

# La radioactivité

## I) L'atome :

### 1) Modèle de l'atome (rappels) :

Un atome est constitué d'un noyau autour duquel gravitent des électrons.

Le noyau est constitué de particules appelées nucléons : neutrons et protons.

### 2) Caractéristiques d'un noyau d'atome :

La représentation symbolique du noyau d'un atome est :  ${}^A_Z X$ , X est le symbole de l'élément chimique.

\* Z est le nombre de protons, appelé numéro atomique et aussi nombre de charge.

\* A est le nombre de nucléons, aussi appelé nombre de masse

\* N = A - Z est le nombre de neutrons .

### 3) Isotopes :

Des noyaux sont appelés isotopes si ils ont le même nombre de protons Z mais un nombre de neutrons N différent ( ou nombre de nucléons A). Exemple :  ${}^{35}_{17}\text{Cl}$  et  ${}^{37}_{17}\text{Cl}$  sont des isotopes du chlore.

## II) Stabilité du noyau atomique :

### 1) Forces agissant dans le noyau : (rappels)

Dans un noyau atomique, il existe des forces électrostatiques répulsives entre les protons, des forces gravitationnelles attractives entre les nucléons et des forces nucléaires attractives d'interaction forte à courte portée ( $10^{-15}\text{m}$ ) entre les nucléons qui assurent la cohésion de certains noyaux.

### 2) Stabilité du noyau :

Sous l'action des différentes forces en présence, certains noyaux sont stables (ils ont une grande durée de vie) et d'autres sont instables (ils se détruisent rapidement).

Parmi les 1500 noyaux connus, seuls 260 sont stables.

## III) Radioactivité (découverte par Henri Becquerel en 1896):

### 1) Définition :

Un noyau radioactif est un noyau instable dont la désintégration (destruction) provoque l'apparition d'un nouveau noyau, l'émission d'une particule notée  $\alpha$ ,  $\beta^-$  ou  $\beta^+$ , et fréquemment l'émission d'un rayonnement électromagnétique noté  $\gamma$ .

La radioactivité est une réaction dite nucléaire car elle concerne le noyau de l'atome par opposition aux réactions chimiques qui ne concernent que le cortège électronique sans modifier le noyau.

### 2) Propriétés de la désintégration :

La désintégration radioactive est aléatoire, on ne peut pas prévoir quand va se produire la désintégration d'un noyau .

Elle est spontanée, elle se produit sans aucune intervention extérieure. Elle ne dépend pas ni de son environnement chimique, de l'espèce chimique qui contient le noyau radioactif ; ni des conditions extérieures ( pression ou température).

### 3) Lois de conservation :

Lois de Soddy : Lors d'une désintégration nucléaire, il y a conservation du nombre de charge Z et du nombre de nucléons A

La désintégration d'un noyau X (appelé noyau père) conduit à un noyau Y (appelé noyau fils) et à l'expulsion d'une particule P (particule  $\alpha$  ou  $\beta$ ).

L'équation de la désintégration s'écrit :  ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A_1}_{Z_1} Y + {}^{A_2}_{Z_2} P$

Les lois de conservation de **Soddy** s'écrivent:

\* Loi de conservation du nombre de masse A :  $A = A_1 + A_2$

\* Loi de conservation du nombre de charges Z :  $Z = Z_1 + Z_2$

### 4) Radioactivité $\alpha$ :

#### a) Définition :

Des noyaux sont dits radioactifs  $\alpha$  s'ils émettent des noyaux d'hélium  ${}^4_2\text{He}$ .

Le noyau de l'atome d'hélium porte deux charges positives. On ne les représente pas.

#### b) Equation de la réaction de désintégration $\alpha$ :

D'après les lois de conservation de **Soddy**, l'équation s'écrit :  ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2\text{He}$

La radioactivité  $\alpha$  concernent les noyaux lourds ( A > 200 )

Ex : L'uranium 238 est un noyau radioactif  $\alpha$  :  ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$  (noyau fils : thorium)

#### c) Caractéristiques de la particule $\alpha$ :

Ces particules sont arrêtées par quelques centimètres d'air ou par une feuille de papier, mais elles sont très ionisantes et donc dangereuses.

### 5) Radioactivité $\beta^-$ :

#### a) Définition :

Des noyaux sont dits radioactifs  $\beta^-$  s'ils émettent des électrons  ${}^0_{-1}\text{e}$ .

#### b) Equation de la réaction de désintégration. :

D'après les lois de conservation de **Soddy** l'équation s'écrit :  ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1}\text{e}$

Exemple : le cobalt 60 est un noyau radioactif  $\beta^-$ .

Son équation de désintégration s'écrit :  ${}^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni} + {}^0_{-1}\text{e}$

Remarque : Il n'y a pas d'électron dans le noyau, mais le noyau peut en émettre en transformant un neutron excédentaire en un électron et un proton suivant le bilan :

${}^1_0\text{n} \rightarrow {}^1_1\text{p} + {}^0_{-1}\text{e}$ , Z augmente d'une unité et N diminue d'une unité, A reste constant.

#### c) Caractéristiques de la particule $\beta^-$ :

Les particules  $\beta^-$  sont assez peu pénétrantes. Elles sont arrêtées par quelques millimètres d'aluminium.

### 6) Radioactivité $\beta^+$ :

#### a) Définition :

Des noyaux sont dits radioactifs  $\beta^+$  s'ils émettent des positons  ${}^0_{+1}e$

Ce sont des particules  $\beta^+$  portant une charge  $+e$ .

#### b) Equation de la désintégration :

D'après les lois de conservation de **Soddy** l'équation s'écrit :  ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + {}^0_{+1}e$

Exemple : le phosphore 30 est un noyau radioactif  $\beta^+$  :  ${}^{30}_{15}P \rightarrow {}^{30}_{14}Si + {}^0_{+1}e$

Remarque : Cette radioactivité ne concerne que des noyaux artificiels, obtenus par des réactions nucléaires, qui possèdent trop de protons. Un proton excédentaire se transforme en un positon et un neutron suivant le bilan :

${}^1_1p \rightarrow {}^1_0n + {}^0_{+1}e$ , N augmente d'une unité et Z diminue d'une unité, A reste constant.

#### c) Caractéristiques de la particule $\beta^+$ :

Ces particules ont une durée de vie très courte car lorsqu'elles rencontrent un électron, les deux particules s'annihilent pour donner de l'énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique  $\gamma$  suivant le bilan :  ${}^0_{-1}e + {}^0_{+1}e \rightarrow \gamma$

#### 5) Désexcitation $\gamma$ :

Le noyau fils est en général obtenu dans un état excité (niveau d'énergie élevé), il est noté  $Y^*$ . Cet état est instable, le noyau se désexcite en évacuant cette énergie excédentaire, en émettant un rayonnement électromagnétique  $\gamma$  (particules très énergétiques appelées photons).

Equation d'une émission  $\gamma$  :  $Y \rightarrow Y + \gamma$

## Loi de décroissance radioactive

### 1) Nombre de désintégrations pendant une durée $\Delta t$ :

On considère un échantillon contenant N noyaux radioactifs (non désintégrés) à un instant t.

Ce nombre est noté  $N_0$  à l'instant  $t_0 = 0s$  pris comme instant initial.

Pendant une durée  $\Delta t$  très brève, un certain nombre de noyaux radioactifs se sont désintégrés.

Soit  $N + \Delta N$  le nombre de noyaux radioactifs non désintégrés à la date  $t + \Delta t$ . ( $\Delta N < 0$  car N diminue)

Le nombre moyen (phénomène aléatoire) de noyaux désintégrés pendant la durée  $\Delta t$  est :

$$N_t - N_{t+\Delta t} = N - (N + \Delta N) = -\Delta N > 0$$

On a donc :  $-\Delta N = \lambda N \cdot \Delta t$  où  $\lambda$  est la constante radioactive, caractéristique d'un radioélément.

$-\Delta N = \lambda N \cdot \Delta t \Rightarrow -\Delta N / N = \lambda \cdot \Delta t$  ;  $\lambda$  s'exprime en  $s^{-1}$ ,  $min^{-1}$ ,  $h^{-1}$ ,  $jour^{-1}$  ou  $an^{-1}$ .

### 2) Décroissance exponentielle :

L'évolution du nombre de noyaux radioactifs présents dans un échantillon au cours du temps est donnée par :

$$-\Delta N / N = \lambda \cdot \Delta t$$

Si  $\Delta t$  tend vers 0, la relation devient  $-dN/N = \lambda \cdot dt$

(en prenant l'intégrale, on obtient  $\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \ln(N/N_0) = -\lambda \cdot t \Rightarrow N / N_0 = e^{-\lambda t}$ )

$$\Rightarrow N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

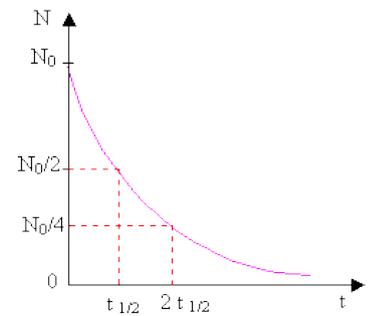
La fonction  $N(t)$  qui vérifie cette propriété est :  $N = N_0 e^{-\lambda t}$

où  $N_0$  est le nombre de noyaux radioactifs à l'instant initial et  $\lambda$  est la constante radioactive.

D'après cette fonction, la durée de désintégration totale est infinie.

N est une fonction décroissante du temps

Plus  $\lambda$  est grande, plus la décroissance de N est rapide



### 3) Demi-vie radioactive :

#### a) Définition :

La demi-vie radioactive, notée  $T$ , d'un échantillon de noyaux radioactifs est égale à la durée

nécessaire pour que, statistiquement, la moitié des noyaux radioactifs présents dans l'échantillon se désintègrent.

$$N(t + T) = N(t) / 2$$

#### b) Calcul de la demi-vie $T$ :

$$N(t + T) = N(t) / 2 \Rightarrow N_0 \cdot e^{-\lambda(t+T)} = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} / 2 \Rightarrow e^{-\lambda \cdot T} = 1/2 \Rightarrow -\lambda \cdot T = \ln 1/2 = -\ln 2 \Rightarrow T = \ln 2 / \lambda$$

### II) Activité radioactive :

#### 1) Définition :

L'activité A radioactive est égale au nombre moyen de désintégrations par seconde.  $A = N_{\text{désint.}} / \Delta t = -\Delta N / \Delta t$  ( $A > 0$ )

Elle s'exprime en becquerels dont le symbole est Bq (1 Bq = 1 désintégration par seconde).

$$A = -\Delta N / \Delta t = \lambda \cdot N = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

L'activité suit la même loi de décroissance exponentielle que N.

#### 2) Dangerosité et effet biologique :

Plus l'activité d'une source est grande, plus elle est dangereuse.

L'action sur les tissus vivants dépend de plusieurs paramètres, du nombre de particules reçues par seconde, qui dépend de l'activité A et de la distance de la source; de l'énergie et de la nature des particules; du fractionnement de la dose reçue et de la nature des tissus touchés.

Cela peut provoquer des réactions chimiques et des modifications de l'ADN.



**III ) Datation :****1) Principe :**

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \Rightarrow A / A_0 = e^{-\lambda \cdot t} \Rightarrow \ln(A/A_0) = -\lambda \cdot t \Rightarrow t = \ln(A_0/A) / \lambda$$

En connaissant un radioélément contenu dans l'objet, on détermine sa constante  $\lambda$

On peut mesurer  $A$ , si l'on connaît l'activité  $A_0$  de l'échantillon, alors on peut connaître la date d'origine  $t$  de l'objet.

**2) Datation au carbone 14**

La proportion de carbone 14 par rapport à l'isotope 12 abondant est de l'ordre de  $10^{-12}$ , elle est à peu près constante car il est régénéré dans l'atmosphère. Il en est de même dans le dioxyde de carbone de l'atmosphère. Or tous les organismes vivants échangent du  $\text{CO}_2$  avec l'atmosphère soit par photosynthèse, soit par l'alimentation. Les tissus fixent l'élément carbone. La proportion de carbone 14 dans les tissus est donc identique à celle de l'atmosphère tant que l'organisme est en vie. A leur mort, la quantité de carbone 14 diminue selon la loi de décroissance radioactive.

$$t_{1/2} (^{14}\text{C}) \approx 5570 \text{ ans}$$

## Masse et énergie. Réactions nucléaires

**I ) Equivalence masse énergie :****1) Relation d'Einstein :** relation d'équivalence masse-énergie

En 1905, en élaborant la théorie de la relativité restreinte, Einstein postule que la masse est une des formes de l'énergie :

Un système au repos, de masse  $m$  possède une énergie de masse :

$$E = m \cdot c^2 \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} E : \text{énergie de masse en joules (J)} \\ m : \text{masse en kilogrammes (kg)} \\ c : \text{vitesse de la lumière dans le vide (} c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \text{)} \end{array}$$

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  $\Delta E$  et sa variation de masse  $\Delta m$  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.

**2) Unités :**

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

$$1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad \text{et aussi le MeV:} \quad 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

Remarque : A cette échelle, l'unité kg est aussi inadaptée, on utilise parfois l'unité de masse atomique notée  $u$ .

Elle est égale au douzième de la masse d'un atome de carbone  $^{12}_6\text{C}$ .

$$1 u = M(^{12}_6\text{C}) / (12 N_A) = 12,0 \cdot 10^{-3} / (12 \times 6,02 \cdot 10^{23}) = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

**II ) Energie de liaison du noyau :****1) Défaut de masse du noyau :**

On a constaté en mesurant les masses que la masse du noyau atomique est inférieure à la somme des masses des

protons  $m_p$  et des neutrons  $m_n$  qui le constituent :  $m_{\text{noyau}} < Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n$

Cette différence est appelée défaut de masse  $\Delta m$  :  $\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m_{\text{noyau}} \quad (\Delta m > 0)$

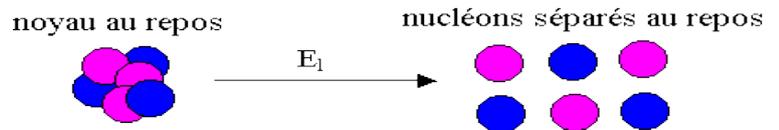
Exemple: Calculer  $\Delta m$  pour un noyau d'hélium :

$$\text{données: } m_n = 1,67496 \cdot 10^{-27} \text{ kg}, m_p = 1,67265 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad \text{et } m(^4_2\text{He}) = 6,6447 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\Delta m = 2 \cdot m_p + 2 \cdot m_n - m(^4_2\text{He}) = (2 \times 1,67265 + 2 \times 1,67496 - 6,6447) \cdot 10^{-27} = 5,05 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$$

**2) Energie de liaison du noyau :**

Définition: On appelle énergie de liaison d'un noyau, notée  $E_l$ , 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  $\Delta m$  et l'énergie de  $\Delta m \cdot c^2$ .



L'énergie de liaison d'un noyau a pour expression :

$$E_l = \Delta m \cdot c^2 \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} E_l : \text{énergie de liaison du noyau (en J) à convertir en MeV} \\ \Delta m : \text{défaut de masse du noyau (en kg)} \\ c : \text{célérité de la lumière dans le vide (en m} \cdot \text{s}^{-1} \text{)} \end{array}$$

Pour un noyau d'hélium :  $E_l = \Delta m \cdot c^2 = 5,05 \cdot 10^{-29} \times (3,0 \cdot 10^8)^2 = 4,54 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 28,4 \text{ MeV}$

Remarque: Inversement, lorsque le noyau se forme à partir de ses nucléons libres, le milieu extérieur reçoit l'énergie

$$E = |\Delta m| \cdot c^2 \quad (\text{la masse du système diminue et } \Delta m < 0)$$

**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.

$$E_A = E_l / A \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} E_A : \text{énergie de liaison par nucléon (en MeV/nucléon)} \\ E_l : \text{énergie de liaison du noyau (en MeV)} \\ A : \text{nombre de nucléons du noyau} \end{array}$$

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.

Les noyaux instables peuvent évoluer de 2 façons :

\* Les noyaux lourds peuvent se casser en 2 noyaux légers appartenant au domaine de stabilité. C'est la fission.

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

### III ) Fission et fusion nucléaires :

#### 1) Réactions nucléaires provoquées :

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

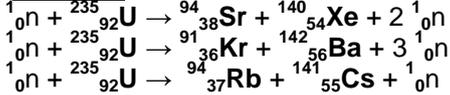
Les lois de conservation de Soddy sont vérifiées.

**Exemple :** Expérience de Rutherford en 1919 : le bombardement de noyaux d'azote avec des particules  $\alpha$  provoque la formation de noyaux d'oxygène et de protons.

#### 2) La fission nucléaire: réaction en chaîne :

**Définition:** 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:

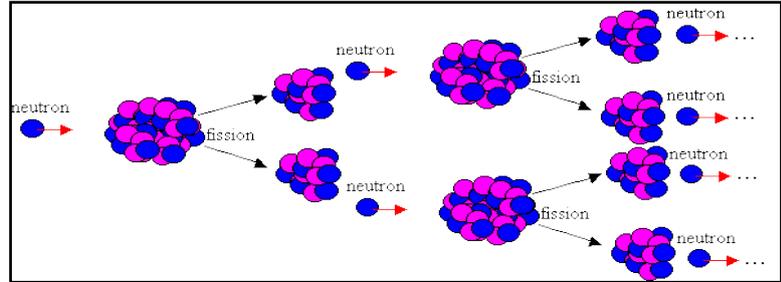


Les neutrons émis lors de la fission peuvent provoquer la fission d'autres noyaux. Si le nombre de neutrons émis lors de chaque fission est supérieur à 1, une réaction en chaîne peut se produire et devenir rapidement incontrôlable (bombe à fission : bombe "A" d'Hiroshima).

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.

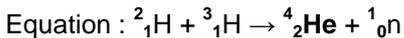
Pour amorcer une fission, il faut apporter une quantité minimale d'énergie au système.



#### 3) La fusion nucléaire :

**Définition:**

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

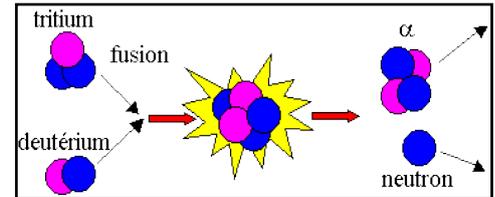


L'énergie libérée au cours d'une fusion est considérable.

La fusion n'est possible que si les deux noyaux possèdent une grande énergie cinétique pour vaincre les forces de répulsion électriques.

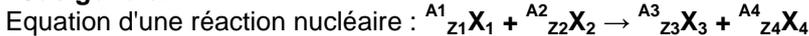
La fusion se produit naturellement dans les étoiles. Dans une bombe thermonucléaire (appelée bombe H), la fusion nucléaire est incontrôlée et explosive

Elle est très intéressante pour produire de l'énergie, mais on ne la maîtrise pas suffisamment pour produire de l'électricité



### IV ) Bilan énergétique :

#### 1) Cas général :



D'après l'équivalence masse-énergie, la variation d'énergie  $\Delta E$  de la réaction correspond à la variation de masse  $\Delta m$  :

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

$$\Delta E = E_{11} + E_{12} - (E_{13} + E_{14}) \quad (\text{voir définition de } E_i)$$

#### 2) Réactions nucléaires spontanées :



$$\text{Energie fournie au milieu extérieur : } \Delta E = [m({}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}) + m({}^4_2\text{He}) - m({}^A_Z\text{X})] \cdot c^2$$



#### 3) Réactions de fission et de fusion provoquées :

Pour la fission, étudions la réaction utilisée par une centrale nucléaire : la fission de l'uranium 235.



remarque : La fission d'un noyau d'uranium peut donner d'autres noyaux fils.

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

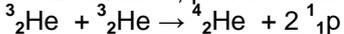
$$\Delta E = [m({}^{94}_{38}\text{Sr}) + m({}^{140}_{54}\text{Xe}) + 2 \cdot m_n - m({}^{235}_{92}\text{U}) - m_n] \cdot c^2 \quad (\Delta m = -0,1983 \text{ u})$$

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

Cette énergie est énorme par rapport à la combustion de pétrole .

1 kg d'uranium fournit autant d'énergie que 2 000 Tonnes de pétrole.

Pour la fusion, prenons l'exemple de la fusion de 2 noyaux d'hélium 3



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

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

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

