# La transmutation pour éliminer les déchets nucléaires

Bac S 2010 Amérique du Sud (ancien programme) · Exercice 1 **5 points** **Durée conseillée 1 h 05**

**1.1.1** Que signifie l'expression « noyaux isotopes » ?

Deux noyaux isotopes appartiennent au même élément chimique : ils ont le même numéro atomique $Z$ (même nombre de protons), mais pas le même nombre de neutrons.

Isotopes : même $Z$, nombres de nucléons $A$ différents.

**COMPRENDRE**
Exemple tiré de l'exercice : l'américium 241 et l'américium 242 ont tous deux 95 protons, mais 146 et 147 neutrons.

**1.1.2** Donner la définition de « noyau radioactif ».

Un noyau radioactif est un noyau instable : il se désintègre spontanément, à un instant imprévisible, pour donner un autre noyau en émettant une particule (et souvent un rayonnement $\gamma$).

Noyau radioactif : noyau instable qui se désintègre spontanément.

**PIÈGE**
Oublier « spontanément ». Une transformation provoquée par un choc, comme la capture d'un neutron ou la fission, n'est pas une désintégration radioactive.

**1.2** Remplacer le mot « vie », dans « vie longue » et « vie nettement plus courte », par une expression plus appropriée.

Le mot « vie » désigne ici la demi-vie radioactive $t_{1/2}$ : la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux d'un échantillon s'est désintégrée.

« vie » doit être remplacé par « demi-vie » (isotopes à demi-vie longue, à demi-vie plus courte).

**COMPRENDRE**
Un noyau isolé n'a pas de durée de vie prévisible. Seule une grandeur statistique, définie sur un grand nombre de noyaux, a un sens : c'est la demi-vie.

**1.3** Donner la définition de « réaction de fission ».

La fission est une réaction nucléaire provoquée : sous l'impact d'un neutron, un noyau lourd se casse en deux noyaux plus légers. Elle libère aussi quelques neutrons et beaucoup d'énergie.

Fission : un noyau lourd, frappé par un neutron, se scinde en deux noyaux plus légers en libérant des neutrons et de l'énergie.

**PIÈGE**
Confondre avec la fusion, où deux noyaux légers s'assemblent en un noyau plus lourd.

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

**Données utiles** $^{241}_{95}\mathrm{Am}$

Dans l'écriture $^{A}_{Z}\mathrm{X}$, $Z$ est le nombre de protons et $A$ le nombre de nucléons.

Nombre de protons : $Z = 95$. Nombre de neutrons : $A - Z = 241 - 95 = 146$.

Le noyau $^{241}_{95}\mathrm{Am}$ contient 95 protons et 146 neutrons.

**PIÈGE**
Répondre « 241 neutrons » : 241 est le nombre total de nucléons. Ne pas citer d'électrons non plus, la question porte sur le noyau.

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

Au cours d'une réaction nucléaire, il y a :

- conservation du nombre de nucléons : la somme des $A$ est la même avant et après ;
- conservation de la charge électrique : la somme des $Z$ est la même avant et après.

Conservation du nombre de nucléons ($A$) et de la charge électrique ($Z$) : lois de Soddy.

**PIÈGE**
Parler de conservation « des éléments » ou « de la masse », comme en chimie. Dans une réaction nucléaire, l'élément change et la masse ne se conserve pas.

**2.1.3** Écrire l'équation de la réaction de capture d'un neutron par un noyau d'américium 241. Identifier le noyau X1 obtenu.

**Données utiles** neutron ${}^{1}_{0}\mathrm{n}$ ; américium : $Z = 95$

On note le noyau formé ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}_1$ : ${}^{241}_{95}\mathrm{Am} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow {}^{A}_{Z}\mathrm{X}_1$

Conservation du nombre de nucléons : $A = 241 + 1 = 242$.

Conservation de la charge : $Z = 95 + 0 = 95$, c'est encore l'élément américium.

${}^{241}_{95}\mathrm{Am} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow {}^{242}_{95}\mathrm{Am}$ : X1 est l'américium 242.

**COMPRENDRE**
Le neutron ne porte pas de charge : la capture ne change pas $Z$, donc pas l'élément. On obtient un isotope du noyau de départ.

**2.2.1** Quelle est la particule émise lors d'une désintégration β⁻ ?

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

**PIÈGE**
Confondre avec la radioactivité $\beta^+$, qui émet un positon ${}^{0}_{1}\mathrm{e}$.

**2.2.2** Écrire l'équation de la désintégration β⁻ du noyau X1. Identifier le noyau X2.

**Données utiles** X1 : ${}^{242}_{95}\mathrm{Am}$ (2.1.3) ; curium : $Z = 96$

${}^{242}_{95}\mathrm{Am} \longrightarrow {}^{A}_{Z}\mathrm{X}_2 + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}$

Nombre de nucléons : $242 = A + 0$, donc $A = 242$.

Charge : $95 = Z - 1$, donc $Z = 96$ : d'après le tableau, c'est le curium.

${}^{242}_{95}\mathrm{Am} \longrightarrow {}^{242}_{96}\mathrm{Cm} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}$ : X2 est le curium 242.

**PIÈGE**
Écrire $Z = 95 - 1 = 94$. La charge de l'électron est négative : pour que la somme reste égale à 95, le noyau fils doit avoir $Z = 96$.

**COMPRENDRE**
Dans une désintégration $\beta^-$, un neutron du noyau devient un proton : $A$ ne change pas et $Z$ augmente d'une unité.

**2.3.1** Quelle est la particule émise lors d'une désintégration α ?

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

**2.3.2** Identifier le noyau X3 produit par la désintégration α du noyau X2. Justifier la réponse.

**Données utiles** X2 : ${}^{242}_{96}\mathrm{Cm}$ (2.2.2) ; plutonium : $Z = 94$

${}^{242}_{96}\mathrm{Cm} \longrightarrow {}^{A}_{Z}\mathrm{X}_3 + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

Nombre de nucléons : $242 = A + 4$, donc $A = 238$.

Charge : $96 = Z + 2$, donc $Z = 94$ : d'après le tableau, c'est le plutonium.

${}^{242}_{96}\mathrm{Cm} \longrightarrow {}^{238}_{94}\mathrm{Pu} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$ : X3 est le plutonium 238.

**MÉTHODE**
Pour identifier un noyau inconnu : écrire l'équation avec $A$ et $Z$ inconnus, appliquer les deux lois de conservation, puis chercher l'élément de numéro atomique $Z$ dans le tableau.

**3.1** Dans la loi de décroissance radioactive, donner la signification de $N_0$ et de $N$.

$N_0$ est le nombre de noyaux radioactifs présents dans l'échantillon à l'instant $t = 0$, choisi comme origine des temps.

$N$ est le nombre de noyaux radioactifs encore présents à l'instant $t$, c'est-à-dire non désintégrés.

$N_0$ : nombre de noyaux radioactifs à $t = 0$ ; $N$ : nombre de noyaux restants à la date $t$.

**PIÈGE**
Dire que $N$ est le nombre de noyaux désintégrés. Celui-ci vaut $N_0 - N$.

**3.2** Deux échantillons, l'un d'américium 241, l'autre de noyaux X2, contiennent chacun $1{,}0 \times 10^{10}$ noyaux à l'origine des temps. Calculer le nombre de noyaux présents 10 ans plus tard dans chaque échantillon.

**Données utiles** $N_0 = 1{,}0 \times 10^{10}$ ; $t_{1/2}(^{241}\mathrm{Am}) = 432$ ans ; $t_{1/2}(\mathrm{X2}) = 163$ jours ; 1 an = 365 jours

On applique $N = N_0\, e^{-\frac{(\ln 2)\, t}{t_{1/2}}}$ avec $t$ et $t_{1/2}$ dans la même unité.

Américium 241, durées en années :

$$N = 1{,}0 \times 10^{10} \times e^{-\frac{\ln 2 \times 10}{432}} = 9{,}8 \times 10^{9}$$

Noyau X2 (curium 242), durées en jours, avec $t = 10 \times 365 = 3650$ jours :

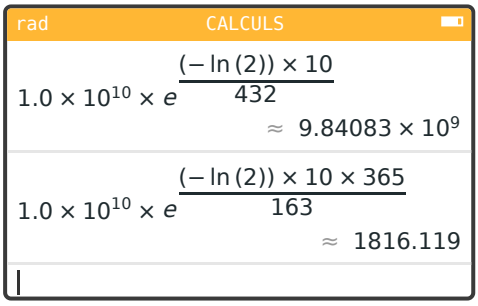
$$N = 1{,}0 \times 10^{10} \times e^{-\frac{\ln 2 \times 3650}{163}} = 1{,}8 \times 10^{3}$$

Après 10 ans, il reste $9{,}8 \times 10^{9}$ noyaux d'américium 241 et $1{,}8 \times 10^{3}$ noyaux X2.

**PIÈGE**
Garder $t = 10$ ans avec $t_{1/2} = 163$ jours. Le rapport $t/t_{1/2}$ n'a de sens que si les deux durées sont exprimées dans la même unité.

**COMPRENDRE**
$N_0$ est donné avec deux chiffres significatifs : les résultats en gardent deux. Dix ans représentent 22 demi-vies de X2, mais seulement 2 % d'une demi-vie de l'américium 241.

**À LA CALCULATRICE**




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

**Données utiles** nombres de noyaux restants après 10 ans (3.2)

En 10 ans, l'échantillon d'américium 241 a perdu moins de 2 % de ses noyaux, alors qu'il ne reste presque plus rien de l'échantillon de X2 (environ 2 noyaux sur 10 millions).

La transmutation remplace donc un noyau à demi-vie très longue (432 ans) par un noyau à demi-vie beaucoup plus courte (163 jours), qui disparaît en quelques années.

Les déchets transmutés restent radioactifs bien moins longtemps : la durée pendant laquelle il faut les stocker et les surveiller est fortement réduite.

**COMPRENDRE**
Le mécanisme étudié est simplifié : le plutonium 238 obtenu à la fin est lui-même radioactif. L'exercice ne compare que l'américium 241 et X2.

**3.4** Justifier, à l'aide des demi-vies, la phrase : « Dans un échantillon issu d'américium 241, le nombre de noyaux X1 est toujours négligeable ».

**Données utiles** $t_{1/2}(\mathrm{X1}) = 16$ h ; $t_{1/2}(\mathrm{X2}) = 163$ jours ; $t_{1/2}(^{241}\mathrm{Am}) = 432$ ans

La demi-vie de X1 (16 heures) est très courte devant celle de X2 (163 jours) et celle de l'américium 241 (432 ans).

Un noyau X1 se désintègre donc en X2 très peu de temps après sa formation : au bout de 10 demi-vies, soit moins de 7 jours, il reste moins d'un millième des noyaux X1 formés.

Les noyaux X1 disparaissent presque aussitôt formés et ne s'accumulent pas : leur nombre reste négligeable devant ceux d'américium 241 et de X2.

**MÉTHODE**

Après $n$ demi-vies, le nombre de noyaux est divisé par $2^n$. Avec $n = 10$, il est divisé par 1024 : on retient qu'après 10 demi-vies, il reste environ un millième de l'échantillon.

**À LA CALCULATRICE**

