« Les Noyaux – Masse et Energie »

I) L'équivalence Masse-Energie :

1) L'équation d'Einstein :

A partir de sa théorie de la relativité restreinte, en 1905, Einstein a prouvé l'équivalence entre la Masse et l'Energie. Cela signifie que la masse peut se transformer en énergie, et inversement.

Tout système ayant une masse m, possède une énergie E, appelée énergie de masse, selon cette Equation : $E = m\,c^2$,où c est la célérité de la lumière ($c = 3.10^8$ m/s) .

Exemple : calculer la masse et l'énergie de masse d'une mole de carbone (12)
Sachant que $M(C_6^{12})$ = 12g/mol. Et $N_A = 6.02\,.10^{23}$ mol^{-1}

2) Les unités de la masse et les unités de l'énergie en physique nucléaire:

a) L'unité de masse atomique (u.m.a) :

En physique nucléaire en utilise l'unité de masse atomique ,notée u qui égale 1/12 de la masse d'un seul atome C_6^{12}

c'est-à-dire : $$1u = \frac{1}{12} * m(C_6^{12}) = \frac{M\,(C_6^{12})}{12.N_A} = \frac{12}{12.\ 6{,}022\,.10^{23}}\, 1{,}660.10^{-27}\text{Kg}$$

$$1u = 1{,}66\,yg(yocto - gramme)\,, et\ 1yg = \ 10^{-27}Kg$$

exemple : la masse d'un éléctron en u.m.a :

$$m(e^-) = 9{,}11\,.\,10^{-31}Kg = \frac{9{,}11\,.\,10^{-31}}{1{,}66\,.\,10^{-27}}\ u = 0{,}00055\,u$$

b) L'électronvolt (eV) :

Pour l'énergie, en utilise l'électronvolt (eV) comme unité pratique en physique nucléaire.

$$1eV = 1{,}602\,.\,10^{-19}\,j$$
$$1\ MeV = 10^6\ eV = 10^6\,.1{,}602\,.\,10^{-19}\ j = 1{,}602\,.\,10^{-13}\ j$$

$$1\ GeV = 10^9\ \text{eV}$$

c) L'énergie équivalente à une unité de masse atomique :

Selon la relation : $E = m\,c^2$. L'énergie équivalente de 1u est :

$$\boldsymbol{E = 1{,}660\,.\,10^{-27}.\,(3.10^8)^2 \quad = 1492{,}42\,.\,10^{-13}j}$$

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

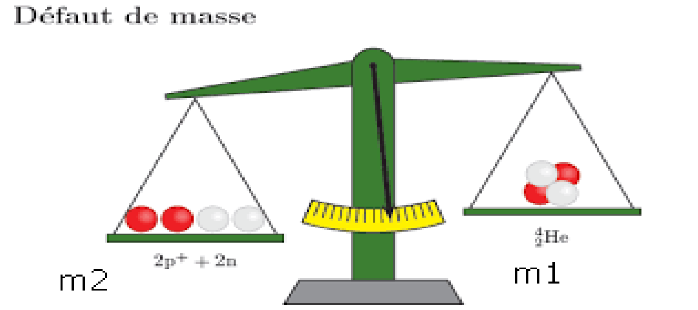
Par conséquent :

1 u = 931,5 MeV / c^2 ou encore : E = 931,5 MeV = 1 u .c^2

II) La stabilité d'un noyau :

1) Le défaut de masse d'un noyau :

L'expérience montre que la masse d'un noyau est inférieur à l'ensemble des masses des nucléons qui le constituent ; cela est dû au fait qu'une partie des masses de tous les nucléons s'est transformée en énergie de cohésion.



Cette différence entre les deux masses m1 et m2 est appelé le défaut de masse, noté Δm.

Le défaut de masse d'un noyau ^A_ZX se calcul par :

$$\Delta m = Z.m_p + (A - Z).m_n - m(^A_ZX)$$

2) L'énergie de Liaison (E_L) :

L'énergie de liaison d'un noyau est l'énergie qu'elle faut lui apporter pour dissocier ses nucléons ; c'est l'équivalence en énergie du défaut de masse de tel noyau. Elle se calcule par :

$$E_L = \Delta m.c^2 = \{Z.m_p + (A - Z).m_n - m(^A_ZX)\}.c^2$$

3) L'énergie de Liaison par nucléon (ξ):

C'est l'énergie nécessaire pour séparer un nucléon de son noyau :

$$\xi = \frac{E_L}{A}$$ **Son unité est le : MeV/nucléon**

C'est une grandeur qui caractérise chaque noyau atomique. Elle donne une idée sur la stabilité nucléaire des noyaux .En effet, un noyau est plus stable qu'un autre, lorsqu'il a un (ξ) plus grand

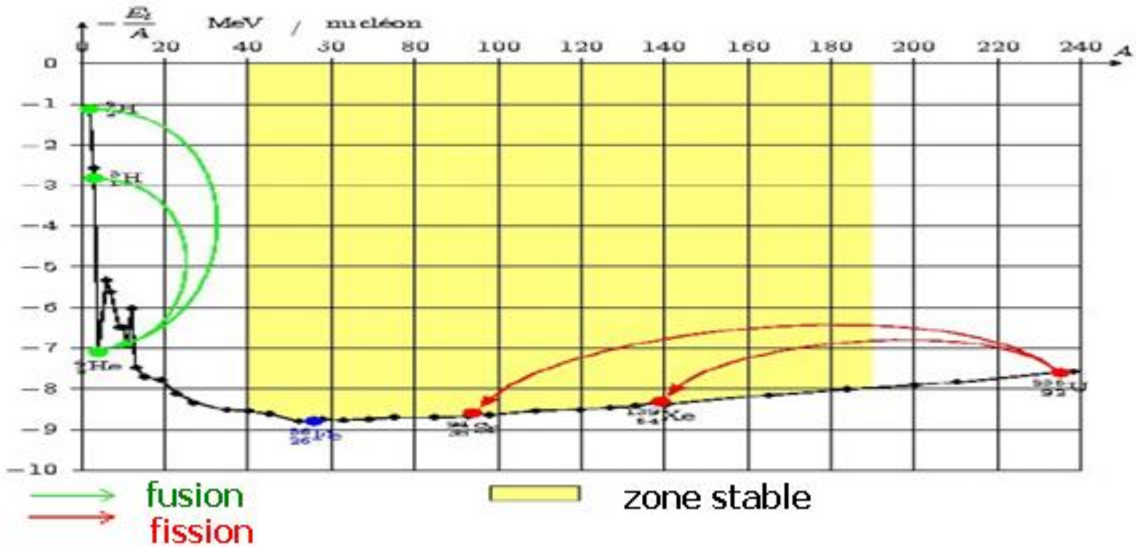
Application :

Calculer pour ces deux isotopes C_6^{12} et C_6^{14} le défaut de masse, l'énergie de liaison, l'énergie de liaison par nucléon, et conclure.

On donne : m(C_6^{12})= 11,9967u ; m(C_6^{14})=13,9999u

m_n = 1,00866u ; m_p = 1,00728u

4) La courbe d'Aston :



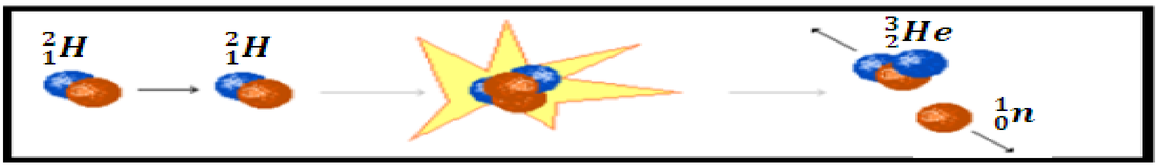
Dans cette courbe, on représente les noyaux atomique sous forme de points, selon leur nombre de masse A et leur opposée de l'énergie de liaison par nucléon $-\frac{E_L}{A}$. Elle permet d'étudier la stabilité des noyaux atomiques :

- **Le noyau le plus stable de tous les noyaux est le $^{56}_{26}Fe$**
- **Les noyaux stables se situent dans la zone 40<A<195**
- **Les noyaux légers ayant A<40 sont susceptible de se fusionner pour former des noyaux plus stables.**
- **Les noyaux lourds ayant A>195 sont susceptible de se fissionner pour former deux ou plusieurs noyaux plus stables**

III) La Fusion et la Fission nucléaires :

1) La fusion nucléaire :

En quête de leurs stabilité, certains noyaux légers peuvent dans certaines conditions expérimentales se fusionner pour former des noyaux plus lourds est plus stables, exemple : $^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{2}He + 1\ {}^{1}_{0}n$

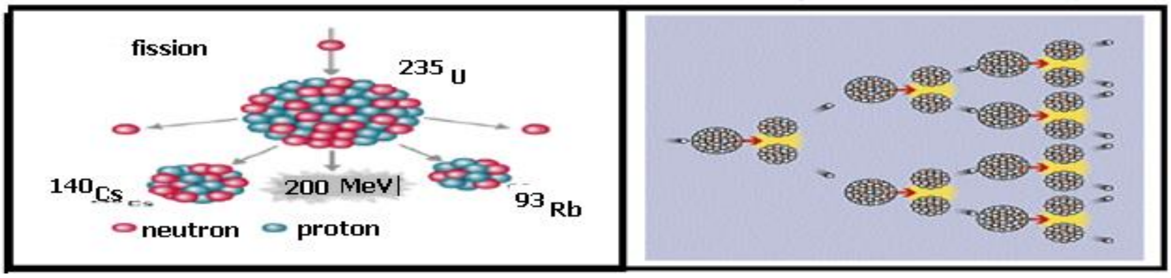


Remarque : la réalisation de ce genre de transformations nucléaires, nécessite une température et une pression très élevés (comme dans le cas d'une étoile) pour vaincre les interactions répulsives dues aux forces électriques.

2) La fission nucléaire :

Cherchant à se stabiliser certains noyaux lourds peuvent se décomposer en plusieurs noyaux plus légers, et plus stables.

Exemple : $^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{140}_{55}Cs + ^{93}_{37}Rb + 2^{1}_{0}n + \gamma$



Autres possibilités :

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

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

Remarque : les neutrons produits par ces réactions exothermiques peuvent, s'ils ne sont pas contrôlés, provoquer la fission de d'autres noyaux et rendre la réaction nucléaire cyclique, et l'énergie s'accumulera jusqu'à une explosion !

3) Le bilan énergétique d'une transformation nucléaire :

a) Le cas général :

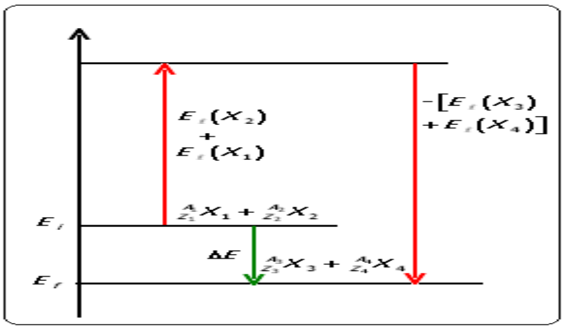
Considérons une transformation nucléaire symbolisée par cette équation :

$$^{A_1}_{Z_1}X_1 + ^{A_2}_{Z_2}X_2 \rightarrow ^{A_3}_{Z_3}X_3 + ^{A_4}_{Z_4}X_4$$

Le système étudié : $\{^{A_1}_{Z_1}X_1 + ^{A_2}_{Z_2}X_2\}\text{devient}\{^{A_3}_{Z_3}X_3 + ^{A_4}_{Z_4}X_4\}$

L'énergie reçue par notre système cédée par son extérieur lors de sa transformation est

$$\Delta E = E_f - E_i$$



En se basant sur ce schéma énergétique explicatif on peut écrire :

$$\Delta E = -\left[E_l(X_3)+E_l(X_4)\right]+\left[E_l(X_1)+E_l(X_2)\right]$$
$$\Delta E = \left[E_l(X_1)+E_l(X_2)\right]-\left[E_l(X_3)+E_l(X_4)\right]$$
$$\Delta E = \sum E_l(\text{réactifs})-\sum E_l(\text{produits})$$

D'une autre manière, nous avons aussi :

$$\Delta E = \Delta m.c^2$$
$$\Delta E = \left[(m_3+m_4)-(m_1+m_2)\right].c^2$$
$$\Delta E = \left[\sum m(\text{produits})-\sum m(\text{réactifs})\right].c^2$$

b) Application à des exemples :

application1: on considère cette réaction nucéaire :

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

1) calculer ΔE l'énergie libérée par la fission d'un seul noyau ${}^{235}_{92}U$
2) dresser le schéma énérgitique de cette réaction
3) calculer l'énergie libérée par la fission de 1g de ${}^{235}_{92}U$

<u>données:</u> $m\left({}^{94}_{38}Sr\right) = 93,8945u$ / $m({}^{235}_{92}U) = 234,9935u$

$m\left({}^{1}_{0}n\right) = 1,0087u$ / $m\left({}^{140}_{54}Xe\right) = 139,8920u$

application 2 : on considère cette réaction nucéaire :

$${}^{3}_{2}He + {}^{3}_{2}He \rightarrow {}^{4}_{2}He + 2.{}^{1}_{1}p$$

1) calculer ΔE l'énergie libérée par la fusion de deux noyaux ${}^{3}_{2}He$
2) dresser le schéma énérgitique de cette réaction
3) calculer l'énergie libérée par la fusion de 1g de ${}^{3}_{2}He$

<u>données:</u> $m\left({}^{4}_{2}He\right) = 4,0015u$ / $m\left({}^{3}_{2}He\right) = 3,0149u$

$m\left({}^{1}_{0}n\right) = 1,0087u$ / $m\left({}^{1}_{1}p\right) = 1,0073u$