lieu de $Z = 93$ pour le noyau fils.

MÉTHODE
Écrire d'abord la particule émise, puis en déduire le noyau fils par conservation : en β^-, A ne change pas et Z augmente de 1. Le nom de l'élément se lit ensuite dans le diagramme.



Q.5 · Document 1 du sujet, avec le chemin de l'uranium 238 au plutonium 239

Q.6 Indiquer à quel type de radioactivité correspond la désintégration du plutonium 239.

La particule émise est un noyau d'hélium 4, $^{4}_{2}\mathrm{He}$, appelé particule α.

La désintégration du plutonium 239 est une **radioactivité α**.

COMPRENDRE
Le document 1 le confirme : la case du plutonium 239 porte la mention α. Le noyau perd 4 nucléons dont 2 protons, d'où l'uranium 235.

Q.7 Établir l'expression de la constante radioactive λ en fonction de $t_{1/2}$. En déduire que, pour le plutonium 239, $\lambda = 9{,}1 \times 10^{-13}\ \text{s}^{-1}$.

Données utiles $N(t) = N_0\, e^{-\lambda t}$; $t_{1/2}(^{239}\text{Pu}) = 24\,110$ ans

Par définition de la demi-vie : $N(t_{1/2}) = \dfrac{N_0}{2}$.

Avec la loi de décroissance : $N_0\, e^{-\lambda t_{1/2}} = \dfrac{N_0}{2}$, soit $e^{-\lambda t_{1/2}} = \dfrac{1}{2}$.

On prend le logarithme népérien : $-\lambda\, t_{1/2} = \ln\dfrac{1}{2} = -\ln 2$, d'où

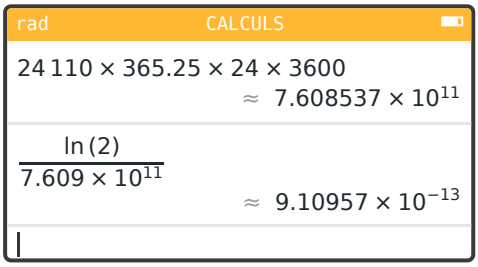
$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$

Conversion : $t_{1/2} = 24\,110 \times 365{,}25 \times 24 \times 3600 = 7{,}609 \times 10^{11}$ s.

$$\lambda = \frac{\ln 2}{7{,}609 \times 10^{11}} = 9{,}1 \times 10^{-13}\ \text{s}^{-1}$$

$\lambda = \dfrac{\ln 2}{t_{1/2}} = 9{,}1 \times 10^{-13}\ \text{s}^{-1}$: c'est la valeur attendue.

À LA CALCULATRICE



PIÈGE

Laisser la demi-vie en années : on obtient $2{,}9 \times 10^{-5}$, qui est en an^{-1}. L'énoncé attend des s^{-1}, il faut convertir $t_{1/2}$ en secondes.

COMPRENDRE

Le résultat est donné avec deux chiffres significatifs, comme la valeur annoncée par l'énoncé. Prendre 365 jours par an au lieu de 365,25 ne change pas ces deux chiffres.

Q.8 Montrer, à l'aide du tableau 2, l'intérêt du MOX, en analysant comment sont gérés actuellement les déchets de la catégorie à laquelle appartient le plutonium 239.

Données utiles $A = \lambda N$; $\lambda = 9{,}1 \times 10^{-13}\ \text{s}^{-1}$ (Q.7) ; $M = 239\ \text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$; $N_A = 6{,}02 \times 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$; $t_{1/2} = 24\,110$ ans

Pour classer le plutonium 239 dans le tableau 2, il faut sa demi-vie et son activité massique, c'est-à-dire l'activité d'un échantillon de masse $m = 1$ g.

Demi-vie : $24\,110\ \text{ans} > 31\ \text{ans}$, donc **vie longue**.

Nombre de noyaux dans 1 g : $N = \dfrac{m}{M} N_A = \dfrac{1}{239} \times 6{,}02 \times 10^{23} = 2{,}52 \times 10^{21}$ noyaux.

Activité : $A = \lambda N = 9{,}1 \times 10^{-13} \times 2{,}52 \times 10^{21} = 2{,}3 \times 10^{9}\ \text{Bq}$.

L'activité massique vaut $2{,}3 \times 10^{9}\ \text{Bq} \cdot \text{g}^{-1} > 10^{6}\ \text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$: **haute activité** (HA).

D'après le tableau 2, il n'existe pas encore de filière opérationnelle pour les déchets de haute activité à vie longue : le stockage profond est seulement à l'étude.

Le plutonium 239 ($2{,}3 \times 10^{9}\ \text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$, vie longue) est un déchet sans solution de stockage actuelle. Le réutiliser comme combustible dans le MOX évite d'avoir à le stocker.

PIÈGE
S'arrêter au nombre de noyaux ou à l'activité sans revenir au MOX. La conclusion attendue relie la case du tableau à l'intérêt du recyclage.

MÉTHODE
Question ouverte : annoncer d'abord les deux critères du tableau (demi-vie, activité massique), les évaluer l'un après l'autre, puis lire la case et conclure sur la question posée.

À LA CALCULATRICE

