Controler la fusion nucléaire

Bac S 2006 Nouvelle-Calédonie rattrapage (ancien programme) · Exercice 2 **5,5 points** **Durée conseillée 1 h 05**

1 Donner la composition et le symbole du noyau Y qui sert à fabriquer le tritium, en précisant les règles de conservation.

Données utiles ${}^{A}_{Z}\mathrm{Y} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{3}_{1}\mathrm{H}$; H ($Z=1$), He ($Z=2$), Li ($Z=3$), Be ($Z=4$), B ($Z=5$)

Lors d'une réaction nucléaire, il y a conservation :

- du nombre de nucléons : $A + 1 = 4 + 3$, donc $A = 6$;
- du nombre de charge : $Z + 0 = 2 + 1$, donc $Z = 3$.

$Z = 3$ est le numéro atomique du lithium.

Y est le noyau de lithium 6, ${}^{6}_{3}\mathrm{Li}$: 3 protons et $6 - 3 = 3$ neutrons.

PIÈGE
Oublier le neutron dans le bilan des nucléons : il compte pour $A = 1$ et $Z = 0$. Sans lui, on trouve $A = 7$.

2.1 Donner la composition du noyau de deutérium ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$.

$Z = 1$: un proton. $A = 2$ nucléons, donc $A - Z = 1$ neutron.

Le noyau de deutérium contient 1 proton et 1 neutron.

2.2 Le deutérium et le tritium sont des isotopes. Justifier cette affirmation.

Des noyaux isotopes possèdent le même nombre de protons Z et des nombres de neutrons différents.

Deutérium ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$: 1 proton, 1 neutron. Tritium ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$: 1 proton, 2 neutrons.

Même $Z = 1$ mais A différents (2 et 3) : ce sont deux isotopes de l'hydrogène.

2.3 Donner l'expression littérale puis la valeur du défaut de masse $\Delta m({}^{2}_{1}\mathrm{H})$ du noyau de deutérium.

Données utiles $m(\mathrm{p}) = 1{,}672622 \times 10^{-27}$ kg ; $m(\mathrm{n}) = 1{,}674927 \times 10^{-27}$ kg ; $m({}^{2}_{1}\mathrm{H}) = 3{,}344497 \times 10^{-27}$ kg

Le défaut de masse est l'écart entre la masse des nucléons séparés et la masse du noyau :

$$\Delta m({}^{2}_{1}\mathrm{H}) = m(\mathrm{p}) + m(\mathrm{n}) - m({}^{2}_{1}\mathrm{H})$$

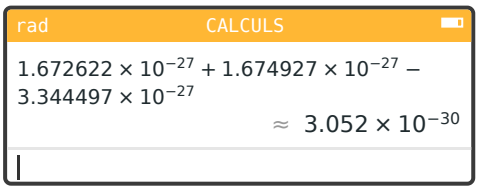
$$\Delta m({}^{2}_{1}\mathrm{H}) = (1{,}672622 + 1{,}674927 - 3{,}344497) \times 10^{-27}$$

$$\Delta m({}^{2}_{1}\mathrm{H}) = 3{,}052 \times 10^{-30} \text{ kg}$$

PIÈGE
Arrondir les masses avant de soustraire : le défaut de masse ne représente qu'un millième de la masse du noyau, il disparaît dès qu'on tronque les données.

COMPRENDRE
Chiffres significatifs : dans une soustraction, c'est le rang du dernier chiffre qui compte. Les masses sont connues à 10^{-33} kg près, le résultat aussi : il ne reste que quatre chiffres.

À LA CALCULATRICE



2.4 En déduire l'énergie $E(^2_1\mathrm{H})$ correspondant à ce défaut de masse, en J puis en MeV, et donner sa signification physique.

Données utiles $\Delta m(^2_1\mathrm{H}) = 3{,}052 \times 10^{-30}$ kg (2.3) ; $c = 3{,}00 \times 10^8$ m · s^{-1} ; $1\ \mathrm{eV} = 1{,}60 \times 10^{-19}$ J

Équivalence masse-énergie : $E(^2_1\mathrm{H}) = \Delta m(^2_1\mathrm{H}) \times c^2$

$E(^2_1\mathrm{H}) = 3{,}052 \times 10^{-30} \times (3{,}00 \times 10^8)^2 = 2{,}75 \times 10^{-13}$ J

Comme $1\ \mathrm{MeV} = 1{,}60 \times 10^{-13}$ J : $E(^2_1\mathrm{H}) = \dfrac{2{,}75 \times 10^{-13}}{1{,}60 \times 10^{-13}} = 1{,}72\ \mathrm{MeV}$

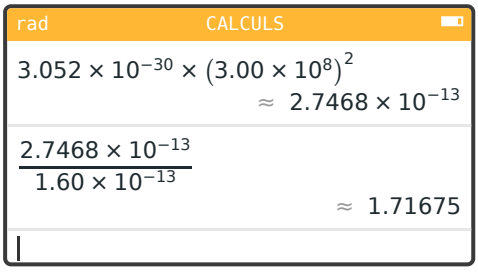
Cette énergie est l'énergie de liaison du noyau : celle qu'il faut apporter au noyau de deutérium au repos pour le séparer en un proton et un neutron isolés, au repos.

$E(^2_1\mathrm{H}) = 2{,}75 \times 10^{-13}$ J $= 1{,}72$ MeV : énergie de liaison du noyau.

PIÈGE
Oublier le carré sur c, ou convertir en eV au lieu de MeV : $1\ \mathrm{MeV} = 10^6\ \mathrm{eV} = 1{,}60 \times 10^{-13}$ J.

COMPRENDRE
Trois chiffres significatifs, comme c et la valeur de l'électronvolt, données les moins précises du calcul.

À LA CALCULATRICE



3 Donner l'expression littérale de l'énergie libérée par la réaction de fusion (1) en fonction des données de l'énoncé, puis la calculer en MeV.

Données utiles $^2_1\mathrm{H} + {}^3_1\mathrm{H} \rightarrow {}^4_2\mathrm{He} + {}^1_0\mathrm{n}$; $m(^3_1\mathrm{H}) = 5{,}008271 \times 10^{-27}$ kg ; $m(^4_2\mathrm{He}) = 6{,}646483 \times 10^{-27}$ kg ; $m(^2_1\mathrm{H})$, $m(\mathrm{n})$, c et l'électronvolt comme précédemment

L'énergie libérée correspond à la masse perdue au cours de la réaction :

$$E_{\mathrm{lib}} = \left[m(^2_1\mathrm{H}) + m(^3_1\mathrm{H}) - m(^4_2\mathrm{He}) - m(\mathrm{n})\right] \times c^2$$

Masse perdue : $(3{,}344497 + 5{,}008271 - 6{,}646483 - 1{,}674927) \times 10^{-27} = 3{,}1358 \times 10^{-29}$ kg

$E_{\mathrm{lib}} = 3{,}1358 \times 10^{-29} \times (3{,}00 \times 10^8)^2 = 2{,}82 \times 10^{-12}$ J

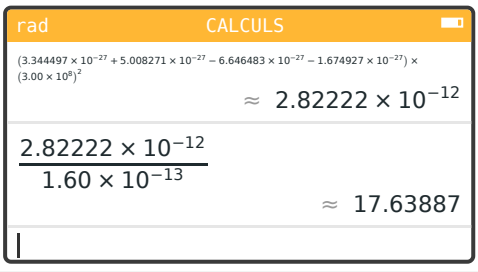
$E_{\mathrm{lib}} = \dfrac{2{,}82 \times 10^{-12}}{1{,}60 \times 10^{-13}}$

$E_{\mathrm{lib}} = 17{,}6$ MeV

COMPRENDRE
La variation d'énergie du système, (masse des produits − masse des réactifs)$\times c^2$, vaut $-17{,}6$ MeV : elle est négative car le système cède de l'énergie. L'énergie libérée est sa valeur absolue.

MÉTHODE
Vérifier le résultat avec l'énoncé : le texte annonce « quelques MeV » et la partie 4 donne 17,6 MeV.

À LA CALCULATRICE



4.1.1 Déterminer le nombre N de noyaux présents dans la masse $m = 1{,}0$ kg de deutérium.

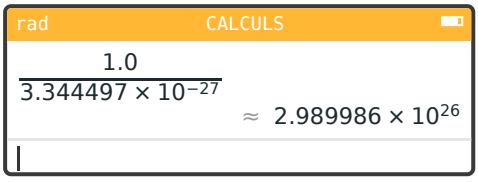
Données utiles $m(^2_1\mathrm{H}) = 3{,}344497 \times 10^{-27}$ kg ; la masse d'un atome est assimilée à celle de son noyau

$$N = \frac{m}{m(^2_1\mathrm{H})} = \frac{1{,}0}{3{,}344497 \times 10^{-27}}$$

$N = 3{,}0 \times 10^{26}$ noyaux

COMPRENDRE
Deux chiffres significatifs, comme $m = 1{,}0$ kg.

À LA CALCULATRICE



4.1.2 En déduire l'énergie E libérée par une masse $m = 1{,}0$ kg de deutérium.

Données utiles $N = 3{,}0 \times 10^{26}$ (4.1.1) ; énergie libérée par une réaction (1) : 17,6 MeV ; $1\ \mathrm{MeV} = 1{,}60 \times 10^{-13}$ J

Chaque réaction (1) consomme un noyau de deutérium : il y a donc N réactions, le tritium étant supposé disponible en quantité suffisante.

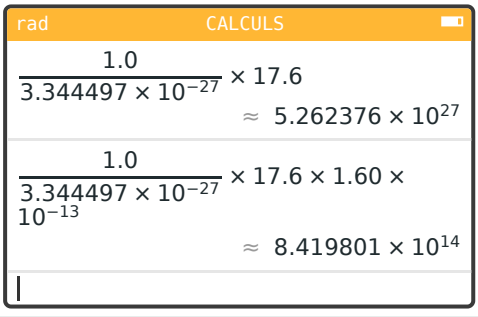
$E = N \times E_{\mathrm{lib}} = 3{,}0 \times 10^{26} \times 17{,}6 = 5{,}3 \times 10^{27}\ \mathrm{MeV}$

$E = 5{,}3 \times 10^{27} \times 1{,}60 \times 10^{-13}$

$E = 8{,}4 \times 10^{14}$ J

MÉTHODE
Garder la valeur non arrondie de N dans la calculatrice pour enchaîner les calculs, et n'arrondir que le résultat final.

À LA CALCULATRICE



4.2 Estimer, en années, la durée Δt nécessaire pour épuiser la réserve de deutérium des océans en répondant à la consommation annuelle actuelle.

Données utiles réserve $M = 4{,}6 \times 10^{13}$ tonnes ; consommation annuelle $E_{\mathrm{an}} = 4 \times 10^{20}$ J ; rendement 33 % ; $E = 8{,}4 \times 10^{14}$ J par kilogramme (4.1.2)

Réserve : $M = 4{,}6 \times 10^{13}$ t $= 4{,}6 \times 10^{16}$ kg.

Énergie libérée par la fusion de toute la réserve : $M \times E = 4{,}6 \times 10^{16} \times 8{,}4 \times 10^{14} = 3{,}9 \times 10^{31}$ J.

Énergie électrique obtenue : $E_{\mathrm{él}} = 0{,}33 \times 3{,}9 \times 10^{31} = 1{,}3 \times 10^{31}$ J.

$$\Delta t = \frac{E_{\mathrm{él}}}{E_{\mathrm{an}}} = \frac{1{,}3 \times 10^{31}}{4 \times 10^{20}}$$

$\Delta t \approx 3 \times 10^{10}$ ans

PIÈGE
Laisser la réserve en tonnes alors que E est donnée par kilogramme, ou oublier le rendement de 33 %.

COMPRENDRE
Un seul chiffre significatif, comme la consommation annuelle. Trente milliards d'années, c'est plus que l'âge de l'Univers : le deutérium n'est pas la ressource limitante, c'est le lithium, comme le dit l'énoncé.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$4.6 \times 10^{16} \times 8.4 \times 10^{14} \approx 3.864 \times 10^{31}$

$\dfrac{4.6 \times 10^{16} \times 8.4 \times 10^{14} \times 0.33}{4 \times 10^{20}} \approx 3.1878 \times 10^{10}$

5.1 Définir le temps de demi-vie $t_{1/2}$ de l'américium 241.

$t_{1/2}$ est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux d'américium 241 initialement présents dans l'échantillon se sont désintégrés : $N(t_{1/2}) = \dfrac{N_0}{2}$.

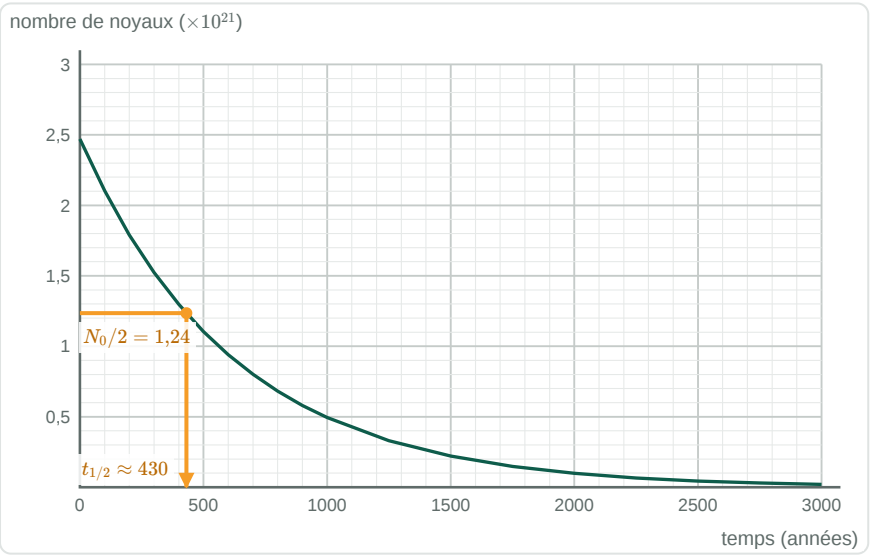
5.2 En utilisant la courbe et en précisant la méthode utilisée, déterminer ce temps de demi-vie.

Données utiles courbe $N(t)$ du sujet ; $N_0 = 2{,}47 \times 10^{21}$ noyaux

On calcule $\dfrac{N_0}{2} = \dfrac{2{,}47 \times 10^{21}}{2} = 1{,}24 \times 10^{21}$ noyaux.

On trace la droite horizontale d'ordonnée $1{,}24 \times 10^{21}$ jusqu'à la courbe, puis on lit l'abscisse du point d'intersection à l'aide de l'échelle de l'axe des temps (la graduation 1000 ans sert de repère).

$t_{1/2} \approx 4{,}3 \times 10^2$ ans



5.2 · Courbe du sujet avec la lecture graphique de la demi-vie

COMPRENDRE

Contrôle possible avec $t_{1/2} = \dfrac{\ln 2}{\lambda}$: on trouve $1{,}4 \times 10^{10}$ s, soit environ 430 ans. Une lecture entre 400 et 450 ans est acceptable.

MÉTHODE

Sur un axe peu gradué, mesurer à la règle : la distance de l'origine au point lu, rapportée à la distance qui représente 1000 ans, donne l'abscisse par proportionnalité.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$\dfrac{2.47 \times 10^{21}}{2} \approx 1.235 \times 10^{21}$

$\dfrac{\dfrac{\ln(2)}{5.1 \times 10^{-11}}}{365.25 \times 24 \times 3600} \approx 430.6766$

5.3 L'américium 241 se désintègre selon $^{241}_{95}\mathrm{Am} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{237}_{93}\mathrm{Np}$. De quel type de radioactivité s'agit-il ? Justifier.

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

Il s'agit d'une radioactivité α.

5.4.1 En utilisant l'équation de la courbe, déterminer la durée t_1, en années, au bout de laquelle un gramme d'américium 241 a une activité égale à $3{,}7 \times 10^3$ Bq.

Données utiles $A = \lambda N$; $N = N_0\, e^{-\lambda t}$; $\lambda = 5{,}1 \times 10^{-11}\ \text{s}^{-1}$; $N_0 = 2{,}47 \times 10^{21}$; $A(t_1) = 3{,}7 \times 10^3$ Bq

$A(t_1) = \lambda N(t_1) = \lambda N_0\, e^{-\lambda t_1}$, donc $e^{-\lambda t_1} = \dfrac{A(t_1)}{\lambda N_0}$, soit $-\lambda t_1 = \ln\left(\dfrac{A(t_1)}{\lambda N_0}\right)$.

$$t_1 = \frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{\lambda N_0}{A(t_1)}\right)$$

$$t_1 = \frac{1}{5{,}1 \times 10^{-11}} \times \ln\left(\frac{5{,}1 \times 10^{-11} \times 2{,}47 \times 10^{21}}{3{,}7 \times 10^3}\right) = 3{,}4 \times 10^{11}\ \text{s}$$

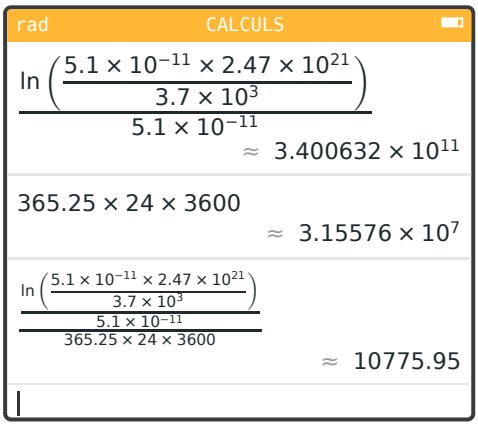
Une année dure $365{,}25 \times 24 \times 3600 = 3{,}16 \times 10^7$ s, d'où $t_1 = \dfrac{3{,}4 \times 10^{11}}{3{,}16 \times 10^7}$.

$t_1 = 1{,}1 \times 10^4$ ans

PIÈGE
L'unité S.I. de λ est la s^{-1} (l'activité est en becquerels, soit des désintégrations par seconde) : t_1 sort en secondes et doit être converti en années.

COMPRENDRE
L'activité initiale vaut $\lambda N_0 = 1{,}3 \times 10^{11}$ Bq : il faut la diviser par 34 millions environ, soit attendre 25 demi-vies.

À LA CALCULATRICE



5.4.2 L'ordre de grandeur de t_1 est de 10^4 ans. Préciser en quoi, dans le domaine des déchets, la fusion représente un avantage sur la fission.

Fission : un déchet comme l'américium 241 ne devient de faible activité qu'après environ 10^4 ans.

Fusion : d'après le texte, cent ans après l'arrêt du réacteur, la plupart des matériaux, voire tous, sont des déchets de très faible activité.

Les déchets de la fusion restent dangereux environ 100 fois moins longtemps (10^2 ans contre 10^4 ans) : leur stockage est beaucoup moins contraignant.