

## Chap 06 - Masse et énergie. Réactions nucléaires

# I ) Equivalence masse énergie :

## 1) Relation d'Einstein :

En 1905, en élaborant la théorie de la relativité restreinte, Einstein postule que la masse est une des formes de l'énergie :

Un système au repos, de masse  $m$  possède une énergie de masse :

$E$  : énergie de masse en joules (J)

$E = m \cdot c^2$  avec  $m$  : masse en kilogrammes (kg)

$c$  : vitesse de la lumière dans le vide ( $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(relation d'équivalence masse-énergie)

Conséquence : Si le système (au repos) échange de l'énergie avec le milieu extérieur, (par rayonnement ou par transfert thermique par exemple), sa variation d'énergie  $\Delta E$  et sa variation de masse  $\Delta m$  sont liées par la relation :  $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$

- Si  $\Delta m < 0$  alors  $\Delta E < 0$ , le système cède de l'énergie au milieu extérieur et sa masse diminue.
- Si  $\Delta m > 0$  alors  $\Delta E > 0$ , le système reçoit de l'énergie du milieu extérieur et sa masse augmente.

## 2) Unités :

A l'échelle atomique, l'unité joule est inadaptée , trop grande ; on utilise plutôt l'électron volt , eV :

$1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$  et aussi le MeV:  $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-13} \text{ J}$ .

exemple : Déterminer l'énergie de masse  $E$  d'un proton en J et en MeV : ( $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ )

$E = m_p \cdot c^2 = 1,67 \cdot 10^{-27} \times (3,0 \cdot 10^8)^2 \approx 1,50 \cdot 10^{-10} \text{ J} \approx 939 \text{ MeV}$

Remarque : A cette échelle, l'unité kg est aussi inadaptée, on utilise parfois l'unité de masse

atomique notée  $u$  . Elle est égale au douzième de la masse d'un atome de carbone  ${}^{12}_6\text{C}$  .

$$1 \text{ u} = M({}^1_0\text{n}) / (12 N_A) = 12,0 \cdot 10^{-3} / (12 \times 6,02 \cdot 10^{23}) = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

## II ) Energie de liaison du noyau :

### 1) Défaut de masse du noyau :

On a constaté en mesurant les masses que la masse du noyau atomique est inférieure à la somme des masses des protons  $m_p$  et des neutrons  $m_n$  qui le constituent :  $m_{\text{noyau}} < Z \cdot m_p + (A-Z) \cdot m_n$

Cette différence est appelée défaut de masse  $\Delta m$  :  $\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m_{\text{noyau}}$  ( $\Delta m > 0$ )

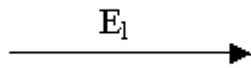
Exemple: Calculer  $\Delta m$  pour un noyau d'hélium :

données :  $m_n = 1,67496 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ,  $m_p = 1,67265 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  et  $m({}^4_2\text{He}) = 6,6447 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

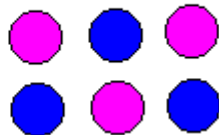
$$\Delta m = 2 \cdot m_p + 2 \cdot m_n - m({}^4_2\text{He}) = (2 \times 1,67265 + 2 \times 1,67496 - 6,6447) \cdot 10^{-27} = 5,05 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$$

### 2) Energie de liaison du noyau :

noyau au repos



nucléons séparés au repos



Définition: On appelle énergie de liaison d'un noyau, notée  $E_1$ , l'énergie que le milieu extérieur doit fournir à un noyau au repos pour le dissocier en nucléons séparés au

repos.

Lorsque le noyau se dissocie, la masse augmente de  $\Delta m$  et l'énergie de  $\Delta m \cdot c^2$ .

L'énergie de liaison d'un noyau a pour expression :

$E_1$  : énergie de liaison du noyau (en J) à convertir en MeV

$$E_1 = \Delta m \cdot c^2 \quad \text{avec} \quad \Delta m : \text{défaut de masse du noyau (en kg)}$$

$c$  : célérité de la lumière dans le vide (en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$$\text{Pour un noyau d'hélium : } E_1 = \Delta m \cdot c^2 = 5,05 \cdot 10^{-29} \times (3,0 \cdot 10^8)^2 = 4,54 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 28,4 \text{ MeV}$$

Remarque: Inversement, lorsque le noyau se forme à partir de ses nucléons libres, le milieu extérieur reçoit l'énergie  $E = |\Delta m| \cdot c^2$  (la masse du système diminue et  $\Delta m < 0$ ).

### 3) Energie de liaison par nucléon :

Définition: L'énergie de liaison par nucléon d'un noyau notée  $E_A$  est le quotient de son énergie de liaison par le nombre de ses nucléons.

$E_A$ : énergie de liaison par nucléon (en MeV/nucléon)

$E_A = E_1 / A$  avec  $E_1$ : énergie de liaison du noyau (en MeV)

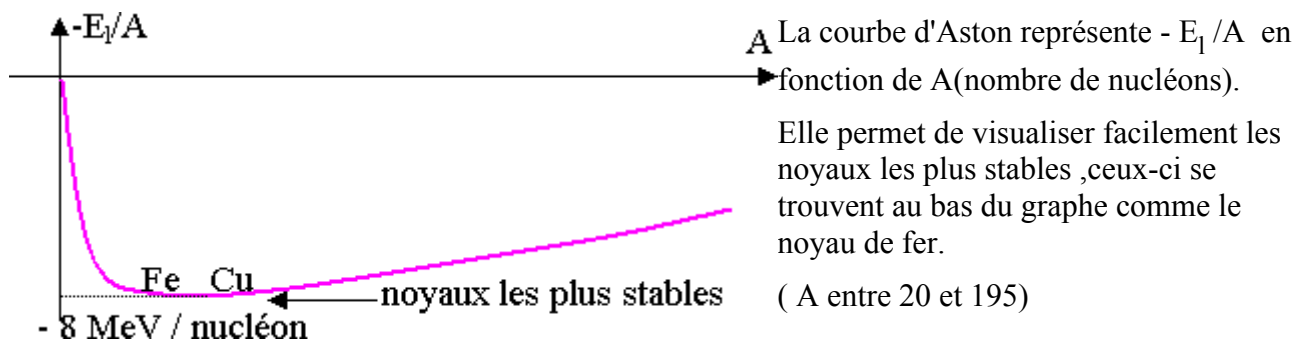
A: nombre de nucléons du noyau

Pour un noyau d'hélium :  $E_A = E_1 / 4 = 28,4 / 4 = 7,10$  MeV / nucléon

Remarque:  $E_A$  permet de comparer la stabilité des noyaux entre eux.

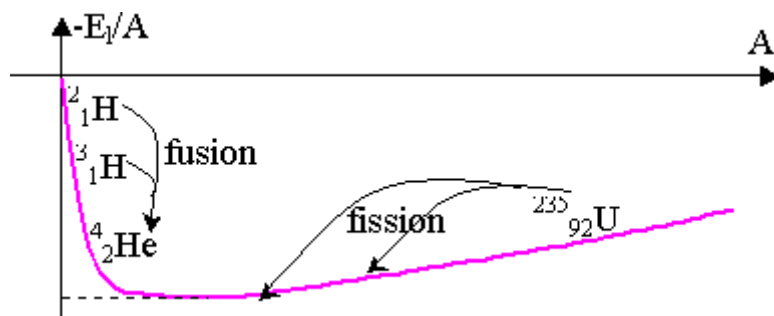
Plus l'énergie de liaison par nucléon est grande, plus le noyau est stable.

#### 4) Courbe d'Aston :



Les noyaux instables peuvent évoluer de 2 façons :

- Les noyaux lourds peuvent se casser en 2 noyaux légers appartenant au domaine de stabilité. C'est la fission.
- Certains noyaux légers peuvent "fusionner" pour former un noyau plus gros et stable. C'est la fusion.



### III ) Fission et fusion nucléaires :

#### 1) Réactions nucléaires provoquées :

Définition: Une réaction nucléaire est dite provoquée lorsqu'un noyau cible est frappé par un noyau projectile et donne naissance à de nouveaux noyaux.

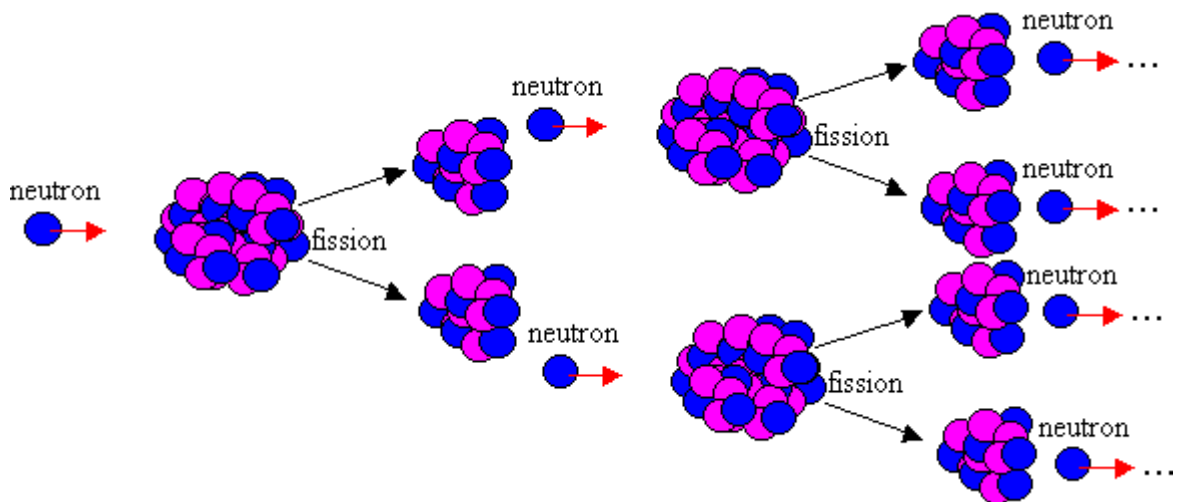
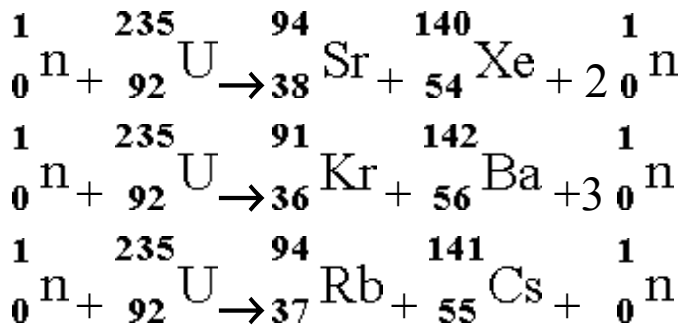
Les lois de conservation de Soddy sont vérifiées.

Exemple : Expérience de Rutherford en 1919 : le bombardement de noyaux d'azote avec des particules  $\alpha$  provoque la formation de noyaux d'oxygène et de protons.

## 2) La fission nucléaire: réaction en chaîne :

Définition: La fission est une réaction nucléaire provoquée au cours de laquelle un noyau lourd "fissile" donne naissance à deux noyaux plus légers.

Exemple: Plusieurs réactions de fission de l'uranium 235 sont possibles:



Les neutrons émis lors de la fission peuvent provoquer la fission d'autres noyaux. Si le nombre de neutrons émis lors de chaque fission est supérieur à 1, une réaction en chaîne peut se produire et devenir rapidement incontrôlable (bombe à fission : bombe "A" d'Hiroshima).

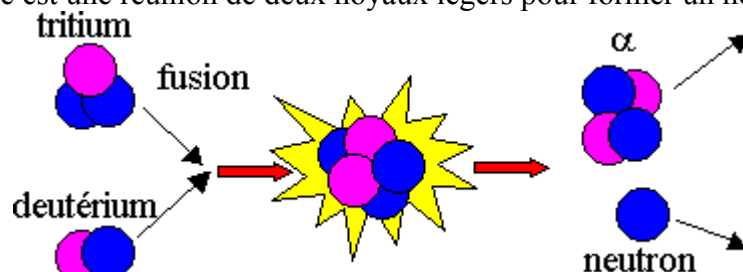
Dans une centrale nucléaire, la réaction en chaîne est contrôlée par des barres mobiles qui plongent dans le réacteur entre les barres de "combustible" pour absorber une partie des neutrons émis. On peut ainsi contrôler la quantité d'énergie produite par les réactions de fission.

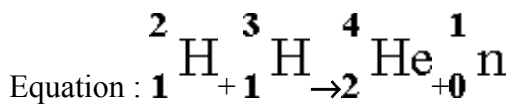
Pour amorcer une fission, il faut apporter une quantité minimale d'énergie au système.

## 3) La fusion nucléaire :

Définition:

La fusion nucléaire est une réunion de deux noyaux légers pour former un noyau plus lourd.





L'énergie libérée au cours d'une fusion est considérable.

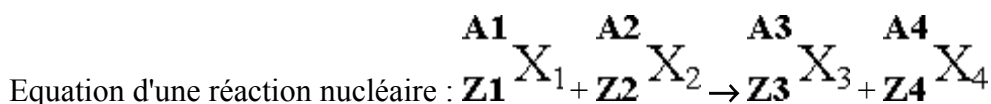
La fusion n'est possible que si les deux noyaux possèdent une grande énergie cinétique pour vaincre les forces de répulsion électriques.

La fusion se produit naturellement dans les étoiles. Dans une bombe thermonucléaire (appelée bombe H), la fusion nucléaire est incontrôlée et explosive

Elle est très intéressante pour produire de l'énergie, mais on ne la maîtrise pas suffisamment pour produire de l'électricité.

## IV ) Bilan énergétique :

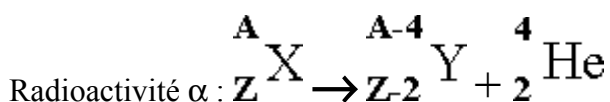
### 1) Cas général :



D'après l'équivalence masse-énergie, la variation d'énergie  $\Delta E$  de la réaction correspond à la variation de masse  $\Delta m$  :  $\Delta m = (m_3 + m_4) - (m_1 + m_2)$ .  $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$

$$\Delta E = E_{11} + E_{12} - (E_{13} + E_{14}) \quad (\text{voir définition de } E_l)$$

### 2) Réactions nucléaires spontanées :



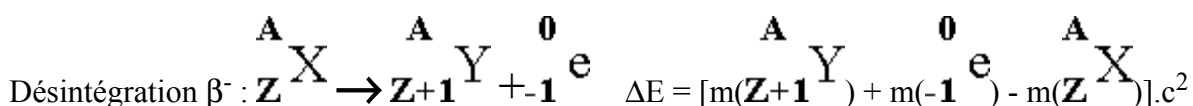
$$\text{Energie fournie au milieu extérieur : } \Delta E = [m({}_{Z-2}^{A-4}\text{Y}) + m({}_2^4\text{He}) - m({}_Z^A\text{X})] \cdot c^2$$

Exemple : désintégration  $\alpha$  d'un noyau de radium 226 en noyau de radon 222

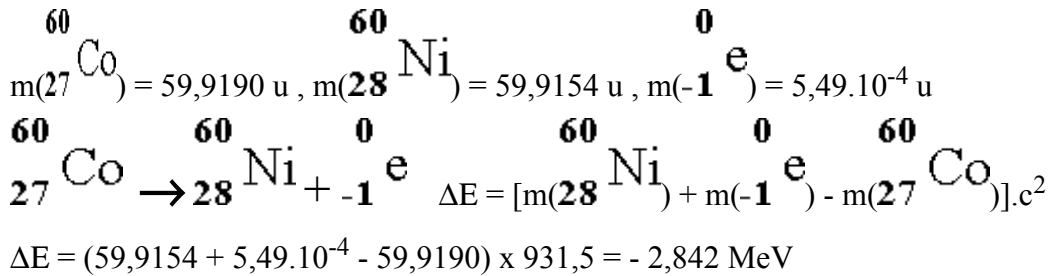
$$m({}_{88}^{226}\text{Ra}) = 225,9770 \text{ u}, m({}_{86}^{222}\text{Rn}) = 221,9702 \text{ u}, m({}_2^4\text{He}) = 4,0015 \text{ u}, (1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2)$$

$${}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn} + {}_2^4\text{He} \quad \Delta E = [m({}_{86}^{222}\text{Rn}) + m({}_2^4\text{He}) - m({}_{88}^{226}\text{Ra})] \cdot c^2$$

$$\Delta E = (221,9702 + 4,0015 - 225,9770) \times 931,5 = -4,937 \text{ MeV}$$

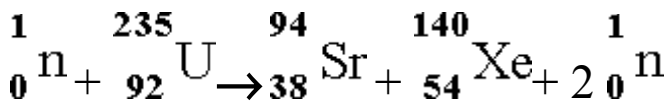


Exemple : désintégration  $\beta^-$  du cobalt 60 en nickel 60

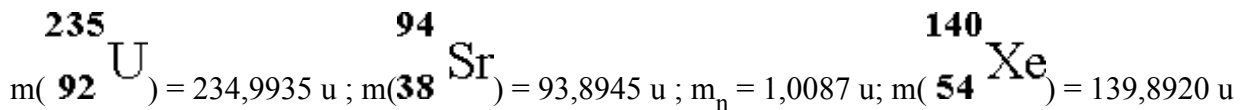


### 3) Réactions de fission et de fusion provoquées :

Pour la fission, étudions la réaction utilisée par une centrale nucléaire : la fission de l'uranium 235.



remarque : La fission d'un noyau d'uranium peut donner d'autres noyaux fils.



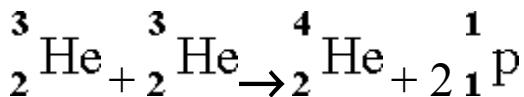
$$\Delta E = [m({}_{38}^{94}\text{Sr}) + m({}_{54}^{140}\text{Xe}) + 2 \cdot m_{\text{n}} - m({}_{92}^{235}\text{U}) - m_{\text{n}}] \cdot c^2; (\Delta m = -0,1983 \text{ u})$$

$$\Delta E = (93,8945 + 139,8920 + 2 \cdot 1,0087 - 234,9935) \times 931,5 = -184,7 \text{ MeV}$$

Cette énergie est énorme par rapport à la combustion de pétrole .

1 kg d'uranium fournit autant d'énergie que 2 000 Tonnes de pétrole.

Pour la fusion, prenons l'exemple de la fusion de 2 noyaux d'hélium 3



$$m({}_2^3\text{He}) = 3,0149 \text{ u}; m({}_2^4\text{He}) = 4,0015 \text{ u}; m_{\text{p}} = 1,0073 \text{ u}; \Delta m = -0,00137 \text{ u}$$

$$\Delta E = [m({}_2^4\text{He}) + m_{\text{p}} - 2 \cdot m({}_2^3\text{He})] \cdot c^2 = (4,0015 + 1,0073 - 2 \times 3,0149) \times 931,5 = -12,76 \text{ MeV}$$

Remarque : Par nucléon, la fusion libère plus d'énergie que la fission.

©Sciences Mont Blanc  
Fiche réalisée par P.Bourton

Pour en savoir plus <http://montblancsciences.free.fr>