

Professeur	Bahloul Khalid (+212) 622-17-65-52
Chapitre	La décroissance radioactive (l'essentiel du cours + applications)
Niveaux	Bac français / 1 ^{ère} et 2 ^{ème} Bac International SM

Composition et caractéristiques du noyau

Le noyau d'un atome est constitué de protons et neutrons, l'ensemble de ces deux types de particules sont appelées : nucléons.

- Proton** : Découvert en 1910 par Rutherford.
 Le nombre de protons d'un noyau est le numéro atomique ou nombre de charge désigné par Z.
 Cette particule est chargée positivement dont sa charge égale à celle de la charge élémentaire

$$q_p = e = 1,6 \times 10^{-19} \text{C} \quad m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{Kg}$$
- Neutron** : Découvert en 1933 par Chadwick.
 Le nombre de neutron d'un noyau est noté N. **Le neutron est neutre** c'est-à-dire sa charge est nulle $q_n = 0 \text{ C}$, avec une masse sensiblement égale à celle du proton

$$m_n = m_p$$
- Nombre de masse**: c'est la somme du nombre des protons et des neutrons

$$A = Z + N$$
- Notation**: Le noyau est noté ${}^A_Z\text{X}$ X est le symbole de l'élément
- Isotopes**: deux noyaux isotopes ont le même nombre de protons mais différent par leur nombre de neutrons par exemple

$${}^{63}_{29}\text{Cu} \text{ et } {}^{65}_{29}\text{Cu}^*$$
- Unité de masse atomique**: par convention l'unité de masse atomique de symbole "u" est par définition le douzième de l'atome de carbone 12

$${}^{12}_6\text{C} \quad u = \frac{1}{12} m({}^{12}_6\text{C}) \quad u = 1,66 \times 10^{-27} \text{Kg}$$

Stabilité d'un noyau

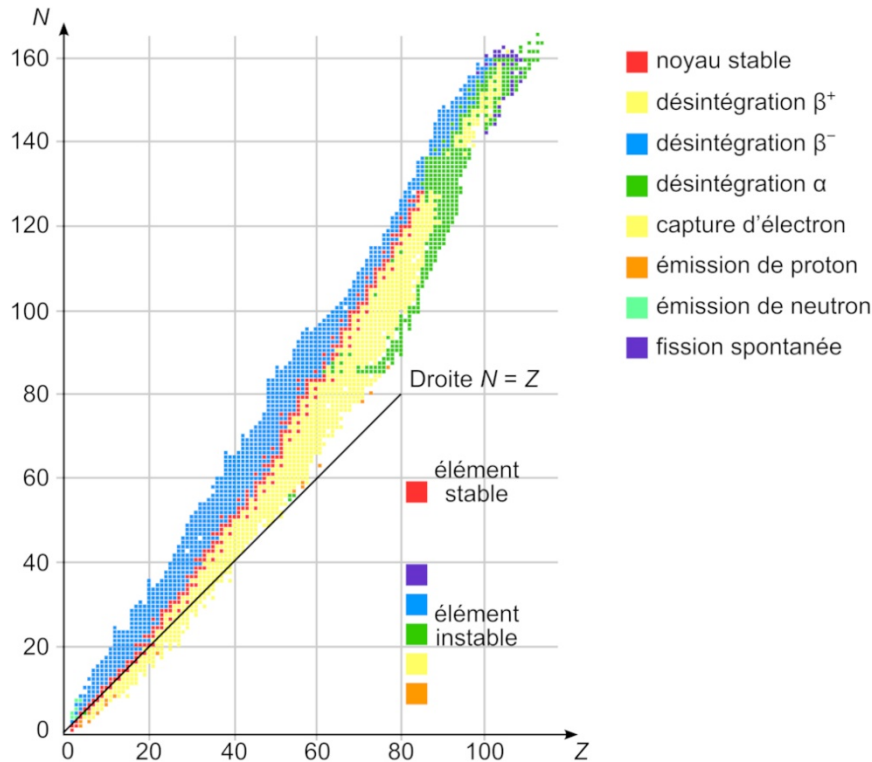
On explique la cohésion d'un noyau par l'existence des forces attractives entre les nucléons.

Cette force est très intense, on l'appelle : **L'interaction forte**.

Grâce à cette force on peut trouver deux protons chargés positivement proches l'un de l'autre, alors qu'ils doivent subir à la répulsion électrostatique.

Cependant, on trouve des nucléides instables qui peuvent se désintégrer spontanément, on les appelle : **Les nucléides radioactifs**.

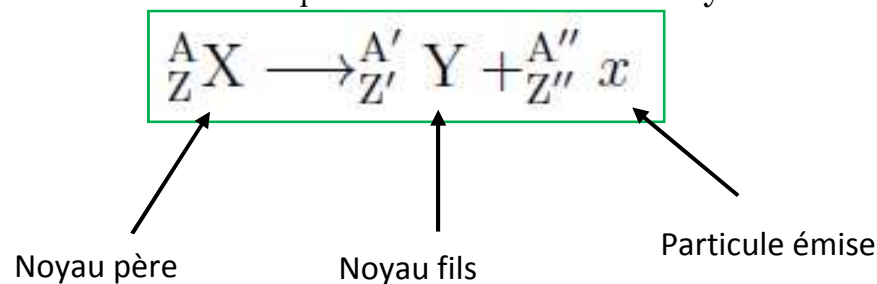
Si l'on reporte sur un graphique le nombre de neutrons N en fonction du nombre de protons Z , on obtient le diagramme suivant, qu'on l'appelle **diagramme de Segré** ou diagramme (N - Z) :



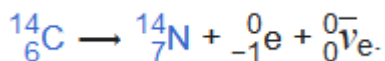
La radioactivité

La **radioactivité** est une **désintégration naturelle** d'un noyau instable en un noyau plus stable avec l'émission de particules qui forment des radiations actives.

Un noyau instable (noyau radioactif) se désintègre spontanément en donnant un noyau différent et en émettant des particules et souvent un rayonnement.



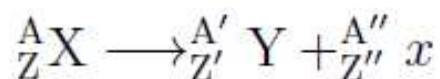
Exemple:



Loi de conservation de Soddy

Au cours d'une réaction nucléaire, il y a :

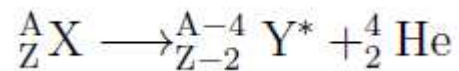
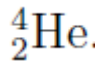
1. Conservation de la charge électrique.
2. Conservation du nombre de nucléons



$$\begin{cases} A = A' + A'' \\ Z = Z' + Z'' \end{cases}$$

La radioactivité α

Les noyaux massifs sont instables, cette instabilité est due à un excès de nucléons, ils se désintègrent en émettant un noyau d'Hélium

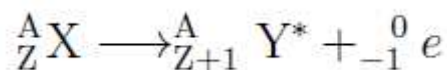


Remarque : Cette désintégration est valable pour les noyaux lourds dont $A > 195$.

Le noyau fils Y correspond à l'élément situé deux cases avant celle de l'élément père X dans le tableau de la classification périodique.

La radioactivité β^-

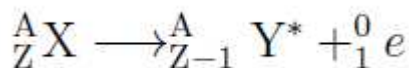
Les noyaux situés au dessus du domaine de stabilité, possèdent trop de neutrons par rapport au nombre de protons, donc le neutron se transforme en proton en émettant un électron



Mécanisme : Le neutron du noyau se transforme spontanément en proton et électron selon le mécanisme suivant : ${}_0^1n \longrightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e$

La radioactivité β^+

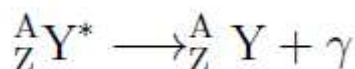
Les noyaux situés au dessous du domaine de stabilité, possèdent trop de protons par rapport au nombre de neutron, donc le proton se transforme en neutron en émettant un positron (L'antiparticule de l'électron)



Mécanisme : Le proton du noyau se transforme spontanément en neutron et positron selon le mécanisme suivant : ${}_1^1p \longrightarrow {}_0^1n + {}^0_1e$

Rayonnement γ

Après une désintégration le noyau fils est souvent excité il redevient stable en libérant une énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique γ , selon la transformation suivante :



Cette radiation porte une grande énergie

Les familles radioactives

Un nucléide radioactif se transforme en un autre nucléide, qui peut être lui même radioactif et ainsi de suite... La chaîne s'arrête lorsque le nucléide formé est stable.

La loi de décroissance radioactive

La désintégration d'un noyau instable a un caractère aléatoire, un échantillon radioactif (contenant un grand nombre de noyaux instables) est donc un échantillon de grande taille dans lequel se répète un phénomène aléatoire un certain nombre de fois

Pour un échantillon contenant un seul type de noyaux radioactifs, la variation du nombre des noyaux $\Delta N(t)$ entre des instants très proches t et $t + \Delta t$ est proportionnelle au nombre de noyaux $N(t)$ présents à t et à la durée Δt :

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t$$

Où λ est la constante radioactive qui dépend de type du type des noyaux qui se désintègrent, exprimé en s^{-1} . La durée $\lambda^{-1} = \tau$ est la constante du temps, exprimé en (s).

Lorsque $\Delta t \rightarrow 0$ l'équation (1) devient :

$$\begin{aligned} dN = -\lambda N dt &\iff \frac{dN}{dt} = -\lambda N \\ &\iff \frac{dN}{dt} + \lambda N = 0 \end{aligned}$$

C'est une équation différentielle de la forme : $\frac{dy}{dx} = ay$ sa solution est $x \mapsto \alpha e^{ax}$

On en déduit que :

$$N = \alpha e^{-\lambda t}$$

Identifions α :

On a à $t = 0$:

$$N_0 = \alpha e^{-\lambda \times 0} \iff N_0 = \alpha$$

Par suite :

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

Où N_0 est le nombre de noyaux présents à l'instant t_0 .

Activité radioactive

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

Elle donne le nombre de désintégration par unité de temps

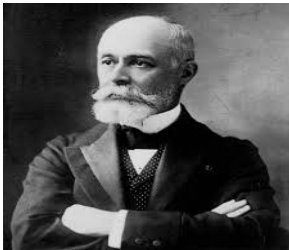
$$\begin{aligned}
 a &= -\frac{dN}{dt} \\
 &= -\frac{d}{dt} (N_0 e^{-\lambda t}) \\
 &= -N_0 \times (-\lambda) e^{-\lambda t} \\
 &= \lambda N_0 e^{-\lambda t}
 \end{aligned}$$

$$a = a_0 e^{-\lambda t}$$

Bq

$$\begin{aligned}
 1 \text{ Bq} &= 1 \text{ désintégration/s} \\
 1 \text{ Ci} &= 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}
 \end{aligned}$$

L'unité de **a** est le **Bq** (Becquerel) en nommage du physicien **Henri Becquerel**



Antoine Henri Becquerel, né le 15 décembre 1852 de Paris et mort le 25 août 1908 au Croisic, est un physicien français. Il découvre la radioactivité en 1896 et il est lauréat du prix Nobel de physique de 1903.

Demi-vie radioactive

La demi-vie $t_{1/2}$ est la durée nécessaire pour que la moitié des noyaux présents dans un échantillon soit désintégrée.

$$N = \frac{N_0}{2} \quad \text{à} \quad t = t_{1/2}$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$

Exploitation graphique

Détermination de la demi-vie et la constante de temps τ

- . L'abscisse correspondante à $\frac{N_0}{2}$ représente la demi-vie $t_{1/2}$ de l'échantillon étudié.
- . La loi de la décroissance radioactive s'écrit sous la forme :

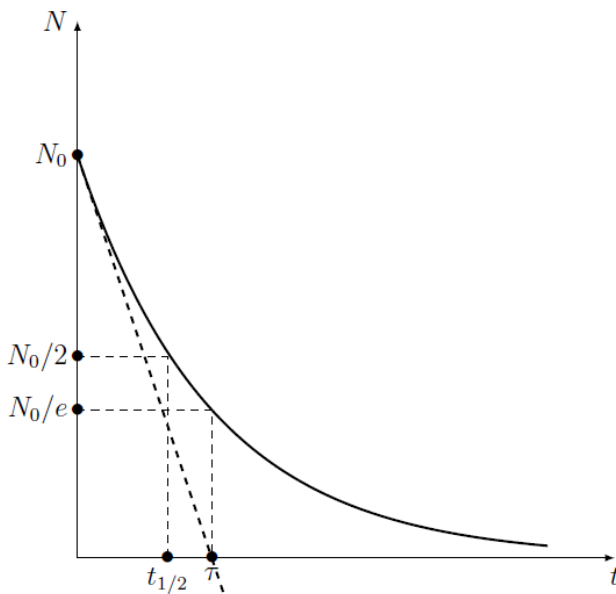
$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{Si } t = \tau \quad N = N_0 \cdot e^{-1} = \frac{N_0}{e}$$

$$N \approx 0,37 \times N_0$$

Or, l'abscisse correspondante à cette valeur représente la constante de temps τ .

On peut aussi déterminer la constante de temps τ en traçant la tangente à la courbe à l'instant $t = 0$. Elle coupe l'axe des dates en un point, dont l'abscisse représente la constante de temps τ .

On peut tous résumer dans ce graphe :



Application

l'âge de la terre

La détermination de l'âge de la Terre a commencé vers le XVI^e siècle, on l'estimait alors autour de 5 000 ans. Au XIX^e siècle, des scientifiques admettaient un âge d'environ 100 millions d'années. La découverte de la radioactivité, par H. Becquerel en 1896, bouleversa toutes les données connues. La datation à l'uranium - plomb permet de déterminer assez précisément l'âge de la Terre. Nous proposons de comprendre cette technique de datation.

1. Étude de la famille uranium 238 – plomb 206

Le noyau d'uranium 238, naturellement radioactif, se transforme en un noyau de plomb 206, stable, par une série de désintégrations successives. Nous allons étudier ce processus. On ne tiendra pas compte de l'émission γ .

1.1. Dans la première étape, un noyau d'uranium ${}^{238}_{92}\text{U}$ subit une radioactivité α . Le noyau fils est du thorium (symbole Th).

1.1.1. Qu'est-ce qu'un noyau radioactif ?

1.1.2. Écrire l'équation de la réaction nucléaire en précisant les règles utilisées.

1.2. Dans la deuxième étape, le noyau de thorium 234 se transforme en un noyau de protactinium ${}^{234}_{91}\text{Pa}$. L'équation de la réaction nucléaire est : ${}^{234}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{234}_{91}\text{Pa} + {}^0_{-1}\text{e}$.

Préciser, en justifiant, le type de radioactivité correspondant à cette transformation. /

1.3. L'équation globale du processus de transformation d'un noyau d'uranium 238 en un noyau de plomb 206 est : ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{206}_{82}\text{Pb} + 6 {}^0_{-1}\text{e} + 8 {}^4_2\text{He}$

Déterminer, en justifiant, le nombre de désintégrations α et β^- de ce processus.

2. Géochronologie

On a constaté d'une part, que les minéraux d'une même couche géologique, donc du même âge, contiennent de l'uranium 238 et du plomb 206 en proportions remarquablement constantes, et d'autre part que la quantité de plomb dans un minéral augmente proportionnellement à son âge relatif.

Si on mesure la quantité de plomb 206 dans un échantillon de roche ancienne, en considérant qu'il n'y en avait pas initialement, on peut déterminer l'âge du minéral à partir de la courbe de décroissance radioactive du nombre de noyaux d'uranium 238.

Étudions un échantillon de roche ancienne dont l'âge, noté t_{Terre} , correspond à celui de la Terre.

2.1. On considère la courbe de décroissance radioactive du nombre $N_U(t)$ de noyaux d'uranium 238 dans un échantillon de roche ancienne (voir annexe ci-contre).

2.1.1. Indiquer la quantité initiale $N_U(0)$ de noyaux d'uranium de cet échantillon.

2.1.2. Déterminer graphiquement la valeur de la constante de temps τ de l'uranium 238 (représenter la construction sur la courbe de l'annexe). En déduire la valeur de sa constante de radioactivité λ .

2.1.3. Donner l'expression de $N_U(t)$, nombre de noyaux radioactifs présents dans cet échantillon à la date t , en fonction de $N_U(0)$.

Calculer le nombre de noyaux d'uranium 238 qui restent dans cet échantillon roche à la date $t_1 = 1,5 \times 10^9$ années. Vérifier graphiquement votre résultat.

2.1.4. Définir et déterminer graphiquement le temps de demi-vie $t_{1/2}$ de l'uranium 238 (représenter la construction sur la courbe de l'annexe). Vérifier la cohérence avec la constante de temps τ .

2.2. La quantité de plomb mesurée dans la roche à la date t_{Terre} , notée $N_{\text{pb}}(t_{\text{Terre}})$, est égale à $2,4 \times 10^{12}$ atomes.

2.2.1. Établir la relation entre $N_U(t_{\text{Terre}})$, $N_U(0)$ et $N_{\text{pb}}(t_{\text{Terre}})$.

Calculer la quantité $N_U(t_{\text{Terre}})$ de noyaux d'uranium.

2.2.2. Déterminer l'âge t_{Terre} de la Terre.

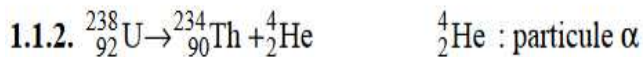
Courbe de décroissance radioactive de l'uranium 238



Correction

1.1.1. Un noyau radioactif est un noyau instable qui peut se désintégrer spontanément en un autre noyau plus stable en émettant un rayonnement.

L'instabilité est due soit à un trop grand nombre de protons par rapport aux neutrons (β^+) soit à un trop grand nombre de neutrons par rapport aux protons (β^-) soit à un trop grand nombre de nucléons (α).



Dans une réaction nucléaire, il y a conservation du nombre de nucléons et conservation du nombre de charges (lois de Soddy)

1.2. Au cours de cette réaction il y a émission d'un électron, c'est donc une **radioactivité β^-** .

1.3. Au cours de ce processus, il y a 8 particules α émises et 6 électrons. Il y a donc **8 désintégrations α et 6 désintégrations β^-** .

2.1.1. D'après le graphique, on lit :

$N_{\text{U}}(0) = 5,0 \times 10^{12}$ noyaux d'uranium.

2.1.2. Pour déterminer la valeur de la constante de temps, on trace la tangente à la courbe $N_{\text{U}} = f(t)$, à la date $t = 0$, celle-ci coupe l'axe des abscisses en **$t = \tau = 6,5 \times 10^9$ ans.**

Cette méthode est peu précise, ne pas donner le résultat avec trop de chiffres significatifs.

Constante radioactive : $\lambda = \frac{1}{\tau}$

$$\text{soit } \lambda = \frac{1}{6,5 \cdot 10^9} = 1,5 \times 10^{-10} \text{ an}^{-1}$$

2.1.3. La loi de décroissance radioactive nous donne : **$N_{\text{U}}(t) = N_{\text{U}}(0) \times e^{-\lambda t}$**

À la date $t_1 = 1,5 \times 10^9$ années, on a **$N_{\text{U}}(t_1) = 5,0 \times 10^{12} \times e^{1,5 \times 10^{-10} \times 1,5 \times 10^9}$ soit $N_{\text{U}}(t_1) = 4,0 \times 10^{12}$ noyaux.**

On vérifie ce résultat graphiquement (voir courbe ci-dessus).

2.1.4. Le temps de demi-vie correspond à la durée nécessaire à la désintégration de la moitié de la population initiale en uranium 238. On a $N_U(t_{1/2}) = N_U(0)/2$.

Graphiquement on lit : $N(t) = N_U(0)/2$ pour $t = t_{1/2} = 4,5 \times 10^9$ ans. On vérifie que l'on a bien $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$.

La valeur de λ issue de $t_{1/2}$ est plus précise que celle issue de τ

2.2.1. Un noyau d'uranium, en se désintégrant, donne un noyau de plomb donc:

$$N_U(0) = N_U(t_{\text{Terre}}) + N_{\text{Pb}}(t_{\text{Terre}}) \text{ donc } N_U(t_{\text{Terre}}) = N_U(0) - N_{\text{Pb}}(t_{\text{Terre}}) = 5 \times 10^{12} - 2,4 \times 10^{12} = 2,6 \times 10^{12} \text{ noyaux}$$

2.2.2. La loi de décroissance s'écrit :

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

Remarque : il est préférable d'utiliser la valeur de $t_{1/2}$ car sa détermination graphique est plus précise que celle de τ (ou que celle de λ issue de τ).

$$\text{Avec les notations du texte cela s'écrit alors } t = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \ln\left(\frac{N_U(0)}{N_U(t_{\text{Terre}})}\right) = \frac{4,5 \times 10^9}{\ln 2} \ln\left(\frac{5,0 \times 10^{12}}{2,6 \times 10^{12}}\right) = 4,4 \times 10^9 \text{ ans}$$

