

Noyaux : masse et énergie

I- Equivalence masse-énergie :

1) 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 :

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

Avec :

E : énergie de masse (J).

m : masse (Kg).

c : célérité de la lumière dans le vide $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

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 : $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$

2) Unités de masse et d'énergie :

Le kilogramme (Kg) et le Joule (J) sont deux unités non adaptées à l'échelle atomique.

a) Unité de masse : unité de masse atomique (u. m. a).

La masse d'un noyau atomique est souvent exprimée dans une unité plus adaptée que le kilogramme : l'unité de masse atomique, noté u ;

« L'unité de masse atomique u , est égale au $\frac{1}{12}$ de la masse d'un atome de carbone 12 : $^{12}_6C$ ».

$$1u = \frac{1}{12} \cdot m(^{12}_6C) = \frac{1}{12} \cdot \frac{M(^{12}_6C)}{N_A}$$

On donne :

$$\left. \begin{array}{l} M(^{12}_6C) = 12 \text{ g.mol}^{-1} = 12 \cdot 10^{-3} \text{ Kg.mol}^{-1} \\ N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} ; \text{ constante d'Avogadro.} \end{array} \right\} \Rightarrow 1u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$$

b) Unité d'énergie : Electronvolt (eV).

L'électronvolt (eV) est une unité d'énergie adaptée à l'échelle atomique. A l'échelle du noyau, on utilise plutôt le mégaélectronvolt (MeV) :

$$1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

Remarque :

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

Noyaux : Masse et énergie

II- Energie de liaison :

1) Défaut de masse :

On appelle défaut de masse Δm pour un noyau, la différence entre la somme des masses des nucléons (masse théorique du noyau) et la masse du noyau :

$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z)m_n - m(^A_Z X)$$

Remarque :

Le défaut de masse Δm est une grandeur strictement positive.

2) Energie de liaison du noyau : (*A retenir*)

L'énergie de liaison d'un noyau (noté E_ℓ) est l'énergie qu'il faut fournir à un noyau au repos, pour le dissocier en nucléons isolés et immobiles :

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

Remarque :

L'énergie de liaison d'un noyau représente l'équivalent énergétique de son défaut de masse.

3) Energie de liaison par nucléon :

L'énergie de liaison par nucléon (noté ξ) est obtenue en divisant l'énergie de liaison E_ℓ d'un noyau par son nombre de nucléons A :

$$\xi(^A_Z X) = \frac{E_\ell}{A} \quad (\text{MeV/nucléon})$$

Remarque :

- L'énergie de liaison par nucléon représente l'énergie de liaison moyenne par nucléon.
- « *Plus la valeur de l'énergie de liaison par nucléon est grande, plus le noyau considéré est plus stable* ».

Application n° 1 : Exercice n° 1 ; Série n° 4

Un noyau de carbone 14 a une masse de 13,9999u. L'isotope 14 est noté $^{14}_6 C$.

La masse d'un neutron est $m_n = 1,00866u$, celle du proton $m_p = 1,00727u$.

1- Donner la composition du noyau de carbone 14.

2- Calculer en unité de masse atomique u, la masse théorique du noyau (i.e la masse de nucléons).

3- En déduire le défaut de masse.

4- Calculer en MeV l'énergie de liaison de cet noyau.

5- En déduire l'énergie de liaison moyenne par nucléon du carbone 14.

6- L'énergie de liaison par nucléon du carbone 12 est $\xi(^{12}_6 C) = 7,68 \text{ MeV/nucléon}$.

Parmi les deux noyaux, lequel est le plus stable ? Justifier votre réponse.

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

Noyaux : Masse et énergie

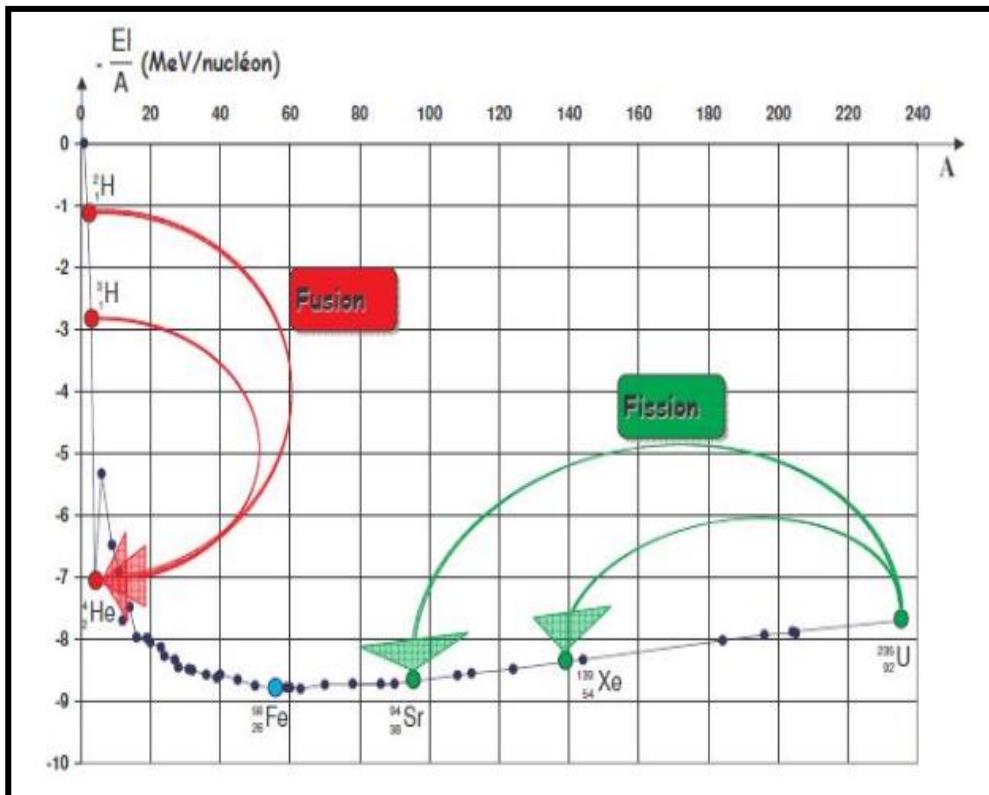
Réponse :

III-Fusion et fission nucléaires:

1) Courbe d'Aston :

La courbe d'Aston 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 représente l'opposé de l'énergie de liaison par nucléon $-\frac{E_\ell}{A}$.

Noyaux : Masse et énergie



- Pour les noyaux dont $20 < A < 195$: la courbe présente des valeurs minimales de $(-\frac{E_B}{A})$, elle est de (-8 MeV/nucléon) . c'est la zone de stabilité.
- Pour les noyaux dont $A < 20$ et ceux dont $A > 195$: leurs énergies de liaison par nucléon sont faibles, donc instables, c'est pour cela qu'ils se transforment en noyau plus stables selon les processus suivants :
 - Les noyaux légers ($A < 20$) peuvent s'associer entre eux pour donner un noyau plus lourd. C'est le phénomène de la fusion nucléaire.
 - Les noyaux lourds ($A > 195$) peuvent se scinder en deux noyaux plus légers. C'est le phénomène de la fission nucléaire.

Remarque :

Les réactions de fusion et de fission nucléaires sont généralement des réactions nucléaires non spontanées : il est nécessaire de les provoquer.

2) Fission nucléaire :

a- Définition :

La fission est une réaction nucléaire dans laquelle un noyau lourd, dit "fissile", est scindé en deux noyaux plus légers et plus stables.

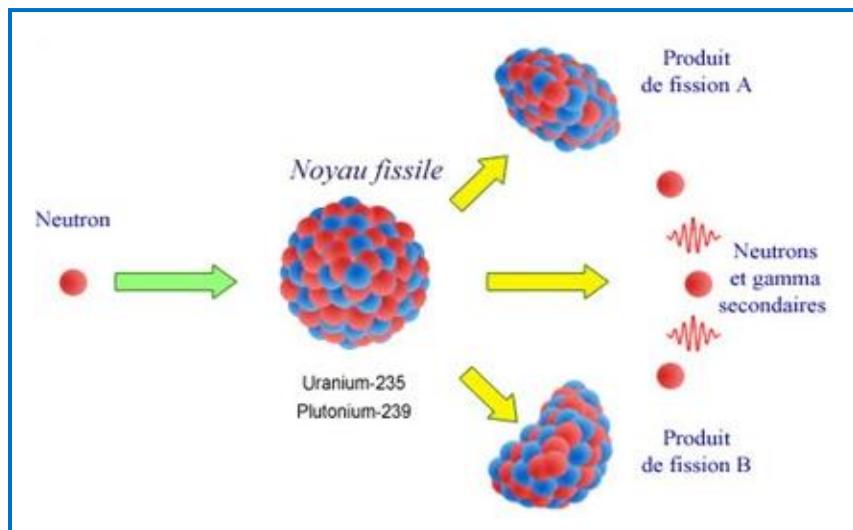
Remarque :

Dans la plupart des cas, la fission est provoquée par l'impact d'une particule incidente ;

Noyaux : Masse et énergie

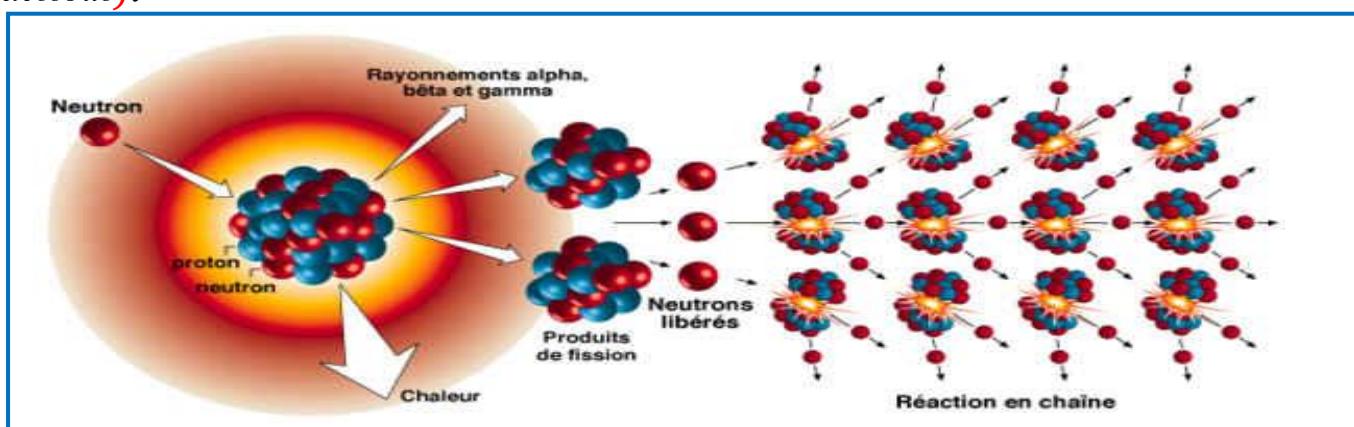
Le neutron, électriquement neutre, est généralement utilisé car il ne subit pas de répulsion électrostatique de la part du noyau cible.

Exemples :



b- Réaction en chaîne :

Provoquée par un neutron, la réaction précédente libère trois autres neutrons, dits neutrons rapides. A leur tour, ces neutrons peuvent provoquer la fission de trois autres noyaux d'uranium 235 ; et ainsi de suite. On parle de réaction en chaîne. (figure ci-dessous).



Noyaux : Masse et énergie

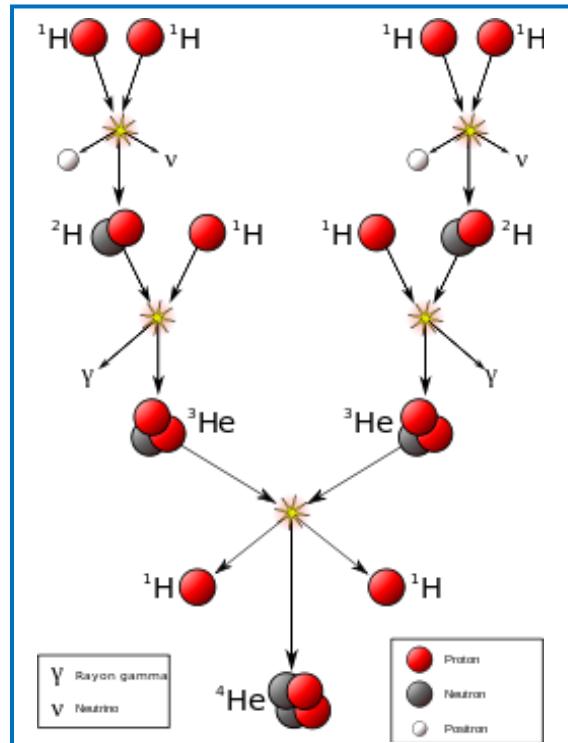
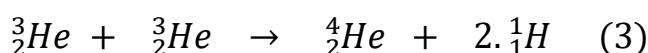
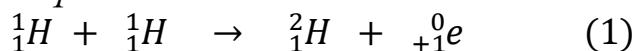
3) Fusion nucléaire :

a- Définition :

La fusion nucléaire est la formation d'un noyau plus lourd et plus stable à partir de deux noyaux légers.

Exemples : (figure ci-contre).

Dans le soleil, les noyaux de l'hélium se forment à partir de noyaux d'hydrogène selon les trois étapes suivantes :



b- Condition de la réalisation de la fusion nucléaire : (A retenir).

La fusion nucléaire n'est possible que si les noyaux légers possèdent une énergie suffisante, capable de vaincre les forces d'interaction répulsive au sein des noyaux. Ce ci nécessite des températures très élevées de l'ordre de $10^8 K$: c'est pour cette raison qu'on qualifie la fusion nucléaire de «réaction nucléaire thermique».

IV- Energie de réaction nucléaire :

Considérons la réaction nucléaire d'équation générale suivante :



L'énergie de cette réaction nucléaire est donnée par :

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

Avec :

Δm : Représente la variation massique, elle est donnée par :

$$\Delta m = m(\text{produits}) - m(\text{réactifs})$$

$$\Rightarrow \Delta m = m({}_{Z_3}^{A_3}X_3) + m({}_{Z_4}^{A_4}X_4) - m({}_{Z_1}^{A_1}X_1) - m({}_{Z_2}^{A_2}X_2)$$

Remarque :

- ΔE est une grandeur algébrique (positive ou négative):
 - si $\Delta E < 0$: on dit que le système (la réaction) libère de l'énergie au milieu extérieur ; il s'agit donc d'une réaction exothermique.
 - si $\Delta E > 0$: on dit que le système (la réaction) absorbe de l'énergie de milieu extérieur ; il s'agit donc d'une réaction endothermique.

Noyaux : Masse et énergie

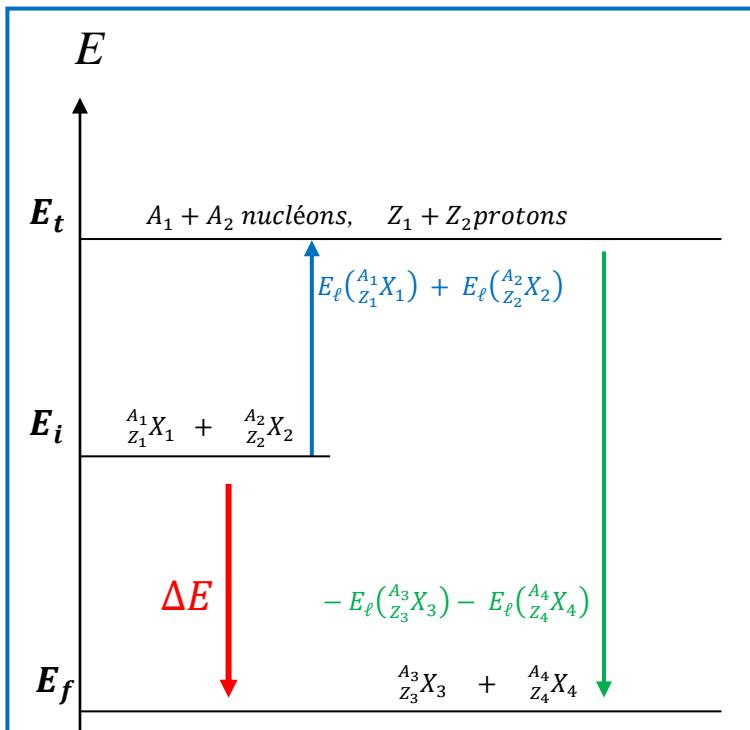
- On peut calculer ΔE aussi en utilisant les énergies de liaison des différents noyaux du système :

$$\Delta E = E_\ell(\text{réactifs}) - E_\ell(\text{produits})$$

$$\Rightarrow \Delta E = E_\ell\left(\frac{A_1}{Z_1}X_1\right) + E_\ell\left(\frac{A_2}{Z_2}X_2\right) - E_\ell\left(\frac{A_3}{Z_3}X_3\right) - E_\ell\left(\frac{A_4}{Z_4}X_4\right)$$

Avec : $E_\ell\left(\frac{1}{1}p\right) = E_\ell\left(\frac{1}{0}n\right) = E_\ell\left(\frac{-1}{-1}e\right) = E_\ell\left(\frac{0}{+1}e\right) = 0$

- Diagramme d'énergie d'une réaction nucléaire :



$E_\ell\left(\frac{A_1}{Z_1}X_1\right) + E_\ell\left(\frac{A_2}{Z_2}X_2\right)$: énergie reçue par le système pour dissocier les noyaux X_1 et X_2 en nucléons.

$- E_\ell\left(\frac{A_3}{Z_3}X_3\right) - E_\ell\left(\frac{A_4}{Z_4}X_4\right)$: énergie libérée par le système pour former les noyaux X_3 et X_4 à partir de nucléons.

E_i : énergie initiale du système (**réactifs**) ;

E_f : énergie finale du système (**produits**) ;

E_t : énergie de transition du système (**nucléons**).

Remarque :

- A partir du diagramme énergétique on peut calculer l'énergie de la réaction ΔE :

$$\Delta E = E_f - E_i$$

- On peut aussi selon le diagramme énergétique déterminer l'énergie de liaison d'un noyau.

Noyaux : Masse et énergie

1) Applications aux réactions nucléaires spontanées :

Dans le cas d'une réaction nucléaire spontanée (α , β^- et β^+), l'énergie de réaction est toujours négative ($\Delta E < 0$), et s'appelle énergie libérée et on la note $E_{libérée}$, et on écrit : $E_{libérée} = |\Delta E|$

Applications n° 2 : Exercice n° 2 ; Série n° 4

Le fer 59 est radioactif β^- selon l'équation : ${}_{26}^A Fe \rightarrow {}_{27}^{59} Co + \beta^-$

1- Déterminer, en les justifiant, les valeurs de Z et A .

2- Calculer l'énergie de la réaction en MeV.

3- Calculer l'énergie libérée lors de la désintégration de 1g de $^{26}A\text{Fe}$.

4- Représenter le diagramme énergétique de cette réaction.

Données :

$$1u = 1,66055 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 931,5 \text{ MeV/c}^2 \quad ; \quad \text{Masse des noyaux :}$$

$$m(^{48}_{\text{Zn}}Fe) = 58,920.6 \text{ u} ; m(^{59}_{\text{Zn}}Co) = 58,918.4 \text{ u} \text{ et } m(\beta^-) = 5.49 \cdot 10^{-4} \text{ u}.$$

Réponse :

Noyaux : Masse et énergie

2) Applications aux réactions nucléaires provoquées :

a) Réactions de fissions nucléaires :

Applications n° 3: Exercice n° 3 ; Série n° 4

Un réacteur d'une centrale nucléaire fonctionne à l'uranium enrichi (3 % d'uranium 235 fissile et 97 % d'uranium 238 non fissile). Par capture d'un neutron lent, le noyau, subit la fission:

- 1- Calculer x et z pour ajuster les coefficients de cette équation de réaction nucléaire
 - 2- Calculer la variation de masse Δm en u de cette réaction.
 - 3- Calculer l'énergie libérée par la fission d'un noyau d'uranium 235. L'exprimer en MeV et en joules.
 - 4- Quelle serait l'énergie fournie par la fission d'une mole de noyaux d'uranium 235
 - 5- Dans cette centrale nucléaire, l'énergie nucléaire est transformée en énergie électrique, elle fournit une puissance électrique moyenne $P_e = 1000 \text{ MW}$ avec un rendement $r = 25\%$.
 - 5.1- Quelle est sa puissance nucléaire P_n consommée ?
 - 5.2- Quelle est, en joule, l'énergie nucléaire consommée chaque année ?
 - 5.3- Quelle est, en tonne, la masse d'uranium 235 consommée annuellement ?

Données:

Masses des noyaux participant à la réaction (en unité de masse atomique):

Xenon: 138,8882; Strontium: 93,8946; Uranium 235: 235,0134 ; Neutron: 1,00866 ;

Réponse :

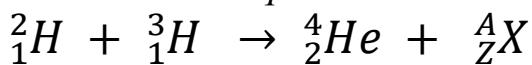
Noyaux : Masse et énergie

Noyaux : Masse et énergie

b) Réactions de fusions nucléaires :

Applications n° 4: Exercice n° 4 ; Série n° 4

On considère l'équation suivante :



1- Donner le symbole du noyau ${}_Z^AX$ en précisant les règles de conservation.

2- De quel type de réaction s'agit-il ?

3- Représenter le diagramme énergétique de cette réaction.

4- Calculer l'énergie de cette réaction. Est-elle endo ou exothermique ?

Données :

Énergies de liaison par nucléon :

$$\frac{E_\ell}{4} ({}^2_1 H) = 1,10 \text{ Mev/nucléon} ;$$

$$\frac{E_\ell}{4} ({}^3_1 H) = 2,80 \text{ Mev/nucléon;}$$

$$\frac{E_\ell}{A} ({}^4_2 He) = 7,07 \text{ Mev/nucleon}.$$

A

Réponse :