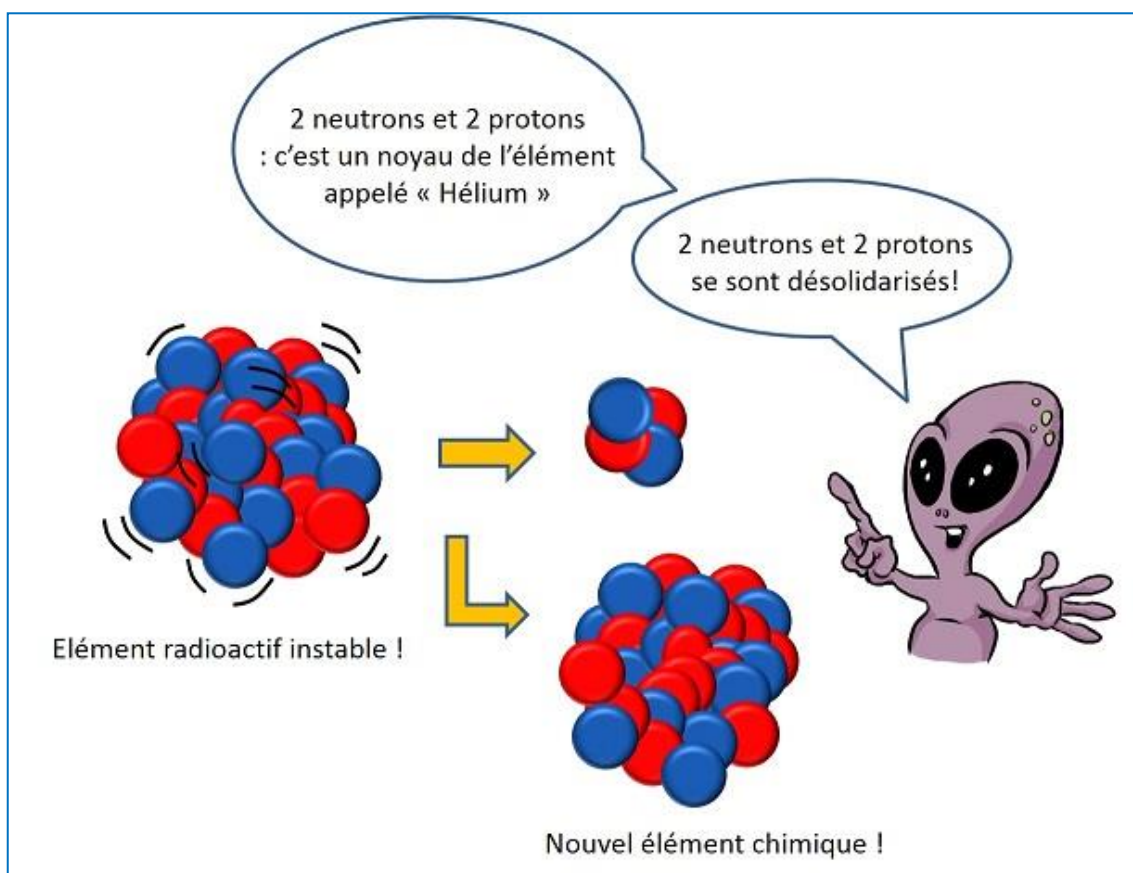


Chapitre II : La radioactivité



Dr : ZAABAT. N

1ère année LMD. SNV

Année universitaire : 2024-2025

Chapitre II : La radioactivité

1-Définition

La radioactivité est le phénomène physique par lequel les noyaux instables se transforment en noyaux atomiques plus stables en émettant de l'énergie sous forme de rayonnements. Ces rayonnements peuvent être de trois types principaux (α , β et γ).

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.

La radioactivité a été découverte par Henri Becquerel en 1896, et ses propriétés ont ensuite été étudiées en profondeur par Marie et Pierre Curie. Ce phénomène est à la base de nombreux processus en physique, chimie, médecine (radiothérapie, imagerie médicale) et dans l'industrie nucléaire.

2- Défaut de masse, Energie de liaison, Energie de liaison par nucléon :

a- Défaut de masse

Le défaut de masse est défini comme étant la différence entre la somme des masses des nucléons (protons et neutrons) qui constituent un noyau atomique et la masse réelle de ce noyau. Il est noté Δm .

Exemple :

Soit la réaction (la formation d'un noyau d'hélium par l'association de 2 protons et 2 neutrons) suivante :



La masse expérimentale (mesurée) d'Hélium : **$m_{\text{He}(\text{exp})} = 4,002 \text{uma}$**

La masse d'un proton (m_p) = 1,0073uma ; la masse d'un neutron (m_n) = 1,0087uma

Le calcul de la masse d'un noyau d'hélium (He) formé par l'association de 2 protons et 2 neutrons (masse théorique) :

La masse du noyau formé = 2 x masse d'un proton + 2x masse d'un neutron

La masse du noyau formé = 2x 1,0073 + 2x 1,0087

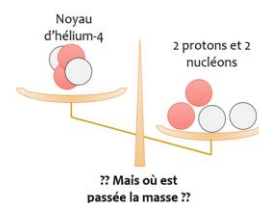
La masse du noyau formé (masse théorique) = **$4,0318864 \text{uma} = m_{\text{He}}(\text{théo})$**

$$\Delta m = m_{\text{He}}(\text{Théo}) - m_{\text{He}(\text{exp})} = 4,0318 - 4,0015 = \mathbf{0,0303 \text{ uma}}$$

La masse calculée à partir des nucléons du noyau > masse expérimentale du noyau

La réaction nucléaire s'accompagne d'une perte de masse Δm appelée défaut de masse qui se transforme en énergie.

$$\Delta m = m_{(\text{Théo})} - m_{(\text{exp})} = [Zx m_p + (A-Z) m_N] - m_{\text{noya}}$$



Z : le nombre de protons

m_p ; la masse d'un proton

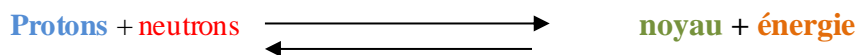
A : le nombre de nucléons (protons + neutrons)

m_N : la masse d'un neutron

m_{noyau} : la masse expérimentale du noyau atomique

b- Energie de liaison

C'est l'énergie libérée lors de la formation d'un noyau à partir de protons et de neutrons. selon la célèbre équation d'Einstein l'énergie de liaison $\Delta E = \Delta m \cdot C^2$



$$\Delta m = m_{(\text{Théo})} - m_{(\text{exp})} = [Zx m_p + (A-Z) m_N] - m_{\text{noyau}}$$

$$\Rightarrow \Delta E = \Delta ([Zx m_p + (A-Z) m_N] - m_{\text{noyau}}) \cdot C^2$$

C = Célérité ou vitesse de la lumière = $3 \cdot 10^8$ m/s

Δm : défaut de masse exprimé en Kg

ΔE : énergie de liaison exprimée en joule

L'unité de l'énergie :

L'énergie d'une réaction nucléaire est exprimée par le joule (J) ou l'électron volt (ev) ou Mev (Méga électron volt).

$$1\text{ev} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}, \quad 1\text{Mev} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}; \quad 1\text{Gev} = 1,6 \cdot 10^{-10} \text{ J}$$

Gev=Géga électron volt

Exemple : Si $\Delta m = 1 \text{ uma}$, calculer l'énergie de liaison en Mev

$$1 \text{ uma} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$$

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2$$

$$= 14,94 \cdot 10^{-11} \text{ J}$$

$$\left. \begin{array}{l} 1\text{ev} \longrightarrow 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \\ ? \longrightarrow 14,94 \cdot 10^{-11} \end{array} \right\}$$

$$\Delta E = 931 \cdot 10^6 \text{ ev} = 931 \text{ Mev}$$

Donc : **1uma=931 Mev**

Pour calculer l'énergie en Mev, il suffit de multiplier Δm (uma) par 931

$$\Delta E = \Delta m \times 931.$$

c-L'énergie de liaison par nucléon : E_N

Cette énergie est définie comme étant le rapport de l'énergie de liaison par le nombre de nucléons A (nombre massique). Plus l'énergie de liaison par nucléon est élevée, plus le noyau est stable.

$$E_N = \frac{\Delta E}{A}$$

} ΔE : énergie de liaison en Mev
A : nombre massique

L'unité de E_N : Mev / nucléon

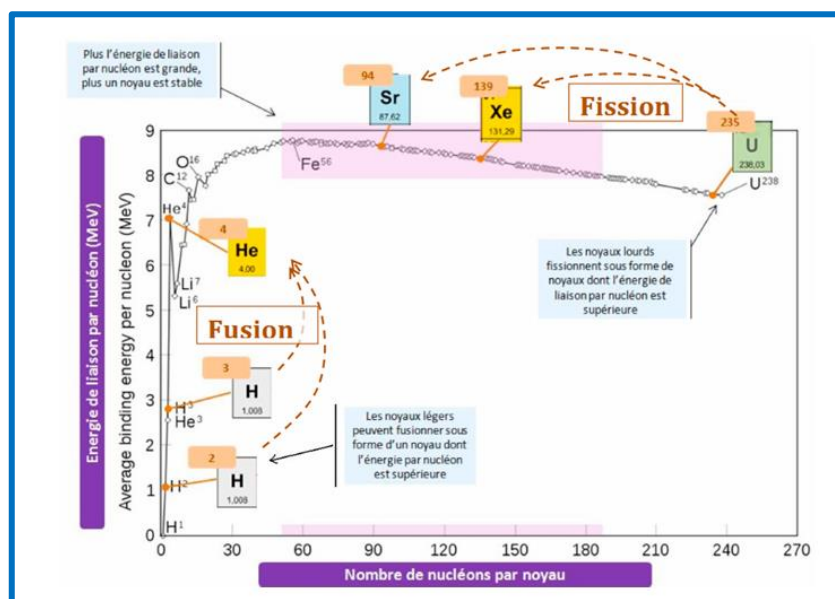
Exemple : calculer l'énergie de liaison par nucléon du noyau ${}^4_2\text{He}$

$$\Delta m_{\text{He}} = 0,030 \text{ u}$$

1 u	→	933 Mev	}	$\Delta E = 27,99 \text{ Mev}$
0,030 u	→	ΔE		

$$E_N = \Delta E / A = 27,99 / 4 = 7,0 \text{ Mev / nucléon}$$

Remarque : Plus le rapport ($\Delta E / A$) est grand, plus le noyau est stable.



Cette courbe porte le nom du physicien anglais **F.W Aston**. Elle représente la variation de l'énergie de liaison par nucléon (exprimée en MeV/nucléon) en fonction du nombre de nucléons A dans un noyau atomique. Elle nous permet de comprendre la stabilité des différents noyaux. Nous pouvons constater via cette courbe :

Les noyaux instables : $(\Delta E / A) < 8 \text{ Mev / nucléon}$

Le noyau le plus stable est **le fer** (${}^{56}_{26}\text{Fe}$) : $\Delta E / A = 8,7 \text{ Mev / nucléon}$

Les **noyaux dont** leur nombre de masse compris : $20 < A < 190$ ont une énergie de liaison par nucléon d'environ 8 MeV / nucléon Ce sont les plus **stables**.

Pour Les noyaux $A > 200$ et $A < 20$, ont une énergie de liaison par nucléon faible donc :

Ce sont des noyaux instables et peuvent se transformer en d'autres noyaux plus stables selon deux processus différents :

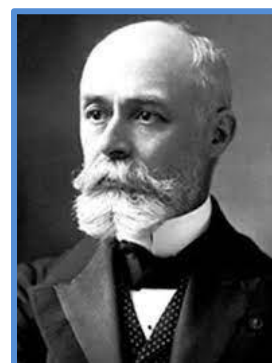
Les noyaux lourds ($A > 200$), exemple ^{235}U , peuvent se dissocier en deux noyaux légers appartenant au domaine de stabilité. Ils subissent alors une réaction nucléaire de **fission**.

Certains noyaux légers, $A < 20$, exemple 1H , 2H , 3H peuvent fusionner pour former un noyau plus lourd. Ce sont des réactions nucléaires de **fusion**.

2-La radioactivité naturelle

Elle a été découverte par Henri BECQUEREL en 1886.

C'est la propriété de certains noyaux à se désintégrer spontanément en émettant divers rayonnements alpha, bêta, gamma. Les noyaux lourds (gros noyaux) émettent des rayonnements β^- ou alpha. Les noyaux les moins lourds (légers ou petits noyaux) émettent des rayonnement β^- .



Henri Becquerel

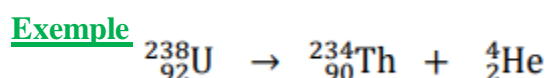
Un noyau radioactif

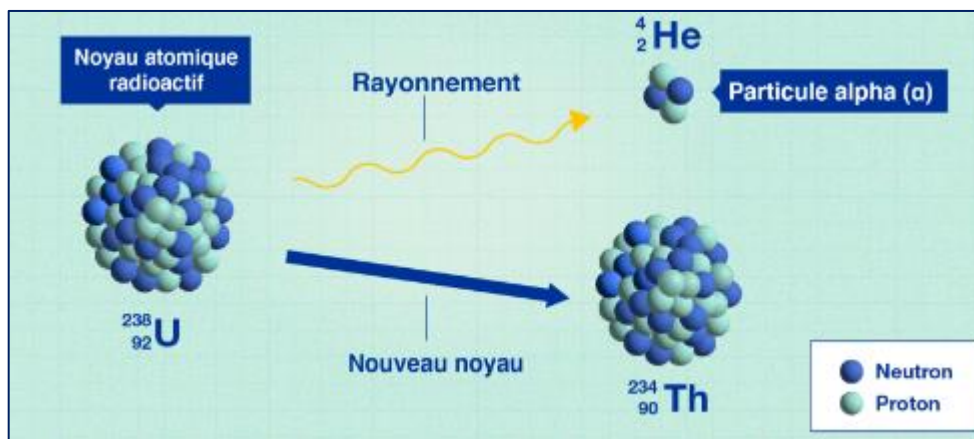
Un **noyau radioactif** est un noyau atomique instable qui se désintègre spontanément en émettant des particules ou des rayonnements pour atteindre un état plus stable. Les noyaux radioactifs peuvent émettre différents types de radiations :

2.1 Les types de rayonnements nucléaires

a- Les rayons α (alpha):

Ce sont des noyaux d'hélium ^4_2He émis lors de la désintégration spontanée d'un noyau lourd ($A > 200$) en noyau plus légers. Un noyau « père » ^A_ZX se désintègre pour donner le noyau fils $^{A-4}_{Z-2}\text{Y}$ et expulsion d'un rayonnement alpha selon la réaction suivante :





Les particules alpha sont moins pénétrantes, elles peuvent être arrêtées efficacement par une feuille de papier, une couche de vêtements ou même la couche superficielle de la peau.

b- Les rayons β :

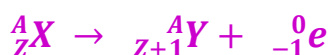
Lorsque le rapport N/Z est trop élevé, les noyaux instables émettent des particules bêta des **négatons** (β^-) ou des **positons** (β^+).

Les rayons β^- (négatons)

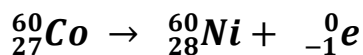
Lorsque dans le noyau il y a un excès de neutrons ($N > Z$: zone c, N : nombre de neutrons ; Z : nombre de protons) Il y a émission d'un négaton β^- .

Un noyau père A_ZX se transforme en un noyau fils ${}^{A}_{Z+1}Y$

accompagnée de l'émission d'un électron ${}^0_{-1}e$ appelé particule β^- , selon la réaction nucléaire suivante :



Exemple :

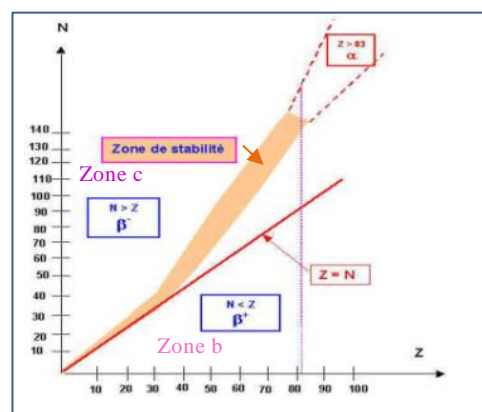


Remarque : lors de cette radioactivité β^- un neutron se transforme en un proton selon l'équation suivante : ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e$

Les rayons β^+ (positons)

Il concerne les noyaux riches en protons ($Z > N$) qui sont situés au-dessous de la zone de stabilité (diagramme) émettent des particules ${}^0_{+1}e$ appelées : **positons** β^+ de même masse que les électrons ordinaires mais de charge $+e$.

L'équation de désintégration s'écrit :

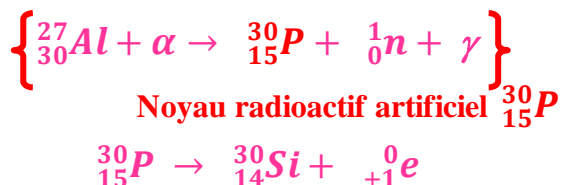


Un proton excédentaire se transforme en un positon et un neutron suivant le bilan :



Ce type de rayonnement s'observe qu'avec des radioéléments artificiels (c'est-à-dire des noyaux engendrés par des réactions nucléaires réalisées par l'homme).

Exemple



Les particules β peuvent pénétrer plus profondément dans la matière, mais sont arrêtées par des matériaux tels que le plastique, le verre ou quelques millimètres de métal comme l'aluminium. Elles peuvent causer des dommages aux tissus biologiques s'ils sont en contact direct avec le corps, mais leur pénétration est limitée.

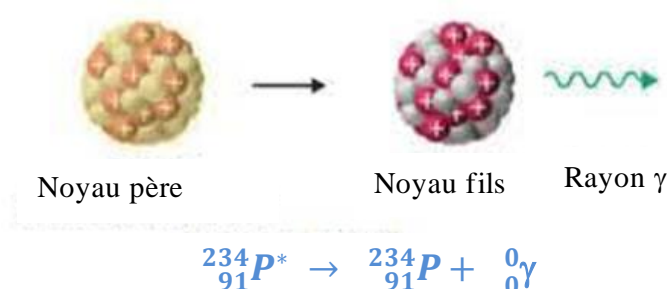
c- Les rayons γ :

L'éjection des particules et souvent s'accompagnent d'un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde ($\lambda < 1\text{Å}$) se sont les rayons γ (C'est un dégagement d'énergie qui accompagne une réaction nucléaire). Ils sont émis lorsqu'un noyau est formé par désintégration α ou β . le noyau fils est généralement produit dans un état excité (il possède un excédent d'énergie par rapport à son état fondamental). Ce noyau libère un rayonnement γ

Une émission de rayonnement γ ne produit ni variation de **A** ni de **Z**.

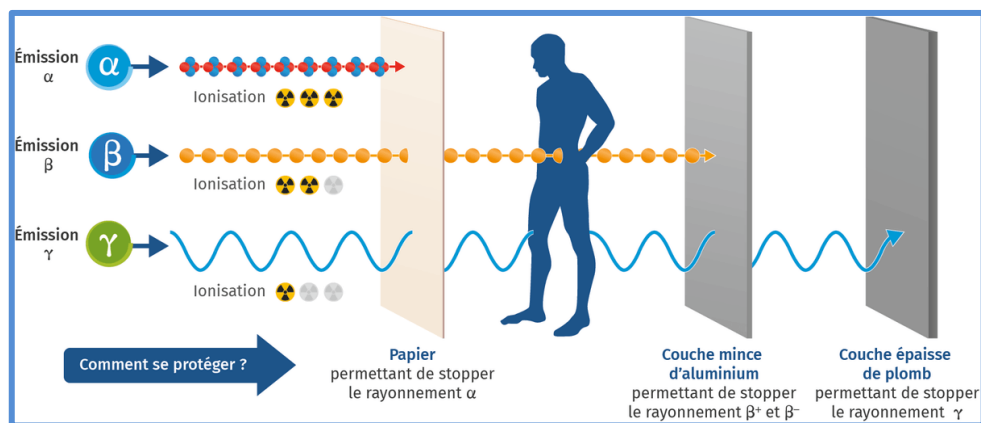


Exemple :



Les rayonnements γ ont un pouvoir de pénétration bien plus important que celui des particules α et β , il faut une forte épaisseur de béton ou de plomb pour s'en protéger, mais ils sont plus ionisants.

Ils sont particulièrement dangereux pour les tissus biologiques car ils peuvent pénétrer profondément dans le corps et causer des dommages à l'ADN des cellules.



3. La radioactivité artificielle

La radioactivité artificielle a été mise en évidence en 1934 par Irène et Frédéric JOLIOT– CURIE. Une réaction nucléaire artificielle est une réaction nucléaire qui est initiée, contrôlée ou produite par l'homme. Les noyaux cibles sont bombardés A_ZX par un autre noyau généralement léger ${}^{A_1}_{Z_1}P$ ou particule (noyau projectile : les protons, les neutrons, les électrons) pour donner de nouveaux noyaux.

Une réaction artificielle peut être écrite de la manière suivante :



On peut utiliser une écriture abrégée ou simplifiée pour la réaction nucléaire :



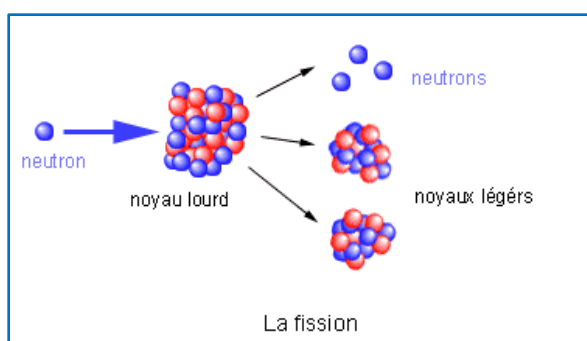
Exemple :

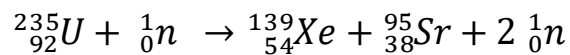


3.1 Les différents types d'une réaction nucléaire :

a-Réaction de fission

Est un processus par lequel un noyau lourd ($A > 200$) donne naissance à deux noyaux plus légers. Généralement accompagnée de la libération d'une très grande énergie et de neutrons. C'est la réaction qui alimente les réacteurs nucléaires pour produire de l'électricité.



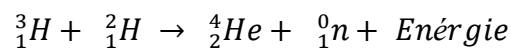
Exemple :

Les neutrons résultants peuvent conduire à des nouvelles fissions en formant une **fission en chaîne**.

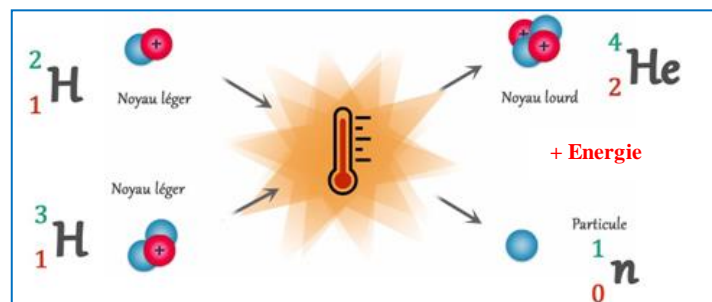
1 gramme d'uranium 235 libère ainsi autant d'énergie que la combustion de plusieurs tonnes de charbon.

b-Réaction de fusion

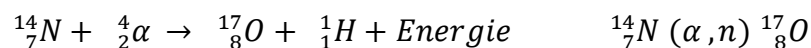
Dans la fusion, deux ou plusieurs noyaux légers se combinent (se fusionnent) pour donner un noyau plus lourd avec émission d'un neutron ou proton, et un dégagement de chaleur.

Exemple: la bombe d'hydrogène

L'énergie dégagée par cette réaction est de $E=17,6 \text{ MeV/He}$

**c-Réaction de transmutation**

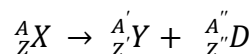
Dans cette réaction le nombre de masse du nucléide obtenu égal ou très voisin de celui du nucléide transformé. Le nucléide formé est stable ou radioactif

Exemple 1 :**Loi de conservation**

Au cours une réaction nucléaire (naturelle ou artificielle) d'un noyau, il y a conservation

du : Nombre massique

Nombre atomique



Conservation du nombre massique : $A = A' + A''$

Conservation du nombre atomique : $Z = Z' + Z''$

Exemple :

$$A=235+1=236$$

$$A' = 141+92+x = 233+x$$

$$\Rightarrow x = 3 \text{ donc } A' = 236$$

$$Z = 92+0=92$$

$$Z' = 56+36+0=92$$

4-Loi de désintégration radioactive :

Pour un échantillon donné le nombre d'atomes radioactifs varie avec le temps suivant une loi qui est précisément la loi désintégration radioactive (naturelle ou artificielle).

Soit la désintégration suivante :



$$t=0 \quad N_0 \quad 0$$

$$t \quad N_t \quad N_0 - N_t$$

N_0 : nombre de noyaux initial

N_t = nombre de noyaux restant au temps "t"

$N_0 - N_t$ = nombre des noyaux désintégrés

$dN = (N_t - N_0)$ C'est la variation du nombre de noyaux désintégrés pendant un temps dt

$-dN$ = (le signe (-), signifie que le nombre de noyaux diminue au cours du temps).

dt = variation du temps t

La vitesse de disparition des noyaux (la désintégration) en fonction de N s'écrit :

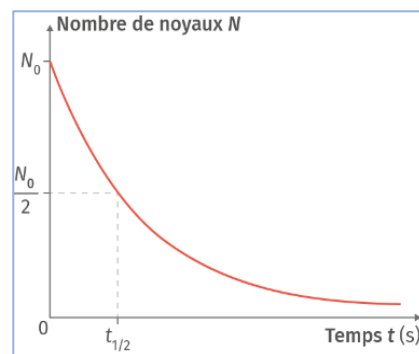
$$-dN / dt = \lambda N \Rightarrow -dN/N = \lambda dt$$

La loi de variation du nombre de noyaux en fonction du temps s'obtient en intégrant l'équation différentielle du 1er ordre.

$$\int_{N_0}^{N_t} \frac{dN}{N} = \int_0^t -\lambda dt \Rightarrow [\ln N]_{N_0}^{N_t} = -\lambda [t]_0^t$$

$$\ln N_t - \ln N_0 = -\lambda t \Rightarrow N_t / N_0 = e^{-\lambda t}$$

$$\Rightarrow \boxed{N_t = N_0 e^{-\lambda t}} \text{ C'est la loi de la décroissance radioactive}$$



courbe de décroissance

N_0 : nombre de noyaux initial

N_t : nombre de noyaux restants au temps "t"

λ : est la constante radioactive ou constante de désintégration,

elle varie avec la nature du noyau radioactif et son unité c'est s^{-1} ou min^{-1} .

t : le temps

4.1 La relation entre la loi de désintégration et la masse

1 mole \longrightarrow $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$

n moles \longrightarrow N_{noyaux}

$$n = \frac{N}{N_A}$$

$$n = \frac{m}{M_M} = \frac{N}{N_A} \Rightarrow N = \frac{m}{M_M} N_A \dots \dots \dots \textcircled{1}$$

La loi de désintégration radioactive : $N_t = N_0 e^{-\lambda t} \dots \dots \dots \textcircled{2}$

On remplace 1 dans 2 $\Rightarrow \frac{m_t}{M_M} \cancel{N_A} = \frac{m_0}{M_M} \cancel{N_A} e^{-\lambda t} \Rightarrow m = m_0 e^{-\lambda t}$

m : la masse restante exprimée en gramme (g)

m_0 : la masse initiale exprimée en gramme (g)

M_M : la masse molaire exprimée en g/mole

5-L'activité : \mathcal{A}

C'est le nombre de désintégrations par unité de temps.

$$\mathcal{A} = -dN/dt = \lambda N$$

\mathcal{A} est exprimée en :

- ◆ désintégrations par seconde (dps) ou Becquerels (Bq)
- ◆ Curies (Ci)

1 Bq = 1 dps

1 curie (Ci) = $3,7 \cdot 10^{10}$ dps

1 μ Ci = 10^{-6} Ci

5.1-La relation entre l'activité et la loi de désintégration

\mathcal{A}_0 : activité initiale

\mathcal{A} : activité au temps t

$$\mathcal{A} = \lambda N \Rightarrow N = \mathcal{A} / \lambda$$

$$\mathcal{A}_0 = \lambda N_0 \Rightarrow N_0 = \mathcal{A}_0 / \lambda$$

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

$$\Rightarrow \mathcal{A} / \lambda = \mathcal{A}_0 / \lambda (e^{-\lambda t}) \Rightarrow \mathcal{A} = \mathcal{A}_0 e^{-\lambda t}$$

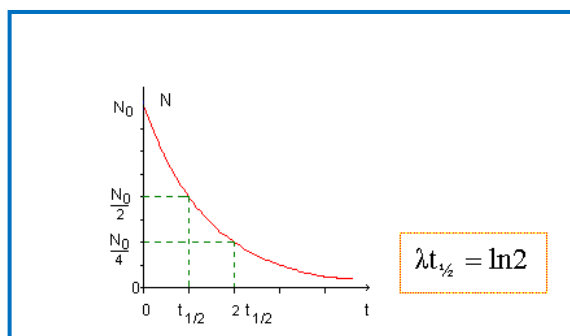
6- Période radioactive (T ou $t_{1/2}$)

La période ou temps de demi-vie d'un noyau radioactif noté par T ou $t_{1/2}$ est le temps nécessaire pour que la moitié des noyaux radioactifs présents initialement dans l'échantillon se désintègre.

	A	→	B
t=0	N_0		0
$t_{1/2}$	$N_0/2$		

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow \ln(N/N_0) = -\lambda t$$

$$A \quad T = t_{1/2} \Rightarrow N = N_0/2$$



$$\Rightarrow \ln \frac{(N_0/2)}{N_0} = -\lambda T \Rightarrow \ln(1/2) = -\lambda T \Rightarrow \ln 1 - \ln 2 = -\lambda T$$

$$\Rightarrow -\ln 2 = -\lambda T \Rightarrow T = \ln 2 / \lambda = 0,69 / \lambda$$

La demi-vie radioactive est une caractéristique de chaque type de noyau radioactif, elle ne dépend que de la constante radioactive λ .

Exemple :

Calculer l'activité de 1g de ^{226}Ra pendant une période $T = 1620$ ans

$$\mathcal{A} = -dN/dt = \lambda N \dots\dots\dots (3)$$

$$T = \ln 2 / \lambda \Rightarrow \lambda = \ln 2 / T \dots\dots\dots (4); \quad N = \frac{m}{M_M} N_A \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{On remplace 4 et 5 dans 3} \Rightarrow \mathcal{A} = \frac{\ln 2}{T} \times \frac{m}{M_M} \times N_A$$

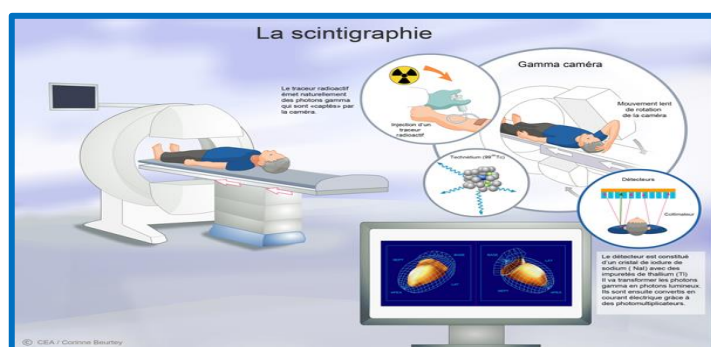
$$\mathcal{A} = \frac{0,69 \times 6,023 \cdot 10^{23} \times 1}{1620 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 \times 226} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{dps}$$

7- Applications de la radioactivité

Il est important de noter que la radioactivité possède de nombreuses applications bénéfiques, elle peut être dangereuse si elle n'est pas gérée correctement.

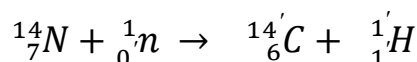
a-La médecine

La radiation ionisante est utilisée en médecine nucléaire pour diagnostiquer et traiter les maladies. En médecine diagnostique des traceurs radioactifs sont utilisés pour obtenir des images des organes et des tissus internes par des techniques telles que la tomographie par émission de positons (TEP) et scintigraphie. En thérapie, la radiothérapie est utilisée pour traiter le cancer, ou la radiation est dirigée vers les cellules cancéreuses pour les détruire.



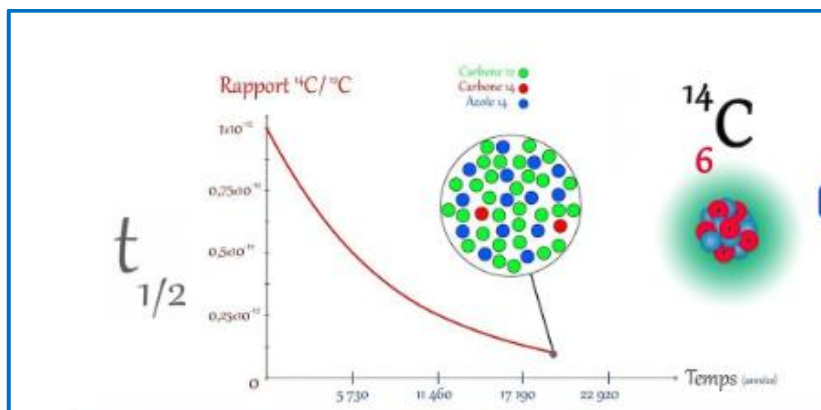
b-La datation

L'utilisation du ^{14}C radioactif permet de déterminer l'âge des pièces archéologiques et géologiques. Cet isotope est produit de manière continue dans l'atmosphère par l'action des neutrons des rayons cosmique sur l'azote ^{14}N de l'atmosphère suivant la réaction :



Il est oxydé en CO_2 et éventuellement absorbé par les plantes et les animaux. le nombre de désintégration par unité du temps et de masse est également constante pour tous les organismes vivants (15,3 dpm/gr).

La datation repose sur la désintégration du carbone 14 en carbone 12 dans les organismes vivants, qui cesse lorsque ces organismes meurent. En mesurant la quantité de carbone 14 restante dans un objet, les scientifiques peuvent estimer son ancienneté



c-La production d'énergie

L'énergie nucléaire est produite par fission nucléaire ou les noyaux d'atomes lourds tels que l'Uranium se divisent en noyaux plus légers, libérant une grande quantité d'énergie. Cette dernière est utilisée dans les centrales nucléaires pour produire de l'électricité.

Exercice d'application

Le radon 222 est la cause principale de la radioactivité atmosphérique naturelle. Son temps de demi-vie est $t_{1/2} = 3,8$ jours.

1. Calculer le nombre de noyaux N_0 de radon 222 contenus dans la masse de 2g de radon 222 pur.
2. Calculer la constante radioactivité du radon 222.
3. Calculer l'activité initiale d'un échantillon de Radon 222 de masse 2 g.

La solution

1* Nombre de noyaux N_0 de radon 222 :

$$N_0 = \frac{m}{M_a} N_A \Rightarrow N = \frac{2}{222} \times 6,023 \times 10^{23} = 5,42 \times 10^{21} \text{ noyaux}$$

2* La constante radioactive λ

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{0,69}{3,8 \times 24 \times 3600} = 2,10 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

3* L'activité (\mathcal{A})

$$\mathcal{A}_0 = \lambda N_0 = 5,42 \times 10^{21} \times 2,10 \times 10^{-6} = 11,38 \times 10^{15} \text{ dps} = 11,38 \times 10^{15} \text{ Bq}$$

