

CHAPITRE II : LA RADIOACTIVITE :

II.1 : INTRODUCTION

Découvert en 1896 par HENRI BECQUEREL sur l'aluminium, confirmée par MARIE CURIE pour le THORIUM.

La radioactivité est un phénomène lié à la désintégration spontanée et aléatoire des noyaux atomiques, ce qu'on appelle les **radionucléides**. La radioactivité est un phénomène physique naturel au cours duquel des noyaux instables (radionucléides) se désintègrent en dégageant de l'énergie sous forme de rayonnement ionisants divers (α , β et γ) pour se transformer en noyaux atomiques plus stables ayant perdu une partie de leur masse.

On distingue deux types de radioactivités :

- Radioactivité naturelle.
- Radioactivité artificielle.

II.2 : RADIOACTIVITE NATURELLE :

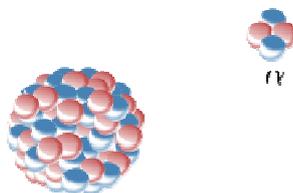
On parle de **radioactivité naturelle** pour designer la radioactivité due à des sources non produites par les activités humaines. Elle provient principalement :

- Des rayons cosmiques (espace, soleil....).
- Des substances radioactives présentes dans le sol terrestre (U^{238} ...) ou dans l'air (radon).
- D'éléments radioactifs composant les organes vivants (carbone...).

Cette activité peut prendre trois formes distinctes :

II.2.a : Radioactivité ou particules α (${}^4_2\text{He}^{++}$)

La **radioactivité alpha** (ou rayonnement alpha, symbolisé α) est une forme de désintégration radioactive où un noyau atomique X éjecte une particule alpha et se transforme en un noyau Y de nombre de masse A diminué de 4 et de numéro atomique Z diminué de 2 :

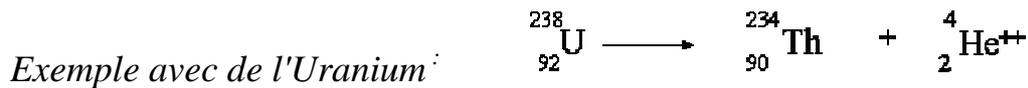
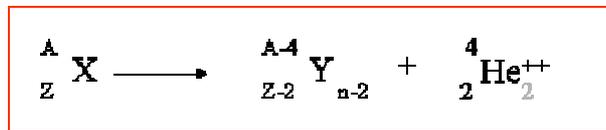


Emission d'une particule Alpha

La désintégration alpha peut être vue comme une forme de fission nucléaire où le noyau père se scinde en deux noyaux fils dont l'un est un noyau d'hélium (rayons alpha), édifice particulièrement stable constitué de 2 protons et de 2 neutrons, appelé particule α .

En fait, des mesures précises montrent que la masse totale du noyau fils et de la particule alpha est légèrement inférieure à la masse du noyau père : cela vient du fait qu'une partie de la masse est convertie (selon la célèbre formule d'Einstein $E = mc^2$) en énergie cinétique permettant l'expulsion du noyau d'hélium :

Cette désintégration peut s'écrire en utilisant une équation-bilan qui respecte les quatre règles de conservation.



Où : A représente le nombre de masse, Z le numéro atomique.

En effet la particule alpha est un noyau d'hélium et la désintégration conserve bien le nombre total de nucléons et la charge électrique totale.

La masse d'une particule alpha est $m_\alpha = 6,644656 \times 10^{-27}$ kg, ce qui équivaut à une énergie $E_\alpha = 3,72738$ GeV.

Application .

Calculer l'énergie libérée lors de la radioactivité α $\begin{matrix} 230 \\ 90 \end{matrix} Th \rightarrow \begin{matrix} 4 \\ 2 \end{matrix} H + \begin{matrix} 226 \\ 88 \end{matrix} X$

Données : $m_{Th} = 230.1047$ g
 $m_{He} = 4.0033$ g
 $m_X = 226.0957$ g

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 \quad \text{avec : } \Delta m = (m_{He} + m_X) - m_{th} \Leftrightarrow$$

$$\Delta m = (4.0033 + 226.0957) - 230.1047 = -5.1 \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta E = -5.1 \cdot 10^{-6} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = -4.59 \cdot 10^{11} \text{ joules} \quad (\text{énergie libérée par une mole de noyaux Th}).$$

L'énergie libérée par un atome de Th est :

$$\Delta E' = \frac{\Delta E}{Na} = \frac{4.59 \cdot 10^{11}}{6.02 \cdot 10^{23}} = 7.6 \cdot 10^{-13} \text{ joules}$$

$$\text{Soit : } \Delta E' = \frac{7.6 \cdot 10^{-13}}{1.6 \cdot 10^{-13}} = 4.7 \text{ M\text{e}v}$$

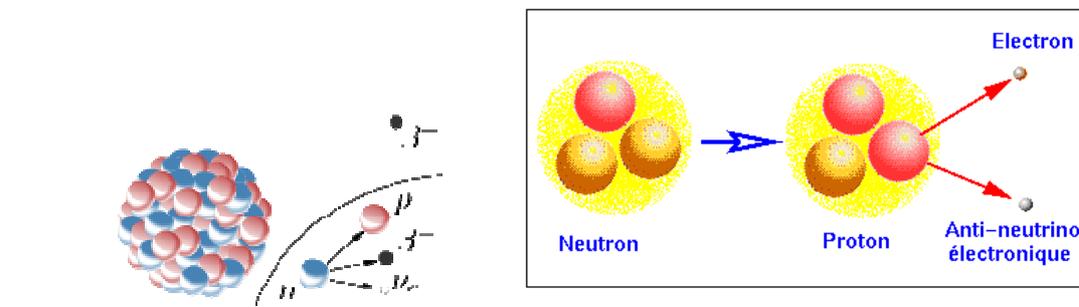
Remarque :

Les particules α^{++} (${}^4_2\text{He}^{++}$) sont relativement lourdes et chargée deux fois positivement, elles interagissent fortement avec la matière et sont donc particulièrement dangereuses pour le corps humain, toutefois leur pouvoir pénétrant est très faible (stoppées par quelques cm dans l'air ou au niveau de la surface de la peau).

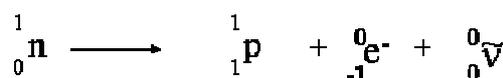
II.2.b : Radioactivité ou particules β

La **radioactivité bêta** ou **émission bêta** (symbole β) est un type de désintégration radioactive dans laquelle une **particule bêta** (un **électron** ou un **positron**) est émise. On parle de désintégration bêta moins (β^-) (basse énergie) ou bêta plus (β^+) (haute énergie) selon que c'est un électron (particule chargée négativement) ou un positron (particule chargée positivement) qui est émis.

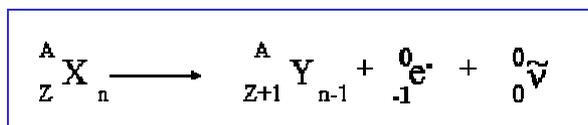
Désintégration β^- (électron e^-)



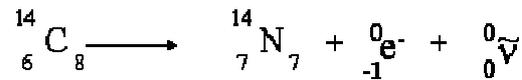
Un **neutron** est converti en **proton** par l'intermédiaire de la **force nucléaire faible** et une particule β^- (un **électron**) et un **anti-neutrino** sont émis :



La désintégration β^- a comme équation-bilan :



En guise d'exemple, le cas du carbone 14 (^{14}C) :



Remarque :

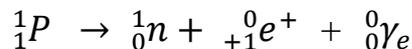
La réaction est énergétiquement possible à la seule condition que le noyau atomique fils soit moins lourd que le noyau père.

La radioactivité bêta moins (β^-) affecte les nucléides X présentant un excès de neutrons.

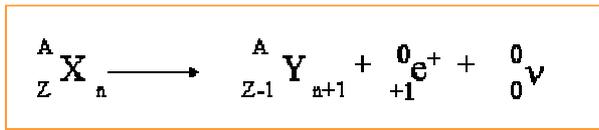
Ces particules (électrons ou β^-) sont chargées négativement et interagissent donc fortement avec la matière. De plus, leur masse étant plus faible, leur pouvoir de pénétration est plus élevé que pour les particules alpha. Ainsi ces particules peuvent atteindre des cellules non épidermiques. (risque de cancer).

Désintégration β^+ (positron e^+)

Un proton est converti en neutron par l'intermédiaire de la force nucléaire faible et une particule β^+ (un positron e^+) et un neutrino ν_e sont émis:



Lorsqu'un noyau est trop riche en protons, un type de radioactivité particulier est observé, il s'agit de la radioactivité β^+ . Son équation bilan est :



Un exemple avec un atome de carbone 11 : ${}^{11}_6\text{C} \rightarrow {}^{11}_5\text{B} + {}^0_{+1}\text{e}^+ + {}^0_0\nu$

Remarque :

- Cette réaction ne peut avoir lieu que si la masse du noyau fils additionnée de deux fois la masse de l'électron est inférieure à celle du noyau père.
- La radioactivité bêta plus (β^+) ne concerne que des nucléides qui présentent un excès de protons

bilan énergétique

Différence entre l'énergie initiale et l'énergie finale.

$$\Delta E = (m(X) - m(Y) - m_e - m_\nu)C^2$$

où $m_e c^2$ est négligeable, puisque de l'ordre de quelques eV

$$\Delta E = (m(X) - m(Y) - m_e)C^2$$

Soient m et M respectivement les masses du noyau et de l'atome :

$$\Delta E = [M_{(X)} - Zm_{(e^-)}] C^2 - [M_{(Y)} - (Z - 1)m_{(e^-)}] \cdot C^2 - m_{(e^+)} \cdot C^2,$$

$$\Delta E = [M_{(X)} \cdot C^2 - Zm_{(e^-)} \cdot C^2] - [M_{(Y)} \cdot C^2 + (Z - 1)m_{(e^-)} \cdot C^2] - m_{(e^+)} \cdot C^2,$$

avec : $M_{(X)}C^2$ et $M_{(Y)}C^2$ les énergies des atomes X et Y

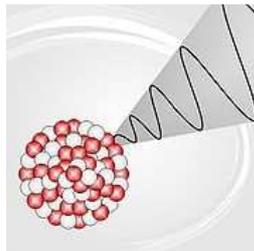
$Z m_e C^2$ énergie des électrons de l'atome X

$(Z - 1)m_e C^2$ énergie des électrons de l'atome Y

$$\Delta E = (M_{(X)} - M_{(Y)} - 2m_e)C^2 = \Delta E_{\beta^+}$$

La réaction n'est donc possible que si $Q > 0$ c'est-à-dire que si $(M_{(X)} - M_{(Y)})C^2 > 2m_e C^2 = 1.022 \text{ Mev}$

II.2.c : Radioactivité ou rayonnement γ (Pénétration jusqu'à 7 à 8 mètres dans le béton)



Mise en évidence en 1900 par le physicien français PAUL VILLARD.

La radioactivité gamma se traduit par l'émission d'une onde électromagnétique à haute énergie (au delà de 100 eV) (photons) sans qu'il ai émission de particules comme c'est le cas pour la radioactivité α et β .

Il n'ya ni changement de nombre de masse A ni le numéro atomique Z

On parle souvent de désexcitation du noyau



II.2.d : Période ou demi-vie d'un élément radioactif.

Soit une quantité d'un certain *élément radioactif* ou *nucléide radioactif* caractérisé par sa constante de désintégration λ . On utilise habituellement une autre caractéristique qui s'appelle **période ou demi-vie** du nucléide radioactif.

On entend par *période ou demi-vie*, notée $t_{1/2}$, le temps écoulé pour que la moitié des noyaux initialement présents se soient désintégrés.

Soit $N(t)$ nombre de radionucléides à l'instant t . le nombre total de désintégration (dN) pendant l'intervalle de temps dt est proportionnelle au nombre de radionucléides de même espèce N présents et à la durée dt de cet intervalle

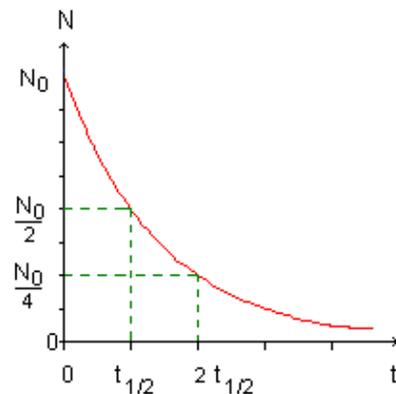
$$\text{Soit : } dN \sim N \text{ et } dN \sim dt \rightarrow dN = -\lambda N dt \quad \text{ou} \quad \frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

Le signe $-$ vient de ce que N diminue au cours du temps de sorte que la constante K soit positive.

En intégrant l'équation différentielle ci-dessus $\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$ on obtient : $\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda \cdot t$

$$\rightarrow \frac{N}{N_0} = e^{-\lambda \cdot t} \quad \text{Ou : } \boxed{N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}} \quad \text{loi de décroissance radioactive.}$$

Le nombre N de noyaux radioactifs décroît exponentiellement avec le temps



Demi-vie ou période.

Si $N = \frac{N_0}{2}$ alors $t = t_{1/2}$ (définition de la période)
 $\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$ Donne : $\ln \frac{N_0}{2 N_0} = -\lambda t_{1/2} \rightarrow \ln \frac{1}{2} = -\lambda t_{1/2} \rightarrow$

$$\ln \frac{2}{1} = \lambda t_{1/2} \quad \text{Ou} \quad \boxed{\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{t_{1/2}}}$$

Quelques valeurs de périodes.

| Nucléides | Radioactivité | Période |
|--------------------|------------------|------------------------------|
| ^{14}C | β^- | $5.7 \cdot 10^3 \text{ ans}$ |
| ^{40}K | β^- | $1.3 \cdot 10^3 \text{ ans}$ |
| ^{126}Ra | α, γ | $1.6 \cdot 10^3 \text{ ans}$ |
| ^{235}U | α, γ | $7.1 \cdot 10^8 \text{ ans}$ |
| $^{13}\text{N}^*$ | β^+ | 9.9 mn |
| $^{28}\text{Al}^*$ | β, γ | 2.3 mn |

Indice * : nucléides radioactifs artificiels

II.2.e : L'activité radioactive (vitesse de désintégration).

C'est le nombre de désintégration radioactive par unité de temps. $A = -\frac{dN}{dt}$

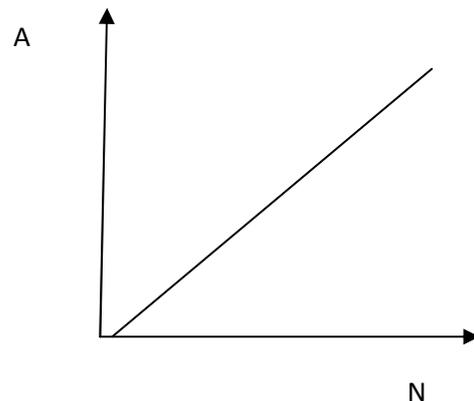
Or, $dN = -\lambda N dt \rightarrow \frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N \rightarrow A = -(-\lambda \cdot N) \quad \text{ou} \quad A = \lambda \cdot N$

C.à.d. : $A(t) = \lambda \cdot N(t)$

La fonction $A = \lambda \cdot N$ est une loi linéaire.

A partir de l'expression $N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$ On peut également démontrer que :

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$



Démonstration :

En dérivant, $N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$ on obtient : $\frac{dN}{dt} = N_0(-\lambda)e^{-\lambda t} = -\lambda N_0 e^{-\lambda t}$

Or, $A = -\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda t}$

On posant $A_0 = \lambda \cdot N_0$; on obtient : $A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$

Unité de l'activité radioactive.

Becquerel (Bq) = 1 désintégration /seconde (d.p.s)

Ou : Curies : avec (C1) = 37 GBq = 37 10⁹ désintégration par seconde

Dans le corps humain, 6600 atomes se désintègrent en moyenne chaque seconde pour un individu de 70 kg. On dit alors que le corps humain est une source radioactive d'activité 6600 becquerels (cette radioactivité est due à un isotope de potassium présent dans le corps humain).

II.3 : La radioactivité artificielle :

Certain éléments radioactifs (ou radio-isotopes) sont naturellement présents dans la nature (carbone, potassium, uranium...). Cependant, il est aussi possible de créer artificiellement des éléments radioactifs qui ne se trouvent pas dans la nature, c'est *la radioactivité artificielle*.

Pour cela, il faut bombarder des atomes naturels avec des protons, neutrons ou des particules α ou β . De cette manière, les atomes de départ sont modifiés.

Pour qu'un tel bombardement soit efficace, il faut utiliser les projectiles ayant une énergie cinétique suffisante que l'on communique à la particule à l'aide d'un accélérateur de particules.

Ces radioactivités nucléaires artificielles se subdivisent en 3 groupes :

- Les transmutations
 - Les réactions de fission
 - Les réactions de fusion
- } dépendent de la nature du noyau bombardé (cible),
de la nature et de l'énergie du projectile.

II.3.1 : Transmutation nucléaires.

La transmutation est la transformation d'un élément chimique en un autre par une modification du noyau atomique de l'élément.

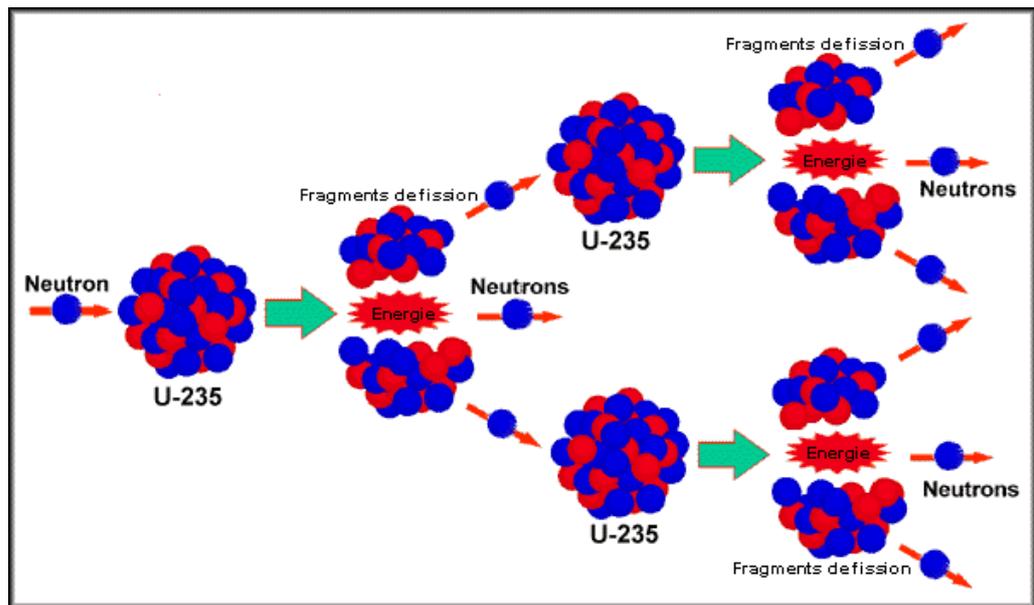
Ces réactions produisent des nucléides de nombre de masse égal ou très voisin de celui du nucléide qui a servi de cible. Les nucléides formés sont stables ou radioactifs.

Exemples.

| Réactions | Notation abrégée |
|---|--|
| ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$ | ${}^{14}\text{N}(\alpha, p){}^{17}\text{O}$ |
| ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{30}_{15}\text{P} + {}^1_0\text{n}$ | ${}^{27}\text{Al}(\alpha, n){}^{30}\text{P}$ |
| ${}^6_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H}$ | ${}^6\text{Li}(d, p){}^7\text{Li}$ |
| ${}^{23}_{11}\text{Na} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{23}_{12}\text{Mg} + {}^1_0\text{n}$ | ${}^{23}\text{Na}(p, n){}^{23}\text{Mg}$ |

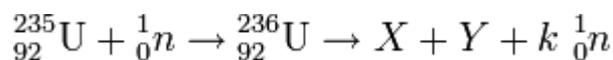
II.3.2 : Réaction de fission

La *fission* est une réaction nucléaire au cours de laquelle un noyau atomique lourd (noyau qui contient beaucoup de *nucléons*, tels les noyaux d'*uranium* et de *plutonium*) se scinde en deux fragments, noyaux de masses inférieures, en produisant de l'énergie, du rayonnement* et quelques neutrons*. Les noyaux résultant de la fission (les fragments de fission) sont instables et se désintègrent par radioactivité β au bout d'un temps variable compris entre la seconde et plusieurs millions d'années



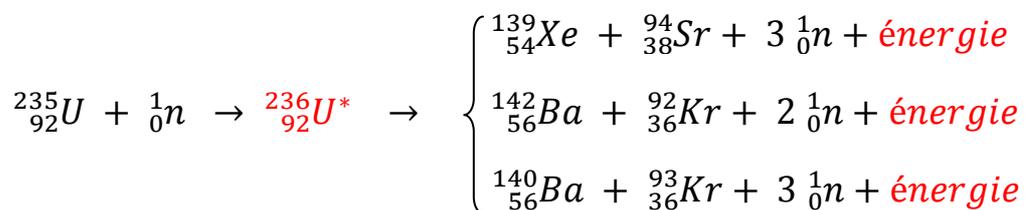
L'énergie libérée correspond à la différence de masse entre les noyaux initiaux et les noyaux obtenus.

La réaction de fission de l'uranium 235 ($^{235}_{92}\text{U}$) s'écrit :



X et Y étant deux noyaux moyennement lourds et généralement radioactifs : on les appelle des **produits de fission** ou **noyaux fissiles**.

Exemples de quelques réactions de fission de l'uranium 235 ($^{235}_{92}\text{U}$)



Calcul de l'énergie libérée par la fission d'un noyau de l'uranium 235 ($^{235}_{92}\text{U}$)

Prenons comme exemple la première équation.

On donne : $m_n = 1,0087 \text{ uma}$ $m^{235}_{92}\text{U} = 235,0134 \text{ uma}$ $m^{98}_{38}\text{Sr} = 93,8946 \text{ uma}$

$m^{139}_{54}\text{Xe} = 138,882 \text{ uma}$ Avec : $1 \text{ uma} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Calculons Δm . $\Delta m = (m_{\text{Sr}} + m_{\text{Xe}} + 3 m_n) - (m_{\text{U235}} + m_n)$

$\Delta m = (93,8946 + 138,882 + 3 \cdot 1,0087) - (235,0134 + 1,0087) = -0,21320 \text{ uma}$

Soit : $\Delta m = -3,54 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$

D'où $E = \Delta m \cdot c^2 = -3,54 \cdot 10^{-28} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = -3,18 \cdot 10^{-11} \text{ j}$

$E = -3,18 \cdot 10^{-11} \text{ j}$ Energie libérée par la fission d'un noyau d'uranium 235

1 noyau d'uranium pèse $3,90 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$ soit, dans 1 kg, il y'a $2,56 \cdot 10^{24}$ noyaux d'uranium.

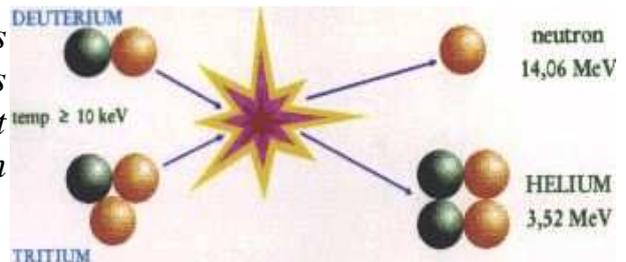
Donc, l'énergie libérée par la fission de 1 kg d'uranium 235 est :

$E = 2,56 \cdot 10^{24} \cdot 3,18 \cdot 10^{-11} = 8,14 \cdot 10^{13} \text{ j}$

$E = 8,14 \cdot 10^{13} \text{ j}$ énergie libérée par la fission de 1 kg d'uranium 235

II.3.3 : Fusion nucléaire.

C'est une réaction thermonucléaire dans laquelle Deux noyaux atomiques légers s'unissent à de très Hautes température et pression pour former un noyau d'un atome plus lourd.



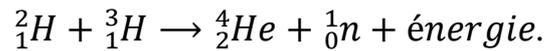
Cette réaction libère une énorme quantité d'énergie.

Plusieurs réactions sont possibles mais elles ne sont pas toutes aussi faciles à réaliser.

- 1- $^2_1\text{H} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^3_2\text{He} + ^1_0\text{n} + E$
- 2- $^2_1\text{H} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^3_1\text{H} + ^1_1\text{H} + E$
- 3- $^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^1_0\text{n} + E$
- 4- $^2_1\text{H} + ^3_2\text{He} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^4_2\text{He} + E$

Les réactions (1) et (2) sont aussi possibles mais la réaction (3) est 100 fois plus fréquente au dessus d'un certain seuil de température dans un plasma.

Celle que l'homme tente actuellement de maîtriser et qui est plus facile à produire sur terre, est celle entre les isotopes d'hydrogène le deutérium ${}^2_1\text{H}$ et le tritium ${}^3_1\text{H}$ c'est-à-dire la réaction n°(3).



Calcul de l'énergie dégagée par la réaction de fusion ci-dessus.

$$\Delta E = \Delta m \cdot C^2 \quad \text{Avec : } \Delta m = (m({}^4_2\text{He}) + m({}^1_0\text{n})) - (m({}^2_1\text{H}) + m({}^3_1\text{H}))$$

$$\Delta m = (4,00260211 + 1,0087) - (2,0135532 + 3,0160492)$$

$$\Delta m = -0,0183 \text{ uma} = -0,030378 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

D'où une énergie libérée : $\Delta E = 0,030378 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2$

$$\Delta E = 0,2734 \cdot 10^{-11} \text{ joules}$$

La réaction de fusion ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ fournit donc une énergie égale à **$0,2734 \cdot 10^{-11}$** joules/atome d'He ou **17,1** MeV/atome d'He formé.

$$\text{Soit environ } \frac{17,1}{4} \approx 4,3 \text{ MeV/u.m.a}$$

Remarque :

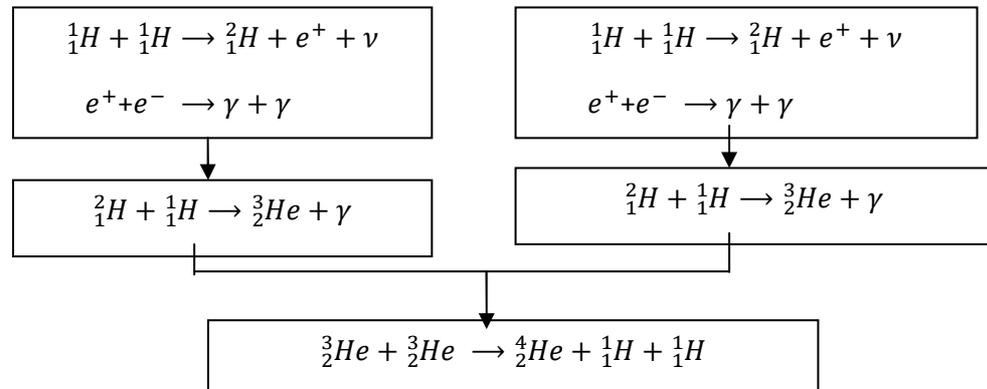
La réaction de fission ${}^{139}_{54}\text{Xe} + {}^{94}_{38}\text{Sr} + 3 {}^1_0\text{n}$ libère une énergie égale à $3,18 \cdot 10^{-11}$ joules/atome d' ${}^{235}_{92}\text{U}$ ou $8,14 \cdot 10^{13}$ joules/kg d' ${}^{235}_{92}\text{U}$

$$\text{Soit environ : } 0,845 \text{ MeV/u.m.a}$$

Ainsi, l'énergie libérée par la réaction de fusion est environ 5 fois supérieure à celle libérée par la réaction de fission.

Exemple : Réaction de fusion dans le soleil.

La réaction de fusion dans le soleil est un processus en plusieurs étapes dans lequel, l'hydrogène est brûlé pour donner de l'hélium comme le montre la figure .



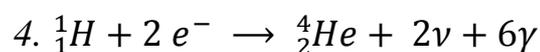
Le cycle commence par la collision de 2 protons (${}^1\text{H} + {}^1\text{H}$) pour former un deutéron ${}^2\text{H}$, avec la création simultanée d'un positron (e^+) et d'un neutrino (ν)

Le positron (e^+) rencontre très rapidement un électron libre (e^-) et les deux particules s'annihilent. L'énergie de leur masse se manifestant sous la forme de 2 photons gamma (γ).

Dès que le deutéron a été produit, il collisionne rapidement un autre proton et forme un noyau ${}^3\text{He}$ et un photon γ .

Deux de ces noyaux ${}^3\text{He}$ peuvent se rencontrer comme la ligne du bas le montre. A la fin, cela conduit à la combinaison de 4 protons et 2 électrons pour former une particule alpha (α , ${}^4\text{He}$). 2 neutrinos et 6 photons γ .

Ainsi, l'équation finale est :



L'énergie libérée dans cette réaction est :

$$\Delta E = \Delta m. C^2 = [4.(1.007285) - 4.002603].932 = 24,48 \text{ MeV.}$$

On a supposé que les masses de l'électron et du neutrino négligeables.

Fin du chapitre