

Activité : Energie des réactions nucléaires

I) Equivalence masse énergie

1) Relation d'Einstein

En 1905, en élaborant la théorie de la relativité restreinte, Einstein montre qu'un système **au repos**, de masse m possède une énergie de masse (ou énergie propre ou énergie interne) :

$$E = mc^2$$

E : énergie de masse (J) ;

m : masse (kg) ;

$c = 2,99792 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ est la vitesse de la lumière dans le vide.

Cette relation est parfois appelée 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 ΔE et sa **variation** de masse Δm 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**.

Exemple : on chauffe un kilogramme d'eau de 0°C à 100°C . Calculer sa variation de masse. Donnée : capacité calorifique massique de l'eau : $c_{eau} = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$. Conclusion ?

2) Unités

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

$1 \text{ eV} = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ donc $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1,6022 \cdot 10^{-13} \text{ J}$

Exemple : déterminer l'énergie de masse E d'un proton en J et en MeV ($m_p = 1,67493 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$).

Rq : A cette échelle, le kilogramme est aussi inadapté, on utilise souvent l'unité de masse atomique notée u. Elle est égale au douzième de la masse d'un atome de carbone 12.
 $1 \text{ u} = M(^{12}_6\text{C}) / (12N_A) = 12,0 \cdot 10^{-3} / (12 \times 6,022 \cdot 10^{23}) = 1,664 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$

II) Energie de liaison du noyau

1) Défaut de masse

Un noyau d'hélium ^4_2He possède 2 protons et 2 neutrons. Sa masse est $m(^4_2\text{He}) = 6,6447 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Calculer la masse totale des nucléons séparés au repos. Conclusion ?

Données : $m_n = 1,67496 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, $m_p = 1,67265 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

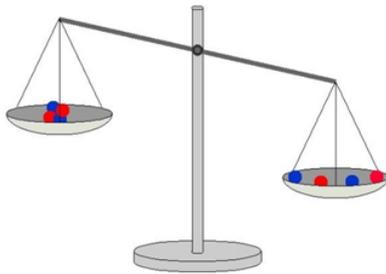
La masse d'un noyau atomique est inférieure à la somme des masses des nucléons qui le constituent :

$$m_{\text{noyau}} < Z \cdot m_p + (A-Z) \cdot m_n$$

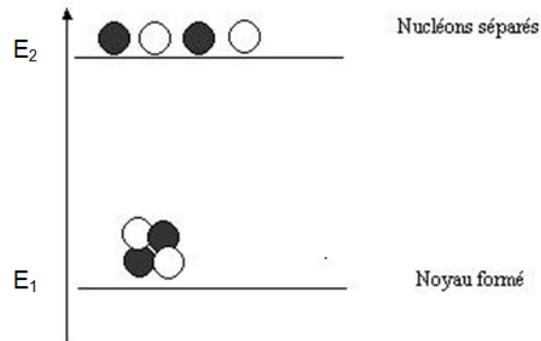
Cette différence est appelée défaut de masse et est notée Δm :

$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m_{\text{noyau}} \quad (\Delta m > 0)$$

2) Energie de liaison



Energie de repos



L'énergie de masse d'un noyau est donc plus petite que celle de ses nucléons isolés. Pour séparer un noyau en ses nucléons il faut donc fournir de l'énergie au noyau.

Définition : on appelle énergie de liaison d'un noyau, notée E_{liaison} , 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 Δm et l'énergie de $\Delta m \cdot c^2$. L'énergie de liaison d'un noyau a pour expression $E_{\text{liaison}} = \Delta m \cdot c^2$ ($E_l > 0$)

Exemple : pour un noyau d'hélium $E_{\text{liaison}} = \Delta m \cdot c^2 = \dots \times (\dots)^2 = \dots \text{ J} = \dots \text{ MeV}$

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 : $E_A = E_{\text{liaison}} / A$

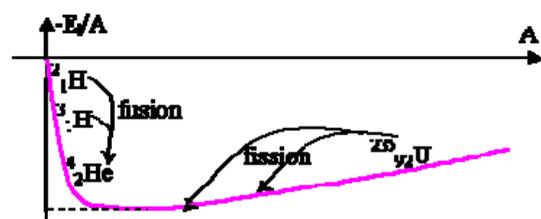
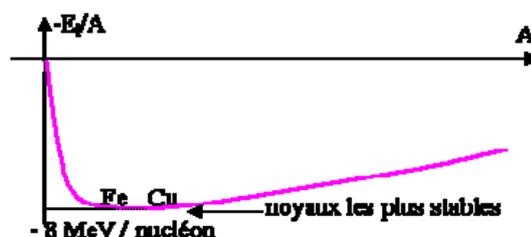
Remarque : E_A permet de comparer la stabilité des noyaux entre eux : plus l'énergie de liaison par nucléon est grande, plus le noyau est stable.

4) Courbe d'Aston

La courbe d'Aston représente $-E_A$ en fonction de A (nombre de nucléons).

Elle permet de visualiser facilement les noyaux les plus stables, ceux-ci se trouvent au bas du graphe comme le noyau de fer

(A entre 40 et 180 environ).



Les noyaux instables peuvent évoluer de 2 façons :

- * Les noyaux lourds peuvent se casser en 2 noyaux légers plus stables : c'est la **fission**.

- * Certains noyaux légers peuvent "fusionner" pour former un noyau plus gros et stable : c'est la **fusion**.

Exemple : données : noyau d'hélium $m_{\text{noyau}} = 6,64649 \times 10^{-27}$ kg. ; noyau ${}^7_3\text{Li}$: $m_{\text{noyau}} = 1,165036 \times 10^{-26}$ kg.
Des deux noyaux ${}^7_3\text{Li}$ et ${}^4_2\text{He}$ lequel est le plus stable ?

III) Fission et fusion nucléaires (voir animations sur l'ENT)

1) Réactions nucléaires provoquées

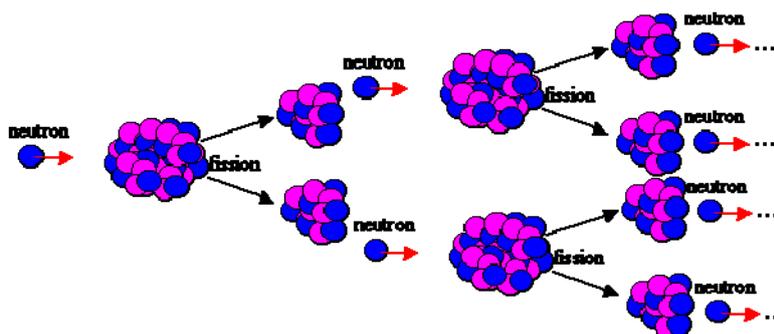
Une réaction nucléaire est dite provoquée lorsqu'un noyau cible est frappé par un noyau projectile et donne naissance à de nouveaux noyaux.

2) La fission nucléaire

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

Ecrire la réaction de fission de l'uranium 235 ${}^{235}_{92}\text{U}$ par bombardement de neutrons qui produit entre autres les noyaux de strontium 94 (${}^{94}_{38}\text{Sr}$) et de xénon 140 (${}^{140}_{54}\text{Xe}$).



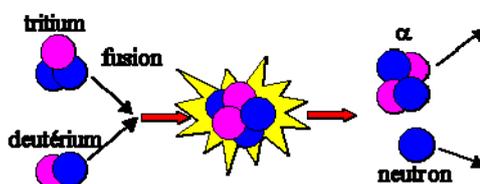
Les neutrons émis lors de la fission peuvent provoquer la fission d'autres noyaux. Si le nombre de neutrons émis lors de chaque fission est supérieur à 1, une réaction en chaîne peut se produire et devenir rapidement incontrôlable (bombes à fission).

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. La France dispose de presque 60 réacteurs nucléaires. La puissance par réacteur est de l'ordre de 1000 MW.

3) La fusion nucléaire

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

Exemple : écrire la réaction de fusion entre le tritium et le deutérium.



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 encore pour pouvoir produire de l'électricité.

IV) Bilan énergétique

1) Cas général

Equation d'une réaction nucléaire : ${}_{Z_1}^{A_1}X_1 + {}_{Z_2}^{A_2}X_2 \rightarrow {}_{Z_3}^{A_3}X_3 + {}_{Z_4}^{A_4}X_4$

Les lois de conservation déjà vues restent vérifiées :

conservation de la charge électrique : $Z_1+Z_2=Z_3+Z_4$ et du nombre de nucléons : $A_1+A_2=A_3+A_4$.

D'après l'équivalence masse-énergie, la variation d'énergie ΔE de la réaction correspond à la variation de masse Δm donc

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = (m_3 + m_4 - m_1 - m_2) \cdot c^2$$

2) Exemple d'une réaction nucléaire spontanée

Désintégration alpha d'un noyau de radium 226 en noyau de radon 222 : ${}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn} + {}_2^4\text{He}$

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

Calculer la variation d'énergie de cette réaction.

Remarques :

* $\Delta E < 0$ car l'énergie de masse diminue. De l'énergie est donc libérée : $E_{\text{libérée}} = +4,937 \text{ MeV}$

3) Exemples de réactions provoquées

a) fission de l'uranium 235 : ${}_0^1\text{n} + {}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow {}_{38}^{94}\text{Sr} + {}_{54}^{140}\text{Xe} + 2 {}_0^1\text{n}$

données : $m({}_{92}^{235}\text{U}) = 234,9935 \text{ u}$; $m({}_{38}^{94}\text{Sr}) = 93,8945 \text{ u}$; $m_{\text{n}} = 1,0087 \text{ u}$; $m({}_{54}^{140}\text{Xe}) = 139,8920 \text{ u}$

Calculer la variation d'énergie de cette réaction.

Remarques :

- la fission d'un noyau d'uranium peut donner d'autres noyaux fils.
- cette énergie est énorme par rapport à l'énergie libérée par la combustion de pétrole :
1 kg d'uranium fournit autant d'énergie que 2 000 tonnes de pétrole.

b) fusion de 2 noyaux d'hélium 3 : ${}_2^3\text{He} + {}_2^3\text{He} \rightarrow {}_2^4\text{He} + 2 {}_1^1\text{p}$

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

Calculer la variation d'énergie de cette réaction.

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

Correction

I-1) variation de masse

$$Q = m_{eau} (T_f - T_i) = \Delta m \cdot c^2$$

$$\Delta m = m_{eau} (T_f - T_i) / c^2 = 1,00 \times 4,18 \cdot 10^3 \times (100 - 0) / (2,99792 \cdot 10^8)^2 = 4,64 \cdot 10^{-12} \text{ kg}$$

$\Delta m > 0$ alors $\Delta E > 0$, le système **reçoit de l'énergie** du milieu extérieur et sa **masse augmente**.

2) Energie de masse

$$E = mc^2 = 1,67 \cdot 10^{-27} \times (2,99792 \cdot 10^8)^2 = 1,85 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 1,85 \cdot 10^{-12} / 1,6022 \cdot 10^{-13} = 11,5 \text{ MeV}$$

II- 1) défaut de masse

${}^4_2\text{He}$: le noyau comporte 2 protons et 2 neutrons.

$$m' = Zm_p + (A - Z)m_n = 2 \times 1,67262 \times 10^{-27} + 2 \times 1,67493 \times 10^{-27} = 6,6951 \times 10^{-27} \text{ kg.}$$

$$m' > m_{noyau} = m.$$

$\Delta m = m' - m$: différence entre la masse des nucléons séparés, au repos, et la masse du noyau naturel, au repos.

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_{noyau}$$

$$\Delta m = 6,6951 \times 10^{-27} - 6,64649 \times 10^{-27} = 4,861 \times 10^{-29} \text{ kg.}$$

2) Energie de liaison :

Il s'agit de l'énergie de liaison E_l qui traduit le supplément de stabilité du noyau par rapport à ses nucléons séparés et au repos.

$$E_l = \Delta m \times c^2 = 4,861 \times 10^{-29} \times (2,9979 \times 10^8)^2 = 43,69 \times 10^{-13} \text{ J} = 27,27 \text{ MeV}$$

$$E_l = \frac{43,69 \times 10^{-13}}{1,602 \times 10^{-19}} = 27,27 \times 10^6 \text{ eV, soit } 27,27 \text{ MeV.}$$

1- stabilité

$$E_l({}^7_3\text{Li}) = [(Zm_p + (A - Z)m_n - m_{noyau})] \times c^2$$

$$= (3 \times 1,67262 \times 10^{-27} + 4 \times 1,67493 \times 10^{-27} - 1,165036 \times 10^{-26}) \times (2,9979 \times 10^8)^2 = 60,41 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$\text{soit : } E_l({}^7_3\text{Li}) = 37,71 \text{ MeV.}$$

$$E_l({}^7_3\text{Li}) > E_l({}^4_2\text{He}).$$

$$\frac{E_l({}^7_3\text{Li})}{A} = \frac{37,71}{7} = 5,387 \text{ MeV}$$

$$\frac{E_l({}^4_2\text{He})}{A} = \frac{27,27}{4} = 6,818 \text{ MeV.}$$

${}^7_3\text{Li}$ est donc moins stable que ${}^4_2\text{He}$.

2) Exemple d'une réaction nucléaire spontanée

Désintégration alpha d'un noyau de radium 226 en noyau de radon 222 : ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$

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

Données : $m({}^{226}_{88}\text{Ra}) = 225,9770 \text{ u}$; $m({}^{222}_{86}\text{Rn}) = 221,9702 \text{ u}$; $m({}^4_2\text{He}) = 4,0015 \text{ u}$ (1 u = 931,5 MeV/c²)

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

Remarques :

* $\Delta E < 0$ car l'énergie de masse diminue. De l'énergie est donc libérée : $E_{libérée} = +4,937 \text{ MeV}$

3) Exemples de réactions provoquées

a) fission de l'uranium 235 : ${}^1_0\text{n} + {}^{235}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{94}_{38}\text{Sr} + {}^{140}_{54}\text{Xe} + 2 {}^1_0\text{n}$

$$m({}^{235}_{92}\text{U}) = 234,9935 \text{ u} ; m({}^{94}_{38}\text{Sr}) = 93,8945 \text{ u} ; m_n = 1,0087 \text{ u} ; m({}^{140}_{54}\text{Xe}) = 139,8920 \text{ u}$$

$$\Delta E = [m({}^{94}_{38}\text{Sr}) + m({}^{140}_{54}\text{Xe}) + 2 \cdot m_n - m({}^{235}_{92}\text{U}) - m_n] \cdot c^2 = (93,8945 + 139,8920 + 1,0087 - 234,9935) \times 931,5 = - 184,7 \text{ MeV}$$

b) fusion de 2 noyaux d'hélium 3 : ${}^3_2\text{He} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2 {}^1_1\text{p}$

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

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

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