Physique 5 : Noyaux, masse et énergie

La désintégration de noyaux radioactifs libère de l'énergie, appelée énergie nucléaire.

1. Quelle est l'origine de l'énergie nucléaire ?

1.1 L'énergie libérée lors d'une désintégration radioactive

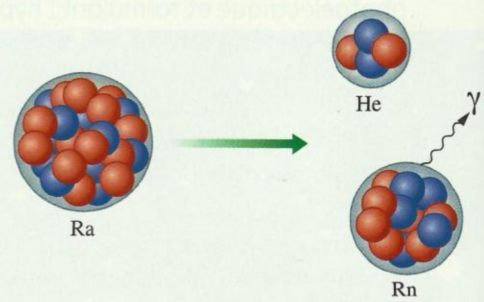
Considérons la désintégration spontanée du radium ^{226}Ra [Doc. 1] :

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow ^{222}_{86}Rn + ^{4}_{2}He + \gamma$$

Cette réaction nucléaire libère de l'énergie sous deux formes :

– **de l'énergie cinétique** : les particules produites sont émises avec une grande vitesse et possèdent donc de l'énergie cinétique ;

– **de l'énergie rayonnante :** le rayonnement γ est une onde électromagnétique de très courte longueur d'onde et d'énergie élevée.



Doc. 1 *La désintégration d'un noyau de radium donne un noyau de radon et une particule α :*

$m(Ra) > m(Rn) + m(He)$.

Il y a défaut de masse.

1.2 Le défaut de masse

Effectuons le bilan de masse de la réaction nucléaire précédente en comparant les masses des noyaux avant (m_{av}) et des noyaux après (m_{ap}) la réaction.

- **Avant la réaction :** $m_{av} = m(^{226}Ra) = 3{,}752\,4612 \times 10^{-25}$ kg.
- **Après la réaction :** $m_{ap} = m(^{222}Rn) + m(^{4}_{2}He)$

$$m_{ap} = 3{,}685\,9278 \times 10^{-25} + 6{,}644\,69 \times 10^{-27}$$

$$m_{ap} = 3{,}752\,3747 \times 10^{-25} \text{ kg.}$$

On constate que $m_{ap} < m_{av}$. Ce résultat est général :

Dans toute réaction nucléaire spontanée, la masse des noyaux après la réaction est inférieure à la masse des noyaux avant la réaction. On appelle défaut de masse, la quantité $D_m = m_{av} - m_{ap} > 0$.

Le défaut de masse est aussi appelé **perte de masse**.

Calculons le défaut de masse dans l'exemple précédent :

$D_m = m_{av} - m_{ap} = 3{,}7524612 \times 10^{-25} - 3{,}7523747 \times 10^{-25} = 8{,}65 \times 10^{-30}$ kg.

Ce défaut de masse est faible en valeur relative :

$$\frac{(m_{av} - m_{ap})}{m_{av}} = 2 \times 10^{-5} = 0{,}002\ \%.$$

Bien qu'il soit faible, les conséquences sont considérables : **le défaut de masse est à l'origine de l'énergie libérée par une réaction nucléaire.**

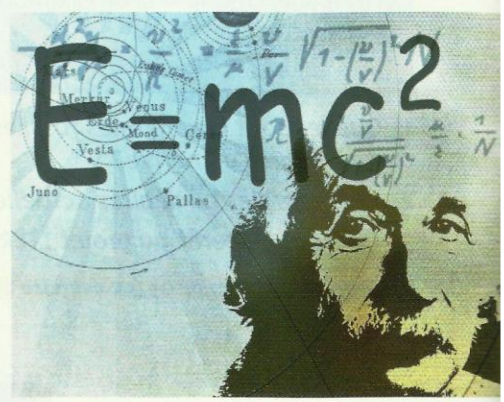
1.3 La relation d'EINSTEIN

> En 1905, Albert EINSTEIN postula l'équivalence entre la masse et l'énergie (voir l'*activité préparatoire A*, page 109, et le **document 2**) :

Toute particule de masse m possède une énergie de masse E_0 donnée par la relation :

$$E_0 = m \,.\, c^2.$$

E_0 s'exprime en joule (J) et m en kilogramme (kg) ; c est la célérité de la lumière dans le vide : $c = 2{,}9979 \times 10^8$ m . s^{-1}.



Doc. 2 *$E = m \,.\, c^2$ est la fameuse équation d'EINSTEIN.*

Si la particule est en mouvement, elle possède une énergie E égale à la somme de son énergie de masse E_0 et de son énergie cinétique E_C.

Interprétons la perte de masse de la réaction nucléaire précédente :

$$^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow \, ^{222}_{86}\mathrm{Rn} + \, ^{4}_{2}\mathrm{He} + \gamma$$

- **Avant la réaction :**

Supposons le noyau immobile; il ne possède pas d'énergie cinétique.
L'énergie du noyau de radium est égale à son énergie de masse :

$$m(^{226}\mathrm{Ra}) \, . \, c^2 = m_{av} \, . \, c^2.$$

- **Après la désintégration :**

L'énergie des produits est :

$$m(^{222}\mathrm{Rn}) \, . \, c^2 + m(^{4}\mathrm{He}) + E_C + E_\gamma = m_{ap} \, . \, c^2 + E_C + E_\gamma.$$

- **La conservation de l'énergie implique :**

$$m_{av} \, . \, c^2 = m_{ap} \, . \, c^2 + E_C + E_\gamma.$$

$\boldsymbol{E_C + E_\gamma = Q}$ est l'énergie libérée lors de la désintégration sous forme d'énergie cinétique et d'énergie rayonnante; d'où : $\boldsymbol{Q = (m_{av} - m_{ap}) \, . \, c^2}$.

Retenons :

L'énergie Q libérée par une désintégration radioactive spontanée est égale à :

$$Q = \Delta_m \, . \, c^2 = (m_{av} - m_{ap}) \, . \, c^2$$

avec Q en J, le défaut de masse en kg et c en m . s^{-1}.

La valeur de c = 299 792 458 m . s^{-1} est la valeur exacte de la vitesse de la lumière dans le vide. Le mètre est défini à partir de cette valeur dans le système international d'unités. Nous utiliserons une valeur approchée $c = 2{,}9979 \times 10^8$ m . s^{-1}

1.4 Unité de masse et énergie

Unité de masse

En physique nucléaire, les masses considérées étant petites, on les exprime en unité de masse atomique, de symbole u *[Doc. 3]*.

$$1 \text{ u} = 1{,}660\,54 \times 10^{-27} \text{ kg.}$$

Particule	Masse (en u)	Énergie (en MeV)
proton	1,007 28	938,272
neutron	1,008 66	939,565
électron	0,000 55	0,511

Doc. 3 *Masse et énergie du proton, du neutron et de l'électron.*

La masse d'une mole d'unité de masse atomique vaut 1 gramme :
$6{,}022 \times 10^{23} \times u = 1$ g.

Unité d'énergie

En chimie, on exprime parfois les énergies des liaisons chimiques en électronvolt (eV).

L'énergie libérée par une réaction nucléaire est environ un million de fois plus grande que celle libérée par une réaction chimique. Aussi, on utilise souvent, comme unité d'énergie, le mégaélectronvolt (MeV) :

$$1 \text{ eV} = 1{,}602\,177 \times 10^{-19} \text{ J}$$
$$1 \text{ MeV} = 1{,}602\,177 \times 10^{-13} \text{ J.}$$

Correspondance

D'après la relation d'Einstein, masse et énergie sont liées.

Une unité de masse atomique correspond à une énergie de :

$E = 1{,}660\,54 \times 10^{-27} \times (299\,792\,458)^2 = 1\,492{,}42 \times 10^{-13}$ J;

soit $E = 931{,}5$ MeV.

Donc **1 u correspond à une énergie de 931,5 MeV.**

$1 \text{ MeV} = 1{,}602\,177 \times 10^{-13}$ J.

L'unité de masse atomique correspond donc à une énergie égale à :

$$E = \frac{1492{,}42 \times 10^{-13}}{1{,}602\,177 \times 10^{-13}} = 931{,}5 \text{ MeV.}$$

Exercice d'entraînement 1

Calculer, en joule, l'énergie libérée par la désintégration :

a. d'un noyau de $^{226}_{88}Ra$;

b. d'un gramme de $^{226}_{88}Ra$.

Donnée : $M(^{226}_{88}Ra) = 226\ g.mol^{-1}$.

Les masses des noyaux de $^{226}_{88}Ra$, $^{222}_{86}Rn$ et $^{4}_{2}He$ sont données dans le paragraphe 1.2.

a. Nous avons calculé au paragraphe 1.2 :

$$D_m = m_{av} - m_{ap} = 8{,}65 \times 10^{-30}\ kg = 0{,}00521\ u.$$

L'énergie libérée par la désintégration d'un noyau de $^{226}_{88}Ra$ est donc égale à :

$$Q = 0{,}00521 \times 931{,}5 = 4{,}85\ MeV,\ \text{soit}\ 7{,}77 \times 10^{-13}\ J.$$

b. L'énergie libérée par la désintégration d'un gramme de $^{226}_{88}Ra$ est :

$$Q = 7{,}77 \times 10^{-13} \times 6{,}02 \times 10^{23} \times \frac{1}{226} = 2{,}07 \times 10^{9}\ J.$$

Remarque : Cette énergie correspond à la combustion d'environ 50 kg de pétrole.

Pour s'entraîner : Ex 1 et 3

2. Comment déterminer l'énergie de liaison d'un noyau ?

L'énergie de masse introduite précédemment permet de calculer l'énergie libérée par la formation d'un noyau à partir de ses nucléons.

2.1 Le défaut de masse d'un noyau

Un noyau d'hélium $^{4}_{2}He$ est constitué de 2 protons et de 4 − 2 = 2 neutrons. Comparons la masse du noyau d'hélium au repos et la masse de ses nucléons séparés, également au repos *[Doc. 4]* :

$M(^{4}_{2}He) = 4{,}00105\ u$;

$m(\text{nucléons séparés}) = 2\ m_p + (4-2)\ m_n = 4{,}032\ u.$

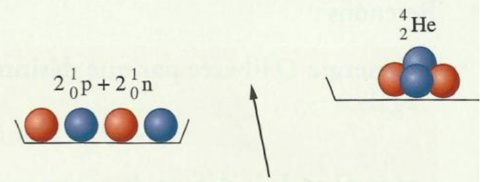
Donc $m(^{4}_{2}He) < m(\text{nucléons séparés})$.

Plus généralement :

Pour un noyau $^{A}_{Z}X$, le défaut de masse D_m est :

$$D_m = (Z.m_p + (A-Z).m_n) - m(^{A}_{Z}X) > 0$$

où m_p et m_n sont respectivement la masse d'un proton et la masse d'un neutron.



Doc. 4 *La masse du noyau d'hélium est inférieure à la somme des masses de deux protons et de deux neutrons séparés.*

2.2 L'énergie de liaison d'un noyau

L'énergie de liaison d'un noyau est l'énergie qui serait libérée par la formation d'un noyau $^{A}_{Z}X$ à partir de ses nucléons séparés.

L'énergie de liaison d'un noyau est égale à :

$$E_\ell = [(Z.m_p + (A-Z).m_n) - m(^{A}_{Z}X)].c^2 = D_m.c^2$$

Remarque : L'énergie de liaison E_ℓ est numériquement égale à l'énergie qu'il faudrait fournir à un noyau au repos pour le dissocier en nucléons, isolés et immobiles.

Bilan énergétique de la formation d'un noyau $^{A}_{Z}X$ au repos à partir de ses nucléons au repos :

nucléons séparés → noyau

$E_{av} = (Z.m_p + (A-Z).m_n).c^2$

$E_{ap} = m(^{A}_{Z}X).c^2$

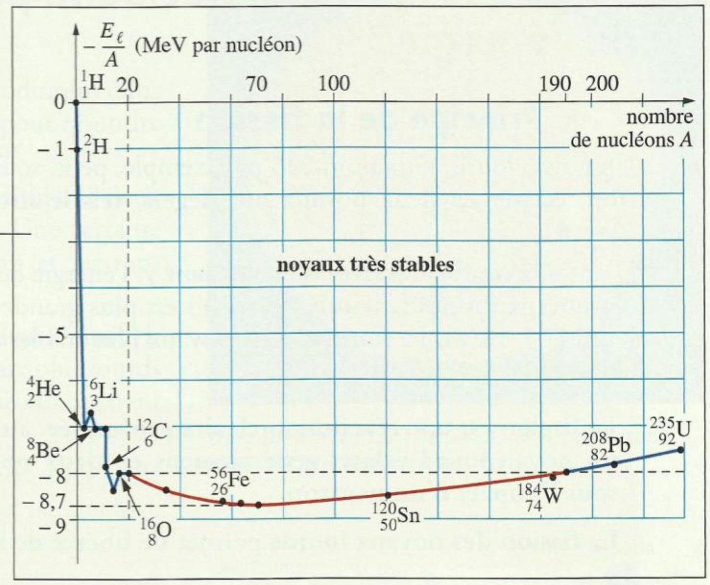
$E_{av} > E_{ap}$ et $E_{av} = E_{ap} + E_\ell$

$E_\ell = E_{av} - E_{ap} = D_m.c^2$

2.3 La courbe d'ASTON

La courbe d'ASTON représente l'opposée de l'énergie de liaison par nucléon en fonction du nombre de nucléons.

Quels renseignements fournit cette courbe?



Doc. 5 *Courbe d'ASTON. Les points situés sur la partie rouge de la courbe concernent les noyaux les plus stables.*

Activité

Comment rechercher la stabilité d'un noyau ?

La courbe du ***document 5*** est appelée courbe d'ASTON ***[Doc. 6]***.
Elle représente l'opposée de l'énergie de liaison par nucléon, c'est-à-dire le quotient $\left(-\frac{E_\ell}{A}\right)$ en fonction du nombre de nucléons pour chaque noyau.

1. *Dans quelle région de la courbe d'ASTON se situent les noyaux stables ?*

2. *Citer deux noyaux pour lesquels l'énergie de liaison par nucléon est importante.*

3. a. *L'énergie de liaison par nucléon du noyau d'uranium 235 est-elle supérieure à celle du noyau de fer 56 ?*

b. *Lequel de ces noyaux est le plus stable ?*

Doc. 6 *Francis William ASTON (1877-1945) participa à la découverte de l'isotopie. Il recensa les isotopes stables des principaux éléments. Il reçut le prix Nobel de Chimie en 1922.*

> Interprétation

Plus un noyau est lourd (A élevé), plus son énergie de liaison est importante. Toutefois, cela n'implique pas qu'il soit plus stable.

Ainsi :

– pour l'uranium 235, $\frac{E_\ell}{A} = 7{,}7$ MeV par nucléon ;

– pour le fer 56, $\frac{E_\ell}{A} = 8{,}79$ MeV par nucléon.

L'énergie de liaison par nucléon du fer 56 est effectivement plus importante que celle de l'uranium 235 : le fer est plus stable que l'uranium.

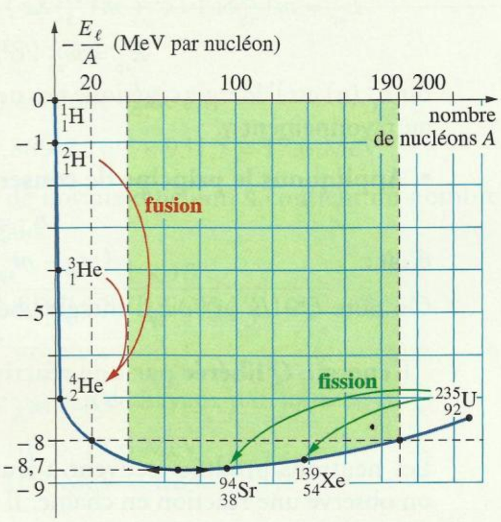
Un noyau est d'autant plus stable que son énergie de liaison par nucléon $\frac{E_\ell}{A}$ est grande.

Les noyaux stables se situent en bas, dans le creux, de la courbe d'ASTON.

Pour les noyaux très stables ($50 < A < 75$), $\frac{E_\ell}{A}$ est de l'ordre de 8,7 MeV.

> Conséquences

Les noyaux possédant des énergies de liaison par nucléon relativement faibles peuvent se transformer en d'autres noyaux plus stables avec libération d'énergie. Deux processus sont alors possibles ***[Doc. 7]*** : **la fission d'un noyau lourd ou la fusion de deux noyaux légers.** Contrairement aux désintégrations radioactives, ces réactions ne sont pas spontanées et doivent être amorcées.



Doc. 7 *Les processus de fission et de fusion.*

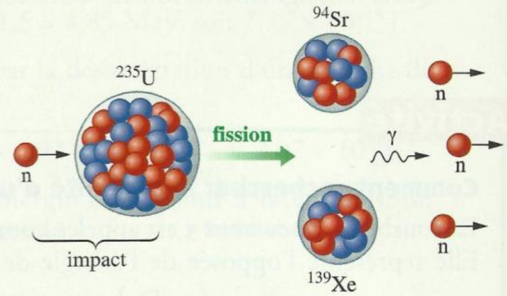
> *Pour s'entraîner : Ex 4 et 5*

3. Comment la fission nucléaire produit-elle de l'énergie ?

3.1 Principe de la fission

Un noyau lourd, l'uranium 235 par exemple, peut, sous l'impact d'un neutron, éclater en deux noyaux plus légers, tels le strontium et le xénon [Doc. 8].

D'après la courbe d'ASTON du **document 7**, l'énergie de liaison par nucléon des noyaux formés (environ 8,7 MeV) est plus grande que celle du noyau lourd (7,7 MeV). La formation de noyaux plus stables s'accompagne d'une libération d'énergie [Doc. 9].



Doc. 8 *Sous l'impact d'un neutron, un noyau d'uranium 235 peut se casser en donnant deux noyaux plus petits et d'autres neutrons. Les neutrons produits peuvent à leur tour casser des noyaux d'uranium (réaction en chaîne).*

La fission est une réaction nucléaire provoquée, au cours de laquelle un noyau lourd éclate, généralement en deux noyaux plus légers, sous l'impact d'un neutron.

La fission des noyaux lourds permet de libérer de l'énergie.

Les produits obtenus sont généralement radioactifs. Certains ont une demi-vie très longue (plusieurs centaines ou milliers d'années), ce qui rend difficile leur gestion.

3.2 Bilan énergétique

Considérons, par exemple, la fission de l'uranium 235 sous l'impact d'un neutron [Doc. 8] :

$$^{1}_{0}\text{n} + {}^{235}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{94}_{38}\text{Sr} + {}^{139}_{54}\text{Xe} + 3\,{}^{1}_{0}\text{n} + \gamma$$

Cette réaction respecte les lois de conservation, énoncées à la page 89.

Négligeons les énergies cinétiques des noyaux et celle du neutron incident, de l'ordre de quelques eV.

- **Avant la réaction :**

$$E_{av} = m_{av} \cdot c^2 = m({}^{235}_{92}\text{U}) \cdot c^2 + m({}^{1}_{0}\text{n}) \cdot c^2.$$

- **Après la fission :**

$$E_{ap} = m({}^{94}_{38}\text{Sr}) \cdot c^2 + m({}^{139}_{54}\text{Xe}) \cdot c^2 + 3\,m({}^{1}_{0}\text{n}) \cdot c^2 + E_C(\text{n}) + E_\gamma$$

$$E_{ap} = m_{ap} \cdot c^2 + E_C(\text{n}) + E_\gamma$$

où $E_C(\text{n})$ est l'énergie cinétique des neutrons produits et E_γ l'énergie associée au rayonnement γ.

- **Appliquons le principe de conservation de l'énergie :**

$$E_{av} = E_{ap} ;$$

d'où : $$(m_{av} - m_{ap}) \cdot c^2 = E_C(\text{n}) + E_\gamma$$

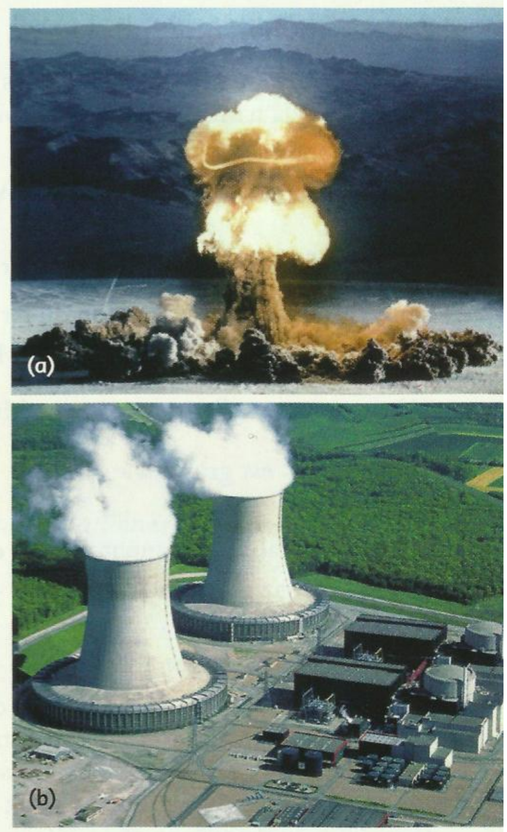
On note $Q = E_C(\text{n}) + E_\gamma$ l'énergie libérée par cette réaction.

L'énergie Q libérée par une réaction de fission est égale à :

$$Q = (m_{av} - m_{ap}) \cdot c^2$$

Les neutrons produits peuvent à leur tour casser des noyaux d'uranium : on observe une réaction en chaîne. Il est donc nécessaire de les contrôler.

> Pour s'entraîner : Ex 8



Doc. 9 *La fission nucléaire est réalisée dans :*
(a) la bombe A (fission non contrôlée) ;
(b) les réacteurs nucléaires (fission contrôlée), où l'énergie est convertie en énergie électrique.

4. Comment la fusion nucléaire produit-elle de l'énergie ?

La maîtrise des réactions de fusion, analogues à celles qui se produisent dans le Soleil et les étoiles **[Doc. 10]**, est le grand défi du XXI^e siècle pour résoudre les problèmes d'énergie (voir l'*activité préparatoire B*, page 109).

Pour obtenir une réaction de fusion, il faut rapprocher suffisamment deux noyaux légers. Ceux-ci, chargés positivement, se repoussent. Une certaine énergie est donc indispensable pour vaincre cette répulsion et les rapprocher.

La réaction de fusion de noyaux légers, tels que les noyaux de deutérium ${}^{2}_{1}H$, et de tritium, ${}^{3}_{1}H$, (isotopes de l'hydrogène), produit des noyaux plus lourds comme celui d'hélium **[Doc. 11]**. C'est sur cette réaction que se concentrent les recherches concernant la fusion contrôlée.

D'après la courbe d'ASTON, le noyau obtenu est plus stable. Son énergie de liaison par nucléon étant plus importante que l'énergie de liaison par nucléon des noyaux plus légers, de l'énergie est libérée au cours de la fusion.

La fusion est une réaction nucléaire au cours de laquelle deux noyaux légers fusionnent pour former un noyau plus lourd.

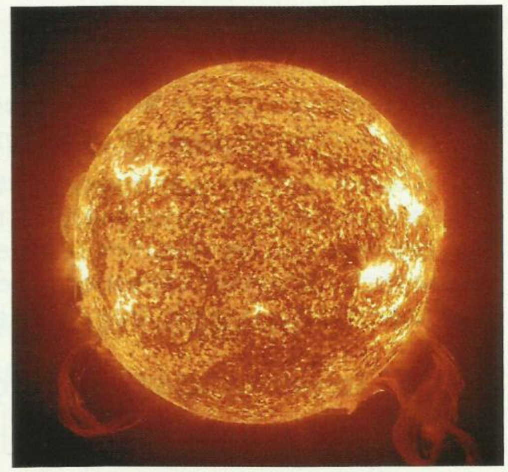
La fusion des noyaux légers permet de libérer de l'énergie.

Les réactions de fusion, comme celle de fission, respectent les lois de conservation (page 89).

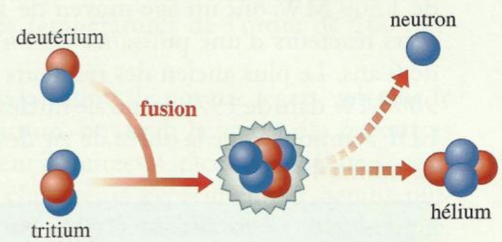
Pour une même masse de matière, le processus de fusion est encore plus énergétique que la fission.

Notons que les noyaux radioactifs obtenus ont une durée de vie très faible, ce qui rend facile leur gestion.

La première bombe à fusion, la bombe H, a été testée en 1952 par les États-Unis. Elle explosa sur l'atoll d'Eniwetok, dans le Pacifique. Mille fois plus puisante que la bombe atomique lancée sur Hiroshima, elle ne laissera plus rien de l'îlot après son exploision.



Doc. 10 *Notre étoile, le Soleil, où se produisent des réactions de fusion nucléaire.*



Doc. 11 *Une réaction de fusion produisant un noyau d'hélium à partir du deutérium et du tritium.*

Exercice d'entraînement 2

On considère la réaction de fusion :

$${}^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n$$

1. Calculer l'énergie libérée lors de la formation d'un noyau ${}^{4}_{2}He$.

2. Calculer l'énergie libérée lors de la formation d'un gramme d'hélium.

Données : $m({}^{2}_{1}H) = 2{,}01355$ u ; $m({}^{3}_{1}H) = 3{,}01550$ u ; $m({}^{4}_{2}He) = 4{,}00150$ u ; $m(n) = 1{,}00866$ u.
$1\ \mu = 1{,}660\,54 \times 10^{-27}$ kg.

1. La perte de masse est :

$$D_m = m_{av} - m_{ap}$$
$$= (2{,}01355 + 3{,}01550) - (1{,}008666 + 4{,}00150)$$

D'où : $D_m = 1{,}889 \times 10^{-2}$ u.

L'énergie libérée est donc égale à :

$$Q = D_m \cdot c^2 = 1{,}889 \times 10^{-2} \times 931{,}5 = 17{,}6 \text{ MeV}.$$

2. Un gramme de noyaux d'hélium 4 contient un nombre N de noyaux égal à :

$$N = \frac{m_{\text{échantillon}}}{m({}^{4}_{2}He)} = \frac{1 \times 10^{-3}}{4{,}00150 \times 1{,}66054 \times 10^{-27}}$$

$N = 1{,}50 \times 10^{23}$ noyaux.

L'énergie libérée par 1 g de noyaux d'hélium est :

$$N \cdot Q = 1{,}50 \times 10^{23} \times 17{,}6 \text{ MeV}$$
$$= 2{,}64 \times 10^{24} \text{ MeV} = 4{,}2 \times 10^{11} \text{ J}.$$

Pour s'entraîner : Ex. 8