

### I- Equivalence masse-énergie

#### 1- Unité de masse et énergie

##### 1-1-Unité de masse atomique

Le kilogramme est une unité inadaptée à l'échelle du noyau atomique.

En physique nucléaire on en utilise alors une autre : l'unité de masse atomique de symbole  $\mu$ . Cette unité est égale à 1/12 de la masse d'un atome de carbone 12.

$$\text{On a } \frac{m}{M} = \frac{N}{N_A} \text{ pour un atome } m = \frac{M}{N_A} \text{ donc } 1\mu = \frac{1}{12} \cdot \frac{M}{N_A}$$

$$\text{application numérique } 1\mu = \frac{1}{12} \cdot \frac{12 \cdot 10^{-3}}{6,03 \cdot 10^{23}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\underline{1\mu = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}}$$

##### 1-2-Unité d'énergie

Dans le domaine de la physique nucléaire on utilise une unité d'énergie plus adaptée à l'échelle microscopique appelé l'électronvolt (eV) :

$$\underline{1\text{eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}}$$

**Remarque** : les multiples de l'électron-volt :

1 keV = $10^3$ eV = $1.6 \cdot 10^{-16}$ J	1 MeV = $10^6$ eV = $1.6 \cdot 10^{-13}$ J	1 GeV = $10^9$ eV = $1.6 \cdot 10^{-9}$ J
--	--	---

### 2- Equivalence masse-énergie

Albert Einstein a postulé en 1905 qu'il existe une équivalence entre la masse et l'énergie.

un système ,au repos, de masse m possède une énergie de masse E telle que :  $E = m \cdot c^2$

quand la masse d'un système va varier, alors son énergie va varier. Ainsi on a :  $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$

L'énergie correspondant à une masse de 1 u est égale à  $E = 931,5 \text{ MeV}$

$$\text{On a } m = \frac{E}{c^2} \text{ alors } 1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$$

**Remarque** L'intérêt de cette unité est de faire directement la correspondance entre une énergie et une masse.

### II - Energie de liaison

#### 3- Défaut de masse

On appelle défaut de masse la grandeur  $\Delta m$ , différence entre la somme des masses des constituants, et la masse du noyau :

$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m(\frac{A}{Z}X)$$

#### 4- Energie de liaison

Energie de liaison  $E_\ell$  est l'énergie qu'il faut fournir à un noyau immobile, pour le dissocier en nucléons libres et immobiles.

Energie de liaison  $E_\ell$  est équivalente au défaut de masse  $\Delta m$  :

$$E_\ell = \Delta m \cdot c^2$$

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

**Remarque** : Energie de liaison  $E_\ell$  est positive puisqu'elle est reçue par le système considéré (noyau).

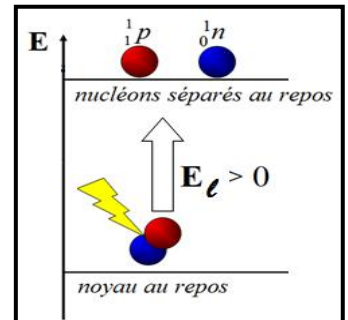
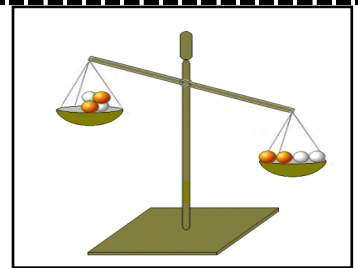
#### 5- Energie de liaison par nucléon-Courbe d'Aston

Elle est égale à l'énergie de liaison du noyau divisée par le nombre de nucléons présents dans ce noyau :

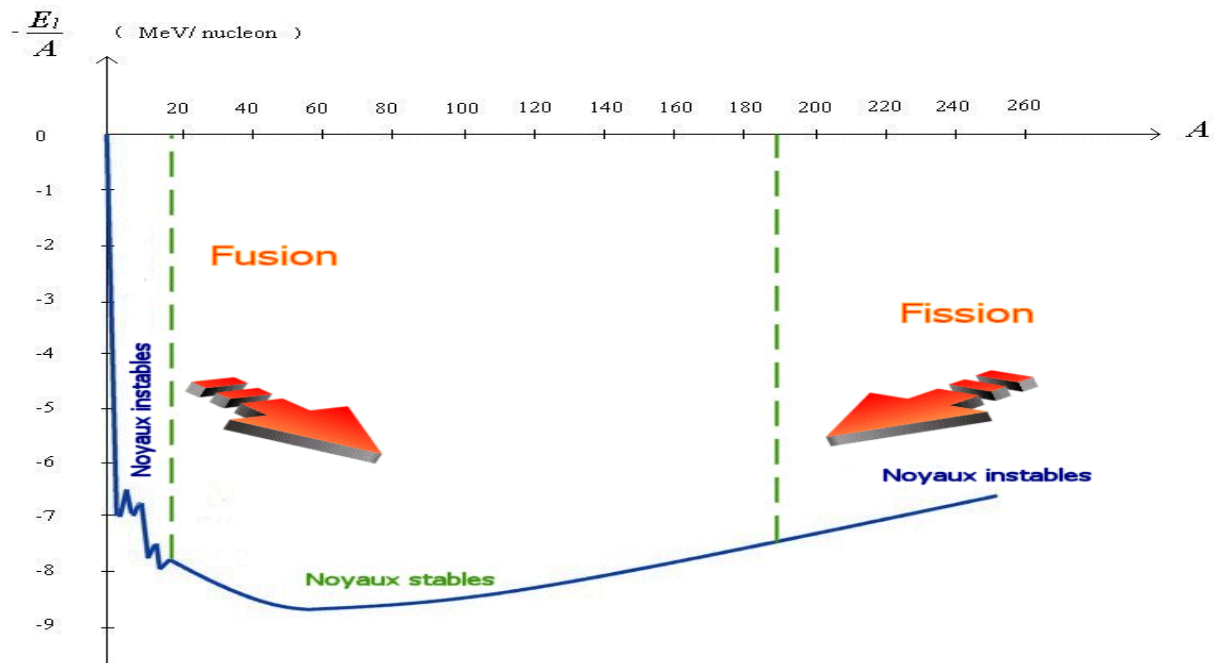
$$\mathcal{E} = \frac{E_\ell}{A}$$

On l'exprimera généralement en MeV/nucléon.

Les noyaux stables sont ceux qui ont la plus grande énergie de liaison par nucléon.



La courbe d'Aston  $-\frac{E_f}{A} = f(A)$  permet d'illustrer la stabilité relative des noyaux.



- ⇒ Les **noyaux stables** sont ceux qui ont une énergie de liaison par nucléon d'environ 8 MeV / nucléon. Leur nombre de masse A est tel que  $20 < A < 190$ . Ils apparaissent autour du minimum de la courbe.
- ⇒ Les **noyaux instables** peuvent se transformer en d'autres noyaux plus stables avec libération d'énergie selon deux processus différents :
- Les noyaux lourds ( $A > 195$ ), comme par exemple  $^{235}\text{U}$ , peuvent se briser (fragmente) en deux noyaux légers appartenant au domaine de stabilité. Ils subissent alors une réaction nucléaire de **fission**.
  - Certains noyaux légers,  $A < 20$  comme par exemple  $^1_1\text{H}$ ,  $^2_1\text{H}$ ,  $^3_1\text{H}$ , peuvent « fusionner » pour former un noyau placé plus bas dans le diagramme. Ce sont des réactions nucléaires de **fusion**.

Ces deux réactions ne sont pas spontanées mais provoquées.

Remarque : Les noyaux instables peuvent subir une modification de structure et se rapprocher du point de stabilité.

## II - Fission et fusion nucléaire

### 2- Fission nucléaire

#### -Définition

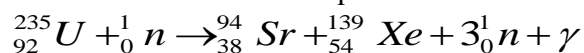
Elle se produit lors de la rencontre d'un neutron lent, dit neutron thermique, avec un noyau fissile tel l'uranium 235 ; ce qui provoque la naissance de deux noyaux plus légers.

#### -Conditions d'obtention

Le fait que ce soit un neutron qui initie la réaction est intéressant car il n'y a pas de répulsion lors de la rencontre entre le neutron (non chargé) et le noyau d'uranium.

#### - Exemple de réaction

fission de l'uranium 235 qui donne naissance à un noyau de strontium 94 et à un noyau de Xénon 139.

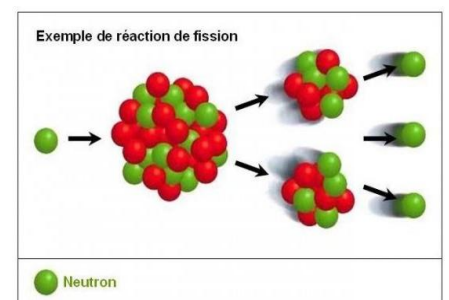


**Remarque :** plusieurs réactions sont possibles pour le seul noyau d'uranium 235



#### Remarque :

L'ensemble des différentes fissions possibles de l'Uranium 235, libère, en moyenne 2-5 neutrons par fission. Ces neutrons libérés lors de la fission d'un noyau d'Uranium 235 peuvent provoquer à leur tour la fission d'autres noyaux d'Uranium 235, qui libèrent à nouveau 2-5 neutrons en moyenne, et ainsi de suite. On dit qu'il se produit une réaction en chaîne



## 2- Fusion nucléaire

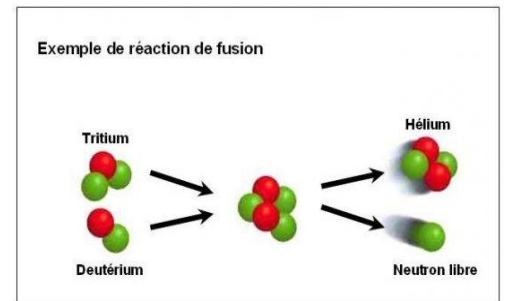
### 2-1- Définition

Pour avoir une fusion nucléaire, il faut que deux noyaux légers s'unissent pour donner naissance à un noyau plus lourd.

### 2-2- Conditions d'obtention

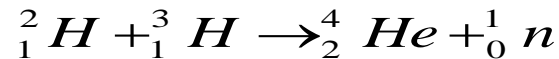
Ces noyaux légers sont cette fois-ci composés de neutrons et de protons, ainsi, il leur faut une très grande énergie pour vaincre les forces de répulsion : On porte alors le milieu à très haute température ( $10^8$  K).

En conséquence, la réaction de fusion est appelée réaction thermonucléaire.



### 2-3-Exemple de réaction

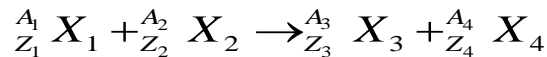
La fusion la plus courante est celle représentée ci-dessus, entre un noyau de deutérium et un noyau de tritium



## III) Bilan de masse et d'énergie d'une réaction nucléaire

### 1- Cas général

Soit une transformation nucléaire quelconque d'équation :



Il y a deux façon de calculer l'énergie libérée par la transformation nucléaire :

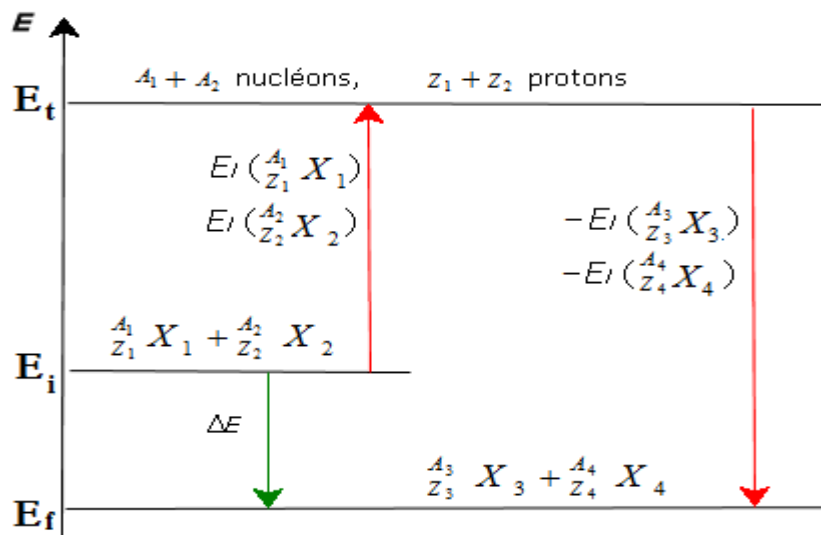
- En utilisant la **variation de masse** :

$$\Delta E = [(m(\text{X}_3) + m(\text{X}_4)) - (m(\text{X}_1) + m(\text{X}_2))] \cdot c^2$$

- En utilisant les **énergies de liaison** des noyaux et d'après la définition de  $E_l$  :

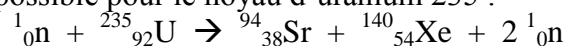
$$\Delta E = [E_l(\text{X}_1) + E_l(\text{X}_2)) - (E_l(\text{X}_3) + E_l(\text{X}_4))]$$

- Diagramme d'énergie



## 2- Réaction nucléaire provoquées : fission et fusion

:Soit une des réactions de fission possible pour le noyau d'uranium 235 :

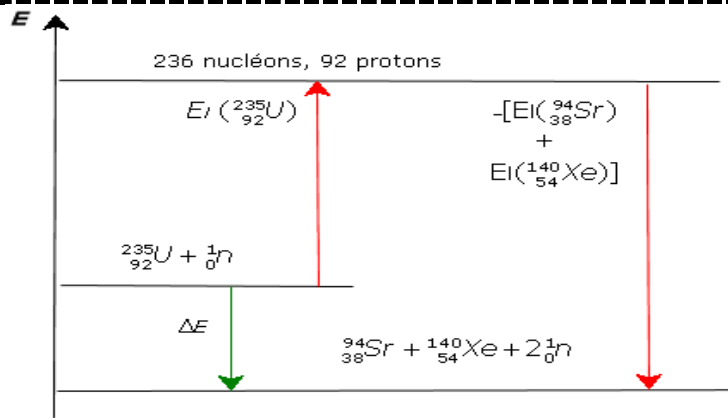


$m({}^{235}_{92}\text{U})=234,9935 \mu$  ;  $m({}^{94}_{38}\text{Sr})=93,8945 \mu$  ;  $m({}^{140}_{54}\text{Xe})=139,8920 \mu$  ;  $m(\text{n})=1,0087 \mu$  ;  $1 \mu=931,5 \text{MeV}/c^2$

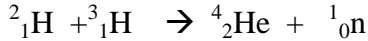
Energie libérée :  $\Delta E = (93,8945 + 139,8920 + 2 \times 1,0087 - 234,9935 - 1.0087) \times 931,5 = -184,7 \text{ MeV}$

Convertissons cette énergie en J en sachant que :  $\Delta E = -184,7 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J} = -3,00 \cdot 10^{-11} \text{ J}$

Energie libérée par nucléon :  $\Delta E' = -184,72/367 = -0,7826 \text{ MeV/nucéon}$



On considère la réaction « classique » de fusion entre un noyau de deutérium et un noyau de tritium :



$$m({}^2_1\text{H}) = 2,0160\mu ; m({}^3_1\text{H}) = 3,0247\mu ; m({}^1_0\text{n}) = 1,0087u ; m({}^4_2\text{He}) = 4,0015u ; 1\mu = 931,5\text{MeV}/c^2$$

$$\text{Energie libérée} : \Delta E = (4,0015 + 1,0087 - 2,0160 - 3,0247) \times 931,5 = -28,41 \text{ MeV}$$

$$\text{Energie libérée par nucléon} : \Delta E' = -28,41/5 = -5,682 \text{ MeV/nucléon}$$

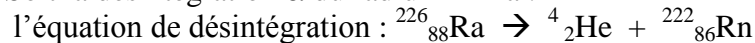
**Remarque.** Comparaison fission-fusion :

On voit que par nucléon, la fusion produit bien plus d'énergie que la fission.

De plus, l'approvisionnement en hydrogène (donc en deutérium et tritium) se fait aisément (eau), la fusion n'engendre pas de déchets radioactifs (noyaux fils eux mêmes radioactifs).

### 3- Réactions nucléaires spontanées

Soit la désintégration  $\alpha$  du radium  ${}^{226}\text{Ra}$  :



$$\text{Données} : m({}^{226}\text{Ra}) = 225,9770 \text{ u} ; m({}^{222}\text{Rn}) = 221,9703 \text{ u} ; m(\alpha) = 4,0015 \text{ u} ; 1\mu = 931,5\text{MeV}/c^2$$

Energie libérée :

$$\Delta E = (221,9702 + 4,0015 - 225,9770) \cdot 931,5\text{MeV} = -4,94 \text{ MeV}$$

$$\Delta E = -4,94 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J} = -7,9097 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

$$\text{Energie libérée par mole de noyau} : \Delta E_m = 7,9 \cdot 10^{-13} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = -4,8 \cdot 10^{11} \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$$

### Connaissances - Compétences

Définir et calculer un défaut de masse et une énergie de liaison.

Définir et calculer l'énergie de liaison par nucléon.

Savoir convertir des J en eV et réciproquement.

Connaître la relation d'équivalence masse-énergie et calculer une énergie de masse.

Commenter la courbe d'Aston pour dégager l'intérêt énergétique des fissions et des fusions.

Définir la fission et la fusion et écrire les équations des réactions nucléaires en appliquant les lois de conservation.

A partir de l'équation d'une réaction nucléaire, reconnaître le type de réaction.

Faire le bilan énergétique d'une réaction nucléaire en comparant les énergies de masse.