

Leçon N°4 : Décroissance radioactive

Introduction

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

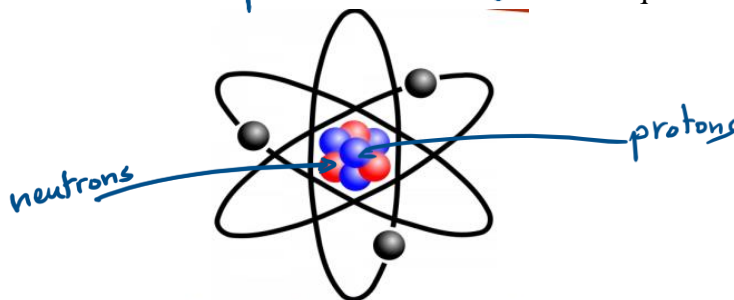


- Quel est le principe de cette datation ?
- Comment la réaliser ?

I. La stabilité et l'instabilité d'un noyau

1. La 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 Z., qui est appelé le numéro atomique...., ou le nombre de charge...., car il permet de calculer la charge du noyau :

$$q_{\text{noy}} = Z \cdot e$$

- ♣ On note le nombre des nucléons par le symbole A., qui est appelé le nombre de masse...., car il permet de calculer la masse de l'atome :

$$m_{\text{atome}} = Z \cdot m_p + N \cdot m_n = Z \cdot m_p + (A - Z) m_n = Z \cdot m_p + A \cdot m_p - Z \cdot m_p = A \cdot m_p$$

- ♣ On note le nombre des neutrons par le symbole N., il est exprimé par :

$$A = Z + N \Rightarrow N = A - Z$$

- La représentation symbolique du noyau d'un atome est la suivante : ${}^A_Z X$.

Exemple :

${}^{63}_{29}\text{Cu}$: C'est un noyau de cuivre qui contient :

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

2. Les nucléides

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

Exemples :

- $^{35}_{17}\text{Cl}$: Nucléide du noyau du Chlore 35
- $^{12}_6\text{C}$ et $^{14}_6\text{C}$: sont des nucléides différents du noyau Carbone

3. Isotopes

Les **isotopes** sont des noyaux qui ont le même nombre de protons Z mais des différent nombre de neutrons.

Exemples : $^{12}_6\text{C}$: 6 protons, 6 neutrons, $^{14}_6\text{C}$: 6 protons, 8 neutrons.

- Pour l'élément de l'Uranium, il existe plusieurs isotopes dont ceux-ci : $^{235}_{92}\text{U}$ et $^{238}_{92}\text{U}$.
- Pour l'élément du Carbone, il existe plusieurs isotopes dont ceux-ci : $^{12}_6\text{C}$ et $^{14}_6\text{C}$.

4. Le 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 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 ordonnées et le nombre de protons Z en abscisses : c'est le **diagramme (N, Z)**.

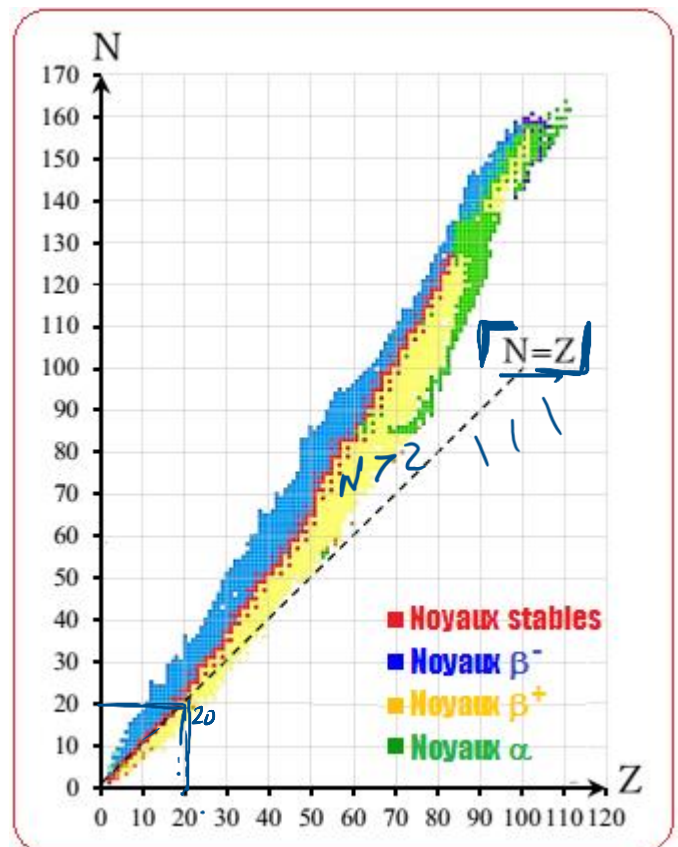
Le **diagramme de Segré** comporte plusieurs zones :
 ① **Zone centrale rouge** : elle s'appelle la vallée de stabilité et comporte les noyaux stables :

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

② **Zone β^-** : Elle se situe au-dessus de la vallée de stabilité.

③ **Zone β^+** : Elle se situe au-dessous de la vallée de stabilité.

④ **Zone α** : Elle comporte les noyaux lourds.



II. La radioactivité

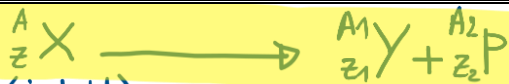
1. Définition

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

Quelques nucléides radioactifs : $^{14}_6\text{C}$; $^{238}_{92}\text{U}$; $^{60}_{27}\text{Co}$; $^{210}_{84}\text{Po}$

Remarque :

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



${}^A_Z X$: noyau père (instable)

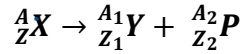
${}^{A_1}_{Z_1} Y$: noyau fils (plus stable)

${}^{A_2}_{Z_2} P$: particule de matière

2. Les lois de conservation – Lois de SODDY

Lors d'une transformation nucléaire, il y a **conservation** du **nombre de masse A** et du **nombre de charge Z**.

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



Selon les lois de Soddy :

Conservation du nombre de masse :

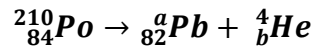
$$A = A_1 + A_2$$

Conservation du nombre de charge :

$$Z = Z_1 + Z_2$$

Exemple :

On considère l'équation suivante :



Déterminer **a** et **b**.

Réponse :

Selon les lois de SODDY :

Conservation du nombre de masse : $210 = a + 4 \Rightarrow a = 210 - 4 = 206$

« « « de charge : $84 = 82 + b \Rightarrow b = 84 - 82 = 2$

3. Les types de radioactivité

a. La radioactivité α

La radioactivité α : est une désintégration

nucléaire, aléatoire, naturelle et spontanée

correspond aux noyaux lourds... ($A > 190$), dans

laquelle un noyau père instable... se transforme en un

noyau fils plus stable... accompagnée de l'émission

d'un noyau 4_2He appelé

particule α, selon l'équation suivante :

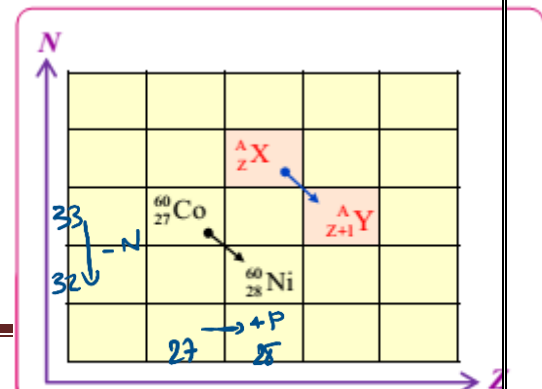
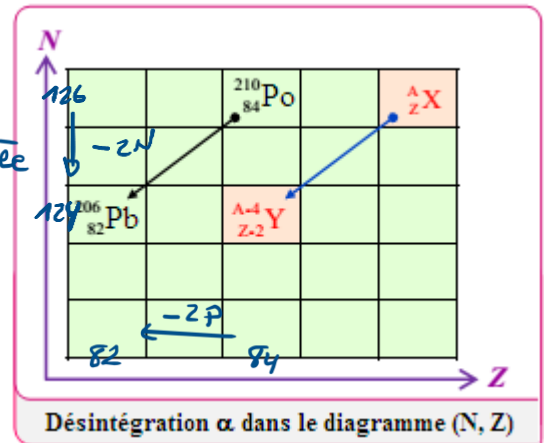


Exemple : ${}^{210}_{84}Po \longrightarrow {}^{206}_{82}Pb + {}^4_2 He$

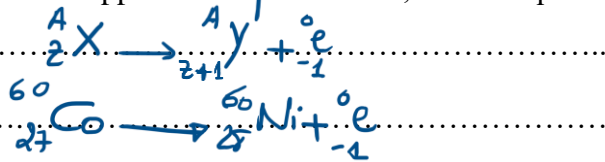
b. La radioactivité β^-

La radioactivité β^- : est une désintégration nucléaire naturelle.....

aléatoire et spontanée....., dans laquelle un noyau père.....

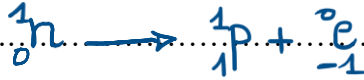


radioactif..... se transforme en un noyau fils plus stable..... accompagnée de l'émission d'un électron ${}^0_{-1}e$ appelé β^- , selon l'équation suivante :



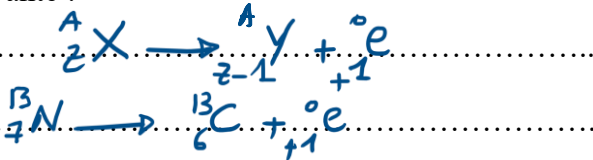
Remarque :

Lors de la transformation β^- , un neutron se transforme en un proton, tel que :



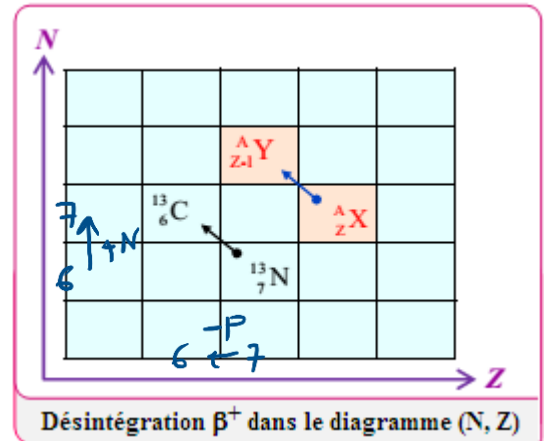
c. La radioactivité β^+

La radioactivité β^+ : est une désintégration nucléaire naturelle... aléatoire et spontanée, dans laquelle un noyau père se transforme en un noyau fils plus stable... accompagnée de l'émission d'un positron ${}^0_{+1}e$ appelé positron, selon l'équation suivante :



Remarque :

Lors de la transformation β^+ , un proton se transforme en un neutron, tel que :



d. Le rayonnement γ

Le rayonnement γ : sont des ondes électromagnétique de très grande énergie. Lors des désintégrations α , β^- , et 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 selon l'équation suivante :



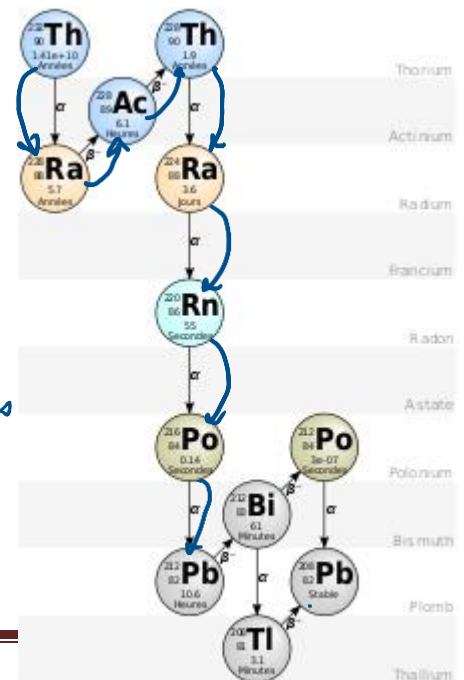
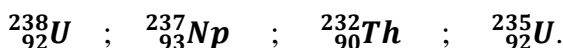
Exemple : émission γ associée à la radioactivité α



4. La famille radioactive

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

La famille radioactive est donc l'ensemble des noyaux issues du m. noyau père. Il n'y a que quatre familles radioactives :



III. La loi de décroissance radioactive

1. La loi

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

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

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

$$e^x = 2,71^x$$

الدالة الأسية

$N(t)$: le nombre des noyaux restants à l'instant t .

N_0 : " " " initiales à $t=0$

λ : Constante radioactive (Δ^{-1})

Remarque :

shift $\rightarrow \ln = e$

L'équation dimensionnelle de la constante λ :

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

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

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

$$\Rightarrow \ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\lambda t$$

$$\Rightarrow \lambda t = -\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$$

$$\Rightarrow \lambda t = \ln\left(\frac{N_0}{N}\right)$$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{1}{t} \ln\left(\frac{N_0}{N}\right)$$

dimensions

$$[\lambda] = \frac{1}{T} \cdot \left[\ln\left(\frac{N_0}{N}\right) \right]$$

$$[\lambda] = \frac{1}{T} = T^{-1}$$

Dimension de λ est l'inverse du temps c-à-d
son unité est Δ^{-1}

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

$$e^a \cdot e^b = e^{a+b} \quad , \quad \frac{e^a}{e^b} = e^{a-b}$$

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

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

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

$$(a, b) > 0 : \ln\left(\frac{a}{b}\right) = \ln a - \ln b$$

$$\ln\left(\frac{1}{a}\right) = \ln 1 - \ln a = -\ln a$$

$$\ln a^n = n \cdot \ln a \quad , \quad \ln\left(\frac{a}{b}\right) = \ln a - \ln b$$

$$\text{Dérivée : } (a \cdot e^{-\lambda x})' = -a \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda x}$$

2. La constante du temps

La constante de temps τ d'un nucléide radioactif est l'inverse de la constante radioactive λ :

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

Elle s'exprime donc en ... seconde. (s)

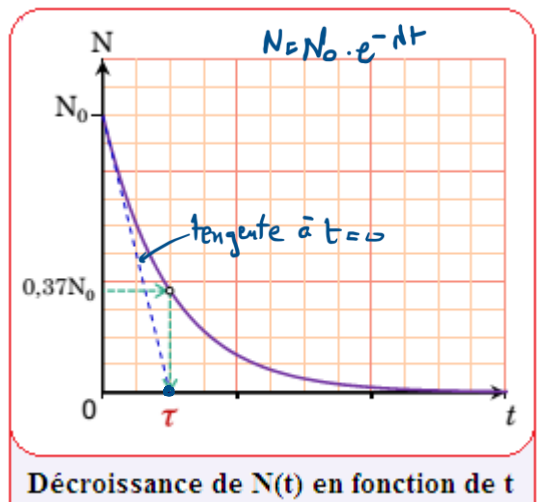
• L'intersection entre la tangente à $t=0$ et l'axe des temps donne la valeur de τ : (si la tangente est donnée)

• $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$ et $\lambda = \frac{1}{\tau} \Rightarrow \lambda t = \frac{t}{\tau}$

$$\Rightarrow N(t) = N_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

à $t = \tau$: $N(\tau) = N_0 \cdot e^{-\tau/\tau} \Rightarrow N(\tau) = N_0 \cdot e^{-1}$ et $e^{-1} = 0,37$

donc $N(\tau) = 0,37 N_0$



3. La demi-vie $t_{1/2}$

La demi-vie $t_{1/2}$ d'un échantillon radioactif est *la durée*... au bout de laquelle la moitié des noyaux initiaux est désintégrée.

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

La demi-vie est une constante caractéristique de l'élément radioactif.

À $t = t_{1/2}$:

La relation entre $t_{1/2}$ et λ

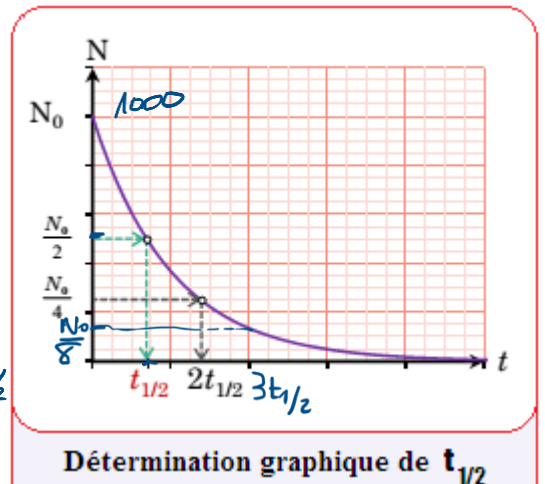
$$N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2} \quad \text{et on a} \quad N(t_{1/2}) = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$$

$$\Rightarrow \frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda t_{1/2}}$$

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

$$\Rightarrow \ln\left(\frac{1}{2}\right) = \ln e^{-\lambda t_{1/2}} \Rightarrow -\ln 2 = -\lambda \cdot t_{1/2} \Rightarrow \ln 2 = \lambda t_{1/2}$$

et donc $\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$ ou $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$



4. L'activité d'un échantillon

L'activité $a(t)$ d'un échantillon contenant N noyaux radioactifs à la date t correspond au *nombre*... de désintégrations par une seconde. Elle est exprimée par la relation :

$$a = - \frac{dN}{dt} > 0$$

$\frac{dN}{dt} < 0$ car $N(t)$ est décroissante.

Remarque :

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

on sait : $N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$

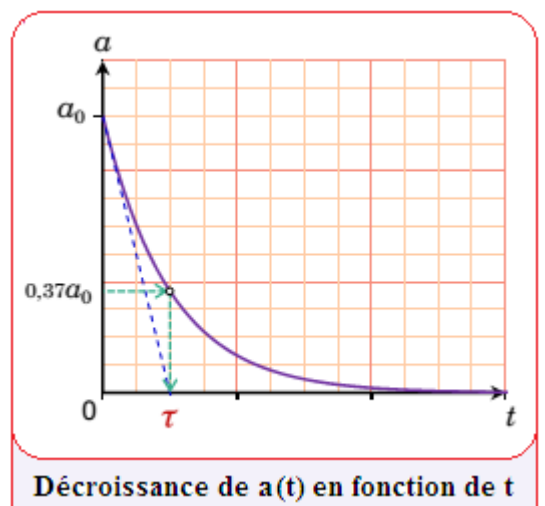
on dérive :

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

$$a = - \frac{dN}{dt} = \lambda N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

donc $a = \lambda N$

ou $a = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot N$ ou $a = \frac{1}{\tau} N$



L'unité de l'activité $a(t)$ 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 :

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

$1 \text{ Bq} \rightarrow 1 \text{ désintégration par seconde}$

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 : é

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

On peut exprimer la loi de décroissance radioactive par :

♣ La quantité de matière : $n(t) = n_0 \cdot e^{-\lambda t}$

on sait que $n = \frac{N}{N_A}$

$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ no. môle d'Avogadro

on a $(N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}) \times \frac{1}{N_A}$

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

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

$n(t)$: qte de matière restante ; n_0 : qte de matière initiale

♣ La masse : $m(t) = m_0 \cdot e^{-\lambda t}$

on sait $n = \frac{m}{M}$

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

$$\Rightarrow \frac{m}{M} = \frac{N}{N_A}$$

$$\Rightarrow m = N \times \frac{M}{N_A}$$

on a $(N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}) \times \frac{M}{N_A}$

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

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

$m(t)$: la masse restante, m_0 : la masse initiale.

IV. La datation par un échantillon radioactif

1. Le 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 $a(t)$ à la date t , et en la comparant avec l'activité a_0 d'un autre échantillon vivant de même nature.

2. Le choix du noyau radioactif

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.

