Chapitre 5 : Noyaux, masse et énergie

1. Équivalence entre masse et énergie

1.1. Énergie de masse

La relativité restreinte établit qu'une particule de masse m, au repos, possède une énergie appelée **énergie de masse**.

$$\boxed{E = mc^2}$$

où :

— E est l'énergie de masse, exprimée en joules ;

— m est la masse de la particule, exprimée en kilogrammes ;

— $c = 3{,}00 \times 10^8\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ est la célérité de la lumière dans le vide.

Cette relation montre que la masse constitue une forme d'énergie.

Une très faible variation de masse peut donc correspondre à une énergie considérable.

Pour une masse de 1,0 g entièrement convertie en énergie :

$$E = mc^2 = 1,0 \times 10^{-3} \times (3,00 \times 10^8)^2 = 9,0 \times 10^{13}\ \text{J}.$$

cette énergie correspond à : $E = \frac{9{,}0.10^{13}}{3{,}6.10^6} = 2,5.10^7 kWh = 25 GWh$

En pratique, cette quantité d'énergie pourrait, idéalement :

— alimenter un appareil de 1 kW pendant environ 2 850 ans ;

— alimenter une ampoule de 100 W pendant environ 28 500 ans ;

— fournir à une voiture électrique consommant 15 kWh/100km de quoi parcourir environ 167 millions de kilomètres ;

1.2. Unités utilisées en physique nucléaire

— **Unité de la masse**

A l' échelle, ùicroscopique il est possible d'utiliser comme unité de masse **l'unité de masse atomique (notée u).**

L'unité de masse atomique est définie par :

$$1u = \frac{m\,(1\,atome\,{}^{12}_{6}C)}{12} = \frac{M\,({}^{12}_{6}C)}{N_A} \times \frac{1}{12} = \frac{12,0000.10^{-3}}{6,02214.10^{23}} \times \frac{1}{12} = 1,066054.10^{-27} kg$$

$$\boxed{1\ \text{u} = 1,66054 \times 10^{-27}\ \text{kg}}.$$

Exemple : Conversion des masses en unité de masse atomique

$$m_p = \frac{1{,}6726 \times 10^{-27}}{1{,}66054 \times 10^{-27}} = 1{,}007277\,\text{u}$$

$$m_n = \frac{1{,}6750 \times 10^{-27}}{1{,}66054 \times 10^{-27}} = 1{,}008665\,\text{u}$$

— **Unité de l'énergie**

Le joule est peu adapté à l'échelle nucléaire. On utilise **l'électron volt (noté eV)** et ses multiples.

$$1eV = 1,6021764610^{-19}J \qquad ; \qquad 1MeV = 10^6\ eV = 1,6021764610^{-13}J$$

Exemple :

$$E_e = m_e c^2 = \frac{9,11 \times 10^{-31} \times \left(3,00 \times 10^8\right)^2}{1,60 \times 10^{-19}} = 5,11 \times 10^5\ \text{eV} = 0,511\ \text{MeV}$$

$$E_p = m_p c^2 = \frac{1,6726 \times 10^{-27} \times \left(3,00 \times 10^8\right)^2}{1,60 \times 10^{-19}} = 9,40 \times 10^8\ \text{eV} = 940\ \text{MeV}$$

— **l'énergie équivalente de 1u**

$$\text{E} = \text{m.c}^2 = 1u.\text{c}^2 = \frac{1,6605410^{-27} \times \left(2,9979.10^8\right)^2}{1,6021764610^{-19}} = 931{,}479462{,}5.10^6\ \text{ eV} \simeq 931{,}5\ \text{MeV}$$

L'unité $\boldsymbol{MeV/c^2}$ est une unité de masse ; elle est définie à partr de la relation $\boldsymbol{m = \frac{E}{c^2}}$ donc on peut écrire :

$$\boxed{1u = 931,5MeV/c^2.}$$

2. Défaut de masse d'un noyau

— **Masse des nucléons séparés**

Considérons un noyau ${}^A_Z X$.

Il contient : Z protons et $N = A - Z$ neutrons.

La masse totale des nucléons séparés est :

$$m_{\text{nucléons}} = Z\, m_p + (A - Z) m_n.$$

— **Définition du défaut de masse**

Expérimentalement, la masse m_X du noyau est inférieure à la somme des masses de ses nucléons pris séparément.

Le **défaut de masse** d'un noyau est la différence entre la masse totale de ses nucléons séparés et la masse réelle du noyau :

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

Le défaut de masse est toujours positif pour un noyau lié.

La « masse manquante » n'a pas disparu : elle correspond à l'énergie libérée lors de la formation du noyau.

Exemple : Calcul du défaut de masse du noyau d'uranium 235 Pour le noyau d'uranium :

$^{235}_{92}\mathrm{U}, \qquad Z = 92, \qquad N = 235 - 92 = 143.$
Les masses des particules sont :

$m_p = 1,007277$ u, $\quad m_n = 1,008665$ u, $\quad m(^{235}_{92}\mathrm{U}) = 234,99346$ u.

Le défaut de masse vaut : $\Delta m = 92\, m_p + 143\, m_n - m(^{235}_{92}\mathrm{U})$.

En remplaçant par les valeurs numériques :

$\Delta m = 92 \times 1,007277 + 143 \times 1,008665 - 234,99346 = 92,669484 + 144,239095 - 234,99346 = 1,915$ u

3. Énergie de liaison

3.1. Définition

L'**énergie de liaison** E_ℓ d'un noyau est l'énergie minimale qu'il faut fournir pour séparer complètement ce noyau en nucléons isolés.

$$\boxed{E_\ell = \Delta m\, c^2}.$$

Si Δm est exprimé en unité de masse atomique, alors :

$$\boxed{E_\ell(\mathrm{MeV}) = \Delta m(\mathrm{u}) \times 931,5}.$$

Exemple : Calcul de l'énergie de liaison du noyau d'uranium 235

$$\Delta m = 1,915\,\mathrm{u} = 1,915 \times 1,66054 \times 10^{-27} = 3,18 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg}$$

$$E_\ell = \Delta m\, c^2 = 3,18 \times 10^{-27} \times \left(3,00 \times 10^{8}\right)^2 = 2,86 \times 10^{-10}\ \mathrm{J}$$

$$E_\ell = \frac{2,86 \times 10^{-10}}{1,60 \times 10^{-13}} = 1,79 \times 10^{3}\ \mathrm{MeV} = 1790\mathrm{MeV}$$

$$E_\ell = 1,915 \times 931,5 = 1,784 \times 10^{3}\ \mathrm{MeV} = 1784\ \mathrm{MeV}$$

3.2. Énergie de liaison par nucléon

Pour comparer la stabilité de noyaux dont les nombres de masse sont différents, on utilise l'énergie de liaison moyenne par nucléon :

L'énergie de liaison par nucléon d'un noyau est le quotient de son énergie de liaison par le nombre de ses nucléons. On la note E_A.

$$\boldsymbol{\frac{E_\ell}{A}}.$$

Elle s'exprime généralement en MeV/nucléon : .

Plus l'énergie de liaison par nucléon est grande, plus le noyau est fortement lié et, en général, plus il est stable.

Exemple : Comparaison de stabilité de quelques noyaux

Noyau	E_ℓ **(MeV)**	$\frac{E_\ell}{A}$ **(MeV/nucléon)**
$^{4}_{2}\mathrm{He}$	28,30	7,07
$^{16}_{8}\mathrm{O}$	127,62	7,98
$^{56}_{26}\mathrm{Fe}$	492	8,79
$^{235}_{92}\mathrm{U}$	1784	7,59

Le noyau le plus stable est le fer 56 et le moins stable est l'hélium 4

4. Courbe d'Aston et stabilité nucléaire

La courbe d'Aston représente généralement l'opposé de l'énergie de liaison par nucléon : $-\frac{E_\ell}{A}$ en fonction du nombre de masse A.

La courbe permet de distinguer trois domaines :

— les **noyaux légers**, situés à gauche de la courbe ;

— les **noyaux de masse moyenne**, proches du fer et du nickel, qui présentent la plus grande énergie de liaison par nucléon et sont donc les plus stables ;

— les **noyaux lourds**, situés à droite de la courbe.

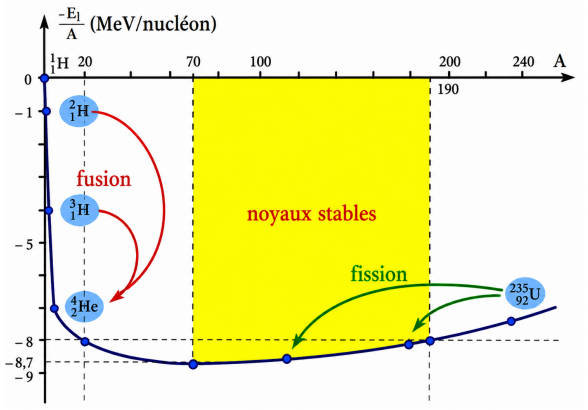


Figure 1 – Courbe d'Aston

Les transformations nucléaires susceptibles de libérer de l'énergie sont celles qui conduisent vers des noyaux plus fortement liés :

— la **fusion** concerne principalement les noyaux légers ;

— la **fission** concerne principalement les noyaux lourds.

5. Énergie libérée par une réaction nucléaire

— Lors des réactions nucléaires on constate que la somme des masses des produits est inférieure à la somme des masses des réactifs.

— On appelle cette différence le défaut de masse noté : $\Delta m = \sum m_{après} - \sum m_{avant} < 0$

— Elle se transforme en énergie $\Delta E = \Delta m.c^2 < 0$

Énergie libérée
L'énergie libérée est donnée par :

$$\boldsymbol{E_{\ell ib} = |\Delta E| = |\Delta m|.c^2 > 0}$$

— Si les masses sont exprimées en unités de masse atomique :

$$\boldsymbol{E_{\ell ib} = |\Delta E| = |\Delta m|.(\mathrm{u}) \times 931,5}$$

— L'énergie libérée apparaît principalement sous forme d'énergie cinétique des produits et, parfois, sous forme de rayonnement électromagnétique.

6. Fission nucléaire

6.1. Définition

La **fission nucléaire** est la division d'un noyau lourd en deux noyaux plus légers, généralement provoquée par la capture d'un neutron.

Exemple de réaction de fission

Lorsqu'un neutron lent frappe un noyau d'uranium 235, celui-ci devient instable et se divise en deux noyaux plus légers en libérant plusieurs neutrons ainsi qu'une grande quantité d'énergie.
L'une des réactions possibles est : $^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow {}^{141}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{92}_{36}\mathrm{Kr} + 3\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$
Cette réaction respecte les lois de conservation.
D'autres modes de fission sont également possibles :

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow {}^{144}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{89}_{36}\mathrm{Kr} + 3\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow {}^{140}_{54}\mathrm{Xe} + {}^{94}_{38}\mathrm{Sr} + 2\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

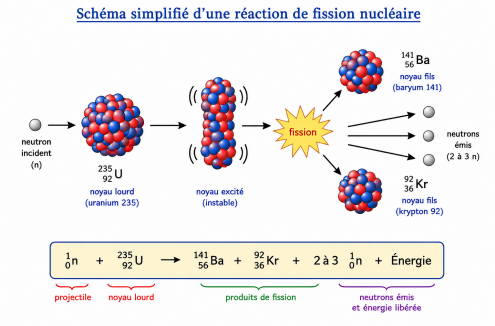


Figure 2 – Schéma simplifié d'une réaction de fission nucléaire

6.2. Réaction en chaîne

Les neutrons libérés lors d'une fission peuvent provoquer de nouvelles fissions. Une succession de réactions est alors possible.

Une **réaction en chaîne** est une succession auto-entretenue de réactions de fission provoquées par les neutrons issus des réactions précédentes.

— Dans un réacteur nucléaire, la réaction est contrôlée.

— Dans une arme nucléaire, elle est très rapide et non contrôlée.

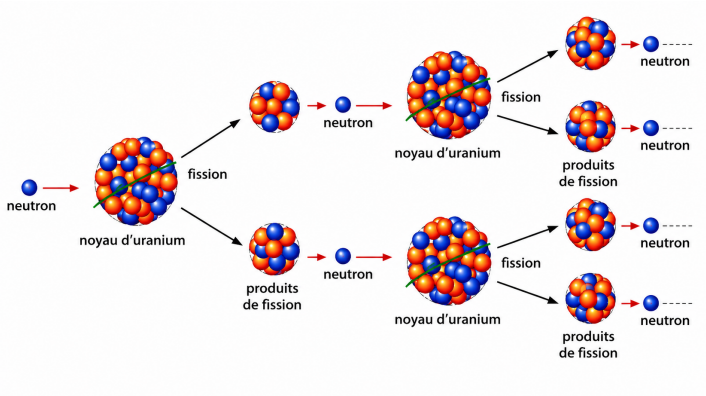


Figure 3 – Principe d'une réaction nucléaire en chaîne

6.3. Production d'électricité

Dans une centrale nucléaire :

1. la fission libère de l'énergie thermique ;
2. cette énergie chauffe de l'eau et produit de la vapeur ;
3. la vapeur entraîne une turbine ;
4. la turbine entraîne un alternateur qui produit de l'électricité.

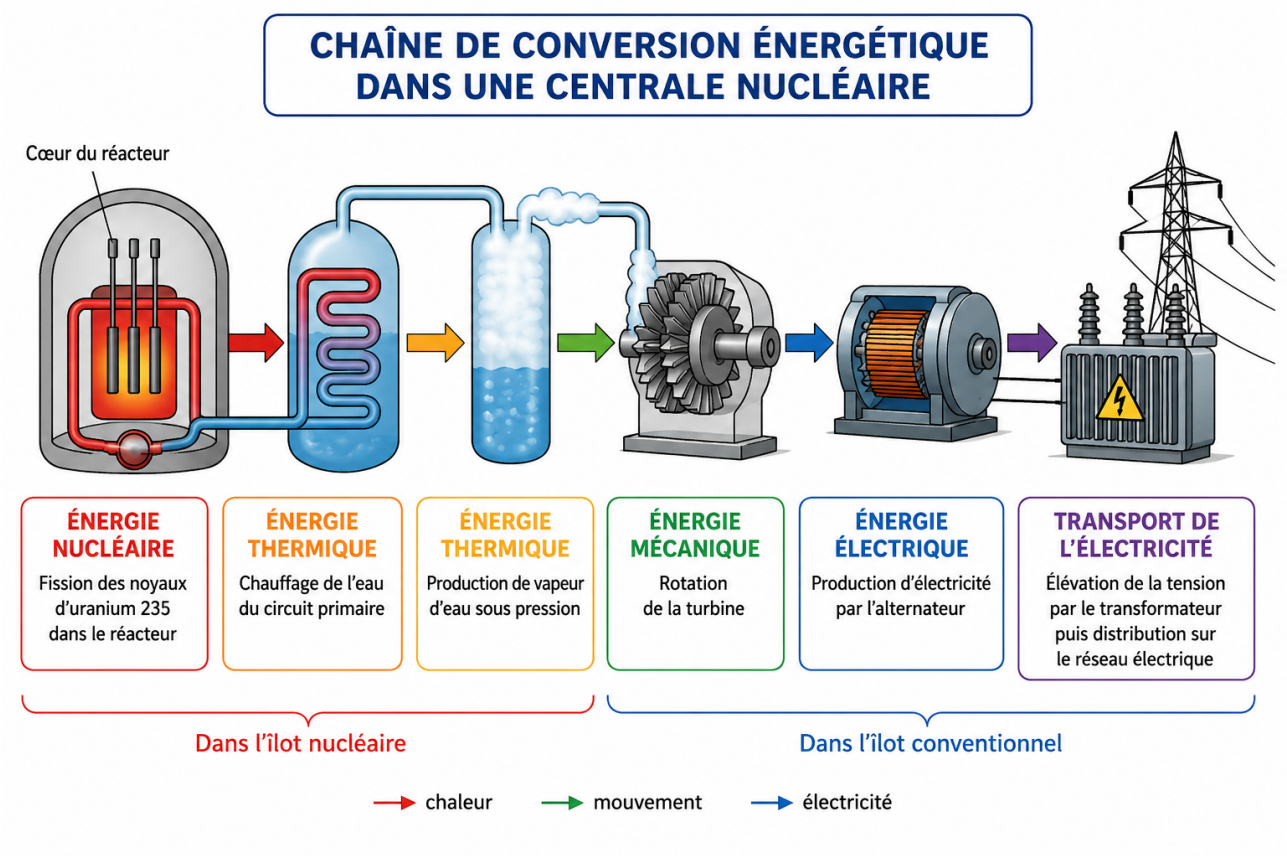


Figure 4 – Chaîne de conversion énergétique dans une centrale nucléaire

Énergie nucléaire ⟶ Énergie thermique ⟶ Énergie mécanique ⟶ Énergie électrique

7. Fusion nucléaire

7.1. Définition

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

La fusion nécessite des températures extrêmement élevées afin de vaincre la répulsion électrique entre noyaux positifs.

7.2. Fusion dans les étoiles

Dans le Soleil, l'énergie provient essentiellement de la transformation de l'hydrogène en hélium.

Le bilan global simplifié est : $\mathbf{4\,{}^{1}_{1}H \longrightarrow {}^{4}_{2}He + 2\,{}^{0}_{+1}e}$

La masse des produits est inférieure à celle des réactifs. La différence de masse est convertie en énergie.

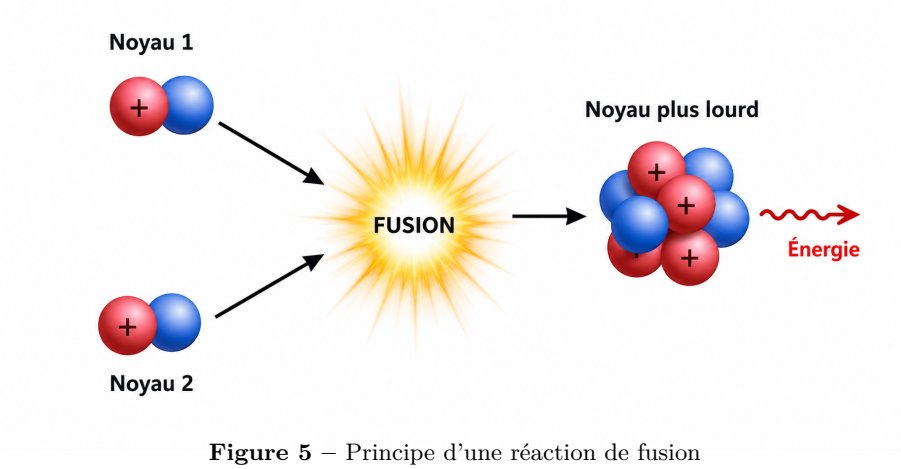


Figure 5 – Principe d'une réaction de fusion

Exemple : Fusion deutérium-tritium
La réaction étudiée dans les projets de fusion contrôlée est : $\mathbf{{}^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \longrightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n.}$ Cette réaction libère environ : $E_{\text{lib}} \approx 17{,}6\,\text{MeV}$. Le deutérium est présent dans l'eau, tandis que le tritium est rare et doit être produit, notamment à partir du lithium.

8. Comparaison entre fission et fusion

Critère	Fission	Fusion
Noyaux concernés	Noyaux lourds	Noyaux légers
Principe	Fragmentation d'un noyau	Union de deux noyaux
Exemple	Uranium 235	Deutérium + tritium
Conditions	Capture d'un neutron	Température très élevée
Déchets radioactifs	Importants et durables	Moins importants, mais activation des matériaux
Maîtrise industrielle	Actuellement maîtrisée	Encore en développement

9. Applications numériques types

Exemple : énergie libérée lors de la désintégration α du radium 226

Le radium 226 se désintègre selon la réaction nucléaire : $^{226}_{88}\mathrm{Ra} \longrightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$.

Données :

$$m\left(^{226}_{88}\mathrm{Ra}\right) = 226{,}025410\,\mathrm{u}, \qquad m\left(^{222}_{86}\mathrm{Rn}\right) = 222{,}017578\,\mathrm{u}, \qquad m\left(^{4}_{2}\mathrm{He}\right) = 4{,}002603\,\mathrm{u}.$$

On donne également : $1\,\mathrm{u} = 1{,}66054 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg}$, $\quad 1\,\mathrm{MeV} = 1{,}602 \times 10^{-13}\,\mathrm{J}$.

1.5

Calcul du défaut de masse

La masse du noyau initial est : $m_i = m\left(^{226}_{88}\mathrm{Ra}\right) = 226{,}025410\,\mathrm{u}$.

La masse totale des produits est :

$$m_f = m\left(^{222}_{86}\mathrm{Rn}\right) + m\left(^{4}_{2}\mathrm{He}\right) = 222{,}017578 + 4{,}002603 = 226{,}020181\,\mathrm{u}.$$

Le défaut de masse vaut donc :

$$|\Delta m| = m_i - m_f = 226{,}025410 - 226{,}020181 = 5{,}229 \times 10^{-3}\,\mathrm{u}.$$

En kilogrammes : $|\Delta m| = 5{,}229 \times 10^{-3} \times 1{,}66054 \times 10^{-27} = 8{,}68 \times 10^{-30}\,\mathrm{kg}$.

Calcul de l'énergie libérée

$$E_{\mathrm{lib}} = |\Delta m|\, c^2 = 8{,}68 \times 10^{-30} \times \left(3{,}00 \times 10^{8}\right)^2 = 7{,}81 \times 10^{-13}\,\mathrm{J}.$$

Conversion en mégaélectronvolts :

$$E_{\mathrm{lib}} = \frac{7{,}81 \times 10^{-13}}{1{,}602 \times 10^{-13}} \approx 4{,}87\,\mathrm{MeV}.$$

Conclusion : Cette énergie est cédée au milieu extérieur, principalement sous forme d'énergie cinétique du noyau de radon et de la particule α.

Exemple : énergie libérée lors d'une réaction de fusion nucléaire

La réaction de fusion de deux noyaux d'hélium 3 est : $^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{3}_{2}\mathrm{He} \longrightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\,{}^{1}_{1}\mathrm{p}$.

Données : $m\left({}^{3}_{2}\mathrm{He}\right) = 3{,}016029\,\mathrm{u}$, $m\left({}^{4}_{2}\mathrm{He}\right) = 4{,}002603\,\mathrm{u}$, $m\left({}^{1}_{1}\mathrm{p}\right) = 1{,}007276\,\mathrm{u}$,

$1\,\mathrm{u} = 1{,}66054 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg}$, $1\,\mathrm{u} = 931{,}5\,\mathrm{MeV}\,.\mathrm{c}^{-2}$.

Calcul du défaut de masse

La masse totale des réactifs est : $m_i = 2\,m\left({}^{3}_{2}\mathrm{He}\right) = 2 \times 3{,}016029 = 6{,}032058\,\mathrm{u}$.

La masse totale des produits est : $m_f = m\left({}^{4}_{2}\mathrm{He}\right) + 2\,m\left({}^{1}_{1}\mathrm{p}\right) = 4{,}00260 + 2 \times 1{,}007276 = 6{,}017155\,\mathrm{u}$.

Le défaut de masse vaut alors : $|\Delta m| = m_i - m_f = 6{,}032058 - 6{,}017155 = 1{,}4903 \times 10^{-2}\,\mathrm{u}$.

Calcul de l'énergie libérée

$E_{\mathrm{lib}} = |\Delta m|\,c^2 = 1{,}4903 \times 10^{-2} \times 931{,}5 = 13{,}88\,\mathrm{MeV}$.

En joules : $E_{\mathrm{lib}} = 13{,}88 \times 1{,}602 \times 10^{-13} = 2{,}22 \times 10^{-12}\,\mathrm{J}$.

Conclusion : Cette énergie est libérée sous forme d'énergie cinétique des particules produites.

Exemple : énergie libérée lors de la fission de l'uranium 235

Considérons la réaction de fission suivante : $^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow {}^{140}_{54}\mathrm{Xe} + {}^{94}_{38}\mathrm{Sr} + 2\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$.

Données : $m\left({}^{235}_{92}\mathrm{U}\right) = 234{,}99346\,\mathrm{u}$, $m\left({}^{1}_{0}\mathrm{n}\right) = 1{,}008665\,\mathrm{u}$

$m\left({}^{140}_{54}\mathrm{Xe}\right) = 139{,}89200\,\mathrm{u}$, $m\left({}^{94}_{38}\mathrm{Sr}\right) = 93{,}89446\,\mathrm{u}$,

$1\,\mathrm{u} = 1{,}66054 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg}$, $1\,\mathrm{u}\,c^2 = 931{,}5\,\mathrm{MeV}$, $1\,\mathrm{MeV} = 1{,}602 \times 10^{-13}\,\mathrm{J}$.

Calcul du défaut de masse

La masse totale des réactifs est : $m_i = m\left({}^{235}_{92}\mathrm{U}\right) + m\left({}^{1}_{0}\mathrm{n}\right) = 234{,}99346 + 1{,}008665 = 236{,}002125\,\mathrm{u}$.

La masse totale des produits est :

$m_f = m\left({}^{140}_{54}\mathrm{Xe}\right) + m\left({}^{94}_{38}\mathrm{Sr}\right) + 2\,m\left({}^{1}_{0}\mathrm{n}\right) = 139{,}89200 + 93{,}89446 + 2 \times 1{,}008665 = 235{,}80379\,\mathrm{u}$.

Le défaut de masse vaut alors : $|\Delta m| = m_i - m_f = 236{,}002125 - 235{,}80379 = 1{,}98335 \times 10^{-1}\,\mathrm{u}$.

En kilogrammes : $|\Delta m| = 1{,}98335 \times 10^{-1} \times 1{,}66054 \times 10^{-27} = 3{,}29 \times 10^{-28}\,\mathrm{kg}$.

Calcul de l'énergie libérée $E_{\mathrm{lib}} = |\Delta m|\,c^2 = 3{,}29 \times 10^{-28} \times \left(3{,}00 \times 10^{8}\right)^2 = 2{,}96 \times 10^{-11}\,\mathrm{J}$.

Conversion en mégaélectronvolts : $E_{\mathrm{lib}} = \frac{2{,}96 \times 10^{-11}}{1{,}602 \times 10^{-13}} \approx 184{,}8\,\mathrm{MeV}$.

Conclusion : Cette énergie est libérée sous forme d'énergie cinétique des fragments de fission, des neutrons émis et de rayonnements.

9.1. Expression de l'énergie libérée en fonction des énergies de liaison

Considérons une réaction nucléaire générale : ${}^{A_1}_{Z_1}X_1 + {}^{A_2}_{Z_2}X_2 \longrightarrow {}^{A_3}_{Z_3}X_3 + {}^{A_4}_{Z_4}X_4$.

L'énergie libérée au cours d'une réaction nucléaire peut être interprétée à l'aide des énergies de liaison des noyaux.

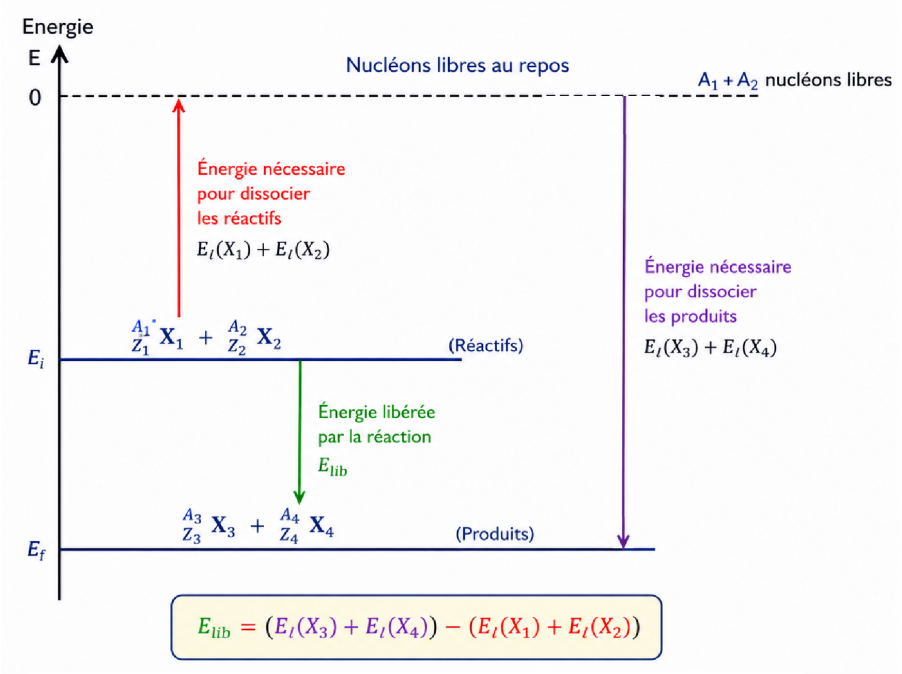


Figure 6 – Diagramme énergétique d'une réaction nucléaire.

On peut décomposer une réaction nucléaire en deux étapes fictives :

1. Séparer les noyaux réactifs en nucléons libres. Cette étape nécessite un apport d'énergie égal à la somme des énergies de liaison des réactifs.
2. Réassembler ces nucléons pour former les noyaux produits. Cette étape libère une énergie égale à la somme des énergies de liaison des produits.

L'énergie effectivement libérée par la réaction est donc la différence entre ces deux énergies.
Les produits formés sont globalement plus fortement liés que les noyaux initiaux.

Démonstration

L'énergie libérée est donnée par : $E_{\text{lib}} = |\Delta m|\, c^2$.

Avec : $\Delta m = \Big(m_1 + m_2\Big) - \Big(m_3 + m_4\Big)$.

Or, pour un noyau quelconque, $E_\ell = (Zm_p + (A-Z)m_n - m(X))\, c^2$.

On en déduit : $m(X) = Zm_p + (A-Z)m_n - \frac{E_\ell}{c^2}$.

En remplaçant les masses des quatre noyaux dans l'expression du défaut de masse, on obtient :

Les masses des protons disparaissent grâce à la conservation du numéro atomique : $Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$.

Les masses des neutrons disparaissent également puisque : $A_1 + A_2 = A_3 + A_4$.

Il reste uniquement les énergies de liaison :

$$\boxed{E_{\text{lib}} = \Big(E_{\ell 3} + E_{\ell 4}\Big) - \Big(E_{\ell 1} + E_{\ell 2}\Big)}$$

$$\boxed{E_{\text{lib}} = \sum E_\ell(\text{produits}) - \sum E_\ell(\text{réactifs})}$$

L'énergie libérée est donc égale à l'augmentation totale de l'énergie de liaison au cours de la réaction.

À retenir

Grandeur	Expression
Énergie de masse	$E_0 = mc^2$
Défaut de masse d'un noyau	$\Delta m = Z m_p + (A - Z) m_n - m_X$
Énergie de liaison	$E_\ell = \Delta m \, c^2$
Énergie de liaison moyenne par nucléon	$\dfrac{E_\ell}{A}$
Énergie libérée (à partir des masses)	$E_{\text{lib}} = (m_{\text{réactifs}} - m_{\text{produits}}) \, c^2$
Énergie libérée (à partir des énergies de liaison)	$E_{\text{lib}} = \sum E_\ell(\text{produits}) - \sum E_\ell(\text{réactifs})$