La radioactivité naturelle et provoquée de l'uranium

Bac S 2010 Antilles-Guyane rattrapage (ancien programme) · Exercice 2 **5,5 points** **Durée conseillée 1 h 05**

1.1 Qu'appelle-t-on noyau radioactif ?

Un noyau radioactif est un noyau **instable** : il se désintègre spontanément en un autre noyau, en émettant une particule (et souvent un rayonnement γ).

COMPRENDRE
La désintégration est spontanée et aléatoire : on ne peut pas prévoir l'instant où un noyau donné se désintègre, seulement le comportement moyen d'un grand nombre de noyaux.

1.2.1 Rappeler la définition de noyaux isotopes.

Des noyaux isotopes ont le **même nombre de protons** Z (même élément chimique) mais des **nombres de neutrons différents**, donc des nombres de nucléons A différents.

1.2.2 Comparer la composition des noyaux des atomes d'uranium 235 et 238.

Données utiles uranium : $Z = 92$

Les deux noyaux contiennent $Z = 92$ protons. Le nombre de neutrons est $N = A - Z$.

Uranium 235 : $235 - 92 = 143$ neutrons. Uranium 238 : $238 - 92 = 146$ neutrons.

Même nombre de protons (92) ; l'uranium 238 possède 3 neutrons de plus (146 contre 143).

PIÈGE
« Comparer » demande de dire ce qui est commun et ce qui diffère, avec les nombres. Donner seulement 235 et 238 nucléons ne répond pas à la question.

1.3.1 Rappeler les lois de conservation, dites lois de Soddy, intervenant lors des désintégrations successives.

Lors d'une transformation nucléaire, il y a **conservation du nombre de nucléons** (somme des A) et **conservation de la charge électrique** (somme des Z).

COMPRENDRE
Le nombre de protons, lui, n'est pas forcément conservé : c'est pour cela que l'élément chimique change au cours d'une désintégration.

1.3.2 Écrire l'équation de la désintégration du noyau d'uranium 238 en thorium 234.

On écrit ${}^{238}_{92}\mathrm{U} \longrightarrow {}^{234}_{90}\mathrm{Th} + {}^{A}_{Z}\mathrm{X}$.

Conservation des nucléons : $238 = 234 + A$, donc $A = 4$.
Conservation de la charge : $92 = 90 + Z$, donc $Z = 2$: la particule est un noyau d'hélium.

$${}^{238}_{92}\mathrm{U} \longrightarrow {}^{234}_{90}\mathrm{Th} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

MÉTHODE
Poser une particule inconnue ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$, appliquer les deux lois de conservation, puis l'identifier : ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$, ${}^{0}_{-1}\mathrm{e}$ ou ${}^{0}_{1}\mathrm{e}$.

1.3.3 Quel est le type de radioactivité correspondant à cette désintégration ?

Le noyau émis est un noyau d'hélium 4, appelé particule α.

Il s'agit d'une radioactivité α.

1.3.4 Le thorium 234 se désintègre en protactinium 234. Écrire l'équation de cette désintégration. Quelle particule est émise ?

Conservation des nucléons : $234 = 234 + A$, donc $A = 0$.
Conservation de la charge : $90 = 91 + Z$, donc $Z = -1$.

$$^{234}_{90}\text{Th} \longrightarrow {}^{234}_{91}\text{Pa} + {}^{0}_{-1}\text{e}$$

La particule émise est un **électron** : c'est une radioactivité β^-.

PIÈGE
Écrire un positon ${}^{0}_{1}\text{e}$. Ici Z augmente d'une unité (de 90 à 91) : la charge émise doit être -1.

1.4.1 Rappeler la définition du temps de demi-vie $t_{1/2}$.

Le temps de demi-vie $t_{1/2}$ est la durée au bout de laquelle la **moitié des noyaux radioactifs** initialement présents dans l'échantillon s'est désintégrée : $N(t_{1/2}) = \dfrac{N_0}{2}$.

1.4.2 À partir de la loi de décroissance $N(t) = N_0\,\text{e}^{-\lambda t}$, retrouver la relation $t_{1/2} = \dfrac{\ln 2}{\lambda}$.

Par définition, $N(t_{1/2}) = \dfrac{N_0}{2}$, donc $N_0\,\text{e}^{-\lambda t_{1/2}} = \dfrac{N_0}{2}$, soit $\text{e}^{-\lambda t_{1/2}} = \dfrac{1}{2}$.

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

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

MÉTHODE
Pour faire sortir une inconnue d'un exposant : isoler l'exponentielle, puis appliquer $\ln$ aux deux membres, avec $\ln(\text{e}^x) = x$ et $\ln(1/2) = -\ln 2$.

1.4.3 En déduire la valeur de la constante radioactive λ en an^{-1}, puis en s^{-1}.

Données utiles $t_{1/2} = 4{,}5 \times 10^9$ ans

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{\ln 2}{4{,}5 \times 10^9} = 1{,}5 \times 10^{-10}\ \text{an}^{-1}$$

En secondes : $t_{1/2} = 4{,}5 \times 10^9 \times 365{,}25 \times 24 \times 3600 = 1{,}4 \times 10^{17}$ s, donc

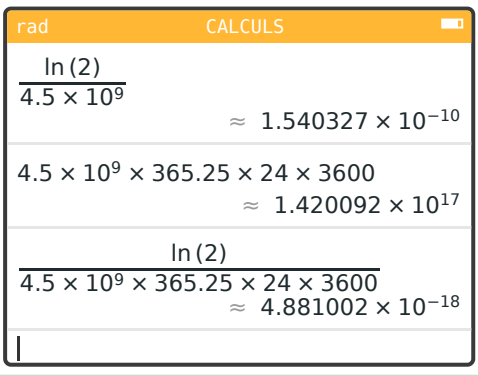
$$\lambda = \frac{\ln 2}{4{,}5 \times 10^9 \times 365{,}25 \times 24 \times 3600} = 4{,}9 \times 10^{-18}\ \text{s}^{-1}$$

$$\lambda = 1{,}5 \times 10^{-10}\ \text{an}^{-1} = 4{,}9 \times 10^{-18}\ \text{s}^{-1}$$

PIÈGE
λ est l'inverse d'une durée : pour passer des an^{-1} aux s^{-1}, on **divise** par le nombre de secondes dans une année, on ne multiplie pas.

COMPRENDRE
Deux chiffres significatifs, comme la donnée $t_{1/2} = 4{,}5 \times 10^9$ ans.

À LA CALCULATRICE



1.5.1 Rappeler la définition de l'activité d'une espèce radioactive.

L'activité A d'un échantillon radioactif est le **nombre moyen de désintégrations par seconde** qui s'y produisent. Elle s'exprime en becquerels (Bq).

1.5.2 Que représente un becquerel (Bq) ?

Un becquerel correspond à **une désintégration par seconde**.

1.5.3 Avec $A(t) = \lambda N(t)$, calculer le nombre N_0 de noyaux d'uranium présents dans la pierre à $t = 0$ s et montrer que son ordre de grandeur est 10^{21}.

Données utiles $A_0 = 9000$ Bq ; $\lambda = 4{,}9 \times 10^{-18}$ s^{-1} (1.4.3)

À $t = 0$: $A_0 = \lambda N_0$, donc $N_0 = \dfrac{A_0}{\lambda}$.

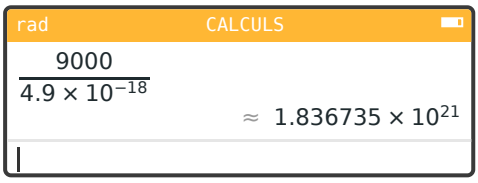
$$N_0 = \frac{9000}{4{,}9 \times 10^{-18}} = 1{,}8 \times 10^{21} \text{ noyaux}$$

$N_0 = 1{,}8 \times 10^{21}$ noyaux : l'ordre de grandeur est bien 10^{21}.

PIÈGE
L'activité est en Bq, donc en désintégrations par seconde : il faut λ en s^{-1}. Avec la valeur en an^{-1}, on trouverait 6×10^{13}, faux.

COMPRENDRE
L'ordre de grandeur est la puissance de dix la plus proche : $1{,}8$ est inférieur à 5, donc on retient 10^{21}.

À LA CALCULATRICE



1.5.4 L'activité suit la loi $A(t) = A_0\,e^{-\lambda t}$ avec $A_0 = 9000$ Bq. Que vaut l'activité de la pierre au bout de 10 ans ? Au bout de 1000 ans ?

Données utiles $\lambda = 1{,}5 \times 10^{-10}$ an^{-1} (1.4.3)

Les durées sont en années : on utilise λ en an^{-1}.

$A(10 \text{ ans}) = 9000 \times e^{-1{,}5\times10^{-10}\times10} = 9{,}0 \times 10^3$ Bq

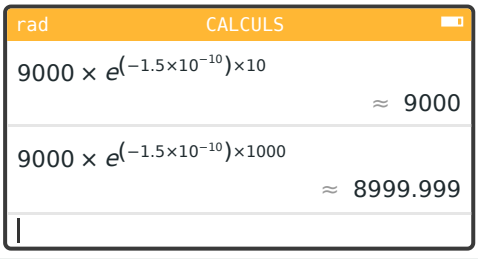
$A(1000 \text{ ans}) = 9000 \times e^{-1{,}5\times10^{-10}\times1000} = 9{,}0 \times 10^3$ Bq

$A(10 \text{ ans}) \approx A(1000 \text{ ans}) \approx 9{,}0 \times 10^3$ Bq : l'activité n'a pratiquement pas changé.

PIÈGE
Dans l'exposant, λ et t doivent être dans des unités cohérentes : an^{-1} avec des années, ou s^{-1} avec des secondes.

COMPRENDRE
En 1000 ans, l'activité baisse d'environ $0{,}001$ Bq sur 9000 : c'est très inférieur à la précision de la donnée.

À LA CALCULATRICE



1.5.5 Que peut-on en déduire à propos de la décroissance de l'activité de cette pierre ?

La décroissance est **extrêmement lente** : à l'échelle humaine, l'activité de la pierre peut être considérée comme constante.

COMPRENDRE
1000 ans est négligeable devant la demi-vie de l'uranium 238 ($4{,}5 \times 10^9$ ans) : il faudrait attendre $4{,}5$ milliards d'années pour que l'activité soit divisée par deux.

1.5.6 Quels effets biologiques peut avoir l'inhalation prolongée de poussières issues d'une telle pierre ?

Les poussières inhalées se fixent dans les poumons et irradient les tissus de l'intérieur ; les rayonnements émis sont ionisants et endommagent les cellules et leur ADN.

Risque de mutations et de **cancers** (du poumon en particulier), ou de leucémies.

2.1 Comment appelle-t-on ce type de réaction ?

Sous l'impact d'un neutron, un noyau lourd se scinde en deux noyaux plus légers.

C'est une réaction de **fission** nucléaire.

COMPRENDRE
La fission est une réaction provoquée (il faut un neutron incident), contrairement à la radioactivité, qui est spontanée. Les 3 neutrons libérés peuvent provoquer d'autres fissions : c'est la réaction en chaîne.

2.2 Déterminer la valeur de A et de Z dans l'équation ${}^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow {}^{94}_{Z}\mathrm{Sr} + {}^{A}_{54}\mathrm{Xe} + 3\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$.

Conservation du nombre de nucléons : $235 + 1 = 94 + A + 3 \times 1$, donc $A = 236 - 97 = 139$.

Conservation de la charge : $92 + 0 = Z + 54 + 3 \times 0$, donc $Z = 92 - 54 = 38$.

$A = 139$ et $Z = 38$

PIÈGE
Oublier le coefficient 3 devant le neutron dans le bilan des nucléons : on trouverait $A = 141$.

2.3.1 Énoncer la relation d'équivalence masse-énergie.

Toute particule de masse m, au repos, possède une énergie de masse E :

$E = m\,c^2$, avec E en joules, m en kilogrammes et c la célérité de la lumière dans le vide en $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

2.3.2 Exprimer, en fonction des masses des particules et des noyaux de l'équation, la variation d'énergie de masse ΔE au cours de la réaction.

$\Delta E = (m_{\text{produits}} - m_{\text{réactifs}})\,c^2 =$
$[m(\mathrm{Sr}) + m(\mathrm{Xe}) + 3\,m(\mathrm{n}) - m(\mathrm{U}) - m(\mathrm{n})]\,c^2$

$\Delta E = [m(\mathrm{Sr}) + m(\mathrm{Xe}) + 2\,m(\mathrm{n}) - m(\mathrm{U})]\,c^2$

PIÈGE
Une variation se calcule toujours « final moins initial ». L'ordre inverse donne le mauvais signe et fausse la conclusion de la question 2.4.

2.3.3 À l'aide des données, calculer la valeur de ΔE en J, puis en MeV.

Données utiles $m(\mathrm{U}) = 235{,}120$ u ; $m(\mathrm{Sr}) = 93{,}8946$ u ; $m(\mathrm{Xe}) = 138{,}888$ u ; $m(\mathrm{n}) = 1{,}00866$ u ; $1\ \mathrm{u} = 1{,}660\,54 \times 10^{-27}$ kg ; $c = 3{,}00 \times 10^{8}\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$; $1\ \mathrm{MeV} = 1{,}60 \times 10^{-13}$ J

Variation de masse, en unité de masse atomique :

$$\Delta m = 93{,}8946 + 138{,}888 + 2 \times 1{,}00866 - 235{,}120 = -0{,}32008\ \mathrm{u}$$

Énergie, avec Δm convertie en kg : $\Delta E = \Delta m\,c^2$

$$\Delta E = -0{,}32008 \times 1{,}660\,54 \times 10^{-27} \times (3{,}00 \times 10^{8})^2$$

$$\Delta E = -4{,}78 \times 10^{-11}\ \mathrm{J}$$

Comme $1\ \mathrm{MeV} = 1{,}00 \times 10^{6} \times 1{,}60 \times 10^{-19} = 1{,}60 \times 10^{-13}$ J :

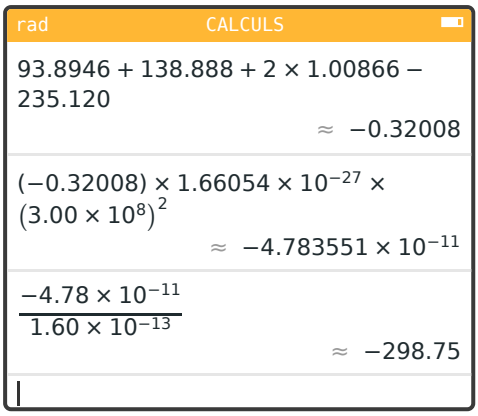
$$\Delta E = \frac{-4{,}78 \times 10^{-11}}{1{,}60 \times 10^{-13}} = -299\ \mathrm{MeV}$$

$\Delta E = -4{,}78 \times 10^{-11}\ \mathrm{J} = -299\ \mathrm{MeV}$

PIÈGE
Les masses sont en u : il faut les convertir en kilogrammes avant de multiplier par c^2, sinon le résultat n'est pas en joules.

COMPRENDRE
Trois chiffres significatifs, comme c. Par $\Delta m \times 931{,}5\ \mathrm{MeV}$ par u, on trouve -298 MeV : le petit écart vient des valeurs arrondies de c et de l'électronvolt.

À LA CALCULATRICE



2.4 De l'énergie est-elle libérée au cours de cette réaction ? Justifier.

Données utiles $\Delta E = -299$ MeV (2.3.3)

$\Delta E < 0$: la masse des produits est inférieure à celle des réactifs, l'énergie de masse du système diminue. Cette énergie perdue par le système est cédée au milieu extérieur.

Oui : la réaction **libère** une énergie $|\Delta E| = 299$ MeV par noyau d'uranium 235 fissionné.

COMPRENDRE
L'énergie libérée se retrouve sous forme d'énergie cinétique des noyaux formés et des neutrons, et de rayonnement ; elle est finalement convertie en chaleur dans un réacteur.