# 1 Équivalence masse-énergie

## 1. Équivalence masse-énergie

- Einstein a montré que la masse constitue une forme d'énergie appelée énergie de masse. La relation entre la masse (en kg) d'une particule, au repos, et l'énergie (en J) qu'elle possède est :

$$\boxed{E = m.c^2},$$

avec $c \approx 3{,}00.10^8$ m.s$^{-1}$, vitesse de la lumière dans le vide.

- L'unité d'énergie utilisée en physique nucléaire est l'électron-volt (eV) et ses multiples (keV, MeV, GeV) :

$$\boxed{1\text{eV} = 1{,}6.10^{-19}\text{ J}}.$$

## 2. Défaut de masse

- La masse d'un noyau est inférieure à la somme des masses des nucléons le constituant.

- On appelle **défaut de masse d'un noyau**, la différence entre la masse totale des nucléons séparés au repos et la masse du noyau constitué et au repos.

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

$$\boxed{\Delta m = (\text{Z}.m_p + (\text{A-Z}).m_n) - m_x},$$

avec $m_x$ : masse du noyau, $m_p$ : masse du proton et $m_n$ : masse du neutron.

- La formation d'un noyau à partir de ses constituants s'accompagne d'une perte de masse, donc d'une émission d'énergie.

## 3. Énergie de liaison

- L'énergie de liaison est l'énergie qu'il faut fournir à un noyau au repos pour le dissocier en nucléons isolés et immobiles :

$$\boxed{E_\ell + m_{\text{noyau}}.c^2 = m_{\text{nucléons}}.c^2}.$$

- Pour un noyau $^{A}_{Z}\text{X}$ : $E_\ell = m_{\text{nucléons}}.c^2 - m_X.c^2 = (\text{Z}.m_p + (\text{A} - \text{Z}).m_n)c^2 - m_X.c^2$.

On a : $E_\ell = [(\text{Z}.m_p + (\text{A} - \text{Z}).m_n) - m_X]c^2$, soit $\boxed{E_\ell = \Delta m.c^2}$.

L'énergie de liaison est toujours positive.

## 4. Énergie de liaison par nucléon

- Pour juger de la stabilité d'un noyau et pour comparer les différents types de noyaux entre eux, il est nécessaire de considérer l'énergie moyenne de liaison par nucléons, soit : $\frac{E_\ell}{A}$.
- Cette énergie correspond à l'énergie nécessaire pour arracher un nucléon au noyau.
- Un noyau est d'autant plus stable que son énergie de liaison par nucléon est grande.

*Exemples :* L'énergie de liaison du fer 56 est $E_\ell = 492$ MeV ; son énergie de liaison par nucléon est de 8,79 MeV/nucléon.
L'énergie de liaison de l'uranium 238 est $E_\ell = 1802$ MeV ; son énergie de liaison par nucléon est de 7,57 MeV/nucléon.
Le fer 56 est donc plus stable que l'uranium 238.

## Exemple d'application

Le noyau $^{16}_{8}O$ a une masse $m_{noyau} = 2{,}656.10^{-26}$ kg. En prenant $m_n = 1{,}675.10^{-27}$ kg et $m_p = 1{,}673.10^{-27}$ kg, calculer :

**1.** le défaut de masse $\Delta m_1$ ;

**2.** l'énergie de liaison $E_\ell$ de ce noyau en joule puis en MeV ;

**3.** l'énergie de liaison par nucléon $\frac{E_\ell}{A}$ en MeV/nucléon.

### Corrigé commenté

***Rappel :*** *sachez que la masse d'un noyau est inférieure à la somme des masses des nucléons le constituant.*

**1.** Par définition, on a : $\boxed{\Delta m = (Z.m_p + (A–Z).m_n) - m_{noyau}}$.

AN : $\Delta m = [8 \times 1{,}673.10^{-27} + (16 - 8).1{,}675.10^{-27}] - 2{,}656.10^{-26} = \mathbf{2{,}240.10^{-28}\ kg}$.

**2.** Par définition, on sait que : $\boxed{E_\ell = \Delta m.c^2}$.

AN : $E_\ell = 2{,}240.10^{-28}.(3{,}00.10^8)^2 = \mathbf{2{,}016.10^{-11}\ J}$.

En divisant par $1{,}6.10^{-19}$, on trouve : $E_\ell = 1{,}260.10^8$ eV, soit $E_\ell = \mathbf{126\ MeV}$.

**3.** On a : $\boxed{\frac{E_\ell}{A} = \frac{\Delta m.c^2}{A}}$. AN : $\frac{E_\ell}{A} = \frac{126}{16} \approx$ **7,88 MeV/nucléon**.

# 2 Fusion et fission

## 1. Courbe d'Aston

● La figure suivante donne les valeurs moyennes de $-E_\ell/A$ en fonction de A (courbe d'Aston) ; cette courbe permet de comparer la stabilité des différents types de noyaux.

● Sur cette figure, le niveau zéro de l'énergie correspond aux nucléons séparés et au repos. À un **minimum de la courbe** (valeur maximale pour $+E_\ell/A$) correspond une **stabilité maximale**.

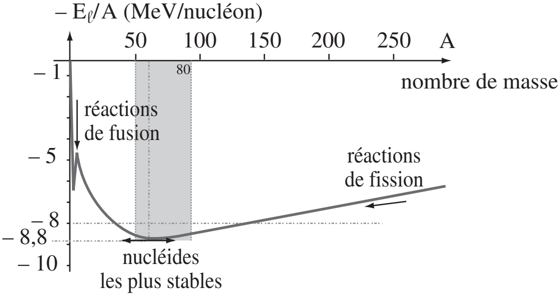


Fig. 5-1

## 2. Exploitation de la courbe d'Aston : domaines de la fission et de la fusion

● Pour $50 < A < 80$, la courbe présente un minimum très aplati qui correspond donc aux noyaux les plus stables.

● Les extrémités de la courbe correspondent aux noyaux les plus instables :
– un noyau très lourd ($A > 100$), bombardé par une particule adéquate peut se casser en deux noyaux plus légers : **c'est la fission nucléaire** ;
– un noyau léger peut donner un noyau plus lourd (possédant une énergie de liaison par nucléon plus grande) : **c'est la fusion nucléaire**.

## 3. La fission nucléaire

● Lors d'une fission nucléaire, un neutron lent dont l'énergie cinétique est de l'ordre de 0,1 MeV « casse » un noyau lourd **fissile** en formant deux noyaux plus légers et en libérant d'autres neutrons et de l'énergie.

● Le seul noyau naturel fissile est l'uranium 235.
Exemple de réaction : ${}^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{95}_{38}\mathrm{Sr} + {}^{139}_{54}\mathrm{Xe} + 2\,{}^{1}_{0}\mathrm{n} + \gamma$

● Si la masse de matière fissile dépasse une certaine valeur, appelée **masse critique**, les neutrons libérés pourront, à leur tour, provoquer une fission : c'est la réaction en chaîne.

## 4. Réaction en chaîne

Soit $k$ le nombre moyen de neutrons libérés qui provoquent une fission.

- Si $k < 1$, la réaction s'arrête. Le système est sous-critique.
- Si $k > 1$, la réaction peut devenir explosive. Le système est sur-critique.
- Si $k = 1$, la réaction s'auto-entretient. Le système est critique.

## 5. La fusion nucléaire

- Lors d'une fusion nucléaire, deux noyaux légers s'unissent pour former un noyau plus lourd en libérant de l'énergie.
- C'est la fusion d'hydrogène en hélium qui est à l'origine de l'énergie solaire : ${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} + 17$ MeV.
- Ces réactions sont très exoénergétiques (Bombe H).
- Les réactions de fusion ne peuvent s'effectuer qu'à très haute température ($\approx 10^8$ K). Ces réactions sont souvent appelées « réactions thermonucléaires ».

## Exemple d'application

**1.** Calculer l'énergie de liaison par nucléon $\frac{E_\ell}{A}$ (en MeV/nucléon) d'un noyau d'uranium 235. Quelle est sa particularité parmi tous les noyaux naturels ? On rappelle que le numéro atomique de l'uranium est 92.

**2.** Lors de sa fission, il peut par exemple donner un noyau ${}^{148}_{57}\mathrm{La}$, un noyau de brome et 3 neutrons. Écrire l'équation de cette réaction.

### Corrigé commenté

**1.** ***Indication*** *: calculez d'abord le défaut de masse.*

Par définition, $\frac{E_\ell}{A} = \frac{\Delta m.c^2}{A} = \frac{\left[\left(Z.m_p + (A-Z).m_n\right) - m_{\text{noyau}}\right].c^2}{A}$.

AN: $\frac{E_\ell}{A} = \approx 1{,}24.10^{-12}$ J/nucléon.

En divisant par $1{,}6.10^{-19}$, on a : $E_\ell = 7{,}76.10^6$ eV/nucléon = **7,76 MeV/nucléon**. C'est le seul noyau naturel fissile !

**2.** ***Indication :*** *utilisez les lois de conservation pour équilibrer la réaction.*

En utilisant les lois de conservation de la charge et des nucléons, on obtient :

$$ {}^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{148}_{57}\mathrm{La} + {}^{85}_{35}\mathrm{Br} + 3.\,{}^{1}_{0}\mathrm{n} + \gamma. $$

# 3 Bilan de masse et d'énergie d'une réaction nucléaire

## 1. Masse en physique nucléaire

● Pour exprimer les masses, en physique nucléaire, on utilise une unité pratique : l'**unité de masse atomique** (symbole **u**) qui est, par convention, le douzième de la masse d'un atome de carbone 12.

$$1\,\text{u} = \frac{1}{12} \cdot \frac{12.10^{-3}}{N_A} \approx 1,66\ .\ 10^{-27}\,\text{kg}$$

● D'après la relation d'Einstein, 1 u équivaut à 931,5 MeV.

| | proton | neutron | électron | positon ou positron | particule $\alpha$ |
|---|---|---|---|---|---|
| masse (en kg) | $1,6726.10^{-27}$ | $1,6479.10^{-27}$ | $9,1095.10^{-31}$ | $9,1095.10^{-31}$ | $6,6470.10^{-27}$ |
| masse (en u) | 1,007 3 | 1,008 7 | $0,55.10^{-3}$ | $0,55.10^{-3}$ | 4,001 5 |
| énergie au repos (en MeV) | 938,3 | 939,6 | 0,5 | 0,5 | 3 728,4 |

## 2. Énergie libérée par une réaction nucléaire

● L'énergie libérée par une réaction nucléaire correspond à la **diminution de la masse totale du système**.

Cette **perte de masse** $\Delta M$ est :

$\Delta M$ = (masse totale avant réaction) – (masse totale après réaction) = $m_{\text{av}} - m_{\text{ap}}$.

● D'après la relation d'Einstein, l'énergie correspondante est égale à :

$$E = \Delta M.c^2 = (m_{\text{av}} - m_{\text{ap}}).c^2.$$

● Cette énergie est libérée sous forme :

– d'énergie cinétique communiquée aux particules créées ;

– d'énergie de rayonnement $\gamma$ (rayonnement électromagnétique de très grande fréquence et donc de grande énergie).

# Exemples d'application

**1** On considère la fission nucléaire suivante :

$$^{239}_{94}\text{Pu} + {}^{1}_{0}\text{n} \rightarrow {}^{138}_{56}\text{Ba} + {}^{90}_{38}\text{Sr} + x.\,{}^{1}_{0}\text{n}.$$

On s'aidera du tableau ci-contre et des données suivantes : $m_{\text{Pu}}$ = 239,0522 u ; $m_{\text{Ba}}$ = 137,9050 u ; $m_{\text{Sr}}$ = 89,9070 u et 1 u = $1{,}66.10^{-27}$ kg.

**1.** Calculer le nombre de neutrons libérés par cette réaction.

**2.** Quelle quantité d'énergie libère cette réaction ?

**3.** Quelle énergie (en MeV) est libérée lors de la fission de 100 grammes de plutonium ?

## Corrigé commenté

***Indication*** *: utilisez les lois de conservation puis quand l'équation est complètement connue, calculez la perte de masse.*

**1.** La conservation du nombre de nucléons s'écrit : 239 + 1 = 138 + 90 + x, soit x = 12. Cette réaction libère donc **12 neutrons**.

**2.** La masse perdue est : $\Delta M = (m_{\text{av}} - m_{\text{ap}})$.
On obtient : $\Delta M = (m_{\text{Pu}} + m_{\text{n}}) - (m_{\text{Ba}} + m_{\text{Sr}} + 12.m_{\text{n}})$.
$\Delta M$ = (239,0522 + 1,00087) – (137,9050 + 89,9070 + 12 × 1,00087) = 0,23063 u.
Or 1 u correspond à une énergie de 931,5 MeV. L'énergie libérée vaut donc : $E_1$ = 0,23063 × 931,5 = **214,832 MeV**.

**3.** La masse d'un atome de plutonium est $m_{\text{Pu}}$ = 239,0522 u = $3{,}9683.10^{-25}$ kg.
D'où, dans 100 g de plutonium, il y a

$$N = \frac{0{,}1}{m_{\text{Pu}}} = \frac{0{,}1}{3{,}9683.10^{-25}} \approx \mathbf{2{,}5200.10^{23}\ \text{atomes}}.$$

Donc cette fission libère $\boldsymbol{E_2} = 2{,}5200.10^{23} \times 214{,}832 = \mathbf{5{,}414.10^{25}}$ **MeV**.

**2** On considère la réaction nucléaire suivante : ${}^{2}_{1}\text{H} + {}^{3}_{1}\text{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\text{He} + {}^{1}_{0}\text{n}$. Quelle énergie (en MeV) est libérée lors de la formation d'un noyau d'hélium ?

On donne les énergies de liaison par nucléon : ${}^{2}_{1}\text{H}$ : 1,10 MeV ; ${}^{3}_{1}\text{H}$ : 2,83 MeV et ${}^{4}_{2}\text{He}$ : 7,07 MeV.

## Corrigé commenté

***Indication*** *: pensez à multiplier l'énergie de liaison par nucléon par le nombre de nucléons pour trouver l'énergie de liaison totale d'un noyau.*

L'énergie libérée par la formation d'un noyau d'hélium est égale à la variation des énergies de liaison : $E_1 = (E_\ell({}^{4}_{2}\text{He}) - (E_\ell({}^{2}_{1}\text{H}) + E_\ell({}^{3}_{1}\text{H}))$.
On calcule : $\text{E}_1$ = (6 × 7,07) – (3 × 1,10 + 4 × 2,83) = **27,8 MeV**.