Leçon N°4 :
Décroissance radioactive

Introduction

La radioactivité est un phénomène naturel aléatoire qui affecte certains noyaux, et qui permet de dater certaines roche o d'estimer la date de la mort de certains être vivants, telles que les momies pharaonique, par exemple.

- **Quel est le principe de cette datation ?**
- **Comment la réaliser ?**

I. Stabilité et instabilité des noyaux

1. Composition du noyau

- L'atome est constitué d'un *noyau* entouré par des *électrons* sous forme d'un nuage électronique.
- Le noyau est composé d'un ensemble des *protons* et des *neutrons* qui sont les *nucléons* :
- On note le nombre des protons par le symbole , qui est appelé le *numéro atomique*, ou le *nombre de charge*, car il permet de calculer la charge du noyau :
- On note le nombre des nucléons par le symbole , qui est appelé le *nombre de masse*, car il permet de calculer la masse de l'atome :

	Proton	**Neutron**
La masse (kg)		
La charge (C)		0
Le découvreur	*Ernest Rutherford*	*James Chadwick*
L'année de découverte	*1910*	*1932*

- On note le nombre des neutrons par le symbole N, il est exprimé par :
- La représentation symbolique du noyau d'un atome est la suivante :

Exemple :

: C'est un noyau de cuivre qui contient :

- 29 protons.
- 63 – 29 = 34 neutrons.

2. Le nucléide

On appelle un **nucléide**, l'ensemble des *noyaux identiques* ayant *même* A et *même* Z.

Exemples :

- : est le nucléide de l'élément de chlore.
- et : sont deux nucléides différents de l'élément de carbone, malgré qu'ils ont même nombre de proton.

3. Les isotopes

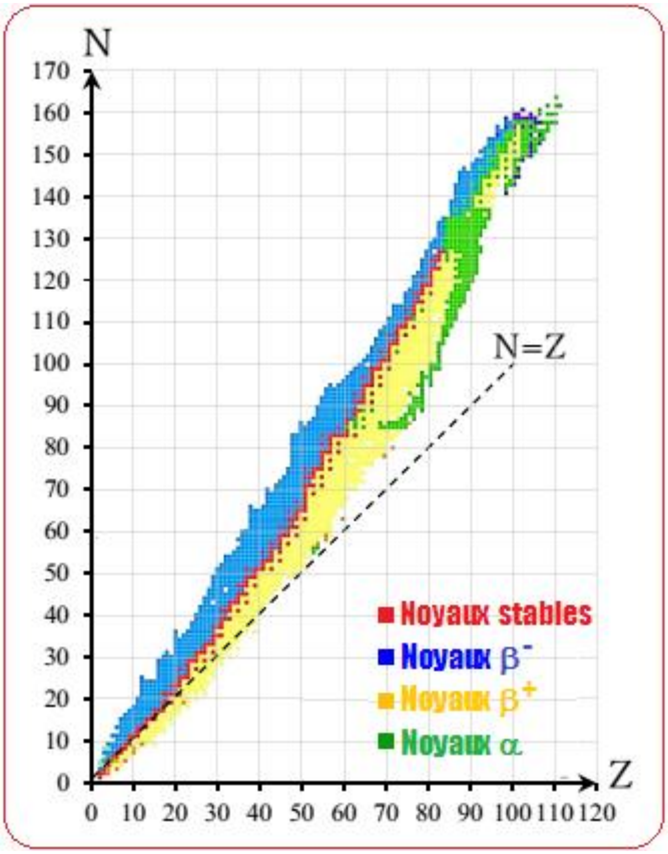
Les **isotopes** sont des noyaux qui ont *même numéro atomique* $\boldsymbol{Z}$ mais des *nombres de nucléons* $\boldsymbol{A}$ *différents*.

Exemples :

- Pour l'élément de l'Uranium, il existe plusieurs isotopes dont ceux-ci : ${}^{235}_{92}U$ *et* ${}^{238}_{92}U$.
- Pour l'élément du Carbone, il existe plusieurs isotopes dont ceux-ci : ${}^{12}_{6}C$ *et* ${}^{14}_{6}C$.

4. Diagramme de Segré – Diagramme (N, Z)

- Dans la nature, il existe des noyaux qui sont *stables*, et d'autres noyaux qui sont *instables*, ces derniers sont appelés *noyaux radioactifs*.
- Le **diagramme de Segré** contient tous les *noyaux stables* et *les noyaux radioactifs* (instables) existants répartis de la façon suivante : le nombre de neutrons N en abscisse et le nombre de protons Z en ordonnée : c'est le **diagramme (N, Z)**.
- Le **diagramme de Segré** comporte plusieurs zones :



❶ **Zone centrale rouge** : elle s'appelle la vallée de stabilité et comprend les noyaux stables :

- Pour $\mathbf{Z \leq 20}$: Elle se situe au voisinage du premier médiateur ($Z = N$), ç-à-d on a : $\boldsymbol{Z = N}$ pour les noyaux stables légers.
- Pour $\mathbf{Z > 20}$: Elle se situe au-dessus du premier médiateur quand la valeur de $\boldsymbol{Z}$ augmente, ç-à-d on a : $\boldsymbol{N > Z}$ pour les noyaux stables.

❷ **Zone $\boldsymbol{\beta^-}$** : Elle se situe *au-dessus* de la vallée de stabilité.

❸ **Zone $\boldsymbol{\beta^+}$** : Elle se situe *au-dessous* de la vallée de stabilité.

❹ **Zone $\boldsymbol{\alpha}$** : Elle comporte les *nucléides lourds*.

II. La radioactivité

1. Définition

La **radioactivité** est une transformation nucléaire *naturelle*, *spontanée*, et *aléatoire*, dans laquelle un noyau *radioactif* (instable) se transforme en d'autre noyau *plus stable* en émettant simultanément un ou plusieurs particules de matière.

Quelques nucléides radioactifs : $\boldsymbol{{}^{14}_{6}C}$; $\boldsymbol{{}^{238}_{92}U}$; $\boldsymbol{{}^{60}_{27}Co}$; $\boldsymbol{{}^{210}_{84}Po}$

Remarque :

Dans le cas général, pour décrire une transformation nucléaire, on utilise l'équation suivante :

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

$\boldsymbol{{}^{A}_{Z}X}$: Noyau radioactif, ou noyau père.

$\boldsymbol{{}^{A_1}_{Z_1}Y}$: Noyau plus stable, ou noyau fils.

$\boldsymbol{{}^{A_2}_{Z_2}P}$: Particule émise.

2. Lois de conservation (Lois de Soddy)

Lors d'une transformation nucléaire, il y a conservation du nombre de masse $\boldsymbol{A}$ et du nombre de charge $\boldsymbol{Z}$.

Soit une transformation nucléaire, où un noyau père $\boldsymbol{X}$ donne naissance à un noyau fils $\boldsymbol{Y}$ en émettant une particule chargée $\boldsymbol{P}$:

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

Selon les lois de Soddy : $\begin{cases} \boldsymbol{A = A_1 + A_2} \\ \boldsymbol{Z = Z_1 + Z_2} \end{cases}$

<u>*Exemple :*</u>

On considère l'équation suivante :

$$\boldsymbol{{}_{84}^{210}Po \rightarrow {}_{82}^{a}Pb + {}_{b}^{4}He}$$

Déterminer a et b.

<u>*Réponse :*</u>

Selon les lois de Soddy : $\begin{cases} 210 = a + 4 \\ 84 = 82 + b \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a = 210 - 4 \\ b = 84 - 82 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a = 206 \\ b = 2 \end{cases}$

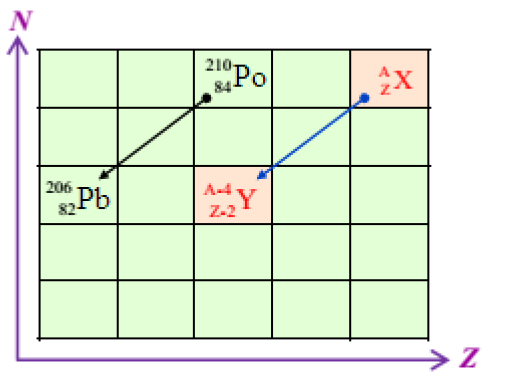
3. Les radioactivités α, β, et γ

a. La radioactivité $\boldsymbol{\alpha}$

La radioactivité $\boldsymbol{\alpha}$: est une désintégration nucléaire naturelle spontanée correspond aux noyaux lourds ($\boldsymbol{A > 200}$), dans laquelle un *noyau père* $\boldsymbol{{}_{Z}^{A}X}$ se transforme en un *noyau fils* $\boldsymbol{{}_{Z-2}^{A-4}Y}$ accompagnée de l'émission d'un *noyau d'Hélium* $\boldsymbol{{}_{2}^{4}He}$ appelé *particule* $\boldsymbol{\alpha}$, selon l'équation suivante :

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

<u>*Exemple :*</u> $\boldsymbol{{}_{84}^{210}Po \rightarrow {}_{82}^{206}Pb + {}_{2}^{4}He}$



Désintégration α dans le diagramme (N, Z)

b. La radioactivité $\boldsymbol{\beta^-}$

La radioactivité $\boldsymbol{\beta^-}$: est une désintégration nucléaire naturelle spontanée, dans laquelle un *noyau père* $\boldsymbol{{}_{Z}^{A}X}$ se transforme en un *noyau fils* $\boldsymbol{{}_{Z+1}^{A}Y}$ accompagnée de l'émission d'un *électron* $\boldsymbol{{}_{-1}^{0}e}$ appelé *particule* $\boldsymbol{\beta^-}$, selon l'équation suivante :

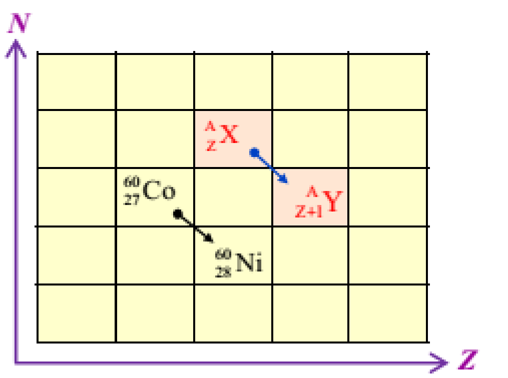
$$\boldsymbol{{}_{Z}^{A}X \rightarrow {}_{Z+1}^{A}Y + {}_{-1}^{0}e}$$

<u>*Exemple :*</u> $\boldsymbol{{}_{27}^{60}Co \rightarrow {}_{28}^{60}Ni + {}_{-1}^{0}e}$

<u>*Remarque :*</u>

Lors de la transformation $\boldsymbol{\beta^-}$, un *neutron* se transforme en *proton* :

$$\boldsymbol{{}_{0}^{1}n \rightarrow {}_{1}^{1}p + {}_{-1}^{0}e}$$



Désintégration β⁻ dans le diagramme (N, Z)

c. La radioactivité $\boldsymbol{\beta^+}$

La radioactivité $\boldsymbol{\beta^+}$: est une désintégration nucléaire naturelle spontanée, dans laquelle un *noyau père* $\boldsymbol{{}_{Z}^{A}X}$ se transforme en un *noyau fils* $\boldsymbol{{}_{Z-1}^{A}Y}$ accompagnée de l'émission d'un *positron* $\boldsymbol{{}_{+1}^{0}e}$ appelé *particule* $\boldsymbol{\beta^+}$, selon l'équation suivante :

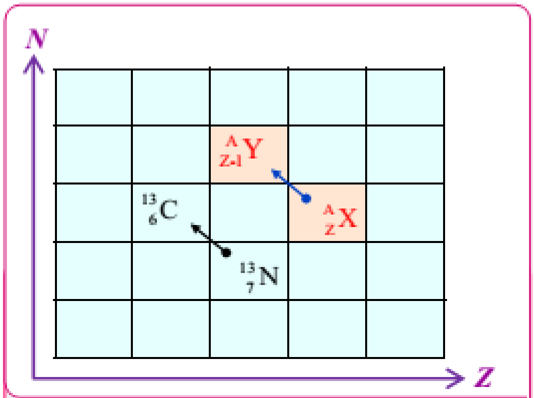
$$_{Z}^{A}X \rightarrow {}_{Z-1}^{\ A}Y + {}_{+1}^{\ 0}e$$

<u>*Exemple :*</u> $\ {}_{7}^{13}N \rightarrow {}_{6}^{13}C + {}_{+1}^{\ 0}e$

<u>*Remarque :*</u>

Lors de la transformation $\boldsymbol{\beta^+}$, un *proton* se transforme en *neutron* :

$$_{1}^{1}p \rightarrow {}_{0}^{1}n + {}_{+1}^{\ 0}e$$



Désintégration β^+ dans le diagramme (N, Z)

d. La radioactivité γ

Le rayonnement $\boldsymbol{\gamma}$: des ondes électromagnétiques de très grande énergie, lors des désintégrations $\boldsymbol{\alpha}$, $\boldsymbol{\beta^-}$, et $\boldsymbol{\beta^+}$, 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 $\boldsymbol{\gamma}$ selon l'équation suivante :

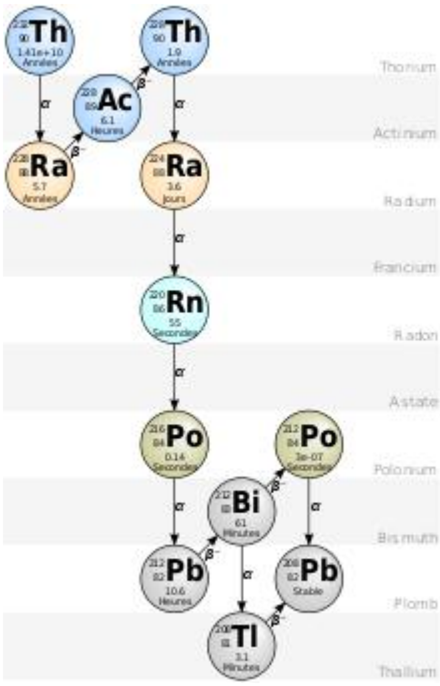
$$_{Z}^{A}X \rightarrow {}_{Z}^{A}X^{*} + \gamma$$

<u>*Exemple :*</u> émission $\boldsymbol{\gamma}$ associée à la radioactivité $\boldsymbol{\alpha}$

$$_{92}^{238}U \rightarrow {}_{90}^{234}Th^{*} + {}_{2}^{4}He$$

Puis : $\quad {}_{90}^{234}Th^{*} \rightarrow {}_{90}^{234}Th + \gamma$

4. Famille radioactive



La radioactivité entraîne la transformation d'un nucléide radioactif en un autre nucléide, si ce dernier est instable, il se transforme aussi en un autre nucléide, et ainsi de suite jusqu'à ce que le nucléide obtenu ne soit plus radioactif.

La **famille radioactive** est donc l'ensemble des nucléides obtenus à partir du même noyau père. Il n'y a que quatre familles radioactives :

$$_{92}^{238}U \quad ; \quad {}_{93}^{237}Np \quad ; \quad {}_{90}^{232}Th \quad ; \quad {}_{92}^{235}U.$$

III. Loi de décroissance radioactive

1. Loi de décroissance radioactive

La **radioactivité** est un phénomène *spontané aléatoire*, ç-à-d on ne peut pas connaitre ou prévoir l'instant où il se produit.

Soit un échantillon radioactif contenant $\boldsymbol{N_0}$ noyaux radioactifs à l'instant $\boldsymbol{t_0 = 0}$, le nombre de noyaux *non désintégrés* de cet échantillon à un instant $\boldsymbol{t > 0}$ suit une loi appelée *loi de décroissance radioactive* :

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

$\boldsymbol{N(t)}$: Le nombre de noyaux radioactifs *restants* à l'instant $\boldsymbol{t}$.
$\boldsymbol{N_0}$: Le nombre de noyaux radioactifs *initiaux* à l'instant $\boldsymbol{t_0 = 0}$.
$\boldsymbol{\lambda}$: La *constante radioactive*, elle caractérise le nucléide radioactif étudié.

Quelques propriétés de la fonction exponentielle "e^x" et népérienne "ln(x)"

$e^a . e^b = e^{a+b} \quad , \quad \dfrac{e^a}{e^b} = e^{a-b}$

$e^b = a \Leftrightarrow b = \ln a \quad ; \quad a \succ 0$

$e^0 = 1 \quad , \quad \ln 1 = 0 \quad , \quad e^{-\infty} = 0$

$(a,b) > 0 : \ \ln(a.b) = \ln a + \ln b$

$(a,b) > 0 : \ \ln \dfrac{a}{b} = \ln a - \ln b$

$\ln a^n = n.\ln a \quad , \quad \ln \dfrac{a}{b} = -\ln \dfrac{b}{a}$

<u>**Dérivée :**</u> $(a.e^{-\lambda.x})' = -a.\lambda.e^{-\lambda.x}$

Remarque :

L'équation dimensionnelle de la constante $\boldsymbol{\lambda}$:

On a : $$N(t) = N_0 . e^{-\lambda . t}$$

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

$\Rightarrow$ $$-\lambda . t = ln \frac{N}{N_0}$$

$\Rightarrow$ $$\lambda . t = ln \frac{N_0}{N}$$

$\Rightarrow$ $$\lambda = ln \frac{N_0}{N} \times \frac{1}{t}$$

Donc :

$$[\lambda] = \left[ln \frac{N_0}{N} \right] \times \frac{1}{[t]} = 1 \times \frac{1}{[t]} = \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{T}}$$

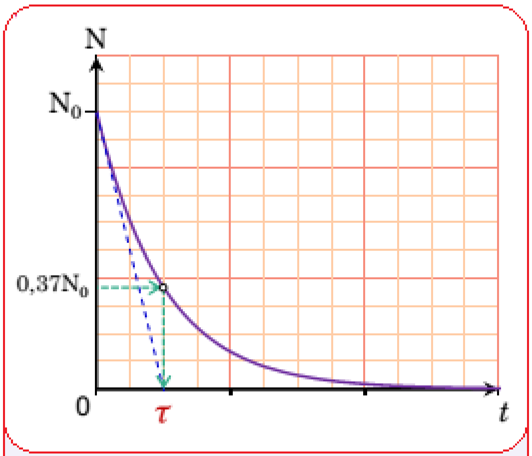
La dimension de $\boldsymbol{\lambda}$ est l'inverse d'un temps, elle s'exprime donc en ($\boldsymbol{s^{-1}}$).

2. Constante du temps d'un échantillon radioactif

La constante de temps $\boldsymbol{\tau}$ d'un nucléide radioactif est l'inverse de la constante radioactive $\boldsymbol{\lambda}$:

$$\boldsymbol{\tau = \frac{1}{\lambda}}$$

Elle s'exprime donc en seconde ($\boldsymbol{s}$).



Décroissance de N(t) en fonction de t

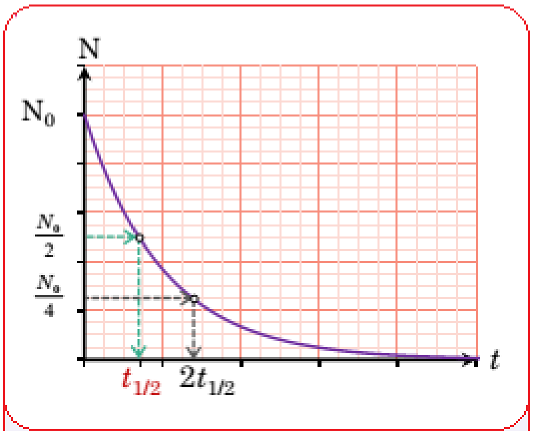
- $\boldsymbol{\tau}$: Représente le *point d'intersection* de la tangente de la courbe à l'instant $\boldsymbol{t_0 = 0}$ avec l'axe de temps.
- De plus, à la date $\boldsymbol{t = \tau}$:

$$N(\tau) = N_0 . e^{-\lambda . \tau} = N_0 . e^{-\frac{\tau}{\tau}} = N_0 . e^{-1} = 0{,}37 N_0$$

$\boldsymbol{\tau}$: Correspond à la durée nécessaire pour la désintégration de $\boldsymbol{63\%}$ du nombre initiale $\boldsymbol{N_0}$ de l'échantillon radioactif.

3. La demi-vie $t_{1/2}$ d'un échantillon radioactif

La demi-vie $\boldsymbol{t_{1/2}}$ d'un échantillon radioactif est la durée au bout de laquelle la *moitié* des noyaux initialement présents dans cet échantillon *se désintègrent*.



Détermination graphique de $\mathbf{t_{1/2}}$

- La demi-vie est une *constante caractéristique* de l'élément radioactif.
- A $\boldsymbol{t = t_{1/2}}$: $$N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2} = N_0 . e^{-\lambda . t_{1/2}}$$

$\Rightarrow$ $$e^{-\lambda . t_{1/2}} = \frac{1}{2}$$

$\Rightarrow$ $$-\lambda . t_{1/2} = ln \frac{1}{2}$$

$\Rightarrow$ $$\lambda . t_{1/2} = ln\, 2$$

Donc :

$$\boldsymbol{t_{1/2} = \frac{ln\, 2}{\lambda} = \tau \times ln\, 2}$$

4. Activité d'un échantillon radioactif

a. Définition

L'activité $\boldsymbol{a(t)}$ d'un échantillon contenant $\boldsymbol{N}$ noyaux radioactifs à la date $\boldsymbol{t}$ correspond au nombre de noyaux qui se désintègrent à chaque seconde. Elle est exprimée par la relation :

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

Remarque :

Le terme $\boldsymbol{\frac{dN}{dt}}$ représente la dérivée de la fonction $\boldsymbol{N(t)}$ par rapport au temps $\boldsymbol{t}$.

b. Expression de l'activité $\boldsymbol{a(t)}$

On a : $$N(t) = N_0.e^{-\lambda.t}$$

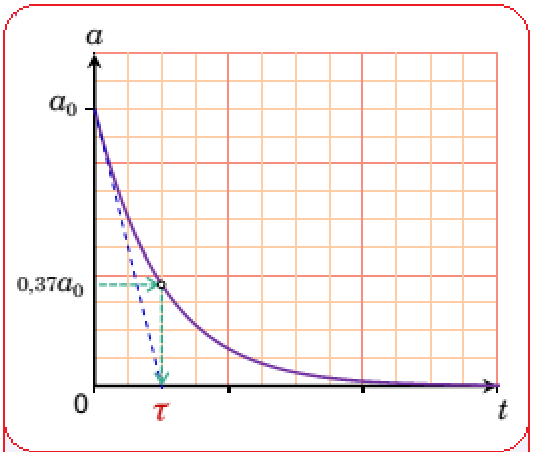
$\Rightarrow$ $$\frac{dN}{dt} = -\lambda.N_0.e^{-\lambda.t} = -\lambda.N(t)$$

D'où :

$$\boldsymbol{a(t) = \lambda.N(t) = a_0.e^{-\lambda.t}}$$

Avec :

$\boldsymbol{a_0 = \lambda.N_0}$: l'activité de l'échantillon radioactif à $\boldsymbol{t_0 = 0}$.



Décroissance de a(t) en fonction de t

- L'unité de l'activité $\boldsymbol{a(t)}$ dans le (S.I) est le *becquerel*, noté (Bq) : un becquerel correspond à *une désintégration par seconde*.
- Il existe une autre unité, c'est la *curie* (Ci), tel que :

$$\boldsymbol{1Ci = 3,7 \times 10^{10} Bq}$$

Exemple :

Source radioactive	L'activité en (Bq)
1 L d'eau minérale	10
1 L de lait	80
1 kg de poisson	100
Homme (70 kg)	8000
1kg de plutonium	2.10^{12}

Remarque :

On peut exprimer la loi de décroissance radioactive par :

♠ **La quantité de matière :**

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

$\Rightarrow$ $$\frac{1}{N_A} \times N(t) = (N_0.e^{-\lambda.t}) \times \frac{1}{N_A}$$

$\Rightarrow$ $$\frac{N(t)}{N_A} = \frac{N_0}{N_A}.e^{-\lambda.t}$$

$\Rightarrow$ $$\boldsymbol{n(t) = n_0.e^{-\lambda.t}}$$

Avec :

$\boldsymbol{n_0 = \frac{N_0}{N_A}}$: la quantité de matière de l'échantillon radioactif à $\boldsymbol{t_0 = 0}$.

♠ **La masse :**

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

$\Rightarrow$ $$\frac{M}{N_A} \times N(t) = (N_0 . e^{-\lambda . t}) \times \frac{M}{N_A}$$

$\Rightarrow$ $$\frac{N(t) \times M}{N_A} = \frac{N_0 \times M}{N_A} . e^{-\lambda . t}$$

$\Rightarrow$ $$n(t) \times M = n_0 \times M . e^{-\lambda . t}$$

$\Rightarrow$ $$\boldsymbol{m(t) = m_0 . e^{-\lambda . t}}$$

Avec :

$\boldsymbol{m_0} = \frac{\boldsymbol{N_0 \times M}}{\boldsymbol{N_A}}$: la masse de l'échantillon radioactif à $\boldsymbol{t_0 = 0}$.

IV. Datation par la radioactivité

1. Principe général

Pour les objets issus du monde vivant, l'échange dynamique entre les organismes vivants et leur milieu extérieur, par exemple l'échange du *carbone 14*, du *potassium 40* …, est toujours maintenu *constant*.

À leur mort, les échanges n'ont plus lieu, et donc les nucléides radioactifs au sein de ces objets se désintègrent selon la loi de décroissance radioactive. Ainsi, un échantillon peut être daté en mesurant son activité $\boldsymbol{a(t)}$ à la date $\boldsymbol{t}$, et en la comparant avec l' activité $\boldsymbol{a_0}$ d'un autre échantillon vivant de même nature.

2. Comment choisir l'élément radioactif à utiliser

Il faut tout d'abord *estimé l'âge* de l'échantillon à dater, pour choisir un radioélément dont la *demi-vie est en rapport avec cet âge*.

Car, à peu près, au bout de $\boldsymbol{10 \times t_{1/2}}$, on considère que les noyaux radioactifs présents dans l'échantillon sont tous désintégrés.

Par exemple, pour la datation des matériaux qui ont *jusqu'à 50 000 ans*, on utilise le *carbone 14* qui a une demi-vie de *5600 ans*.

3. Datation au carbone 14

Dans le cycle du carbone, l'élément carbone est présent sous forme de deux *isotopes stables* : le *carbone 12* (majoritaire), le *carbone 13* (minoritaire), et un *isotope instable* : le *carbone 14* (très minoritaire).

Le temps de demi-vie du carbone 14 est de l'ordre de 5570 ans. Il est continuellement produit dans la haute atmosphère grâce à des réactions nucléaires entre les noyaux des atomes *d'azote 14* de l'air et des *neutrons* ${}_0^1n$ d'origine cosmique. Ces réactions maintiennent une teneur constante en carbone 14 dans l'atmosphère, le carbone 14 formé réagit rapidement avec le dioxygène de l'air pour former du *dioxyde de carbone* CO_2.

Tous les organismes vivants échangent du *dioxyde de carbone* CO_2 avec l'atmosphère par la respiration et l'alimentation, ce qui fixe alors le carbone 14 dans leurs tissus à une teneur égale à celle de l'atmosphère, jusqu'à leur mort.

Après la mort, l'absorption et le rejet de dioxyde de carbone s'arrêtent, et donc la teneur du carbone 14 dans leurs tissus diminue exponentiellement en fonction du temps.

L'âge $\boldsymbol{t}$ d'un échantillon est déterminé alors par la loi de décroissance radioactive :

$$\boldsymbol{a(t) = a_0 . e^{-\lambda . t}}$$

On obtient :

$$- \quad \frac{\boldsymbol{a(t)}}{\ } \quad \frac{\mathbf{1/2}}{\ } \quad \frac{\ }{\boldsymbol{a(t)}}$$

$\boldsymbol{a(t)}$: L'activité de l'échantillon que l'on souhaite dater.
: L'activité d'un échantillon vivant de même nature.
$_{\mathbf{/2}}$: La demi-vie du carbone 14.

4. Datation par d'autres méthodes

Pour dater quelques échantillons très âgés comme les roches, on utilise par exemple *l'uranium 238* de demi-vie $\boldsymbol{t_{1/2} = 4,468.10^9\ ans}$.

La datation à *l'uranium 238* a permis d'estimer l'âge de la terre :