Chapitre III

Radioactivité et réactions nucléaires

I. Introduction

La radioactivité fut découverte par hasard par Henri Becquerel en 1896 lorsqu'il fait des recherches sur la phosphorescence des sels d'uranium. Une plaque photographique mise à côté des sels était impressionnée sans qu'elle soit soumise à la lumière.

La radioactivité se produit lorsqu'un atome instable perd de l'énergie en émettant un rayonnement. La désintégration radioactive est un processus aléatoire au niveau d'atomes uniques, il est donc impossible de prédire quand un atome particulier va se désintégrer. Pendant la désintégration radioactive, un noyau instable se décompose spontanément et aléatoirement pour former un noyau différent qui peut être stable ou instable, dégageant un rayonnement sous forme de particules ou de rayons de haute énergie.

La radioactivité est dite naturelle ; lorsque la désintégration se produit de façon spontanée ; et artificielle si elle est provoquée.

II. Loi de conservation de Soddy et Fajans :

Les réactions nucléaires obéissent aux lois de conservation de Soddy et Fajans :

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A_1}_{Z_1}Y + {}^{A_2}_{Z_2}J$$

-Conservation totale de nucléons :

$$A = A_1 + A_2$$

-Conservation totale de la charge :

$$Z = Z_1 + Z_2$$

III. Type de Radioactivité :

III.1. Radioactivité naturelle :

III.1.1 Emission $\boldsymbol{\alpha}$

Concerne essentiellement les éléments lourds situés au-delà de la vallée de stabilité, de numéro atomique $Z \geq 83$ ou de nombre de masse $A > 200$. L'élément X se désintègre en un élément Y stable ou radioactif avec émission d'une particule $\boldsymbol{\alpha}$.

La particule alpha est constituée de deux protons et deux neutrons combinés en une particule identique au noyau d'hélium 4 ; elle peut donc s'écrire $^{4}He^{2+}$.

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He$$

Exemple : $$^{232}_{90}Th \rightarrow {}^{228}_{88}Ra + {}^{4}_{2}He$$

Les particules $\boldsymbol{\alpha}$ sont très ionisantes mais peu pénétrante, une feuille en papier peut stopper le rayonnement $\boldsymbol{\alpha}$.

III.1.2 Emission $\boldsymbol{\beta^-}$

Concerne les isotopes instables qui possèdent un excès de neutrons et se situe au-dessus de la vallée de stabilité (N/Z trop élevé ou N>Z). La désintégration de type $\boldsymbol{\beta^-}$ correspond à l'émission d'un électron.

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e$$

Exemple : $$^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e$$

Dans cet exemple le carbone 14 possède 8 neutrons et 6 protons (N>Z), un neutron se transforme en proton pour former un noyau plus stable qui est l'azote avec Z=N=7 ; selon la réaction : $^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}P + {}^{0}_{-1}e$

III.1.3 Emission $\boldsymbol{\beta^+}$

Concerne les isotopes instables qui possèdent un excès de protons se situant au-dessous de la vallée de stabilité (Z/N trop élevé ou Z>N).

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{+1}e$$

Exemple : $$^{13}_{8}O \rightarrow {}^{13}_{7}N + {}^{0}_{+1}e$$

L'élément $^{A}_{Z}X$ se stabilise en augmentant le nombre de neutrons et réduisant le nombre de protons, un proton est alors transformé en un neutron avec émission d'un positron noté $^{0}_{+1}e$ qui est une antiparticule de l'électron, selon la réaction : $^{1}_{1}P \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{+1}e$.

Le positron possède la même masse que l'électron mais une charge opposée.

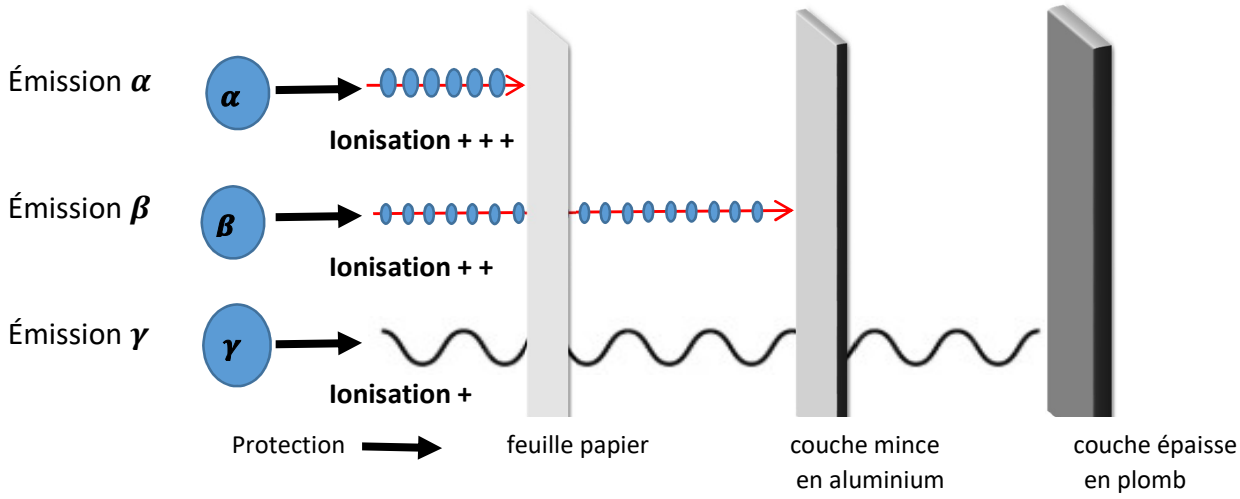
Les particules $\boldsymbol{\beta}$ sont plus pénétrantes que les particules $\boldsymbol{\alpha}$ mais moins ionisantes. Pour stopper le rayonnement $\boldsymbol{\beta}$ il faut une couche mince en aluminium.

III.1.4 Emission $\boldsymbol{\gamma}$

Le rayonnement $\boldsymbol{\gamma}$ apparait lors des émissions $\boldsymbol{\alpha}$ et $\boldsymbol{\beta}$. Lors de la formation d'un noyau par désintégration $\boldsymbol{\alpha}$ ou $\boldsymbol{\beta}$ il est souvent dans un état excité. Le passage de ce dernier à l'état fondamental libère un photon de nature $\boldsymbol{\gamma}$.

$$^{A}_{Z}X^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}X + \gamma$$

Le rayonnement $\boldsymbol{\gamma}$ est sans charge et masse mais très énergétique et très pénétrant. Il faut par exemple une couche très épaisse en béton ou une couche épaisse de plomb pour stopper un le rayonnement $\boldsymbol{\gamma}$.



III.2. Radioactivité artificielle :

La radioactivité artificielle est provoquée par l'homme suite au choc entre les noyaux cibles et des particules extérieures « projectiles » tel que les : neutron (^1_0n), proton (^1_1P) , deutérium (^2_1d), héliun ($\boldsymbol{\alpha}$), électron ou à l'aide d'un photon $\boldsymbol{\gamma}$.

III.2.1 Réactions de transmutation :

Lors des réactions de transmutations, le nombre de masse du nucléide formé est égal ou très proche de celui du nucléide cible.

Exemples :

$^{32}_{16}S + {}^1_0n \rightarrow {}^{32}_{15}P + {}^1_1H$

$^{14}_{7}N + {}^4_2He \rightarrow {}^{17}_{8}O + {}^1_1H$

$^{27}_{13}Al + {}^4_2He \rightarrow {}^{30}_{15}P + {}^1_0n$

Les réactions nucléaires peuvent être représentées comme suit :

Noyau initial ou cible (Projectile, Particule éjectée) noyau fils

Exemple : $^{32}_{16}S\ (n, P)\ {}^{32}_{15}P$, $^{14}_{7}N\ (\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{P})\ {}^{17}_{8}O$

III.2.2. Réactions de Fission nucléaire :

Les éléments lourds (A > 200) se désintègrent pour former des atomes plus légers (72<A<162) et des neutrons qui à leurs tours bombardent des noyaux voisins, ce qui entrainent des réactions nucléaires en chaine.

Exemples :

$^{235}_{92}U + {}^1_0n \rightarrow {}^{236}_{92}U \rightarrow {}^{93}_{36}Kr + {}^{140}_{56}Ba + 3\ {}^1_0n$

$^{235}_{92}U + {}^1_0n \rightarrow {}^{236}_{92}U \rightarrow {}^{94}_{38}Sr + {}^{140}_{54}Xe + 2\ {}^1_0n$

Ce type de réaction libère une énergie considérable environ 200 MeV/noyau soit 1000 fois plus que l'énergie libérée par une réaction chimique.

Les réactions de fission nucléaire sont utilisées dans la production de l'électricité dans les centrales nucléaires (réactions en chaine contrôlées) et dans les pompes atomiques (réactions en chaine non contrôlées).

III.2.3 Réactions de Fusion nucléaire :

Dans les réactions de fusion nucléaire deux ou plusieurs atomes légers (Hydrogène, deutérium, tritium, hélium) vont s'unir pour former un noyau plus lourd à très haute température.

Exemple :

$$^{3}_{1}H + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n$$

$$^{2}_{1}H + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{1}_{1}H + ^{3}_{1}H$$

$$^{2}_{1}H + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{3}_{2}He + ^{1}_{0}n$$

$$^{6}_{3}Li + ^{2}_{1}H \rightarrow 2\ ^{4}_{2}He$$

La réaction de fusion nucléaire est essentiellement utilisée dans la production de la bombe à Hydrogène.

IV. Cinétique de désintégration radioactive :

IV.1. Aspect énergétique :

Lors de la réaction nucléaire, il y'a conservation totale de nucléons et de charge mais s'accompagne d'une perte de masse Δm correspondant à une libération d'énergie ΔE selon la relation d'Einstein $\Delta E = \Delta m.C^2 \leq 0$

Exemple : $^{230}_{90}Th \rightarrow ^{226}_{88}Ra + ^{4}_{2}He$

$\Delta m = m_{produits} - m_{réactifs}$

$\Delta m = m_{He} + m_{Ra} - m_{Th}$

$\Delta m = 226{,}0957 + 4{,}0026 - 230{,}1047 = -0{,}0051\ uma\ (perte\ de\ masse)$

$\Delta E = \Delta m.C^2 = -0{,}0051\ .1{,}66.10^{-2}\ .3.10^{8} = -0{,}0761\ .10^{-1}\ J/noyau$

$$\Delta E = \frac{-0{,}0761\ .10^{-11}}{1{,}6\ .10^{-13}} = -7{,}76\ MeV/noyau$$

IV.2. Aspect cinétique :

Soit un élément A qui se désintègre pour former un élément B selon la réaction suivante :

	A	$\rightarrow$	B
$t_0 = 0$	N_0		0
t	N_t		$N_0 - N_t$

L'expérience a montré que le nombre d'atomes qui se désintègre ($\frac{dN}{dt}$) entre t et t+dt est proportionnel au nombre N_t d'atomes présents à l'instant t.

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N_t$$

N_t: Nombre de noyau présent à l'instant t

λ : Constante radioactive ou de désintégration (s^{-1}, h^{-1},…)

dN : Variation du nombre de noyaux pendant dt

$-\frac{dN}{dt}$: Nombre de noyaux désintégrés par unité de temps ou activité.

La vitesse de désintégration $-\frac{dN}{dt}$ s'exprime en dps, dpm, dph ,…

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N_t \Rightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda\, dt \Rightarrow \int_{N_0}^{N} \frac{dN}{N} = -\int_0^t \lambda\, dt$$

$$\Rightarrow Ln\ \frac{N}{N_0} = -\lambda\, t$$

d'où : $\boldsymbol{N_t = N_0\, e^{-\lambda t}}$ Loi de désintégration radioactive

- **Période radioactive :** la période est le temps au bout duquel la moitié des noyaux a subi la désintégration, notée T ou $t_{1/2}$.
  En remplaçant t par $t_{1/2}$ et N_t par $N_0/2$ dans la loi de désintégration on obtient :
  $N_t = N_0\, e^{-\lambda t}$
  $\frac{N_0}{2} = N_0\, e^{-\lambda\, t_{1/2}} \Rightarrow Ln\ \frac{1}{2} = -\lambda\, t_{1/2} \Rightarrow \boxed{\boldsymbol{t_{1/2} = \frac{Ln\ 2}{\lambda}}}$

Remarque : à chaque fois qu'il s'écoule une période, le nombre de noyaux radioactifs présents est divisé par 2. Au bout de n période on obtient :

$t = 0 \quad N = N0$

$t = T \quad N = N_0/2$

$t = 3T \quad N = (N_0/2)/2 = N_0/2^2$

$t = 4T \quad N = \frac{\frac{N_0}{4}}{2} = \frac{N_0}{2^3}$

$\boldsymbol{t = nT \quad N = N_0/2^n}$

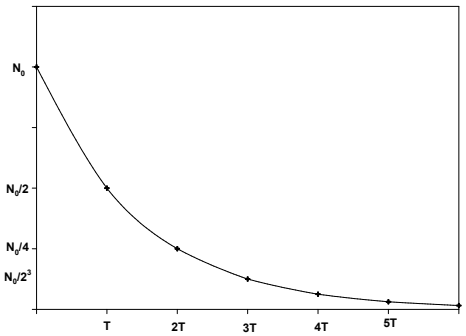


Figure 2 : Courbe de décroissance radioactive

- **Activité radioactive :** représente une vitesse de désintégration, c'est le nombre de noyaux radioactif qui se désintègre par unité de temps et pour une masse donnée. L'activité radioactive est notée A_t

$$\boldsymbol{A_t = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_t}$$

$\boldsymbol{A_t}$ s'exprime en nombre de désintégration par seconde dps, ou par minute dpm ou par heure dph.

Autres unités de l'activité :

Bequerel : **1Bq= 1dps**
Curie : **1Ci=3,7 . 10^{10} dps**

Remarque : 1 curie est l'activité de 1 gramme de radium Ra-226, tel que la période du radium est de 1600 ans :

$$A_0 = \lambda . N_0 = \frac{Ln\ 2}{T} . \frac{m_0\ N_A}{M} = \frac{0{,}69\ .1\ .6{,}023\ .10^{23}}{1600.365.24.60.60.226} = 3{,}7\ .10^{10}\ dps = 1\ Ci$$

.