

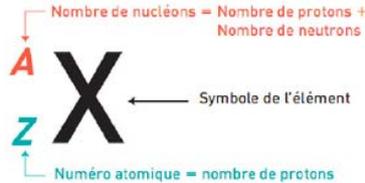
ÉVOLUTION TEMPORELLE D'UN SYSTEME SIEGE D'UNE TRANSFORMATION NUCLEAIRE

La radioactivité est un phénomène naturel qui suscite des réactions allant de l'enthousiasme (médecine, production d'énergie...) à la méfiance (cancers, déchets...).

C'est en 1896 qu'Henri Becquerel découvre la radioactivité : en rangeant sa plaque photographique près de sels d'uranium qu'il était en train d'étudier, il découvrit que le film photographique avait été impressionné sans avoir été exposé à la lumière. Il en conclut que l'uranium émettait des rayonnements invisibles.

I- Stabilité et instabilité des noyaux

1. Le noyau atomique



Le noyau d'un atome est constitué de nucléons de deux sortes : les protons (charge +e) et les neutrons (charge nulle).

Le nombre de nucléons du noyau est noté A et appelé nombre de masse.

Le nombre de protons est noté Z et appelé nombre de charges.

Le nombre de neutrons est noté N et vérifie $N=A-Z$.

Identifier un noyau, c'est connaître deux nombres : le nombre de nucléons A et le nombre de protons Z . On note ce noyau : A_ZX .

2. Isotopes

Des noyaux ayant le même nombre de charges Z mais des nombres de masse A différents sont appelés isotopes.

Exemple : ${}^4_2\text{He}$ et ${}^3_2\text{He}$

3. Diagramme (N,Z)

Il y a une centaine d'éléments chimiques (c'est-à-dire de valeurs possibles de Z) mais plus de mille noyaux répertoriés.

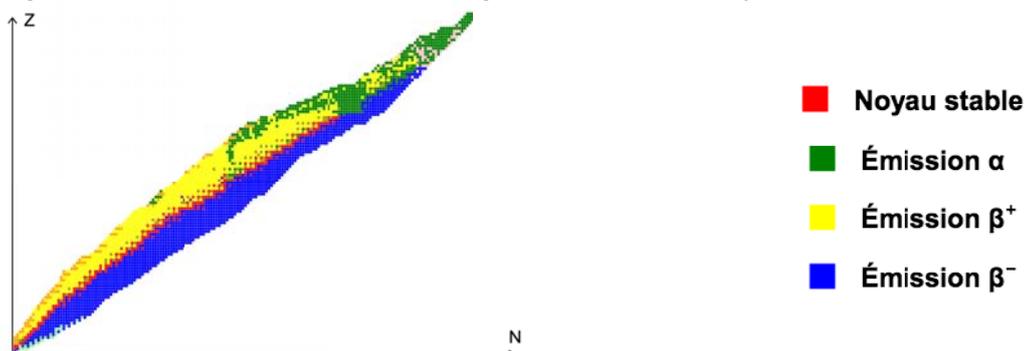
animation diagramme N-Z : <https://segree.web-labosims.org/index.html>

en abscisse : nombre de neutrons

en ordonnée : nombre de protons

Pour de faibles valeurs de Z ($Z < 20$), les noyaux stables se situent au voisinage de la droite $Z=N$ (c'est la cascade ${}^4_2\text{He}$, ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{14}_7\text{N}$, ${}^{16}_8\text{O}$). L'ensemble des noyaux stables est situé sur la courbe rouge appelée « vallée de la stabilité ».

La plupart des noyaux sont instables. C'est le cas des noyaux trop lourds (trop de nucléons) ou ceux dont la proportion proton/neutron est déséquilibrée. Ces noyaux peuvent se transformer spontanément en un noyau différent avec émission d'un rayonnement : on dit qu'ils sont **radioactifs**.



II- La radioactivité

1. Noyaux radioactifs

Un noyau radioactif est un noyau instable qui subira tôt ou tard une transformation nucléaire spontanée appelée désintégration.

Il existe différents types de radioactivité suivant le rayonnement émis.

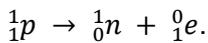
Sur le diagramme (N, Z) :

- Noyaux ayant trop de protons : émetteur β^+
- Noyaux ayant trop de neutrons : émetteur β^-
- Noyaux ayant trop de nucléons : émetteur α

D'autres processus existent mais ne seront pas évoqués.

2. Radioactivité β^+

Le noyau père A_ZX , instable, possède trop de protons par rapport au nombre de neutrons. Un des protons se transforme alors en neutron avec émission d'un positon :



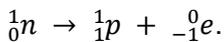
Le noyau fils obtenu est celui d'un élément chimique différent car le numéro atomique diminue d'une unité.



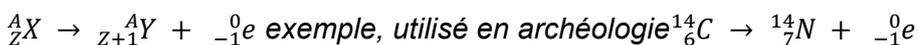
La radioactivité β^+ est une émission de positons par le noyau.

3. Radioactivité β^-

Le noyau père A_ZX , instable, possède trop de neutrons par rapport au nombre de protons. Un des neutrons se transforme alors en proton avec émission d'un électron :



Le noyau fils obtenu est celui d'un élément chimique différent car le numéro atomique augmente d'une unité. L'électron est noté ${}^0_{-1}e$.



La radioactivité β^- est une émission d'électrons par le noyau.

4. Radioactivité α

Le noyau père A_ZX est trop massif. Il est instable car il possède trop de nucléons. Il se désintègre en émettant un noyau d'hélium 4_2He (appelé particule α).



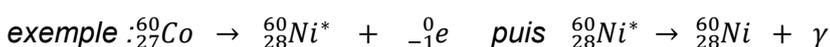
La radioactivité α est une émission de particules α par le noyau.

5. Émission γ

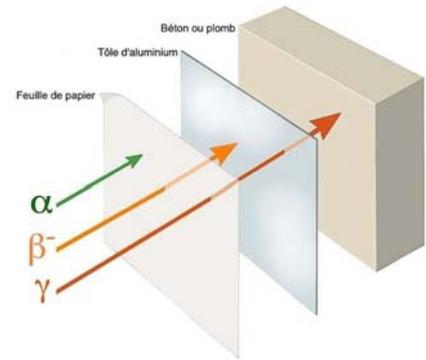
En général, les noyaux fils obtenus lors de la désintégration de noyaux radioactifs sont dans un état excité, c'est-à-dire qu'ils possèdent un excédent d'énergie.

On les note alors ${}^A_ZX^*$. Pour revenir dans leur état fondamental, ils peuvent évacuer cette énergie sous forme d'une onde électromagnétique appelée rayonnement γ .

Ce rayonnement, de même type que la lumière, possède une très courte longueur d'onde (10^{-4} nm) donc il est très énergétique et très pénétrant. ${}^A_ZX^* \rightarrow {}^A_ZX + \gamma$



Un noyau radioactif est un noyau instable qui se désintègre spontanément en donnant un noyau différent, en émettant des particules β^- , β^+ ou α et simultanément un rayonnement γ .



6. Lois de conservation (lois de Soddy)

L'équation d'une réaction nucléaire obéit aux deux lois suivantes :

- **Conservation du nombre de charge Z**

La somme des nombres de charge du noyau fils et de la particule émise est égale au nombre de charge du noyau père désintégré.

- **Conservation du nombre de nucléons A**

La somme des nombres de nucléons du noyau fils et de la particule émise est égale au nombre de nucléons du noyau père désintégré.

Attention : il n'y a pas conservation des éléments chimiques !

III- Loi de décroissance

1. Caractère aléatoire d'une désintégration

La désintégration d'un noyau n'est pas prévisible : c'est un processus aléatoire. Il n'est pas possible de prévoir à l'avance la date de désintégration d'un noyau, ni de modifier les caractéristiques de ce phénomène.

Si on passe à une étude statistique en considérant un très grand nombre de noyaux pendant l'intervalle de temps Δt , il existe un nombre moyen \bar{N} de désintégrations significatif de l'état du système.

2. Loi de décroissance radioactive

Soit $N(t)$ le nombre de noyaux radioactifs d'un échantillon à l'instant t .

Pendant l'intervalle de temps Δt , en moyenne, \bar{N} noyaux se désintègrent donc $N(t + \Delta t) = N(t) - \bar{N}$

La variation du nombre de noyaux radioactifs de l'échantillon vaut :

$$\Delta N = N(t + \Delta t) - N(t) = -\bar{N}$$

$\Delta N < 0$: on parle de **décroissance radioactive** de l'échantillon.

Pendant l'intervalle de temps Δt , le nombre moyen de désintégrations \bar{N} est proportionnel au nombre $N(t)$ de noyaux encore présents et à la durée Δt .

On note λ le coefficient de proportionnalité, appelé **constante radioactive**, exprimée en s^{-1} . C'est l'inverse d'une durée.

$$\bar{N} = \lambda \times N(t) \times \Delta t \quad \text{donc} \quad \Delta N(t) = -\lambda \times N(t) \times \Delta t \quad \text{et} \quad \frac{\Delta N(t)}{\Delta t} = -\lambda \times N(t)$$

Pour une durée Δt courte, $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta N(t)}{\Delta t} = \frac{dN}{dt}$.

On obtient :
$$\boxed{\frac{dN}{dt} = -\lambda \times N(t)}$$

équation différentielle du premier ordre du type *type* $y' = ay + b$ ($a \neq 0$).

Les solutions sont de la forme $y = ke^{ax} - \frac{b}{a}$ avec k une constante réelle.

en général	ici
y	N
x	t
a	$-\lambda$
b	0

Les solutions de l'équation différentielle sont donc de la forme : $N(t) = ke^{-\lambda t}$.

Pour déterminer la constante k , on utilise la condition initiale.

À l'instant initial, le nombre de noyaux radioactifs est noté N_0 .

$$N(0) = ke^{-\lambda \times 0} = N_0 \text{ d'où } k = N_0$$

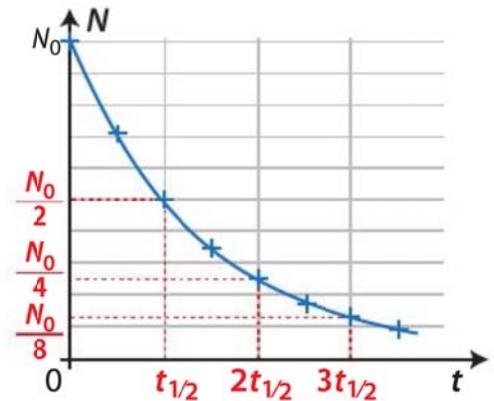
On obtient donc : $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$.

3. Demi-vie d'un échantillon radioactif

La durée permettant de caractériser la décroissance radioactive d'un échantillon est appelée demi-vie et notée $t_{1/2}$.

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

$$\begin{aligned} N(t_{1/2}) &= \frac{N_0}{2} \\ N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} &= \frac{N_0}{2} \\ e^{-\lambda t_{1/2}} &= \frac{1}{2} \\ -\lambda \times t_{1/2} &= \ln \frac{1}{2} = -\ln 2 \\ t_{1/2} &= \frac{\ln 2}{\lambda} \end{aligned}$$



Demi-vies de quelques sources :

Source radioactive	Demi-vie
^{238}U	$4,5 \cdot 10^9$ ans
^{14}C	5734 ans
^{131}I	8,1 jours

4. Activité d'un échantillon radioactif

On appelle **activité A** d'un échantillon radioactif le nombre moyen de désintégrations qu'il produit par seconde : $A(t) = -\frac{dN}{dt}$.

L'activité se mesure en Becquerel (Bq). 1 Bq correspond à une désintégration par seconde.

En utilisant $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$, on obtient $A(t) = -\frac{dN}{dt} = -N_0 \times (-\lambda) e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}$

avec $A_0 = \lambda \times N_0$ activité initiale de l'échantillon en Bq

Ordre de grandeur de l'activité de quelques sources :

Source radioactive	activité
Homme (70 kg)	7000 Bq
1 kg de poisson	100 Bq
1 kg d'engrais phosphaté	2000 Bq
1 kg de plutonium	$2 \cdot 10^{12}$ Bq
Source radioactive médicale	10^{14} Bq

IV- Application à la datation

1. Désintégration du carbone 14

L'élément carbone comporte deux isotopes : le carbone 12, stable et le carbone 14, émetteur β^- . La valeur de sa demi-vie est 5734 ans.

Tant qu'un organisme est vivant, les échanges avec le milieu extérieur maintiennent constante sa teneur en ^{14}C , égale à celle de l'atmosphère.

Lorsque l'organisme meurt, le carbone 14 n'est plus renouvelé et se désintègre

$^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + ^0_{-1}\text{e}$ selon la loi de décroissance radioactive.

2. Comment dater un échantillon animal ou végétal ?

Pour dater un échantillon, il faut :

- mesurer l'activité $A(t)$ d'une masse connue de cet échantillon
- mesurer l'activité A_0 de la même masse d'un échantillon actuel du même matériau

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

$$\frac{A(t)}{A_0} = e^{-\lambda t}$$

$$\ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right) = -\lambda t \text{ d'où } t = -\frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right) = \frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{A_0}{A(t)}\right) = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \times \ln\left(\frac{A_0}{A(t)}\right)$$

Cette méthode ne permet pas de dater des échantillons de plus de 50000 ans car l'activité du carbone 14 est alors trop faible.

Exemple : datation d'un navire grec découvert à Marseille



L'activité d'un gramme de carbone issu de ce navire vaut

$A(t) = 9,94 \text{ Bq}$.

Elle est essentiellement due à la présence de carbone 14.

La demi-vie du carbone 14 vaut $t_{1/2} = 5734 \text{ ans}$.

L'activité d'un gramme d'un échantillon actuel du même matériau vaut $A_0 = 13,60 \text{ Bq}$.

L'âge du navire est

$$t = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \times \ln\left(\frac{A_0}{A(t)}\right) = \frac{5734}{\ln 2} \times \ln\left(\frac{13,60}{9,94}\right) \approx 2590 \text{ ans}$$

Vidéos à consulter :

Histoire de la radioactivité et de la radioprotection : [L'épopée du radium](#)

[Histoire de la radioprotection](#)