

II. RADIOACTIVITE – REACTIONS NUCLEAIRES

II.1. RADIOACTIVITE

La radioactivité a été découverte par Becquerel en 1886. Il découvrit que le sulfate d'uranyle et de potassium $K_2UO_2(SO_4)_2$ émettait un rayonnement capable d'impressionner une plaque photographique.

Les noyaux de certains atomes sont susceptibles d'être le siège de transformations, appelées transmutations qui peuvent être spontanées (naturelles) ou provoquées (réactions nucléaires).

Parmi la centaine d'éléments connus seul les 83 premiers (à l'exception du Technétium ($Z=43$) et du Prométhium ($Z=61$)) possèdent au moins un isotope stable.

A partir du Polonium ($Z=84$) il n'existe plus de nucléides stables, ils sont tous radioactifs.

Pour les premiers éléments de $Z < 30$ on constate que les isotopes stables contiennent un nombre de neutrons sensiblement égal à celui des protons. $Z = N$.

Au delà de $Z = 30$ les isotopes stables contiennent un nombre de neutrons plus élevé que celui des protons : $N > Z$.

Plus le nombre de protons augmente et plus le nombre de neutrons devra augmenter pour que le nucléide soit stable.

Le rapport entre le nombre de proton et le nombre de neutron est le facteur principal qui va fixer la stabilité ou l'instabilité d'un nucléide donné.

Donc, dans la nature il existe des noyaux stables et d'autre instables ou radioactifs.

II.1.1. RADIOACTIVITE NATURELLE

On appelle radioactivité naturelle la propriété de certains éléments de se désintégrer spontanément en émettant diverses radiations.

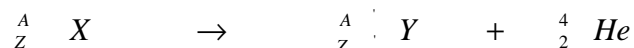
Un élément chimique manifeste une radioactivité naturelle si le rapport

$$\frac{A-Z}{Z} \geq 1.5. \text{ Cependant, il reste des atomes radioactifs qui ne vérifient pas cette condition } ({}^{60}\text{Co}, {}^{24}\text{Na et } {}^{30}\text{P}) \text{ car}$$

se sont en fait des isotopes du $(\text{Co}, \text{Na et P})$.

II.1.2. LOI DE SODDY ET FAJANS

Dans une transformation radioactive il y a conservation du nombre total de nucléons et de la charge globale.



1- Conservation du nombre total de nucléons : $A=A'+4 \Rightarrow A'=A-4$

2- Conservation de la charge : $Z=Z'+2 \Rightarrow Z'=Z-2$

II.1.3. FAMILLES RADIOACTIVES NATURELLES

Au cours d'une désintégration le noyau obtenu peut être radioactif, il y a une série de nucléide qui apparaissent l'un après l'autre et l'ensemble constitue une famille radioactive. Il existe trois (3) famille radioactives naturelles principales : isotope générateur \rightarrow isotope final.

1- Celle de l'Uranium 238 : ${}_{92}^{238}U \xrightarrow{\text{séries de transmutations}} {}_{82}^{206}Pb$

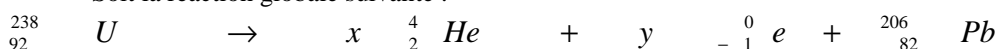
2- Celle de l'Uranium 235 : ${}_{92}^{235}U \xrightarrow{\text{séries de transmutations}} {}_{82}^{208}Pb$

3- Celle du Thorium 232 : ${}_{90}^{232}Th \xrightarrow{\text{séries de transmutations}} {}_{82}^{208}Pb$

Exp : déterminer le nombre de désintégrations α et β dans la famille radioactive de l'Uranium 238.

Solution :

- Soit la réaction globale suivante :



- Application de la loi de Soddy et Fajans

1- Conservation du nombre de nucléons

$$238 = 4x + 0y + 206 \Rightarrow x = (238-206)/4 \Rightarrow x=8 \text{ désintégrations } \alpha$$

2- Conservation de la charge

$$92 = 2x - y + 82 \Rightarrow y = -92 + 82 + 16 \Rightarrow y = 6 \text{ désintégrations } \beta^-$$

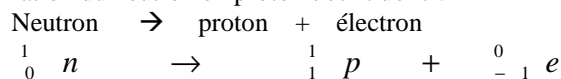
II.1.4. TYPES DE RAYONNEMENTS (RADIOACTIVITES)

Il existe trois formes de rayonnements radioactifs différents :

II.1.4.1. Rayonnement β^- :

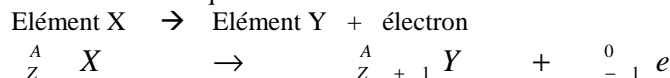
Cette forme de radioactivité concerne les isotopes instables qui possèdent un excès de neutrons. De tels noyaux chercheront à se stabiliser en augmentant Z et en diminuant N . On peut considérer que pour de tels nucléides un neutron se transforme en proton, la charge positive du noyau va donc augmenter, ce qui n'est possible qu'à la condition qu'une charge

négative équivalente soit éjectée du noyau. Cette charge négative correspond au départ d'un électron du noyau. La réaction de transformation du neutron en proton s'écrit donc :



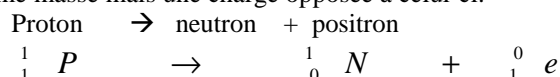
Au cours de cette réaction, le nombre de protons varie et on transforme donc un élément en un autre, il s'agit d'une transmutation.

Au cours de ces réactions les éléments ne sont pas conservés, en revanche la somme des nombres de masse et la somme des numéros atomiques se conservent.



II.1.4.2. Rayonnement β^+

Cette forme de radioactivité concerne les isotopes instables qui possèdent un excès de protons. De tel noyaux chercheront à se stabiliser en augmentant N et en diminuant Z. On peut considérer que pour de tels nucléides un proton se transforme en neutron. Simultanément un positron est éjecté du noyau. Le positron est l'anti-particule de l'électron, il possède une même masse mais une charge opposée à celui-ci.

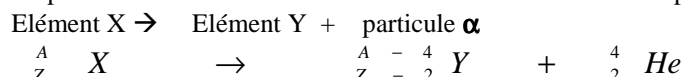


Au cours de cette réaction, le nombre de protons varie et on transforme donc un élément en un autre, il s'agit ici aussi d'une transmutation.



II.1.4.3. Rayonnement α

Cette forme de radioactivité concerne essentiellement les éléments "lourds" de numéro atomique $Z > 83$. Ici, le nombre des protons et celui des neutrons sont modifiés simultanément par émission de particules α (noyaux d'Hélium 4).



Les émissions α et β sont souvent accompagnées de photons très énergétiques (rayonnement γ).

II.1.4.4. Rayonnement γ

Chaque noyau est caractérisé par un état énergétique fondamental. En général lorsque un noyau est formé lors d'une désintégration α ou β , il n'atteint pas immédiatement son état fondamental, il se trouve dans un état excité. Le passage à l'état fondamental libère un photon de nature de rayonnement γ .



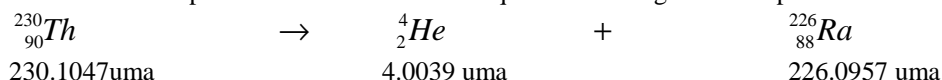
II.1.5. ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES RAYONNEMENTS

α	- pénétrant	+ ionisant
β^-		
γ	+ pénétrant	- ionisant

II.1.6. ASPECTS QUANTITATIFS DES DESINTEGRATIONS RADIOACTIVES

II.1.6.1. Aspect énergétique

Dans la radioactivité, il y a conservation du nombre total de nucléons et de la charge globale. Ceci n'implique aucunement la conservation de la masse, au contraire les transmutations radioactives s'accompagnent toujours d'une perte de masse Δm correspondant à la libération de la quantité d'énergie donnée par la relation d'Einstein : $E = \Delta m \cdot c^2$



La désintégration d'une mole d'atomes s'accompagne d'une perte de masse de : $230.1047 - (226.0957 + 4.0039) = 0.0051 \text{ uma}$

$$E = 0.0051 \cdot 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2 = 0.076194 \cdot 10^{-11} \text{ J/atom} = 0.076194 \cdot 10^{-11} / 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ eV}$$

$E = 4.76 \text{ MeV / atome}$. Cette énergie sert à accélérer les particules α émises.

II.1.6.2. Aspect cinétique

Chaque radio-isotope possède une vitesse de désintégration qui lui est propre. Soit la désintégration suivante : $A^* \rightarrow B$ où B n'est pas radioactif.

L'expérience montre que le nombre d'atomes (dN/dt) qui se désintègrent entre t et $t+dt$ est proportionnel au nombre d'atomes N présent à l'instant t , d'où :

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda * N \dots\dots\dots(1)$$

Avec :

dN : représente la variation du nombre de noyau radioactifs A pendant le temps dt .

N : désigne le nombre de noyaux présents à l'instant t ; λ : constante radioactive ou de désintégration (s^{-1} ou mn^{-1})

$-\frac{dN}{dt}$: représente le nombre de particules désintégrées par unité de temps.

La variation de $-\frac{dN}{dt}$ (vitesse de désintégration) en fonction du N est une loi linéaire.

$\frac{dN}{dt}$: S'exprime en d.p.m (désintégration par minutes) ou d.p.s (désintégration par seconde).

Par intégration de l'équation (1), on obtient :

A $t=0$ on a $N=N_0$

$$A \ t \neq 0 \text{ on a } N=N_t \Rightarrow \frac{dN}{dt} = -\lambda * N \Rightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda * dt \Rightarrow \int_{t=0}^t \frac{dN}{N} = -\int_0^t \lambda \ dt \Rightarrow \ln [N]_0^t = -\lambda [t]_0^t$$

$$\Rightarrow \ln N_t - \ln N_0 = -\lambda t \Rightarrow \ln \frac{N_t}{N_0} = -\lambda * t \dots\dots\dots(2)$$

$$\Rightarrow N_t = N_0 e^{-\lambda t} \dots\dots\dots(3)$$

II. 1.6.2.1. Période d'un radio-isotope

Le temps T nécessaires pour que ce nombre N_0 diminue de moitié s'appelle période (ou temps de demi – vie).

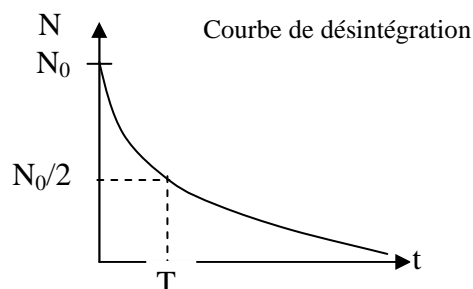
Soit T le temps nécessaire pour que $N_0/2$ soit désintégrés

$$(2) \Rightarrow \ln \frac{N_t}{N_0} = -\lambda * t \Rightarrow \text{pour } t=T : \ln \frac{N_0/2}{N_0} = -\lambda * T$$

$$\Rightarrow -\ln 2 = -\lambda * T \Rightarrow T = (\ln 2)/\lambda \dots\dots\dots(4)$$

II.1.6.2.2. Activité radioactive

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



$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda * N \text{ . Elle peut s'exprimer en : d.p.s, d.p.m ou en curie (1 curie=3.7 10^{10} d.p.s).}$$

Exp : par définition le Curie est le nombre de désintégration par second et par gramme de Radium (^{226}Ra). On sait que la période de désintégration de Ra est $T=1590$ ans.

Solution :

$$A = \lambda * N$$

$$\lambda ? \text{ A partir de l'équation (4)} \Rightarrow \lambda = \ln 2 / T \Rightarrow \lambda = 0.693 / (1560 * 365 * 24 * 3600) = 1.39 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}.$$

$$N ? \quad 226\text{g} \rightarrow 6.023 \cdot 10^{23} \text{ atomes}$$

$$1\text{g} \rightarrow N \Rightarrow N = 6.023 \cdot 10^{23} / 226 = 2.66 \cdot 10^{21} \text{ atomes.}$$

$$\text{Donc: } A = 2.66 \cdot 10^{21} * 1.39 \cdot 10^{-11} \text{ atomes/s (d.p.s)} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ d.p.s} = 1 \text{ Ci.}$$

Remarque : cas ou $A \rightarrow B$ (B est radioactif).

Dans ce cas au moment d'équilibre il se forme par unité de temps autant d'atomes de B qu'ils en disparaissent de A.

$$d'où A_A = A_B \Rightarrow \lambda_A * N_A = \lambda_B * N_B \text{ .}$$

II.2. REACTIONS NUCLEAIRES

Les réactions de transmutations provoquées sont appelées réactions nucléaires. Elles sont obtenues en bombardant les noyaux de certains atomes à l'aide de particules convenables tel que : les protons, les neutrons, les hélions, les électrons ...etc. l'ensemble de ces réactions dites artificielle peuvent être divisées en trois groupes : les transmutations, les réactions de fission et les réactions de fusion.

II.2.1. LES TRANSMUTATIONS

Les réactions de transmutations provoquées, produisent des nucléides de nombre de masse égal ou très voisin de celui du nucléide qui a servi de cible.

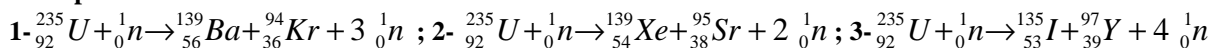
$$\text{Exp : } {}^{32}_{16}\text{S} + {}^1_0n \rightarrow {}^1_1\text{P} + {}^{32}_{15}\text{P} (\text{phosphore}) \text{ ou bien } {}^{32}_{16}\text{S} (n, p) {}^{32}_{15}\text{P} \text{ (écriture simplifiée ou abrégée)}$$

${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^{17}_8\text{O}$, ou bien ${}^{14}_7\text{N} (\alpha, p) {}^{17}_8\text{O}$ (première réaction nucléaire réalisé par RUTHERFORD. Elle a permis de découvrir le proton en 1919.

II.2.2. LA FISSION NUCLEAIRE

Les atomes de nombre de masse très élevés tel que l'Uranium 235 ou le plutonium 239, lorsque ils sont bombardés par des neutrons peuvent subir une cassure conduisant à des atomes plus légers et a des neutrons. Les neutrons émis peuvent à leur tour provoquer la fission d'atomes voisins, on a une réaction en chaîne explosive. Lors du processus il se produit une perte de masse et un important dégagement d'énergie. Ce type de réaction en chaîne quand il n'est pas contrôlé est à la base de la bombe atomique (Bombe A). On peut néanmoins contrôler le processus pour obtenir une libération d'énergie régulière, on a alors une centrale nucléaire. L'énergie libérée par ce type de réaction est énorme de l'ordre de 200 Mev /atome (2 10¹³ J / mole).

Exemples de réactions de fission :



Remarque : le numéro atomique Z des noyaux formés est compris entre 35 et 60, par contre le nombre de masse A est compris entre 72 et 162. le nombre de masse des noyaux cibles est supérieur à 200.

II.2.3. LA FUSION NUCLEAIRE

Les atomes légers vont chercher à se stabiliser par réaction de fusion. Au cours de ce type de réactions, deux ou plusieurs noyaux légers vont fusionner pour donner un atome plus lourd et diverses particules. Au cours de ce processus il va y avoir perte de masse et important dégagement d'énergie. Cette sorte de réaction est à l'origine de l'énergie des étoiles. C'est aussi la réaction utilisée dans les bombes H.

Exemples de réactions de fusion :

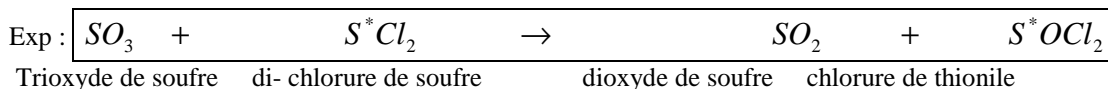


NB : deutérium (${}^2_1\text{H}=\text{d}$) et tritium (${}^3_1\text{H}$)

III. APPLICATION DES RADIO - ISOTOPES

III.1. Traceurs

Pour l'étude des mécanismes réactionnels.



III.2. APPLICATIONS MEDICALES

Traitement de certaines tumeurs par irradiation – bombe au cobalt 60.

III.3. ARMES NUCLEAIRES

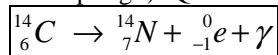
Missiles nucléaires, bombe Atomique, bombe à Hydrogène et bombe à neutron.

III.4. SOURCE D'ENERGIE

Les piles atomiques (réacteurs nucléaires).

III.5. DATATION D'ECHANTILLONS ANCIENS

Le ${}^{14}\text{C}$ radioactif est produit de manière continue dans l'atmosphère par l'action des neutrons des rayons cosmiques sur l'azote ${}^{14}\text{N}$ de l'atmosphère suivant la réaction : ${}^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + {}^1_1\text{H}$, cet isotope s'incorpore dans les molécules CO_2 puis dans les tissus des plantes par photosynthèse. La concentration dans les plantes vivantes (et dans les animaux qui les mangent) est maintenue constante de par l'équilibre avec l'atmosphère ; le nombre de désintégration par unité de temps et de masse est également constant pour tous les organismes vivants (15.3 désintégration par minute et par gramme de carbone total noté dpm g⁻¹). Quand la plante meurt, la concentration en ${}^{14}\text{C}$ décroît à cause de la désintégration selon la réaction suivante :



Exp : La période de ${}^{14}\text{C}$ est de T=5568 ans et qu'un échantillon de charbon de bois fraîchement préparé donne une activité de $A_0=15.3$ dpm g⁻¹. Quel est l'âge d'un échantillon de bois trouvé dans une grotte préhistorique dont un échantillon de même masse que le précédent donne $A_t=9.65$ dpm g⁻¹.

Solution :

Nous avons : $A_0 = N_0 * \lambda$ et $A_t = N_t * \lambda$

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{loi de décroissance radioactive}) \Rightarrow \ln \frac{N_t}{N_0} = \ln e^{-\lambda t} \Rightarrow \ln \frac{A_t / \lambda}{A_0 / \lambda} = -\lambda * t \Rightarrow$$

$$\ln \frac{A_t}{A_0} = -\lambda * t \Rightarrow \ln \frac{A_0}{A_t} = \frac{\ln 2}{T} * t \Rightarrow t = \frac{T}{\ln 2} * \ln \frac{A_0}{A_t}, \text{ AN : } t=3695 \text{ années.}$$