Les réactions de fission et leur utilisation pour la production d'énergie

Bac S 2009 Nouvelle-Calédonie (ancien programme) · Exercice 2 **5,5 points** **Durée conseillée 1 h 05**

1.1 Qu'appelle-t-on noyaux isotopes ?

Deux noyaux sont isotopes s'ils ont le même nombre de protons Z (même élément chimique) mais des nombres de neutrons différents, donc des nombres de nucléons A différents.

Isotopes : même Z, A différents. Exemple : $^{238}_{92}\text{U}$ et $^{235}_{92}\text{U}$.

1.2 Donner la loi de décroissance radioactive $N(t)$ en fonction de N_0 et de la constante radioactive λ.

$$N(t) = N_0\,\mathrm{e}^{-\lambda t}$$

PIÈGE

Oublier le signe « $-$ » dans l'exponentielle : le nombre de noyaux radioactifs diminue au cours du temps.

1.3 Définir le temps de demi-vie radioactive $t_{1/2}$.

Le temps de demi-vie $t_{1/2}$ est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux radioactifs présents initialement dans l'échantillon s'est désintégrée.

$$N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$$

1.4 Par combien N_0 est-il divisé au bout d'une durée $t = 2\,t_{1/2}$? Et au bout de $t = n\,t_{1/2}$, avec n entier ?

À chaque durée $t_{1/2}$ écoulée, le nombre de noyaux restants est divisé par 2.

Après $2\,t_{1/2}$: $N = \dfrac{N_0}{2 \times 2} = \dfrac{N_0}{4}$.

Après $n\,t_{1/2}$: N_0 a été divisé n fois de suite par 2.

À $t = 2\,t_{1/2}$, N_0 est divisé par 4 ; à $t = n\,t_{1/2}$, N_0 est divisé par 2^n : $N = \dfrac{N_0}{2^n}$.

MÉTHODE

Vérification par la loi : $t_{1/2} = \dfrac{\ln 2}{\lambda}$, donc $N(n\,t_{1/2}) = N_0\,\mathrm{e}^{-n\ln 2} = \dfrac{N_0}{2^n}$.

1.5.1 Donner, sous forme de nombres entiers, les rapports R_{238} et R_{235} de l'âge de la Terre au temps de demi-vie de l'uranium 238, puis de l'uranium 235.

Données utiles âge de la Terre : $4{,}5 \times 10^9$ ans ; $t_{1/2}(^{238}\text{U}) = 4{,}50 \times 10^9$ ans ; $t_{1/2}(^{235}\text{U}) = 0{,}713 \times 10^9$ ans

$$R_{238} = \frac{4{,}5 \times 10^9}{4{,}50 \times 10^9} = 1$$

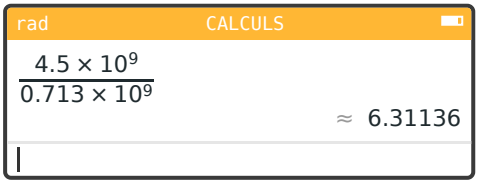
$$R_{235} = \frac{4{,}5 \times 10^9}{0{,}713 \times 10^9} = 6{,}3 \approx 6$$

$R_{238} = 1$ et $R_{235} \approx 6$

COMPRENDRE

L'âge de la Terre n'a que deux chiffres significatifs et l'énoncé demande des entiers : on arrondit $6{,}3$ à 6, ce qui permet d'utiliser le résultat de la question 1.4.

À LA CALCULATRICE



1.5.2 Les deux isotopes étant supposés formés en quantités égales N_0, en déduire les nombres N_{238} et N_{235} de noyaux actuellement présents en fonction de N_0.

Données utiles $R_{238} = 1$ et $R_{235} \approx 6$ (1.5.1) ; $N = \dfrac{N_0}{2^n}$ (1.4)

Depuis la formation de la Terre, il s'est écoulé 1 demi-vie pour l'uranium 238 et environ 6 demi-vies pour l'uranium 235.

$$N_{238} = \frac{N_0}{2} \text{ et } N_{235} = \frac{N_0}{2^6} = \frac{N_0}{64}$$

1.5.3 En déduire le rapport des populations des noyaux d'uranium 238 et 235 actuellement présents, puis justifier la différence d'abondance entre ces deux noyaux.

Données utiles $N_{238} = \dfrac{N_0}{2}$ et $N_{235} = \dfrac{N_0}{2^6}$ (1.5.2)

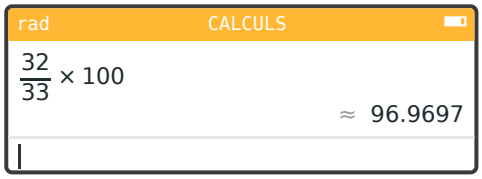
$$\frac{N_{238}}{N_{235}} = \frac{N_0}{2} \times \frac{2^6}{N_0} = 2^5 = 32$$

L'uranium 235 a une demi-vie environ six fois plus courte : il s'est désintégré beaucoup plus vite que l'uranium 238. Il en reste donc aujourd'hui beaucoup moins, ce qui explique la différence d'abondance.

$\dfrac{N_{238}}{N_{235}} = 32$: l'uranium 238 est environ 32 fois plus abondant que l'uranium 235.

COMPRENDRE
Ce rapport donne environ 97 % d'uranium 238, un peu moins que le tableau 1 (plus de 99 %). Le modèle est simplifié : les deux isotopes n'ont pas été formés en quantités exactement égales.

À LA CALCULATRICE



2.1 Donner la définition de la fission nucléaire.

La fission est une réaction nucléaire provoquée : sous l'impact d'un neutron, un noyau lourd se scinde en deux noyaux plus légers. Elle s'accompagne de l'émission de neutrons et d'une libération d'énergie.

Fission : un noyau lourd, percuté par un neutron, se casse en deux noyaux plus légers en libérant de l'énergie.

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

2.2 Quel phénomène risque de se produire si $k \geqslant 2$?

Chaque fission libère au moins deux neutrons, qui peuvent à leur tour provoquer chacun une nouvelle fission, et ainsi de suite. Le nombre de fissions par seconde augmente alors très rapidement, ainsi que l'énergie libérée.

Il risque de se produire une réaction en chaîne, qui peut s'emballer.

COMPRENDRE
Dans un réacteur, des barres de contrôle absorbent une partie des neutrons pour qu'une fission n'en déclenche en moyenne qu'une seule autre.

2.3 Compléter l'équation ${}^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow {}^{93}_{Z}\mathrm{Rb} + {}^{A}_{55}\mathrm{Cs} + 2\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$ en donnant Z et A et en précisant les lois utilisées.

Lois de conservation (lois de Soddy) :

- conservation du nombre de charge : $92 + 0 = Z + 55 + 2 \times 0$, donc $Z = 92 - 55 = 37$;
- conservation du nombre de nucléons : $235 + 1 = 93 + A + 2 \times 1$, donc $A = 236 - 95 = 141$.

$${}^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow {}^{93}_{37}\mathrm{Rb} + {}^{141}_{55}\mathrm{Cs} + 2\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

PIÈGE
Oublier le coefficient 2 devant le neutron : on trouverait $A = 142$.

3.1 Quelle est la nature de la force d'interaction qui assure la cohésion du noyau ? Est-elle attractive ou répulsive ?

La cohésion du noyau est assurée par l'interaction forte, attractive entre tous les nucléons (protons et neutrons).

COMPRENDRE
Sa portée est très courte, de l'ordre de la taille du noyau (10^{-15} m) : elle n'agit qu'entre nucléons très proches.

3.2 Quelle est la nature de l'autre force d'interaction s'exerçant entre les protons ? Est-elle attractive ou répulsive ?

Les protons portent tous une charge électrique positive.

Entre les protons s'exerce l'interaction électrostatique (électrique), répulsive car les charges sont de même signe.

3.3.1 Les positions relatives des niveaux d'énergie des états 1 et 3 sont-elles compatibles avec le fait que la réaction de fission libère de l'énergie ?

Sur le diagramme, $E_3 < E_1$: en passant de l'état 1 à l'état 3, l'énergie du système diminue. Le système cède donc l'énergie $E_1 - E_3$ au milieu extérieur.

Oui : $E_3 < E_1$, la fission libère l'énergie $E_1 - E_3$.

3.3.2 Justifier qu'il faut apporter de l'énergie au noyau pour le déformer. Est-ce compatible avec les positions relatives des niveaux d'énergie des états 1 et 2 ?

Déformer le noyau, c'est augmenter la distance moyenne entre les nucléons. Or, à faible distance, la force de cohésion, attractive, l'emporte : elle s'oppose à cet éloignement. Il faut donc fournir de l'énergie au noyau pour écarter les nucléons malgré cette attraction.

Sur le diagramme, $E_2 > E_1$: l'énergie du système augmente entre l'état 1 et l'état 2, il a bien reçu de l'énergie.

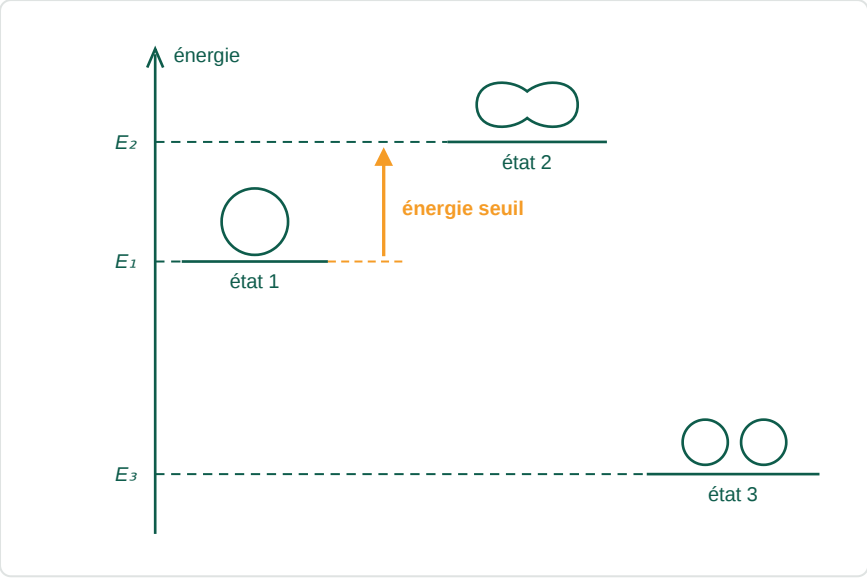
Il faut apporter de l'énergie pour vaincre l'attraction entre nucléons ; c'est compatible avec $E_2 > E_1$.

3.3.3 Représenter par une flèche, sur le diagramme de la figure 8 de l'annexe, l'énergie seuil à apporter au noyau pour réaliser la fission.

L'énergie seuil est l'énergie minimale à fournir pour passer de l'état 1 à l'état 2 : la flèche part du niveau E_1 et monte jusqu'au niveau E_2.

Énergie seuil : $E_s = E_2 - E_1$ (flèche verticale de E_1 vers E_2).

PIÈGE
Tracer la flèche entre E_3 et E_2, ou entre E_1 et E_3 : cette dernière représente l'énergie libérée par la fission.



3.3.3 · Figure 8 de l'annexe complétée : l'énergie seuil est tracée en orange (diagramme non à l'échelle)

4.1 À l'aide des tableaux 2 et 3, déterminer celui des quatre noyaux qui ne peut pas conduire à une fission après capture d'un neutron pratiquement au repos.

Données utiles ^{233}U : $E_a = 6{,}8$ MeV, $E_s = 6{,}0$ MeV ; ^{235}U : 6,5 et 5,9 MeV ; ^{238}U : 4,8 et 5,8 MeV ; ^{239}Pu : 6,5 et 5,9 MeV

La fission n'est possible que si l'énergie apportée par la capture atteint l'énergie seuil : $E_a \geqslant E_s$.

- ^{233}U : $6{,}8 > 6{,}0$, fission possible ;
- ^{235}U : $6{,}5 > 5{,}9$, fission possible ;
- ^{238}U : $4{,}8 < 5{,}8$, fission impossible ;
- ^{239}Pu : $6{,}5 > 5{,}9$, fission possible.

Seul l'uranium 238 ne peut pas conduire à une fission : $E_a = 4{,}8\ \text{MeV} < E_s = 5{,}8\ \text{MeV}$.

MÉTHODE
Comparer les deux tableaux colonne par colonne : l'énergie seuil du tableau 3 est celle du noyau formé après capture (^{239}U pour l'uranium 238).

4.2.1 Pour le noyau trouvé en 4.1, quelle condition doit vérifier l'énergie cinétique du neutron pour que la fission soit possible après sa capture ?

Données utiles $E_a = 4{,}8$ MeV ; $E_s = 5{,}8$ MeV

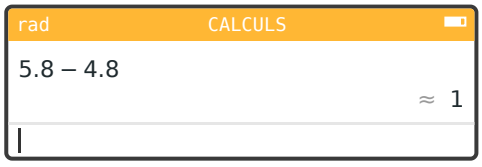
L'énergie apportée par la capture, $E_c + E_a$, doit atteindre l'énergie seuil :

$$E_c + E_a \geqslant E_s \quad \text{soit} \quad E_c \geqslant E_s - E_a$$

$$E_s - E_a = 5{,}8 - 4{,}8 = 1{,}0\ \text{MeV}$$

$E_c \geqslant 1{,}0$ MeV

À LA CALCULATRICE



4.2.2 Justifier l'expression « neutrons rapides » pour désigner les neutrons utilisés dans les réacteurs de génération IV.

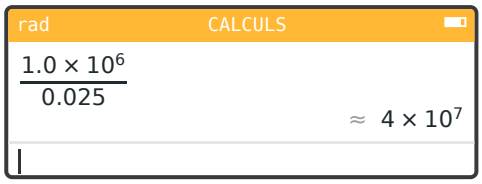
Données utiles $E_c \geqslant 1{,}0$ MeV (4.2.1) ; neutron quasiment au repos : $E_c = 0{,}025$ eV

Pour provoquer la fission après capture par l'uranium 238, le neutron doit avoir une énergie cinétique d'au moins $1{,}0\ \text{MeV} = 1{,}0 \times 10^6\ \text{eV}$, soit $4{,}0 \times 10^7$ fois celle d'un neutron lent ($0{,}025$ eV).

Or $E_c = \frac{1}{2} m v^2$: la masse du neutron étant constante, une énergie cinétique beaucoup plus grande correspond à une vitesse beaucoup plus grande.

Ces neutrons ont une grande énergie cinétique, donc une grande vitesse : ce sont des « neutrons rapides ».

À LA CALCULATRICE



4.2.3 Compte tenu de la grande différence d'abondance entre l'uranium 238 et l'uranium 235, expliquer qualitativement comment les réacteurs à « neutrons rapides » permettent d'optimiser la consommation des ressources en uranium.

Les réacteurs actuels, à neutrons lents, n'exploitent que la fission de l'uranium 235, qui représente moins de 1 % de l'uranium naturel : l'uranium 238 (plus de 99 %) n'y est pas fissile.

Avec des neutrons rapides, l'uranium 238 peut lui aussi servir de combustible.

Les réacteurs à neutrons rapides utilisent l'isotope de loin le plus abondant : la quasi-totalité du minerai devient exploitable, au lieu de moins de 1 %.