

Décroissance radioactive



1. Le noyau atomique :

1.1. Le noyau :

Un noyau est composé de nucléons, qui rassemblent les protons et les neutrons.

La représentation symbolique du noyau d'un atome est la suivante :

$${}^A_ZX \text{ avec } \begin{cases} A : \text{nombre de nucléon} \\ Z : \text{nombre de protons (ou charges)} \end{cases}$$

Exemple

Symbole de noyau A_ZX	Nombres de nucléons A	Nombres de protons (ou nombre de charge) Z	Nombres de neutrons N = A - Z
${}^{14}_6C$	A=14	Z=6	N=8

1.2. L'élément chimique :

L'élément chimique est constitué par l'ensemble des atomes et des ions ayant le même nombre de protons.

1.3. Les nucléides :

Dans la physique atomique, un nucléide est un Noyau atomique caractérisé par son numéro atomique, son nombre de masse et son énergie nucléaire.

Exemple :

${}^{12}_6C$ et ${}^{14}_6C$ sont deux nucléides de même nombre de proton Z

${}^{98}_{42}Mo$ et ${}^{98}_{43}Tc$ sont deux nucléides (Molybdène Mo et le Technétium Tc) de même nombre de nucléons A

1.4. Les isotopes :

On appelle les isotopes d'un élément chimique, les nucléides qui possèdent le même nombre de protons mais de nombre de neutrons différent (nombre de nucléons A).

Exemple :

${}^{235}_{98}U$ et ${}^{238}_{98}U$ sont deux isotopes du même élément de l'uranium

Remarque :

L'abondance naturelle θ_i des isotopes est le pourcentage en masse de chacun des isotopes m_i dans le mélange naturel de masse m avec : $m = \sum m_i \theta_i$

1.5. Le diagramme (N, Z) : Diagramme de Segré :

a. Activité

Certains noyaux conservent toujours la même structure, on dit que ses noyaux sont stables. Et il y a des noyaux qui se transforment spontanément à d'autres noyaux après l'émission de rayonnement, on dit que ses noyaux sont instables ou noyaux radioactifs. Le diagramme Segré montre l'emplacement des noyaux stables et des noyaux radioactifs. De sorte que chaque noyau est représenté par un petit carré d'abscisse Z le nombre de protons et d'ordonnée N le nombre de neutrons. La zone centrale rouge s'appelle la vallée de stabilité et comprend les noyaux stables.

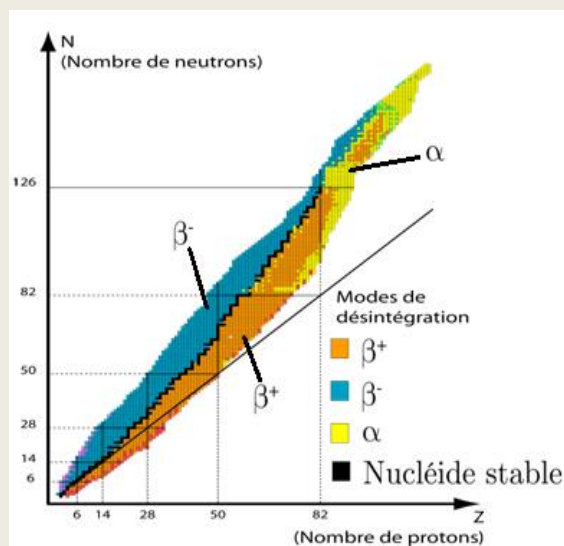
a- Rappeler la signification de la lettre A qui est mentionnée dans la représentation A_ZX , et donner la relation entre A et Z et N.

b- Quels sont les caractéristiques des noyaux stables de Z < 20 ? déduire que le rapport A/Z ≈ 2.

c- Comment devenir le rapport A/Z pour les noyaux lourds stables c-à-d pour les noyaux de Z > 20 ?

d- La zone de couleur bleue comprend les noyaux de radioactivité β⁻. Comparer Z et N pour cette zone. Que concluez-vous ?

e- Comparer Z et N pour la zone de couleur jaune. Que concluez-vous ?



f- Les noyaux lourds ($A > 200$, $Z > 82$) sont-ils stables ? Si la réponse est non, quel est leur type de radioactivité ?

Correction :

a- La lettre A indique le nombre de masse et $A = Z + N$

b- Pour les noyaux stables de $Z < 20$ on a $Z = N$ et on sait que $A = Z + N = Z + Z = 2Z$ donc $A/Z \approx 2$

c- Pour les noyaux de $Z > 70$, on a $N > Z$ alors $A > Z + Z$ c-à-d $A > 2Z$ donc $A/Z > 2$

d- Pour cette zone qui se trouve au-dessus de la vallée de stabilité, on a $N > Z$, on conclut que ces noyaux doivent perdre un ou plusieurs neutrons pour se stabiliser

e- Pour cette zone qui se trouve au-dessous de la vallée de stabilité, on a $N < Z$, on conclut que ces noyaux doivent perdre un ou plusieurs protons pour sa stabilité

f- Ces noyaux sont instables et leur radioactivité est α où ils doivent perdre des protons et des neutrons pour être stables

b. Conclusions :

- ✓ Différents isotopes de même élément chimique se trouvent sur la même droite parallèle à l'axe des ordonnées.
- ✓ Pour les nucléides de $Z \leq 20$: la vallée de stabilité se situe au voisinage du premier bissectrice ($Z = N$), c-à-d que les nucléides légers stables possèdent de protons que de neutrons.
- ✓ Pour les nucléides de $Z > 20$: la vallée de stabilité se déplace au-dessus du premier bissectrice quand la valeur de Z augmente c-à-d $N > Z$. Donc la stabilité du noyau n'est assurée que s'il contient plus de neutrons que de protons
- ✓ Les noyaux lourds ($A > 200$, $Z > 82$) : ils doivent perdre des protons et des neutrons pour être stables

2. Radioactivité

2.1. Définition

La radioactivité est une transformation nucléaire naturelle au cours de laquelle un noyau père A_ZX instable (radioactif) se désintègre (se transforme) en un noyau fils ${}^{A'}_{Z'}Y$ plus stable avec une émission d'une ou plusieurs particules notées (α , β^- , β^+) et souvent d'un rayonnement noté γ .

2.2. Propriété de la radioactivité

Les désintégrations radioactives sont :

- ✓ **Aléatoires** : il est impossible de prévoir l'instant de la désintégration
- ✓ **Spontanées** : elles se déclenchent sans intervention extérieure
- ✓ **Inévitables** : le noyau se désintègre tôt ou tard, il est impossible d'empêcher le processus
- ✓ **Indépendantes de la combinaison chimique** dans laquelle est engagé le noyau radioactif
- ✓ **Indépendantes des paramètres de pression et de température** contrairement aux réactions chimiques.

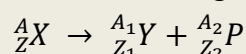
2.3. Lois de conservations (Lois de Soddy)

Les réactions nucléaires obéissent à **deux lois de conservations (lois de conservations de Soddy)**

- ✓ Conservation du nombre de nucléons A
- ✓ Conservation de la charge électrique Z

Lors d'une transformation nucléaire, le nombre de nucléons A et le nombre de charges électriques Z, se conservent.

Appliquons les lois de Soddy à l'équation générale de désintégration suivante :



avec : X : le noyau père ; Y : le noyau fils et P : la particule émise par la désintégration

- Conservation du nombre de nucléons A : $A = A_1 + A_2$
- Conservation de la charge électrique Z : $Z = Z_1 + Z_2$

2.4. Les différents types de radioactivité

a- Radioactivité α (Activité)

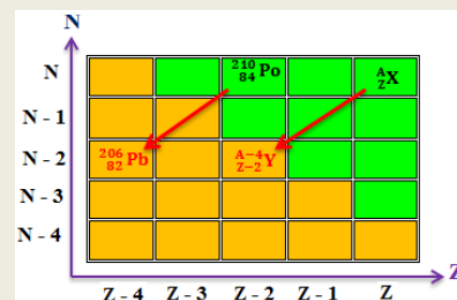
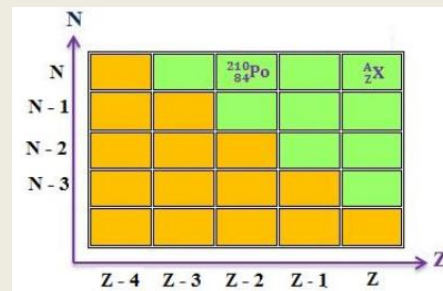
Des noyaux sont dits radioactifs α s'ils émettent des noyaux d'hélium



1. Définir la radioactivité α
2. Écrire L'équation de la désintégration en appliquant les lois de conservation
3. Sur le diagramme de Segré , Tracer une flèche symbolisant de cette transformation en indiquant la position du noyau fils
4. Polonium 210, ${}^{210}_{84}\text{Po}$ se désintègre spontanément par émission pour donner un noyau de Plomb Pb dans son état fondamental. Écrire l'équation de la réaction nucléaire et donner le schéma de désintégration

Correction

1. la radioactivité α est une transformation nucléaire spontanée au cours de laquelle un noyau père A_ZX instable (radioactif) se désintègre en un noyau fils ${}^{A-4}_{Z-2}Y$ plus stable avec émission d'un noyau d'Hélium ${}^4_2\text{He}$ appelé particule α
2. L'équation générale de la désintégration α est : ${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2\text{He}$
3. Dans le diagramme de Segré , le noyau fils ${}^{A-4}_{Z-2}Y$ est décalé de deux cases vers le bas et de deux cases vers la gauche par rapport à un noyau père A_ZX ; (voir figure ci-contre)
4. Le Polonium 210 est radioactif α , L'équation de sa désintégration s'écrit : ${}^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{206}_{82}\text{Pb} + {}^4_2\text{He}$



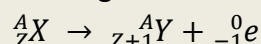
b- Radioactivité β^- (Activité)

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

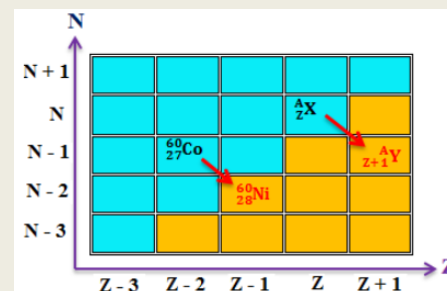
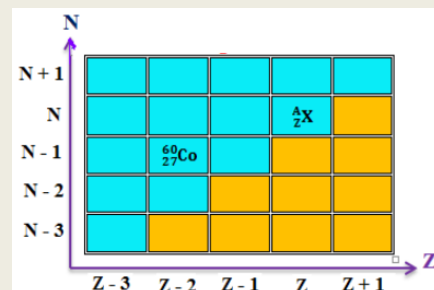
1. Définir la radioactivité β^-
2. Écrire L'équation de la désintégration β^- en appliquant les lois de conservation
3. Sur le diagramme de Segré , Tracer une flèche symbolisant cette transformation en indiquant la position du noyau fils
4. Cobalt 60 , noté , se désintègre spontanément par émission de β^- pour donner un noyau de Nickel ${}^{60}_{28}\text{Ni}$ stable. Écrire l'équation de la réaction nucléaire et donner le schéma de désintégration
5. Comparer les nombres Z , N et A du noyau père à ceux du noyau fils, que remarquez-vous ? que peut-on déduire ?

Correction

1. la radioactivité β^- est une transformation nucléaire spontanée au cours de laquelle un noyau père A_ZX instable se désintègre en un noyau fils ${}^A_{Z+1}Y$ plus stable avec émission d'un électron ${}^0_{-1}e$ appelé particule β^-
2. l'équation générale de la désintégration est :



3. Dans le diagramme de Segré , le noyau fils ${}^A_{Z+1}Y$ est décalé d'une case vers le bas et d'une case vers la droite par rapport à un noyau père A_ZX (voir le diagramme ci-contre).
4. Le Cobalt 60 est radioactif β^- , L'équation de sa désintégration s'écrit : ${}^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni} + {}^0_{-1}e$



(voir le schéma ci-dessus)

5. Lors de la désintégration β^- , on remarque que le nombre de protons Z augmente d'une unité, le nombre de neutrons N diminue d'une unité alors que le nombre de nucléons A reste constant, ceci ne peut être réalisé que si un neutron ${}_0^1n$ s'est transformé en proton ${}_1^1p$. Pendant cette transformation, un électron ${}_{-1}^0e$ est éjecté.

Donc la radioactivité β^- est une transformation nucléaire spontanée, au cours de laquelle, le neutron se transforme en proton avec émission d'un électron selon l'équation suivante : ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e$

c- Radioactivité β^+ (Activité)

Des noyaux sont dits radioactifs β^+ s'ils émettent des électrons. La radioactivité β^+ ne concerne que les noyaux artificiels c'est-à-dire préparés par l'homme.

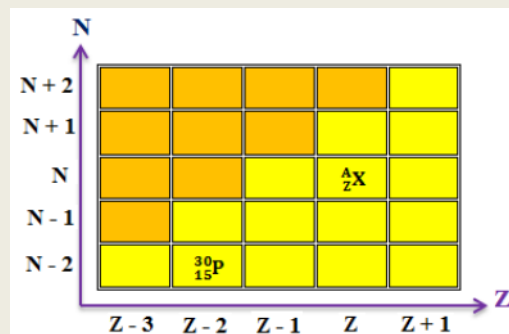
1. Définir la radioactivité β^+

2. Écrire l'équation de la désintégration β^+ en appliquant les lois de conservation

3. Sur le diagramme de Segré, Tracer une flèche symbolisant cette transformation en indiquant la position du noyau fils

4. Phosphore 30 (artificiel), noté ${}_{15}^{30}P$, se désintègre spontanément par émission β^+ pour donner un noyau de Silicium 30 (${}_{14}^{30}Si$) stable. Écrire l'équation de la réaction nucléaire et donner le schéma de désintégration

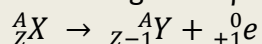
5. Comparer les nombres Z , N et A du noyau père à ceux du noyau fils, que remarquez-vous ? et que peut-on déduire ?



Correction :

1. la radioactivité β^+ est une transformation nucléaire spontanée au cours de laquelle un noyau père ${}_Z^AX$ instable se désintègre en un noyau fils ${}_{Z-1}^AY$ plus stable avec émission d'un positron ${}_{+1}^0e$ appelé particule β^+

2. L'équation générale de la désintégration β^+ est :

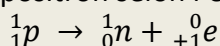


3. Dans le diagramme de Segré, le noyau fils ${}_{Z-1}^AY$ est décalé d'une case vers le haut et d'une case vers la gauche par rapport à un noyau père ${}_Z^AX$ (voir le diagramme ci-contre)

4. Le Phosphore 30 est radioactif β^+ , L'équation de sa désintégration s'écrit : ${}_{15}^{30}P \rightarrow {}_{14}^{30}Si + {}_{+1}^0e$

5. Lors de la désintégration, on remarque que le nombre de protons Z diminue d'une unité, le nombre de neutrons N augmente d'une unité alors que le nombre de nucléons A reste constant, ceci ne peut être réalisé que si un proton ${}_1^1p$ s'est transformé en neutron : ${}_1^1p \rightarrow {}_0^1n$. Pendant cette transformation.

Donc la radioactivité β^+ est une transformation nucléaire spontanée, au cours de laquelle, le proton se transforme en neutron avec émission d'un positron selon l'équation suivante :



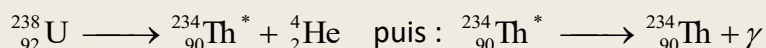
d- Désexcitation γ

Si le noyau fils issu d'une désintégration radioactive α ou β est dans un état excité, l'excédent d'énergie est libéré sous forme de rayonnement électromagnétique γ de très haute fréquence (de l'ordre de 10^{20} Hz).

Remarque : Un noyau dans un état excité est représenté avec un astérisque en exposant à droite

Équation générale : ${}_Z^AX^* \longrightarrow {}_Z^AX + \gamma$

Exemple : émission γ associée à la radioactivité α

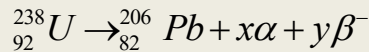


1- Familles radioactives

La radioactivité entraîne la transformation d'un nucléide en un autre nucléide. Si ce dernier est lui-même radioactif, il se transforme à son tour, et ainsi de suite jusqu'à ce que le nucléide obtenu ne soit plus radioactif.

L'ensemble des nucléides obtenus à partir d'un même noyau père est appelé famille radioactive.

Exemple : $^{238}_{92}\text{U}$ radioactif se désintègre par une série d'émission α et β pour aboutir à l'isotope stable non radioactif $^{206}_{82}\text{Pb}$:

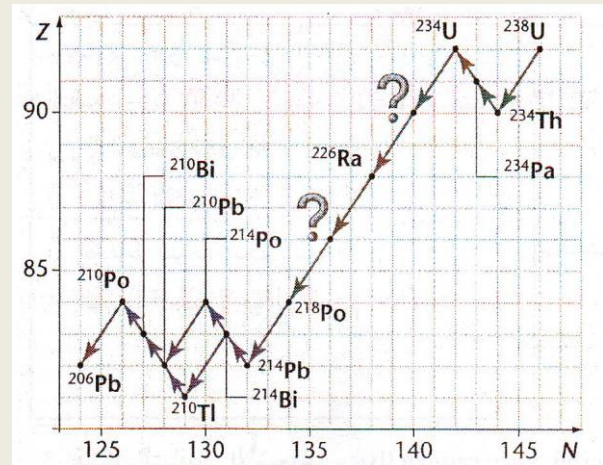


CORRECTION :

Loi de conservation de Soddy :

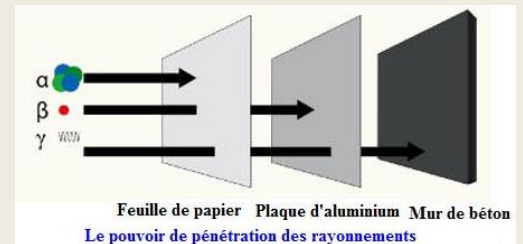
$$\begin{cases} 92 = 82 + 2x + y \cdot (-1) \\ 238 = 206 + 4x + y \cdot 0 \end{cases} \quad \text{Alors} \quad \begin{cases} 92 = 82 + 2 \cdot 8 + y \cdot (-1) \\ x = 8 \end{cases} \quad \text{donc} \quad \begin{cases} y = 4 \\ x = 8 \end{cases}$$

Remarque : Il existe 4 familles radioactives : celle du Neptunium Np, celle de l'uranium U, celle de l'actinium Ac et celle du thorium Th



2- Le pouvoir de pénétration des rayonnements

- ✓ Particules α : Pénétration très faible dans l'air. Une simple feuille de papier est suffisante pour arrêter les noyaux d'hélium.
- ✓ Particules β : Pénétration faible. Parcourent quelques mètres dans l'air. Une plaque d'aluminium de quelques millimètres peut les arrêter.
- ✓ Rayonnements γ : Pénétration très grande : plusieurs centaines de mètres dans l'air. Une forte épaisseur de béton ou de plomb peut les arrêter



IV- Décroissance radioactive

1- Constante de désintégration

Soit :

- N_0 le nombre de noyaux présents à $t = 0$,
- $N(t)$ le nombre de noyaux présents à la date t .
- Pendant une durée dt très brève, un certain nombre de noyaux radioactifs se sont désintégrés (disparus). Soit $N(t) + dN(t)$ le nombre de noyaux radioactifs non désintégrés (Restés) à la date $t + dt$ (avec $dN(t) < 0$ car N diminue).
- La variation du nombre moyen de noyaux désintégrés pendant la durée dt est :

$$N_{t+dt} - N_t = (N(t) + dN(t)) - N(t) = dN(t)$$

Cette variation du nombre de noyaux désintégrés est négative et proportionnel au nombre de noyaux N présents à l'instant t et à la durée dt .

On traduit cela par la relation $dN(t) = -\lambda \cdot N(t) \cdot dt$

Avec : λ est la constante radioactive, elle dépend de la nature du noyau radioactif, c'est la proportion de noyaux qui se désintègre par unité de temps.

Une constante radioactive λ est l'inverse d'un temps, elle s'exprime en s^{-1} .

2- Loi de décroissance radioactive

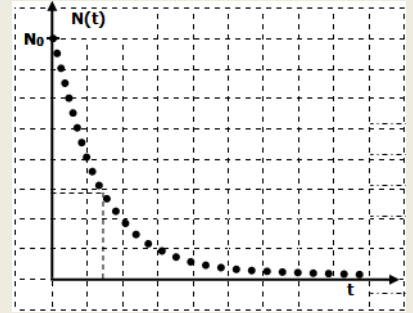
- On a $dN(t) = -\lambda \cdot N(t) \cdot dt$ que l'on peut également l'écrire : $\frac{dN(t)}{dt} + \lambda \cdot N(t) = 0$ donc $N(t)$ satisfait à une équation différentielle du premier ordre.

- La solution de l'équation différentielle est La loi de décroissance radioactive qui s'écrit :

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

Avec :

$\begin{cases} N_0 \text{ est le nombre de noyaux initialement présents dans l'échantillon.} \\ N(t) : \text{ le nombre de noyaux encore présents à la date } t. \end{cases}$

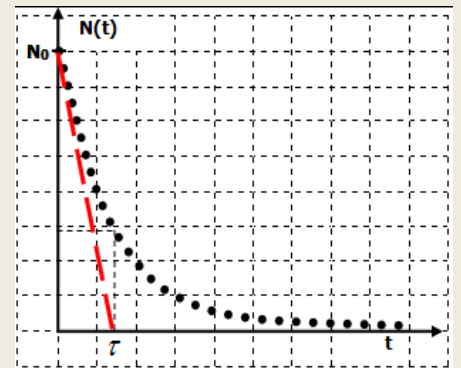


3- Constante de temps

La constante de temps caractéristique, notée τ d'un élément radioactif est l'inverse de la constante radioactive. Elle s'exprime donc en (s) : $\tau = \frac{1}{\lambda}$

Donc la tangente à la courbe, à la date $t=0$, a pour pente $-\frac{N_0}{\tau}$ et coupe l'axe des abscisses en $t = \tau$.

De plus, à la date $t = \tau$, $N(\tau) = N_0 \cdot e^{-\frac{\tau}{\tau}} = N_0 \cdot e^{-1} = 0,37 N_0$



4- Temps de demi-vie $t_{1/2}$

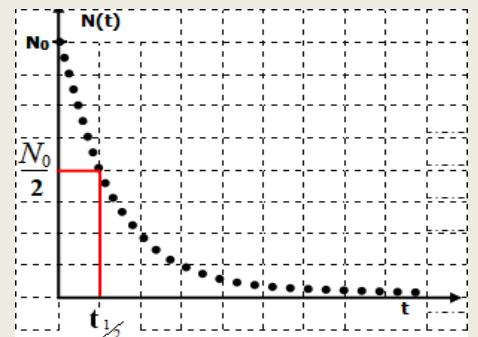
La demi-vie $t_{1/2}$ d'un échantillon de noyaux radioactifs est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux initialement présents se sont désintégrés.

$$N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$$

La demi-vie est une constante caractéristique d'un élément radioactif.

$$N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t_{1/2}} \Leftrightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda \cdot t_{1/2}}$$

$$\ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\ln(2) = -\lambda \cdot t_{1/2} \Leftrightarrow \text{on obtient : } \lambda = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$$



5- Activité d'un échantillon radioactif

a- Définition

L'activité $a(t)$ d'une source contenant N noyaux radioactifs à la date t est égale au nombre de noyaux qui se désintègrent chaque seconde.

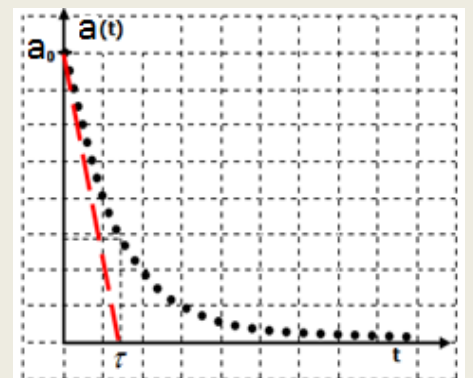
$$a(t) = -\frac{dN}{dt}$$

⇒ L'activité se mesure en becquerel Bq, (un becquerel correspond à une désintégration par seconde).

⇒ C'est une unité très petite, aussi on utilise souvent des multiples :

$$1\text{MBq} = 10^6\text{Bq}$$

⇒ Autre unité, Curie : $1\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{Bq}$



b- Évolution de l'activité

On a : $a(t) = -\frac{dN}{dt} = -(-\lambda \cdot N(t)) = \lambda \cdot N(t) = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} = a_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \Leftrightarrow a(t) = a_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$

avec $a_0 = \lambda \cdot N_0$ activité initiale de l'échantillon.

⇒ On peut également exprimer l'activité en fonction de la demi-vie :

$$a(t) = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} \cdot N(t) \Leftrightarrow a_0 = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} \cdot N_0$$

- si $t = \tau$ alors $a(\tau) = 0,37 \cdot a_0$

- si $t = t_{1/2}$ alors $a(t_{1/2}) = \frac{a_0}{2}$

Exemple

Source	Activité en Bq
1 L l'eau de mer (^{40}K)	10
1 L de lait (^{40}K)	80
1 kg de poisson (^{40}K)	100
1 homme de 70 kg (^{40}K et ^{14}C)	10 000

Remarque : La radioactivité est détectée avec un appareil « Geiger ».

V- Application de la radioactivité à la datation :

1- Principe

Pour les objets issus du monde vivant, l'échange dynamique entre certains organismes vivants et leur milieu extérieur (ex : le carbone 14, le potassium 40...) maintient constant le nombre de noyaux radioactifs dans l'organisme. À leur mort, les échanges n'ont plus lieu et on observe une décroissance qui suit la loi exponentielle.

Remarque : Il faut tout d'abord estimer l'âge de l'échantillon à dater, pour choisir un élément radioactif dont la demi-vie est en rapport avec cet âge. Car au bout de $10 \times t_{1/2}$, on considère que les noyaux radioactifs sont tous désintégrés.

2- Datation au carbone 14

⇒ L'isotope radioactif du carbone, le « carbone 14 » noté ^{14}C est formé continuellement dans la haute atmosphère par réaction nucléaire de neutron cosmiques avec des noyaux d'azote.

⇒ La proportion de carbone 14 par rapport au carbone 12 est identique dans les tissus vivants (échange de carbone par respiration avec le milieu extérieur) :

- Pendant toute leur vie, la proportion de carbone 14 reste constante dans les tissus vivants.
- A leur mort, la quantité de carbone 14 décroît par radioactivité β^- .
- Il est alors possible de déterminer la date de la mort en mesurant la quantité de carbone 14 restant dans l'échantillon à étudier et en le comparant à la quantité de carbone 14 présent dans un échantillon de même nature, mais vivant.

On a $a(t) = a_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ dans ce cas : $\frac{a_{\text{mort}}}{a_{\text{vivant}}} = e^{-\lambda \cdot t}$

donc l'âge est donné par la relation : $t = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{a_{\text{mort}}}{a_{\text{vivant}}}\right) = -\frac{t_{1/2}}{\ln(2)} \cdot \ln\left(\frac{a_{\text{mort}}}{a_{\text{vivant}}}\right)$

3- Comment se protéger de chaque type de rayonnement ?

⇒ Les rayons alpha, très peu pénétrants, sont arrêtés par une feuille de papier ou par les couches superficielles de la peau.

⇒ Les rayons bêta moyennement pénétrants peuvent traverser les couches superficielles de la peau mais sont arrêtés par quelques millimètres de métal.

⇒ Les rayons gamma sont très énergétiques et donc très pénétrants: pour arrêter certains d'entre eux, plusieurs dizaines de centimètres de plomb ou plusieurs mètres de béton sont nécessaires.