Exercice 2

## EXERCICE 2 : COMBUSTIBLE MOX POUR LIMITER LES DÉCHETS NUCLÉAIRES (5 POINTS)

Le combustible utilisé dans les réacteurs nucléaires est de l'uranium enrichi. Après trois ou quatre ans d'utilisation en moyenne, ce combustible est retiré du réacteur. 95% de ce combustible usé est de l'uranium qui peut faire l'objet d'un nouvel enrichissement en vue de la fabrication d'un nouveau combustible. Une autre partie (1%) est du plutonium qui peut être utilisé dans la fabrication d'un autre combustible appelé MOX. Les 4% restant sont les produits de fissions et les actinides mineurs et constituent des déchets ultimes.

Source : d'après *l'ANDRA « 6 questions pour mieux comprendre la gestion des déchets radioactifs à haute activité »*

Le combustible MOX est un combustible nucléaire constitué de plutonium 239 et d'uranium appauvri retirés des réacteurs nucléaires après une première utilisation. Cela participe au recyclage des déchets nucléaires. La moitié des réacteurs nucléaires français utilise en partie du combustible MOX. Les futurs réacteurs pourront utiliser 100 % de MOX.

Source : d'après *Wikipédia*

L'objectif de cet exercice est d'étudier l'intérêt du combustible MOX.

**Données :**

- L'âge de la Terre est estimé à 4,5 milliards d'années ;
- Masse molaire du plutonium 239 : 239 g·mol$^{-1}$ ;
- Nombre d'Avogadro : $N_A = 6{,}02 \times 10^{23}$ mol$^{-1}$ ;
- Temps de demi-vie $t_{1/2}$ de différents noyaux radioactifs (**Tableau 1**) :

| Éléments | Uranium | Uranium | Plutonium | Neptunium | Baryum | Plutonium | Krypton |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Noyaux radioactifs | $^{238}_{92}U$ | $^{235}_{92}U$ | $^{239}_{94}Pu$ | $^{235}_{93}Np$ | $^{140}_{56}Ba$ | $^{235}_{94}Pu$ | $^{93}_{36}Kr$ |
| Demi-vie ($t_{1/2}$) | $4{,}5\times10^{9}$ ans | $7{,}04\times10^{8}$ ans | 24 110 ans | 396 jours | 12,8 jours | 25 min | 1,3 s |

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

**Q.2.** Indiquer, en justifiant la réponse, le ou les noyau(x) radioactif(s) isotope(s) de l'uranium 235 parmi ceux présentés dans le tableau 1.

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

Exercice 2

L'équation de la réaction de la fission du noyau d'uranium 235, percuté par un neutron, en krypton 93, en baryum 140 et en neutrons, noté $^{1}_{0}n$, s'écrit :

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{93}_{36}Kr + ^{140}_{56}Ba + 3\ ^{1}_{0}n$$

**Q.4.** Expliquer en quoi ce type de réaction nucléaire peut être qualifié de réaction en chaîne.

Quant à lui, le plutonium 239 contenu dans le combustible usé est issu des noyaux d'uranium 238 qui, par capture d'un neutron, peuvent se transformer en uranium 239. L'uranium 239 peut ensuite subir deux désintégrations β- successives conduisant au plutonium 239.

| | | |
|---|---|---|
| 239 U 92 β- | 240 Np 93 β- | 241 Pu 94 β- |
| 238 U 92 α | 239 Np 93 β- | 240 Pu 94 α |
| 237 U 92 β- | 238 Np 93 β- | 239 Pu 94 α |

Document 1. Extrait du diagramme N/Z indiquant le type de radioactivité des radionucléides

**Q.5.** Écrire, à l'aide du diagramme N/Z du document 1, les trois équations des réactions successives permettant de passer de l'uranium 238 au plutonium 239 puis donner le nom de la particule émise lors d'une désintégration $\beta^-$.

Le plutonium 239 se désintègre suivant l'équation :

$$^{239}_{94}Pu \rightarrow ^{235}_{92}U + ^{4}_{2}He$$

**Q.6.** Indiquer à quel type de radioactivité correspond cette désintégration.

On donne la loi de décroissance radioactive : $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$ où $N_0$ est le nombre de noyaux à l'instant $t = 0$ s et $\lambda$ est la constante radioactive du noyau radioactif considéré.

**Q.7.** Établir l'expression de la constante radioactive $\lambda$ en fonction du temps de demi-vie $t_{1/2}$. En déduire que la valeur de la constante radioactive du plutonium 239 est $9{,}1 \times 10^{-13}$ $s^{-1}$.

Exercice 2

**Données :**

- L'activité $A$ d'un échantillon radioactif est le nombre de désintégrations par seconde (en becquerel (Bq), avec 1 Bq = 1 $s^{-1}$) et elle est liée au nombre $N$ de noyaux radioactifs présents dans l'échantillon par la relation : $A(t) = \lambda \cdot N(t)$.

- Classification des déchets radioactifs (**Tableau 2**) :

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2"></td><td colspan="3">TEMPS DE DEMI-VIE</td></tr>
<tr><td>Vie très courte<br>(demi-vie < 100 jours)</td><td>Vie courte<br>(demi-vie ≤ 31 ans)</td><td>Vie longue<br>(demi-vie > 31 ans)</td></tr>
<tr><td rowspan="4">ACTIVITE MASSIQUE *</td><td>Très faible activité<br>TFA (< 100 Bq·g$^{-1}$)</td><td rowspan="4">Gestion par décroissance radioactive sur le site de production puis évacuation dans les filières conventionnelles</td><td colspan="2">Stockage de surface<br>(au Centre Industriel de Regroupement, d'Entreposage et de Stockage – CIRES)</td></tr>
<tr><td>Faible activité<br>FA (< $10^5$ Bq·g$^{-1}$)</td><td rowspan="2">Stockage de surface<br>(au centre de stockage de l'Aube)</td><td>Stockage de faible profondeur (à l'étude)</td></tr>
<tr><td>Moyenne activité<br>MA (< $10^6$ Bq·g$^{-1}$)</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>Haute activité<br>HA (> $10^6$ Bq·g$^{-1}$)</td><td colspan="2">Pas encore de filière opérationnelle<br>(stockage réversible profond à l'étude)</td></tr>
</table>

** L'activité massique est l'activité rapporté à 1 g d'échantillon* D'après andra.fr

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

*Le candidat est invité à prendre des initiatives et à présenter sa démarche. Toute démarche pertinente, même non aboutie, sera valorisée.*