

Activités préparatoires

A. L'équivalence masse-énergie

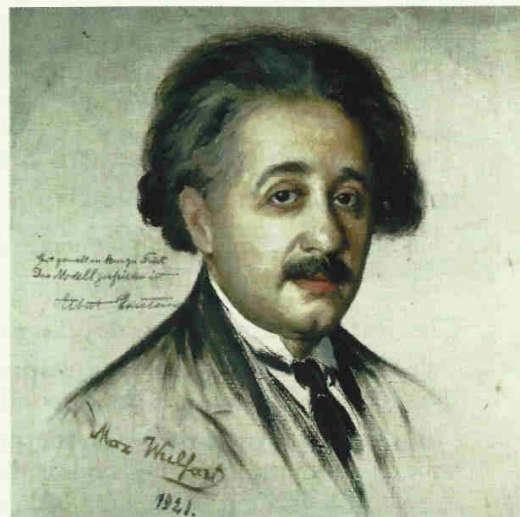
Albert EINSTEIN (1879-1955) est l'un des plus grands esprits scientifiques de tous les temps. En 1905, il publia deux mémoires qui devaient révolutionner la science : l'un proposant une théorie de l'effet photoélectrique et formulant l'hypothèse du photon, l'autre posant les bases de la relativité.

EINSTEIN bouleversa les conceptions d'espace et de temps et postula l'équivalence de la masse et de l'énergie : toute libération d'énergie s'accompagne d'une perte de masse.

Ainsi, la masse du Soleil diminue au fur et à mesure qu'il libère de l'énergie.

1. Sous quelle forme l'énergie libérée par le Soleil parvient-elle sur la Terre ?
2. Quelle formule emblématique, souvent connue du public, cite-t-on couramment pour évoquer A. EINSTEIN ?

➤ Voir § 1.3 du cours p. 110, et exercice 6, p. 122



B. Le projet ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)

« L'objectif du projet ITER est de démontrer la possibilité scientifique et technologique de la production d'énergie par la fusion des atomes.

Le site de Cadarache, près d'Aix-en-Provence, a été retenu. La fusion contrôlée représente un défi scientifique et technologique majeur qui pourrait répondre au problème crucial de disposer, à plus ou moins long terme, de nouvelles ressources énergétiques. L'énergie de fusion représente l'espoir d'avoir une source d'énergie propre et abondante au cours du xxi^e siècle. À l'heure où la raréfaction des énergies fossiles est prévue d'ici 50 ans, il est d'une importance vitale d'explorer le potentiel de toutes les autres sources d'énergie. 300 litres d'eau de mer peuvent fournir 1 g de deutérium, isotope de l'hydrogène, nécessaire à la réaction de fusion. Ainsi, l'eau des océans permettrait, à elle seule, de subvenir aux besoins mondiaux de l'humanité pendant, environ, un milliard d'années. »

Extrait du site <http://www.iter.gov.fr>

1. Quelles sont les énergies fossiles utilisées actuellement comme source d'énergie ?
2. Les centrales nucléaires actuelles fonctionnent-elles sur ce principe ?
3. Quel est l'intérêt du projet ITER ?

➤ Voir § 4 du cours p. 115, et exercice 28, p. 127



▲ Projet d'installation du réacteur ITER sur le site de Cadarache qui accueille actuellement le département de recherche sur la fusion contrôlée.

Comment extraire l'énergie des noyaux ?

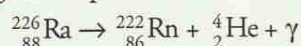
Physique 5 : Noyaux, masse et énergie

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

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

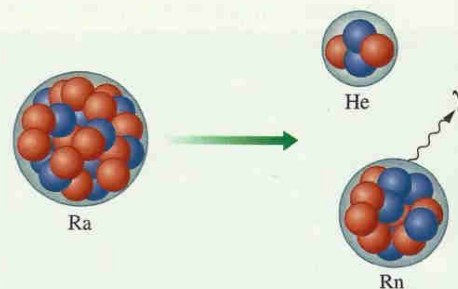
1.1 L'énergie libérée lors d'une désintégration radioactive

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



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 :

$$m(\text{Ra}) > m(\text{Rn}) + m(\text{He}).$$

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** : $m_{\text{av}} = m(^{226}\text{Ra}) = 3,752\,4612 \times 10^{-25} \text{ kg}$.

• **Après la réaction** : $m_{\text{ap}} = m(^{222}\text{Rn}) + m(^4_2\text{He})$

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

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

On constate que $m_{\text{ap}} < m_{\text{av}}$. 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 $D_m = m_{\text{av}} - m_{\text{ap}} > 0$.

Le défaut de masse est aussi appelé perte de masse.

Calculons le défaut de masse dans l'exemple précédent :

$$D_m = m_{\text{av}} - m_{\text{ap}} = 3,752\,4612 \times 10^{-25} - 3,752\,3747 \times 10^{-25} = 8,65 \times 10^{-30} \text{ kg}.$$

Ce défaut de masse est faible en valeur relative :

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

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.**

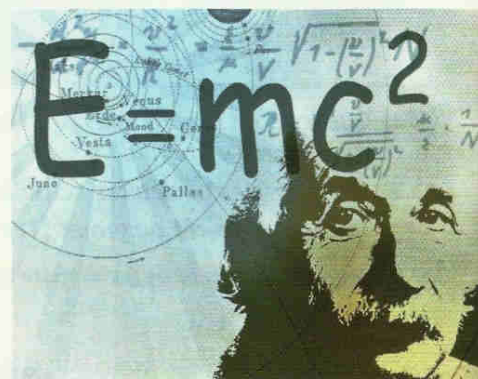
1.3 La relation d'EINSTEIN

➤ 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 :

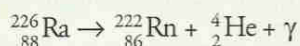
$$E_0 = m \cdot c^2.$$

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



Doc. 2 $E = m \cdot c^2$ 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 :



• **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 :

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

• **Après la désintégration :**

L'énergie des produits est :

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

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

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

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

Retenons :

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

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

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

La valeur de $c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 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 $c = 2,9979 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

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].

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

➤ 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 mégaelectronvolt (MeV) :

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

➤ Correspondance

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

Une unité de masse atomique correspond à une énergie de :

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

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

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

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 :
 $6,022 \times 10^{23} \times u = 1 \text{ g}.$

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

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 :

- d'un noyau de $^{226}_{88}\text{Ra}$;
- d'un gramme de $^{226}_{88}\text{Ra}$.

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

Les masses des noyaux de $^{226}_{88}\text{Ra}$, $^{222}_{86}\text{Rn}$ et ^4_2He sont données dans le paragraphe 1.2.

- Nous avons calculé au paragraphe 1.2 :

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

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

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

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

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

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_2He 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]** :

$$M(^4_2\text{He}) = 4,00105 \text{ u} ;$$

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

$$\text{Donc } m(^4_2\text{He}) < m(\text{nucléons séparés}).$$

Plus généralement :

Pour un noyau ^A_ZX , le défaut de masse D_m est :

$$D_m = (Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n) - m(^A_Z\text{X}) > 0$$

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

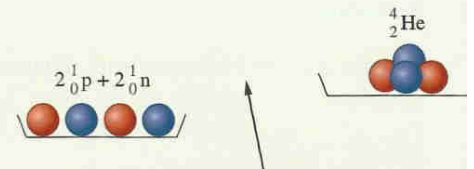
2.2 L'énergie de liaison d'un noyau

L'énergie de liaison d'un noyau est l'énergie qui serait libérée par la formation d'un noyau ^A_ZX à partir de ses nucléons séparés.

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

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

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.



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

Bilan énergétique de la formation d'un noyau ^A_ZX au repos à partir de ses nucléons au repos :

nucléons séparés $\rightarrow$ noyau

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

$$E_{ap} = m(^A_Z\text{X}) \cdot c^2$$

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

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

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 ?

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 ?

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.

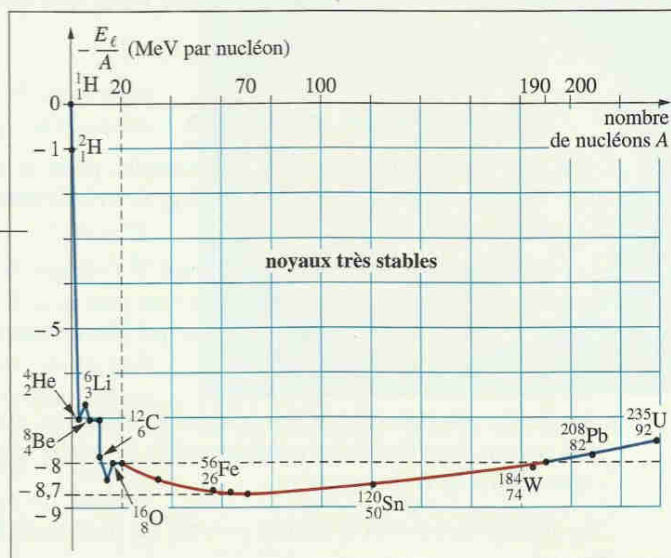
Les noyaux stables se situent en bas, dans le creux, de la courbe d'Aston.

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.

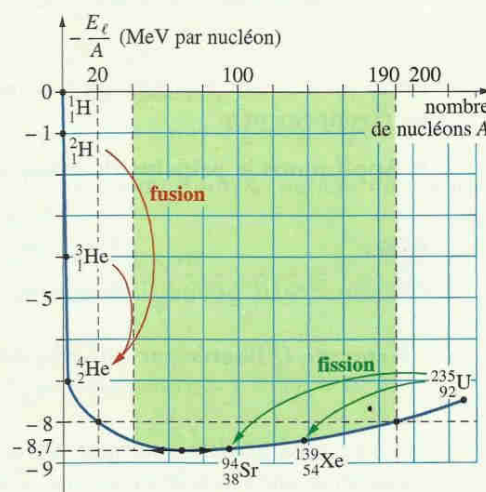
➤ Pour s'entraîner : Ex 4 et 5



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



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.



Doc. 7 Les processus de fission et de fusion.

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].

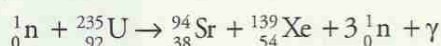
La fission est une réaction nucléaire provoquée, au cours de laquelle un noyau lourd éclate, généralement en deux noyaux plus légers, sous l'impact d'un neutron.

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] :



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 :**

$$E_{\text{av}} = m_{\text{av}} \cdot c^2 = m({}_{92}^{235}\text{U}) \cdot c^2 + m({}_0^1\text{n}) \cdot c^2.$$

• **Après la fission :**

$$E_{\text{ap}} = m({}_{38}^{94}\text{Sr}) \cdot c^2 + m({}_{54}^{139}\text{Xe}) \cdot c^2 + 3 m({}_0^1\text{n}) \cdot c^2 + E_{\text{C}}(\text{n}) + E_{\gamma}$$

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

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

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

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

d'où :

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

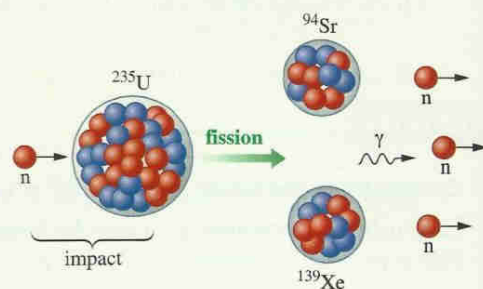
On note $Q = E_{\text{C}}(\text{n}) + E_{\gamma}$ l'énergie libérée par cette réaction.

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

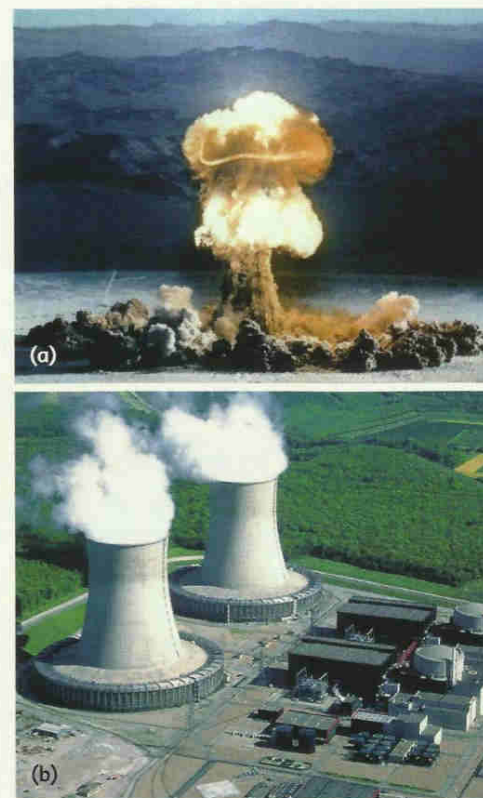
$$Q = (m_{\text{av}} - m_{\text{ap}}) \cdot c^2$$

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. 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).



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 ${}^2_1\text{H}$, et de tritium, ${}^3_1\text{H}$, (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.

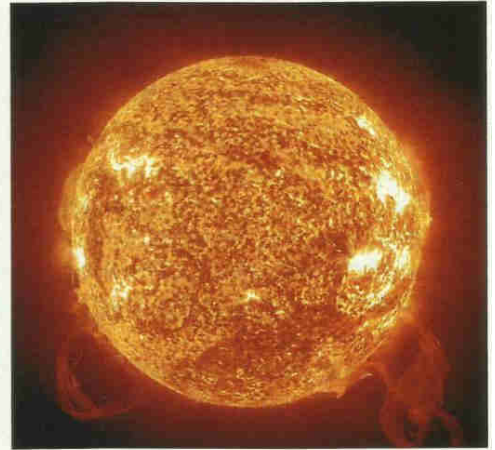
La fusion des noyaux légers permet de libérer de l'énergie.

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

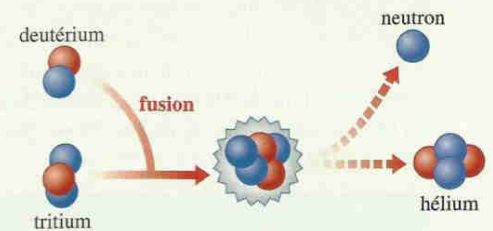
Pour une même masse de matière, le processus de fusion est encore plus énergétique que la fission.

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 puissante que la bombe atomique lancée sur Hiroshima, elle ne laissera plus rien de l'îlot après son explosion.



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 :



1. Calculer l'énergie libérée lors de la formation d'un noyau ${}^4_2\text{He}$.
2. Calculer l'énergie libérée lors de la formation d'un gramme d'hélium.

Données : $m({}^2_1\text{H}) = 2,01355 \text{ u}$; $m({}^3_1\text{H}) = 3,01550 \text{ u}$;
 $m({}^4_2\text{He}) = 4,00150 \text{ u}$; $m(\text{n}) = 1,00866 \text{ u}$.
 $1 \text{ u} = 1,66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

1. La perte de masse est :

$$\begin{aligned} D_m &= m_{\text{av}} - m_{\text{ap}} \\ &= (2,01355 + 3,01550) - (1,008666 + 4,00150) \end{aligned}$$

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

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 :

$$N = \frac{m_{\text{échantillon}}}{m({}^4_2\text{He})} = \frac{1 \times 10^{-3}}{4,00150 \times 1,66054 \times 10^{-27}}$$

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

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

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

> Pour s'entraîner : Ex. 8

Exercices du chapitre Physique 5 : Noyaux, masse et énergie

Applications directes

Connaître l'origine de l'énergie nucléaire

(§ 1 du cours)

1. Calculer un défaut de masse

- Définir le défaut de masse pour un noyau A_ZX .
- Calculer, en unité de masse atomique (u) et en kilogramme (kg), le défaut de masse du noyau de tritium 3_1H qui sera utilisé pour des réactions de fusion dans le projet ITER.

Données : $1 \text{ u} = 1,66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$; $m_n = 1,00866 \text{ u}$; $m_p = 1,00728 \text{ u}$; $m({}^3_1H) = 3,01550 \text{ u}$.

2. Connaître les unités de masse et d'énergie

- Parmi les unités suivantes, quelles sont les unités de masse et d'énergie : le joule (J), le watt (W), le kilogramme (kg), le newton (N), l'électronvolt (eV), l'unité de masse atomique (u).

2. Convertir :

- $2,88 \times 10^{-11} \text{ J}$ en eV;
- $1,248 \times 10^{-9} \text{ J}$ en MeV;
- $4,78 \times 10^2 \text{ eV}$ en J;
- 45 MeV en J.
- $2,3 \times 10^{-26} \text{ kg}$ en μ ;
- 3,02 μ en kg.

3. Calculer une énergie de masse

Calculer, en joule, l'énergie de masse d'un proton 1_1p et celle d'un noyau de deutérium 2_1H .

Données : $m({}^1_1p) = 1,67262 \times 10^{-27} \text{ kg}$; $m({}^2_1H) = 2,01355 \text{ u}$; $1 \text{ u} = 1,66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$; $c = 2,9979 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Calculer l'énergie de liaison des noyaux

(§ 2 du cours)

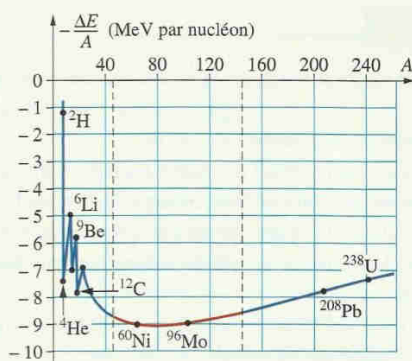
4. Calculer une énergie de liaison

- Définir l'énergie de liaison d'un noyau.
- Quelle est la relation permettant de calculer l'énergie de liaison d'un noyau A_ZX ? Préciser la signification de chacune des lettres de cette formule, ainsi que les unités.
- Calculer l'énergie de liaison du noyau de lithium 6_3Li .

Données : $m({}^1_1p) = 1,67262 \times 10^{-27} \text{ kg}$; $m({}^1_0n) = 1,67493 \times 10^{-27} \text{ kg}$; $m({}^6_3Li) = 9,98567 \times 10^{-27} \text{ kg}$; $c = 2,9979 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

5. Utiliser la courbe d'Aston

- Que représente la courbe d'Aston donnée ci-après?
- Où se situent les noyaux les plus stables sur cette courbe?
- Où se situent les noyaux les plus susceptibles de réaliser une fission? une fusion? Justifier la réponse.
- Quel est l'ordre de grandeur de l'énergie de liaison par nucléon du noyau de nickel 60?
- Quelle est l'ordre de grandeur de son énergie de liaison?



6. Comparer la stabilité des noyaux (voir l'activité préparatoire A)

- Le noyau 6_3Li a une masse de 6,01350 u. Calculer son défaut de masse en unité de masse atomique.
- On donne les défauts de masse de plusieurs noyaux :

Noyau	${}^{10}_4Be$	${}^{60}_{28}Ni$	${}^{208}_{82}Pb$	${}^{238}_{92}U$
Défaut de masse (en u)	0,00697	0,56557	1,75658	1,93394

- Déterminer les énergies de liaison des différents noyaux. Quelles seraient, en MeV, les énergies que l'on pourrait récupérer lors de la formation de ces noyaux à partir de nucléons isolés?
- Déterminer les énergies de liaison par nucléon, de ces noyaux.
- Classer les noyaux, du plus stable au moins stable.

Données : $m_n = 1,00866 \text{ u}$; $m_p = 1,00728 \text{ u}$; 1 u correspond à 931,5 MeV.

Étudier la fission nucléaire

(§ 3 du cours)

7. Calculer l'énergie libérée par une réaction de fission

Sous l'impact d'un neutron, un noyau d'uranium 235 (${}^{235}_{92}U$) éclate en deux noyaux : du krypton ${}^{90}_{36}Kr$ et du baryum ${}^{143}_{56}Ba$.

Lors de cette réaction, il y a libération de neutrons.

- Écrire l'équation de la réaction.
- Calculer la perte de masse correspondante.
 - Calculer l'énergie libérée par cette réaction.

Données : $m_n = 1,00866 \text{ u}$; $m_p = 1,00728 \text{ u}$; $m({}^{235}_{92}U) = 234,99332 \text{ u}$; $m({}^{90}_{36}Kr) = 89,89972 \text{ u}$; $m({}^{143}_{56}Ba) = 142,88982 \text{ u}$.
 1 u correspond à 931,5 MeV; $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$.

8. Connaître les caractéristiques d'une réaction de fission

Lors de la fission d'un noyau d'uranium 235, dans un réacteur nucléaire, parmi les deux noyaux fils pouvant se former, on trouve ceux de zirconium ${}^{99}_{40}Zr$ et de tellure ${}^{134}_{52}Te$. La fission se produit lors de l'impact d'un neutron sur un noyau d'uranium.

Infirmer ou confirmer, en les justifiant, les propositions suivantes.

- L'équation de la fission s'écrit : ${}^1_0n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{99}_{40}Zr + {}^{134}_{52}Te + x {}^1_0n$, avec $x = 2$.
- Cette réaction est spontanée.
- Il y a libération d'énergie au cours de cette fission.
- Sur la courbe d'Aston, $-\frac{E_c}{A} = f(A)$, les deux noyaux formés sont « plus bas » que celui d'uranium.

Données : $m({}^1_0n) = 1,00866 \text{ u}$; $m({}^{235}_{92}U) = 234,99332 \text{ u}$; $m({}^{99}_{40}Zr) = 98,893451 \text{ u}$; $m({}^{134}_{52}Te) = 133,88276 \text{ u}$;
 $E_c({}^{235}_{92}U) = 1783,6 \text{ MeV}$; $E_c({}^{99}_{40}Zr) = 845,5 \text{ MeV}$;
 $E_c({}^{134}_{52}Te) = 1123,3 \text{ MeV}$.

Étudier la fusion nucléaire

(§ 4 du cours)

9. Écrire des réactions de fusion

Dans une étoile, la température et la pression sont telles que des réactions de fusion peuvent avoir lieu. La réaction de fusion de l'hydrogène 1_1H en hélium 4_2He se fait en plusieurs étapes :

- première étape : deux noyaux d'hydrogène 1_1H fusionnent pour donner un noyau de deutérium 2_1H avec émission d'une particule;
- deuxième étape : un noyau d'hydrogène et un noyau de deutérium fusionnent pour donner un noyau d'hélium 3_2He ;
- troisième étape : deux noyaux d'hélium 3_2He fusionnent en un noyau d'hélium 4_2He . Il se forme également de l'hydrogène.

- Écrire les équations traduisant chacune des étapes de fusion décrites ci-dessus. Préciser, si besoin, le nom de la particule émise.
- En combinant les trois équations précédentes, écrire celle de fusion de l'hydrogène en hélium 4 (4_2He). Combien faut-il de noyaux d'hydrogène pour former un noyau d'hélium 4?

Exercices du chapitre Physique 5 : Noyaux, masse et énergie

10. Calculer l'énergie libérée par une réaction de fusion

L'une des nombreuses réactions pouvant se produire dans une étoile, comme le Soleil, est la fusion d'un noyau d'hydrogène $1, {}^1_1\text{H}$, avec un noyau d'hydrogène $2, {}^2_1\text{H}$, souvent appelé deutérium. Cette réaction forme un noyau d'hélium.

1. Quelle est la composition du noyau d'hydrogène 1 ? Pourquoi est-il parfois noté ${}^1_1\text{p}$?

2. Écrire l'équation de la réaction.

3. a. Calculer la perte de masse correspondante.

b. Calculer l'énergie libérée par cette réaction en joule, puis en MeV.

Données : $m_p = 1,672\,62 \times 10^{-27} \text{ kg}$;

$m({}^2_1\text{H}) = 3,343\,59 \times 10^{-27} \text{ kg}$; $m({}^4_2\text{He}) = 5,006\,42 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

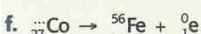
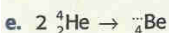
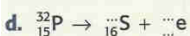
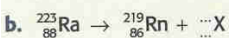
$c = 2,997\,9 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$.

Utilisation des acquis

12. Reconnaître une réaction nucléaire



1. Compléter les équations ci-dessous.



2. Indiquer le type de décomposition (α , β , fusion...).

14. Défaut de masse et énergie de liaison

Le noyau ${}_{86}^{222}\text{Rn}$, isotope du radon, est un descendant de l'uranium 238. Sa masse est $m({}^{222}\text{Rn}) = 221,970\,28 \text{ u}$.

1. Déterminer les nombres de neutrons et de protons dans un noyau ${}_{86}^{222}\text{Rn}$.

2. Calculer la masse de l'ensemble des nucléons séparés en unité de masse atomique.

3. Calculer le défaut de masse du noyau de l'atome de radon 222 en unité de masse atomique, puis en kilogramme.

4. a. Calculer, en joule, puis en MeV, l'énergie de liaison de ce noyau. **SOS**

b. Quelle est l'énergie qu'il faudrait fournir à ce noyau, au repos, pour le dissocier en nucléons isolés immobiles ?

c. Calculer l'énergie de liaison par nucléon.

Données : $m_n = 1,008\,66 \text{ u}$; $m_p = 1,007\,28 \text{ u}$;

$1 \text{ u} = 1,660\,54 \times 10^{-27} \text{ kg}$; $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$;

$c = 2,997\,9 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

15. Énergie de liaison d'isotopes d'un même élément

(voir l'exercice résolu 1)

« La matière première indispensable à la fabrication de l'hormone thyroïdienne est l'iode, que la thyroïde puise dans le sang ; cette hormone est indispensable à la croissance. Les quantités d'iode nécessaires à sa synthèse sont minimes : un homme normal possède environ 10 microgrammes d'iode pour 100 mL de sang. À chaque instant, la thyroïde prélève dans le sang autant d'iode, sous forme d'iodure, qu'elle en sécrète sous forme hormonale ; les quantités d'iode présentes dans le sang restent donc constantes. Néanmoins, l'utilisation de l'iode radioactif permet de suivre le métabolisme de l'iode et de mesurer la quantité d'hormone synthétisée. »

Extrait de *Pour la science*, dossier hors série, octobre 1996.

Parmi les isotopes de l'iode, l'iode 127 (${}_{53}^{127}\text{I}$) et l'iode 131 (${}_{53}^{131}\text{I}$), l'un est stable, l'autre est émetteur β^- .

1. a. Calculer les énergies de liaison, en joule puis en MeV, de ces deux isotopes. **SOS**

b. Quelle énergie faudrait-il fournir à chacun des deux noyaux, au repos, pour le dissocier en nucléons isolés au repos ?

2. a. Pour chacun des noyaux, calculer les énergies de liaison par nucléon.

b. En déduire l'isotope stable, puis l'isotope radioactif.

Données : $m({}^{127}_{53}\text{I}) = 2,106\,831 \times 10^{-25} \text{ kg}$;

$m({}^{131}_{53}\text{I}) = 2,173\,279 \times 10^{-25} \text{ kg}$; $m_n = 1,008\,66 \text{ u}$;

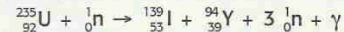
$m_p = 1,007\,28 \text{ u}$; $1 \text{ u} = 1,660\,54 \times 10^{-27} \text{ kg}$;

$c = 2,997\,9 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 1 u correspond à $931,5 \text{ MeV}$.

16. Bilan d'énergie d'une réaction de fission

Dans une centrale nucléaire, on utilise des noyaux d'uranium 235 comme combustible fissile.

L'un des modes de fission nucléaire de l'uranium 235 est le suivant :



1. Calculer, en MeV, puis en joule, l'énergie libérée au cours de cette fission.

2. Sous quelles formes apparaît cette énergie libérée ? **SOS**

3. Cette réaction peut-elle engendrer une réaction en chaîne ?

4. a. Calculer la quantité d'énergie libérée lors de la fission de 1 kg d'uranium 235.

b. Calculer la masse de pétrole qui produirait la même quantité d'énergie. Conclure en comparant les deux masses.

Données : $m({}^{235}\text{U}) = 234,993\,32 \text{ u}$; $m({}^{139}\text{I}) = 138,896\,95 \text{ u}$;

$m({}^{94}\text{Y}) = 93,890\,4 \text{ u}$; $m_n = 1,008\,66 \text{ u}$; 1 u correspond à une énergie de $931,5 \text{ MeV}$; 1 kg de pétrole peut produire 42 MJ d'énergie.

$1 \text{ MeV} = 1,602 \times 10^{-13} \text{ J}$; $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

$M({}^{235}\text{U}) = 235 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

17. Bilan d'énergie d'une réaction de fusion

(voir l'exercice résolu 2)

La réaction thermonucléaire suivante est l'une des plus énergétiques :



1. Calculer, en MeV, l'énergie dégagée par cette réaction.

2. a. Calculer l'énergie libérée lors de la formation de 1 kg d'hélium. **SOS**

b. Calculer la masse de pétrole qui fournirait la même quantité d'énergie. Conclure en comparant les deux masses.

Données : $m({}^2_1\text{H}) = 2,013\,55 \text{ u}$; $m({}^3_1\text{H}) = 3,015\,50 \text{ u}$;

$m_\alpha = 4,001\,5 \text{ u}$; $m_n = 1,008\,66 \text{ u}$.

Pouvoir calorifique du pétrole : $42 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

$N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$; 1 u correspond à $931,5 \text{ MeV}$.

19. Décomposition spontanée

L'ytterbium ${}_{70}^{165}\text{Yb}$ se décompose spontanément en thulium (Tm) par émission β^+ .

1. Écrire l'équation de désintégration de l'ytterbium.

2. Peut-on affirmer que le thulium est plus stable que l'ytterbium ?

3. Au cours de cette désintégration, on calcule une perte de masse de $2,41 \times 10^{-3} \text{ u}$.

a. Donner l'expression littérale du calcul réalisé.

b. Cette désintégration libère-t-elle de l'énergie ?

4. L'énergie de liaison de l'ytterbium est de $1,337 \times 10^3 \text{ MeV}$; celle du thulium de $1,341 \times 10^3 \text{ MeV}$.

a. Calculer l'énergie de liaison par nucléon pour chacun des noyaux.

b. Le résultat confirme-t-il la réponse donnée à la question 2. ?

20. Étude d'une réaction nucléaire provoquée

Des noyaux de lithium au repos, ${}^7_3\text{Li}$, sont bombardés avec des protons d'énergie cinétique 600 keV . On obtient deux particules α .

1. Écrire l'équation de cette réaction nucléaire.

2. Quelle est la perte de masse ?

3. En appliquant la loi de conservation de l'énergie, calculer la somme des énergies cinétiques des deux particules α . **SOS**

Données : $m({}^7_3\text{Li}) = 7,014\,35 \text{ u}$; $m_p = 1,007\,28 \text{ u}$;

$m({}^4_2\text{He}) = 4,001\,50 \text{ u}$;

1 u correspond à $931,5 \text{ MeV}$.