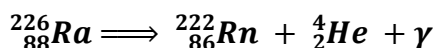


# Noyaux, masse et énergie

## I. Equivalence « masse-énergie » :

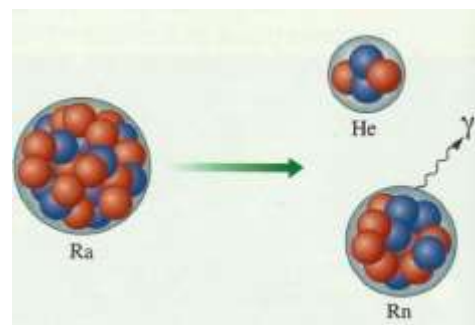
### 1. L'énergie libéré lors d'une désintégration radioactive

- Considérons la désintégration spontanée du radium Ra :



- Cette réaction nucléaire libère de l'énergie sous deux formes :

- **ENERGIE CINETIQUE** : Les particules produites ( ${}^{222}_{86}\text{Rn}$  et  ${}^4_2\text{He}$ ) sont émises avec une grande vitesse et possèdent donc de l'énergie cinétique.
- **ENERGIE RAYONNANTE** : le rayonnement gamma ( $\gamma$ ) est une onde électromagnétique de très courte longueur d'onde et d'énergie élevée.
- Dans notre cas en fait l'étude sur des noyau immobile ( $E_c=0$ )



### 2. La relation d'Einstein : énergie de masse

- Pour Einstein en 1905, un système au repos possède une énergie due à sa **masse**, appelée **énergie de masse**, elle est définie par :

$$E = m \times c^2$$

$\left\{ \begin{array}{l} E: \text{énergie de masse (J)} \\ m: \text{masse (Kg)} \\ c: \text{vitesse de la lumière dans le vide (m/s)} \\ c = 3.10^8 \text{ m/s} \end{array} \right.$

#### Remarque :

- Une conséquence importante de cette relation est que quand la masse d'un système va varier, alors son énergie va varier. Ainsi on a :  $\Delta E = \Delta m \times c^2$ , Donc si :

- **Premiers cas** :  $\Delta m < 0$  donc,  $\Delta E < 0$  négative aussi et par convention, le système libère une énergie au milieu extérieur.  $E_{\text{libérée}} = |\Delta E|$
- **Deuxième cas** :  $\Delta m > 0$  donc,  $\Delta E$  est positive donc et par convention le système reçoit de l'énergie du milieu extérieur.  $E_{\text{consommée}} = |\Delta E|$

### 3. Unités usuelles de masse et d'énergie en physique nucléaire

- Dans le système international d'unités la **masse** s'exprime en **kilogramme (kg)** et l'**énergie** s'exprime en **joule (J)** or :

➤ **Nouvelle unité de masse** : En physique nucléaire, on utilise, comme unité de masse, l'**unité de masse atomique** notée **u** cette unité correspond au **douzième (1/12)** de la **masse d'un atome de carbone** :

$$1u = \frac{\text{masse de carbone}}{12} = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

➤ **Nouvelle unité d'Énergie** : En physique nucléaire, on utilise, Comme unité d'énergie, l'**électronvolt** notée **eV**

- Si nous calculons l'énergie de masse d'un électron :

$$E_{(e^-)} = m_{(e^-)} \times c^2 = 9,31.10^{-31} \times (3.10^8)^2 = 8.4.10^{-14} \text{ J}$$

**Nous trouvons une valeur très petite.**

- Nous utiliserons donc une unité d'énergie plus adaptée à l'échelle microscopique appelé l'**électronvolt (eV)** :

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

- On trouve alors pour l'énergie de masse d'un électron :

$$E_{(e^-)} = 8.4 \cdot 10^{-14} \times 625 \cdot 10^{16} = 0,525 \cdot 10^6 = 0,52 \text{ MeV}$$

- **Énergie correspond à la masse atomique** : D'après la relation d'Einstein  $E = m \cdot c^2$  pour une masse de  $1u$  on a :

$$E = 1,66054 \times 10^{-27} \times (3 \times 10^8)^2 = 1492,42 \times 10^{-15} \text{ J} = 931,5 \text{ MeV}$$

Donc :

$$1u = 931,5/c^2$$

- **Remarque :**

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV} , \quad 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} , \quad 1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$$

## I. ETUDE ENERGETIQUE DU NOYAU

### 1. Le défaut de masse

- Soit le noyau d'hélium  ${}^4_2\text{He}$  comparer la masse de ce noyau, et la masse de ses nucléon séparée :

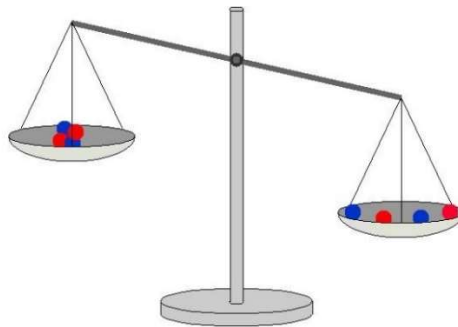
$$2 \times 1.6726 \cdot 10^{-27} + 2 \times 1.6749 \cdot 10^{-27} =$$

- **Données :**  $m_{{}^4_2\text{He}} = 6.644 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  ,  $m_p = 1.6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  ,  $m_n = 1.6749 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Par comparaison on trouve que :

#### - Conclusion :

- En mesurant la masse des noyaux au repos et celles des nucléons, on trouve que la **masse d'un noyau** est toujours **inférieure** à la **somme des masses des nucléons** qui le compose. Cette **différence de masse** est appelée **défaut de masse**  $\Delta m({}^A_Z X)$  et se calcule comme suit, Soit un noyau  ${}^A_Z X$  :



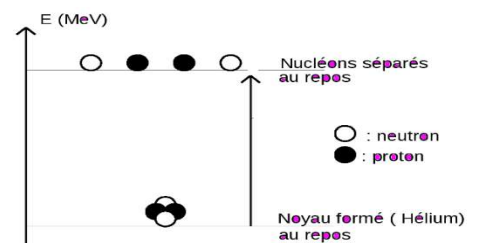
$$\Delta m({}^A_Z X) = [Z \times m_p + (A - Z) \times m_n] - m({}^A_Z X) > 0$$

### 2. Energie de liaison

- **Définition** : L'Energie de liaison est l'énergie qu'il faut fournir à un noyau au repos pour le dissocier en nucléons isolés et immobiles.
- Comme on l'a vu avec l'équivalence masse énergie, l'énergie de liaison d'un noyau est en rapport avec son défaut de masse :

$$E_{(l)} = \Delta m({}^A_Z X) \times c^2$$

Cette énergie est **positive** puisqu'elle est **reçue** par le **système considéré (noyau)**.



#### Application 01 :

- Calculons l'énergie de liaison d'un noyau d'Hélium :

$$m_{{}^4_2\text{He}} = 6.644 \cdot 10^{-27} \text{ u} , \quad m_p = 1.6726 \cdot 10^{-27} \text{ u} , \quad m_n = 1.6749 \cdot 10^{-27} \text{ u} , \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

- On calcul tout d'abord son défaut de masse :

$$\Delta m = [Z m_p + (A - Z) m_n] - m_{{}^4_2\text{He}} = 2 \times 1.6726 \cdot 10^{-27} + 2 \times 1.6749 \cdot 10^{-27} - 6.644 \cdot 10^{-27} = 5.061 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$$

- Puis l'énergie de liaison :  $E_l = \Delta m \times c^2 = 5.061 \cdot 10^{-29} \times (3 \cdot 10^8)^2 = 4.55 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 2846.81 \text{ MeV}$

### 3. Energie de liaison par nucléon et courbe d'Aston

#### a. Energie de liaison par nucléon

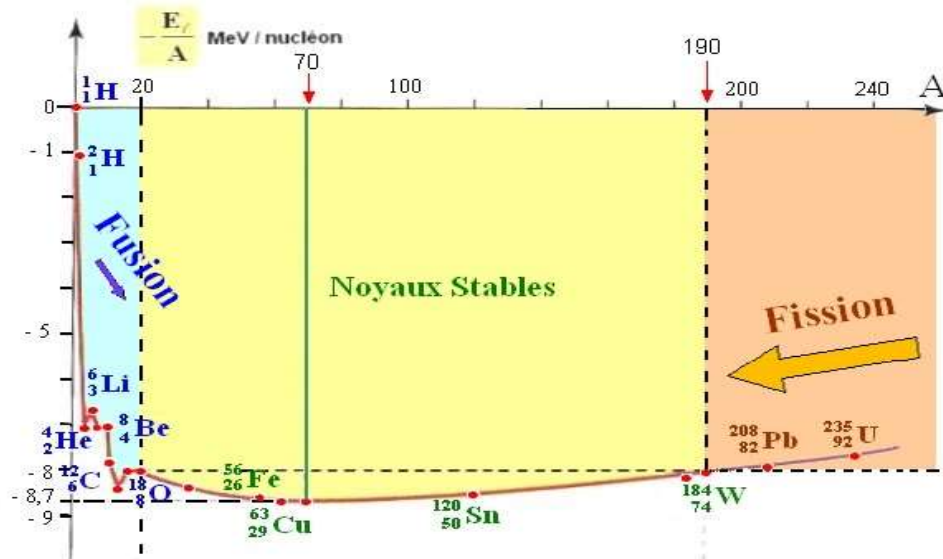
**Définition** : Elle est égale à l'énergie de liaison du noyau divisée par le nombre de nucléons présents dans ce noyau

$$\frac{E_l}{A}$$

- On l'exprimera généralement en **MeV/nucléon**.

#### b. Courbe d'Aston

- Elle permet de **comparer la stabilité de différents noyaux atomiques**. Par commodité, comme dans un diagramme énergétique, on s'est arrangé pour que **les noyaux les plus stables se situent dans la partie la plus basse de la courbe**. La courbe d'Aston est donc la représentation :  $-E_l/A = f(A)$  :



#### c. Exploitation de la courbe d'Aston

##### ➤ Zone de stabilité ( $20 < A < 190$ ) :

- On constate sur la courbe des valeurs minimales de  $-E_l/A$  proche à **8 MeV/nuc** là où se trouvent les noyaux les plus stables

##### ➤ Zone d'instabilité ( $A < 20$ et $A > 195$ )

- On constate sur la courbe que les valeurs de  $-E_l/A$  sont très faibles ce qui confirme que les noyaux existants dans cette zone sont instables ils cherchent à se stabiliser en effectuant :
  - **Pour les noyaux lourds ( $A > 195$ )**: Une fission nucléaire (**dissociation**) pour produire deux noyaux plus légers
  - **Pour les noyaux légers ( $A < 20$ )**: Une fusion nucléaire (**association**) pour produire un noyau plus lourd

## II. Réactions nucléaires de fission et de fusion

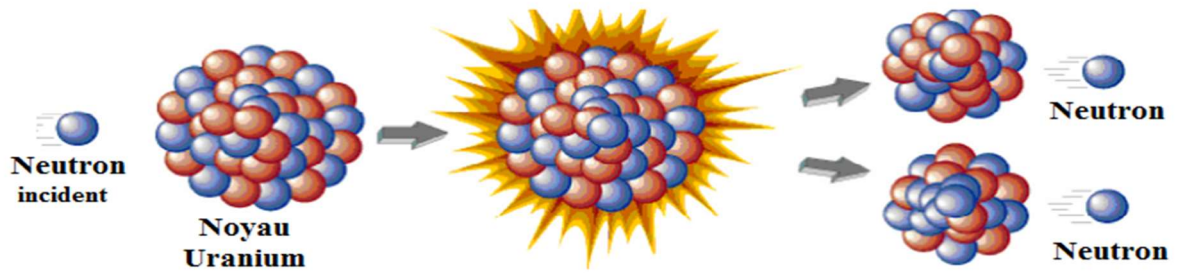
### 1. Propriétés de la fission et de la fusion

- ❖ Les réactions nucléaires de fusion et de fission sont qualifiées de réactions provoquées :
- ❖ Les réactions nucléaires de fusion et de fission doivent vérifier les lois de conservation (de Soddy) comme toutes réactions nucléaires (nombre de masse  $A$  et numéro atomique  $Z$ )

### 2. Réaction de fission nucléaire

#### a. Définition

- C'est une réaction nucléaire provoquée par l'impact d'un neutron « lent » sur un noyau lourd dit : **fissile**, ce qui provoque la naissance de deux noyaux plus légers.



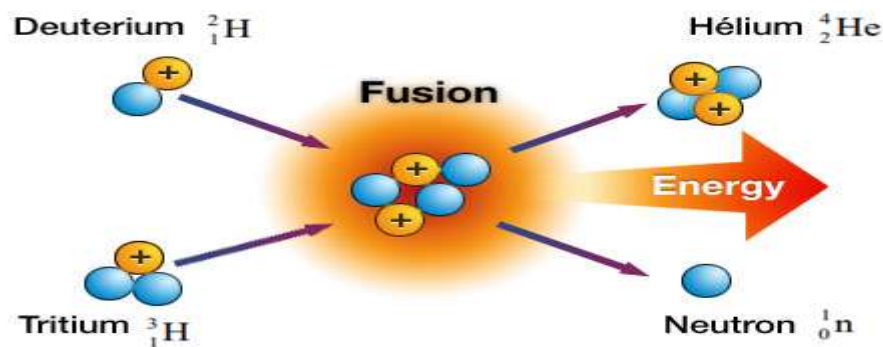
### b. Conditions d'obtention et applications

- Pas de répulsion lors de la rencontre entre le neutron (non chargé) et le noyau d'uranium.
- Une réaction de fission va donner naissance à des noyaux fils et à des neutrons, ceux-ci pouvant aller rencontrer d'autres noyaux d'uranium : **on obtient alors une réaction en chaîne.**

## 3. Réaction de fusion nucléaire

### a. Définition

- C'est une réaction nucléaire entre deux noyaux légers sont « **assemblés** » pour former un noyau plus stable et plus lourd mais dont la masse est inférieure à la somme des masses des noyaux légers mis en jeu



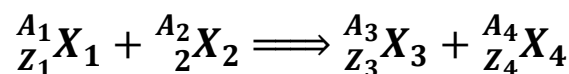
### b. Conditions d'obtention et applications :

- 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 (108 K).

## 4. Bilan de masse et d'énergie d'une réaction nucléaire

### 1. Cas général

- Soit une réaction nucléaire quelconque d'équation :



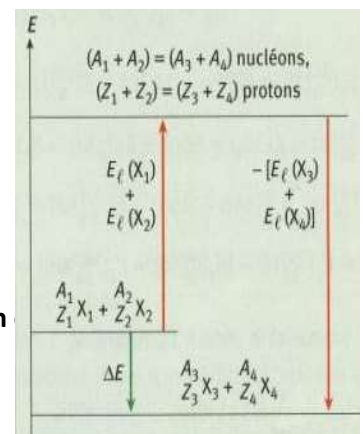
- Il y a deux façons de calculer l'énergie libérée par la transformation nucléaire :

❖ Soit en utilisant la variation de masse :

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

❖ Soit en utilisant les énergies de liaison des noyaux et d'après la définition

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



### 2. Réactions nucléaires spontanées : radioactivité $\alpha$ et $\beta$

#### a. Radioactivité $\alpha$ : désintégration du radium 226

1) Écrire l'équation de désintégration du radium :  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$

2) Calculer l'énergie libérée lors de la désintégration : d'un noyau de radium 226 (en MeV) et d'une mole de noyau de radium 226 (en J.mol<sup>-1</sup>)

Donnée :

Noyau	Masse (u)
Radium	225,9770
Radon	221,9702
Hélium	4,0015

$$c = 2.9979 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

### b. Radioactivité $\beta$ : désintégration du cobalt 60

- 1) Écrire l'équation de désintégration du cobalt :  ${}^{60}_{27}\text{Co}$
- 2) Calculer l'énergie libérée lors de la désintégration : d'un noyau de Cobalt 60 (en MeV) et d'une mole de noyau de Cobalt 60 (en J.mol<sup>-1</sup>)

Données :

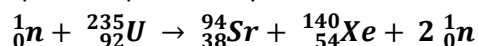
Noyau	Masse (u)
Cobalt	59,9190
Nickel	59,9154

$$m_e = 5.49 \cdot 10^{-4} \text{ u}$$

## 3. Réaction nucléaire provoquées : fission et fusion

### a. Réaction de fission

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



Lors de cette transformation, déterminer :

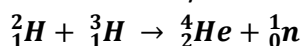
- 1) L'énergie libérée  $\Delta E$
- 2) L'énergie libérée  $\Delta E_m$  par une mole de noyau d'uranium (en J.mol<sup>-1</sup>)
- 3) L'énergie libérée par nucléon

Données : masse des noyaux.

Noyau	Masse (u)
${}_{92}^{235}\text{U}$	234,9935
${}_{38}^{94}\text{Sr}$	93,8945
${}_{54}^{145}\text{Xe}$	139,8920
n	1,0087

### b. Réaction de fusion

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



Lors de cette transformation, déterminer :

- 1) L'énergie libérée  $\Delta E$
- 2) L'énergie libérée par nucléon

Comparer énergétiquement la fission et la fusion et en déduire pourquoi les recherches s'orientent davantage sur la fusion.

Données :

Noyau	Masse (u)
${}_1^2\text{H}$	2.0160
${}_1^3\text{H}$	3.0247
${}_2^4\text{He}$	4.0015
n	1,0087