# 5 NOYAUX ATOMIQUES: MASSE-ÉNERGIE

## I- Équivalence masse-énergie

### 1 Principe d'équivalence:

En 1905, Einstein a postulé le principe d'équivalence entre masse et énergie:

Une particule matérielle, même au repos, du seul fait de sa masse, possède une énergie nommée «énergie de masse».

L'énergie de masse $E$ d'une particule de masse $m$ suite à la fameuse relation d'einstein:

$$E = mc^2$$

où $c$ désigne la vitesse de la lumière dans le vide.

### 2 Variation de la masse:

Lorsque la masse d'un système au cours d'un transformation, telle que les transformation nucléaires de $\Delta m$, alors cette variation s'accompagne d'un échange d'énergie avec le milieu extérieur dont la valeur est: $\Delta E$

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

Lorsque la masse du système diminue $(\Delta m < 0)$ le système libère de l'énergie $(\Delta E < 0)$. Dans le cas inverse, lorsque $\Delta E > 0$, la transformation nécessite un apport extérieur d'énergie, la masse du système augmente.

### 3 Unités utilisées:

Dans cette formule, la masse est exprimée en unité de masse atomique $(u)$ et l'énergie en $MeV$ (méga électron-volt).

$1u = 1,66.10^{-27}kg$ ; $1MeV = 1,6.10^{-13}J$ ; $1u = 931,5MeV.c^{-2}$

**Exemple**: Si $\Delta m = -4u$, alors:

$$\Delta E = \Delta m.c^2 = -4u.c^2 = -4.931,5MeV.c^{-2}.c^2 = -372,6MeV$$

### 4 Défaut de masse d'un noyau:

On constate que la masse du noyau est toujours inférieure à la somme des masses de ses constituants pris individuellement:

Pour un noyau ${}^A_ZX$ on a:

$$m({}^A_ZX) < Zm_p + (A - Z)m_n$$

On appelle défaut de masse de noyau, la différence.

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

**Exemple:** calculons le défaut de masse du noyau de fer $^{56}_{26}Fe$

On donne: $m(^{56}_{26}Fe) = 55,9207u$ ; $m_p = 1,00728u$ ; $m_n = 1,00866u$

$\Delta m = m(nucléons) - m(noyau)$

$= 26m_p + 30m_n - m(^{56}_{26}Fe)$

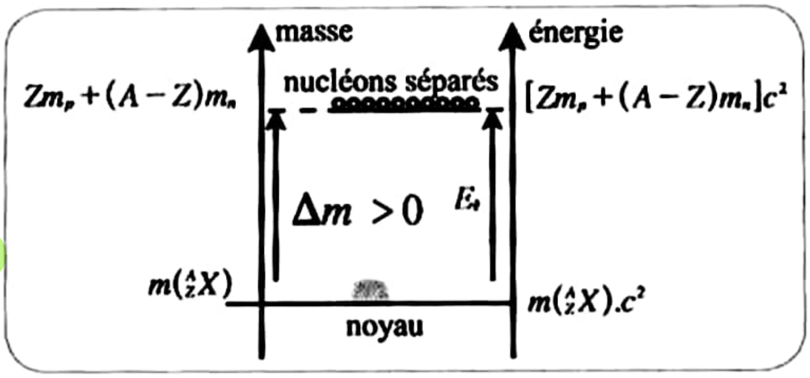
$= 26.1,00728 + 30.1,00866 - 55,9207 = 0,52838u$

## 5- Énergie de liaison:

### 5.1- Définition:

L'énergie de liaison du noyau, que l'on note $E_\ell$, est l'énergie qu'il faut fournir à un noyau pris au repos pour le dissocier en ses différents nucléons isolés et au repos.

### 5.2- Expression:




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

$\Delta m$: défaut de masse du noyau.

### 5.3- énergie de liaison par nucléon:

On la définit par: $\mathscr{E} = \dfrac{E_\ell}{A}$

Plus $\mathscr{E}$ est grande, plus la cohésion dans le noyau est grande, plus il est stable.

**Exemple :** Reprenons l'exemple du nucléide de $^{56}_{26}Fe$.

Son défaut de masse est $\Delta m = 0,52838u$, alors

$E_\ell = \Delta m.c^2 = 0,52838u.c^2$

$= 0,52838.931,5MeV.c^{-2}.c^2$

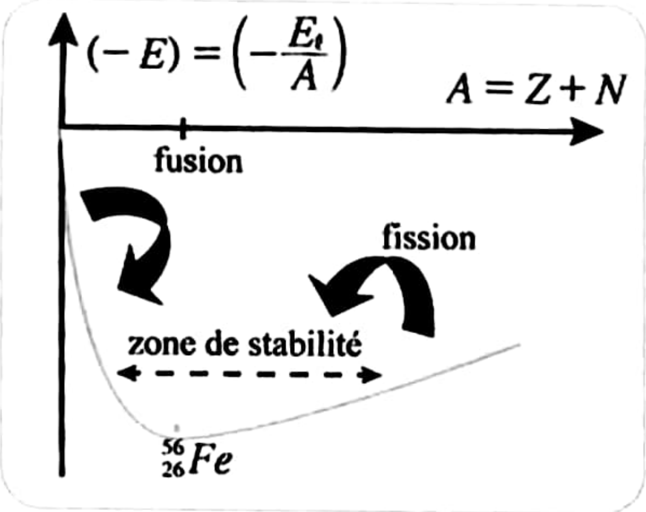
$= 492,18MeV$

$\mathscr{E} = \dfrac{E_\ell}{A} = 8,8 \simeq MeV/nucléon$

### 5.4- Courbe d'Aston:

Elle est représentée par les variations de $\left(-\mathscr{E} = \dfrac{-E_\ell}{A}\right)$ en fonction $A$.

- Les noyaux moyens sont les plus stables. En dehors de cette zone de stabilité, les noyaux légers et les noyaux lourds ont une énergie de liaison par nucléon plus faibles que les noyaux moyens.
- Les noyaux légers peuvent entrer en fusion pour donner des noyaux plus stables.
- Les noyaux lourds peuvent se fissionner pour donner des noyaux plus stables.




## II- Energie produite par une réaction spontanée

### 1 Exemple: Considérons la désintégration d'équation:

$^{210}_{84}Po \longrightarrow {}^{206}_{82}Pb + {}^{4}_{2}He$

On donne: $m({}^4_2He)=4{,}0015u$; $m({}^{210}Po)=209{,}9368u$; $m({}^{206}Pb)=205{,}9295u$

$1u = 931{,}5MeV.c^{-2}$

L'énergie $\Delta E$ de cette réaction est:

$\Delta E = \Delta m.c^2 = [m \text{ (produits)} - m \text{ (réactifs)}]\ c^2$

$\Delta m = m \text{ (finale)} - m \text{ (initiale)}$

$= m(Pb)+m(\alpha)-m(Po)$

$= 205{,}9295 + 4{,}0015 - 205{,}9368 = -0{,}0058u$

Donc $\Delta E = -0{,}0058.931{,}5 = -5{,}4MeV$

$\Delta E < 0$ donc cette réaction donne de l'énergie au milieu extérieur.

Chaque noyau de polonium désintégré libère une énergie qui vaut:

$E = |\Delta E| = 5{,}4MeV$

### 2 Généralisation:

Toutes les réactions spontanées $\alpha$, $\beta$ et $\beta^+$ libèrent de l'énergie ($\Delta E < 0$).

### 3 Bilan énergétique - diagramme d'énergie:

Considérons l'exemple précédent: $^{210}_{84}Po \longrightarrow {}^{206}_{82}Pb + {}^{4}_{2}He$

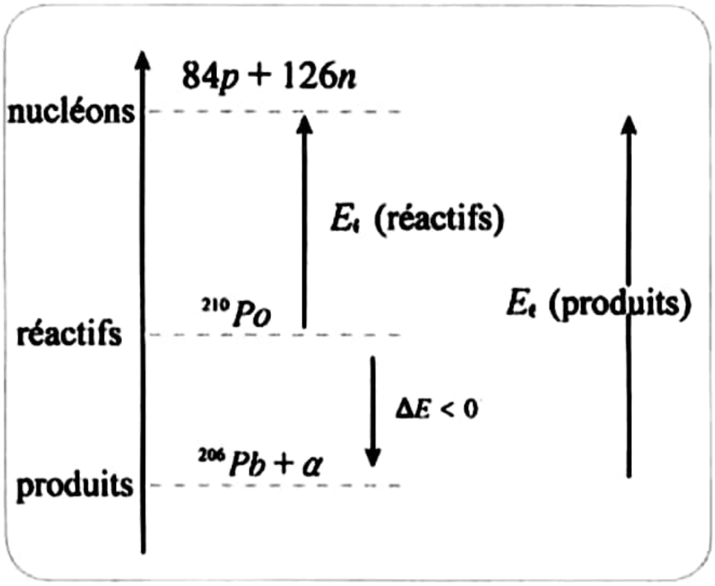
Avant d'atteindre l'état final, on peut imaginer que le système passe par un état intermédiaire instable formé de nucléons.

$^{210}Po \xrightarrow[E_\ell]{①} \because\because \xrightarrow{②} Pb + {}^4_2He$

Cette représentation permet d'introduire l'énergie de liaisons des réactifs et celles des produits de la réaction.

L'énergie qui correspond à l'étape (1) est $E_\ell(Po)$ et celle qui correspond à l'étape (2) est l'opposé d'une énergie de liaison.

Utilisons donc le diagramme énergétique ci-contre.




D'après ce diagramme on a:

$E_\ell$ (produits) $= E_\ell$ (réactifs) $+(-\Delta E)$

d'où $\Delta E = E_\ell$ (réactifs) $- E_\ell$ (produits)

Dans le cas de l'exemple étudié:

$\Delta E = E_\ell(^{210}Po) - [E_\ell(^{206}Pb) + E_\ell(^{4}_{2}He)]$

On encore

$\Delta E = 210\mathscr{E}(Po) - 206\mathscr{E}(Pb) - 4\mathscr{E}(\alpha)$

**En résumé:** Pour une réaction spontanée ($\alpha$, $\beta^-$ et $\beta^+$) modélisée par:

$X \rightarrow Y_1 + Y_2$ où $Y_2$ représente la particule $\alpha$, $\beta^-$ ou $\beta^+$ ; on peut calculer l'énergie de la réaction en utilisant:

- soit la variation de la masse: $\Delta E = \Delta m.c^2$, avec: $\Delta m = m(Y_1) + m(Y_2) - m(X)$;
- soit les énergies de liaisons: $\Delta E = E_\ell(X) - [E_\ell(Y_1) + E_\ell(Y_2)]$

## III- Réactions nucléaires provoquées

### 1. La fission nucléaire:

1.1- La fission nucléaire est une réaction nucléaire provoquée en bombardant un noyau lourd fissile (fissible) par un neutron appelé neutron thermique. ou neutron lent. Il en résulte deux noyaux relativement moyens.

#### 1.2- Réalisation de la fission

Les noyaux fissibles utilisés à nos jours sont deux: $^{235}_{92}U$ et $^{239}_{94}Pu$.

- L'uranium $^{235}_{92}U$, qui est un isotope naturel présent dans les minerais d'uranium avec un pourcentage de $0,7\%$ contre $99,3$ de $^{238}_{92}U$ noyau non fissible.
- Le plutonium $^{239}_{94}Pu$, c'est un noyau artificiel qu'on prépare à partir de l'uranium $^{238}_{92}U$

#### 1.3- Equations de la fission nucléaire

la fission de l'uranium 235 donne lieu a plus de trente réactions différentes.

L'équation d'une fission nucléaire vérifie la loi de Soddy et l'énergie libérée est $\Delta E = \Delta m.c^2$.

## 1.4- Exemple:

### Exercice d'application

L'isotope 235 d'uranium est noyau fissile. Bombardé par un neutron, il peut donner lieu à la réaction de fission suivante: $^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{140}_{54}Xe + ^{94}_{38}Sr + 2^{1}_{0}n$ .

**Données:**

| **Particule** | $^{235}_{92}U$ | $^{140}_{54}Xe$ | $^{94}_{38}Sr$ | $^{1}_{0}n$ |
|---|---|---|---|---|
| **Masse (en $u$)** | 234,9935 | 139,8920 | 93,8945 | 1,0087 |

**a-** Calculer la variation de masse $\Delta m$ associée à cette réaction nucléaire.

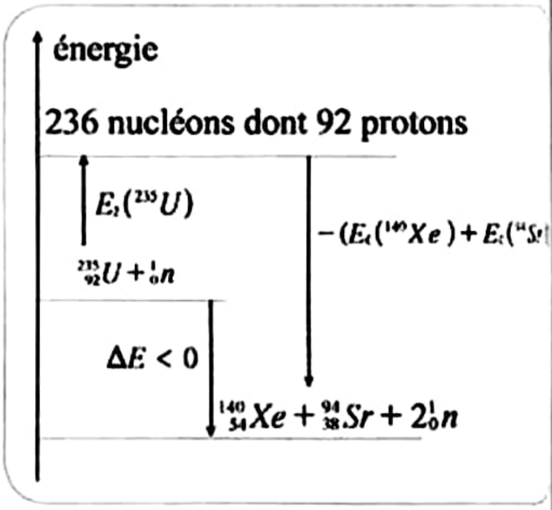
**b-** En déduire l'énergie de réaction $\Delta E$ .

**c-** S'agit-il d'une réaction exothermique, endothermique ou athermique?

**d-** Représenter le bilan d'énergie en utilisant un diagramme d'énergie.

**e-** En déduire l'expression de l'énergie $\Delta E$ en fonction des énergies de liaisons des noyaux mis en jeu.

### ution




**a-** La variation de masse au cours de la réaction est égale à:

$$\Delta m = m(^{140}Xe) + m(^{94}Sr) + m(^{1}_{0}n) - m(^{235}U)$$

soit $\Delta m = -0,1983u$ ou encore

**b-** $\Delta m = \Delta m.c^2 = -0,1983.931,5$

$$= 184,72MeV$$

**c-** $\Delta E < 0$: la réaction est donc exothermique (libère de la chaleur)

**d-** Le diagramme d'énergie ci-contre montre que les produits de la réaction ont une énergie de masse inférieure à celle des réactifs. L'état d'énergie le plus élevé correspond aux nucléons séparés.

**e-** $-[E_l(Xe) + E_l(Sr)] = \Delta E - E_l(U)$, on rappelle que $E_l(^{1}_{0}n) = 0$

d'où: $\Delta E = E_l(U) - [E_l(Xe) + E_l(Sr)]$

$$\Delta E = \sum E_l \text{ (réactifs) } - \sum E_l \text{ (produits)}$$

## 1.5- La fission en chaine:

Les neutrons éjectés par la fission du premier noyau $^{235}U$ peuvent également initier d'autres fissions et ainsi de suite.

Ce phénomène est appelé réaction en chaîne et conduit à une augmentation très rapide de l'énergie libérée sous forme de chaleur.

- Dans les centrales nucléaires la fission en chaîne est contrôlée.
- Lorsque la fission n'est pas contrôlée, elle devient explosive, c'est le principe de la bombe atomique (bombe $A$).

## I- Fusion nucléaire:

### 2.1- Définition:

une fusion nucléaire est une réaction nucléaire provoquée au cours de laquelle deux noyaux légers sont unis pour donner un noyau plus lourd.

Exemple: ${}^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \longrightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n$

### 2.2- Conditions de réalisation:

Pour vaincre la répulsion entre les noyaux réactifs, chargés positivement, et permettre leur collision, il faut:

- Une température proche de $10^{8}\,°C$.
- Une pression très forte de la matière à fusionner.

**Remarque:**

Dans les étoiles comme le soleil, l'agitation thermique importante due à une température de plusieurs millions de degrés favorise les réactions de fusion nucléaire.

**Bilan énergétique:**

Parmi les fusions qui se font au sein du soleil, on trouve la réaction d'équation:

${}^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \longrightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n$

L'énergie $\Delta E$ de cette réaction est:

$\Delta E = \Delta m.c^{2} = [m({}^{4}He) + m({}^{1}_{0}n) - m({}^{2}H) - m({}^{3}H)].c^{2}$;

on encore: $\Delta E = E_{\ell}({}^{2}_{1}H) + E_{\ell}({}^{3}_{1}H) - E_{\ell}({}^{4}_{2}He)$;

Cette énergie de l'ordre de $17\,MeV$, est négligeable devant celle libérée par une fission $(180\,MeV)$, mais, ramenées au nombre de nucléons dans les réactifs:

(5 pour la fusion et 236 pour la fission) la fusion libère environ 5 fois plus d'énergie que la fission.