

Thème : Transformation nucléaire
Cours 24 : Stabilité et instabilité des noyaux – Radioactivité
(version professeur)

B.O. Stabilité et instabilité des noyaux : diagramme (N,Z), radioactivité α et β , équation d'une réaction nucléaire, lois de conservation.

Radioactivité γ

Évolution temporelle d'une population de noyaux radioactifs ; constante radioactive ; loi de décroissance radioactive ; temps de demi-vie ; activité.

Radioactivité naturelle ; applications à la datation. Applications dans le domaine médical ; protection contre les rayonnements ionisants.

I. Stabilité et instabilité des noyaux : Diagramme (N, Z)

1. Composition d'un noyau atomique. (Rappels).

Représentation symbolique du noyau A_ZX

- le noyau d'hélium 4 a pour représentation symbolique ${}^4_2\text{He}$, il est composé de 2 protons et de 2 neutrons.
- le noyau de radium 222 a pour représentation symbolique ${}^{222}_{88}\text{Ra}$, il est composé de 88 protons et de 134 neutrons.

Question : En vous aidant d'une classification périodique, indiquer quelle est la représentation symbolique du noyau constitué de 92 protons et de 146 neutrons ?

Réponse : il s'agit du noyau d'uranium de représentation symbolique ${}^{238}_{92}\text{U}$

2. Isotopie.

Des isotopes sont des noyaux qui ont le même nombre de charges Z, mais des nombres de nucléons différents. (C'est à dire un nombre de neutrons différents).

Autres exemples : les noyaux ${}^{222}_{88}\text{Ra}$ et ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ sont des isotopes.

II. Les différents types de radioactivité.

Selon leurs positions dans le diagramme (N, Z), les noyaux se désintègreront de manières différentes.

1. La radioactivité alpha α (émission d'un noyau d'hélium 4)

Les noyaux appartenant au domaine des noyaux instables ayant un **excès de masse**, subiront une désintégration de type α (alpha) de symbole ${}^4_2\text{He}$

Question : En utilisant la classification périodique des éléments et en indiquant les lois de conservation du nombre de nucléons et de la charge électrique, écrire l'équation de réaction nucléaire d'une désintégration alpha du radon ${}^{222}_{86}\text{Rn}$

Réponse : Equation de réaction nucléaire d'une désintégration α : ${}^{222}_{86}\text{Rn} \rightarrow {}^{218}_{84}\text{Po} + {}^4_2\text{He}$
Radon Polonium Hélium

On constate que les lois de conservation sont vérifiées :

- Conservation du nombre de nucléons : $222 = 218 + 4$

- Conservation de la charge électrique : $86 = 84 + 2$

Le rayonnement est peu pénétrant. Il est arrêté par une feuille de papier ou quelques centimètres d'épaisseur d'air. Ce sont les poussières radioactives inhalées qui sont dangereuses.

1. La radioactivité beta moins β^- (émission d'un électron ${}_{-1}^0e$)

Les noyaux appartenant au domaine des noyaux instables ayant un **excès de neutrons**, subiront une désintégration de type β^-

Question : En utilisant la classification périodique des éléments et en indiquant les lois de conservation du nombre de nucléons et de la charge électrique, écrire l'équation de réaction nucléaire d'une désintégration alpha du cobalt ${}_{27}^{60}\text{Co}$

Réponse : Equation de réaction nucléaire d'une désintégration β^- : ${}_{27}^{60}\text{Co} \rightarrow {}_{28}^{60}\text{Ni} + {}_{-1}^0e$ (1 proton de plus)
Cobalt Nickel

On constate que **les lois de conservation** sont vérifiées :

- Conservation du nombre de nucléons : $60 = 60 + 0$
- Conservation de la charge électrique : $27 = 28 + (-1)$

Remarque : Lors de la désintégration β^- , un neutron subit la transformation suivante : ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}_{-1}^0e$

Le rayonnement β^- est assez pénétrant. Il est arrêté par une feuille métallique.

2. La radioactivité beta plus β^+ (émission d'un positon 0_1e)

Le positon est l'antiparticule de l'électron son symbole est 0_1e

Cette radioactivité bêta est moins fréquente que la radioactivité beta moins. Elle n'affecte que les noyaux artificiels.

Les noyaux appartenant au domaine des noyaux instables ayant un **excès de protons**, subiront une désintégration de type β^+

Question : En utilisant la classification périodique des éléments et en indiquant les lois de conservation du nombre de nucléons et de la charge électrique, écrire l'équation de réaction nucléaire d'une désintégration alpha du phosphore ${}_{15}^{30}\text{P}$

Réponse : Equation de réaction nucléaire d'une désintégration β^+ : ${}_{15}^{30}\text{P} \rightarrow {}_{14}^{30}\text{Si} + {}^0_1e$
Phosphore Silicium

On constate que **les lois de conservation** sont vérifiées :

- Conservation du nombre de nucléons : $30 = 30 + 0$
- Conservation de la charge électrique : $15 = 14 + 1$

3. La radioactivité gamma γ (ou désexcitation γ)

La radioactivité γ ne s'accompagne pas d'émission de particule matérielles. ${}^A_ZX^* \rightarrow {}^A_ZX$

Si le noyau produit par l'une des trois désintégrations précédentes α , β^- et β^+ , est dans un état excité (instable), il peut retrouver son état fondamental (stable) en émettant un rayonnement γ .

L'état excité d'un noyau se note avec une étoile * :

Lors de la désintégration du Radium ${}_{88}^{222}\text{Ra}$ par émission d'une particule α , il produit un noyau dans un état excité.

Question : Ecrire l'équation de réaction nucléaire de la désintégration du noyau de radium.

Réponse : ${}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn}^* + {}^4_2\text{He}$

Question : Le noyau ainsi formé se désexcite spontanément en émettant un rayonnement gamma. Ecrire l'équation de réaction nucléaire de la désintégration du noyau. Quelle protection faut-il utiliser pour se protéger de ce type de rayonnement.

${}_{86}^{222}\text{Rn}^* \rightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn}$

Le rayonnement radioactif γ est très pénétrant. Il faut une plaque de plomb de 20 cm d'épaisseur pour l'arrêter.

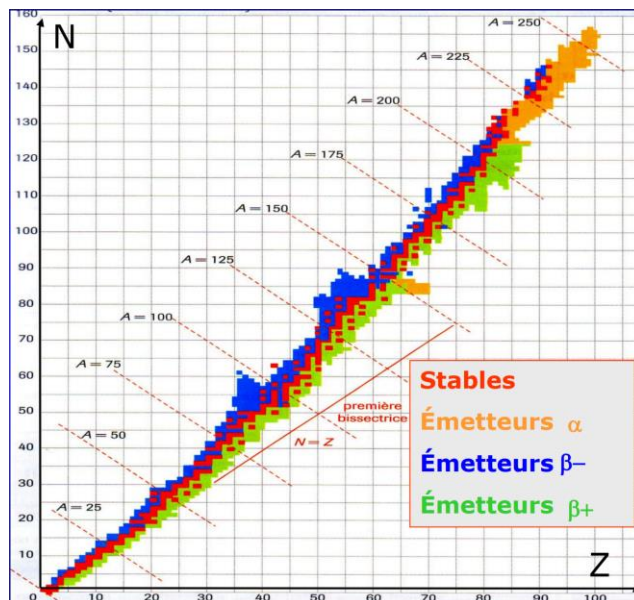
III. Domaines de stabilité et d'instabilité des noyaux : Etude du diagramme (N, Z).

3.1 Pourquoi certains noyaux sont-ils instables ?

La stabilité des noyaux résulte de la compétition entre deux interactions :

- L'interaction **forte** : Elle est attractive, intense à courte distance et active sur les noyaux tels que $N = Z$
- L'interaction **coulombienne** (électrique) entre les protons : Elle est répulsive, agit à plus longue distance et est 10 fois moins active que l'interaction forte. Lorsque A augmente, l'interaction coulombienne (entre les protons), bien que moins intense finit par l'emporter sur l'interaction forte. Les forces répulsives sont ainsi plus intenses : il y a désintégration du noyau.

3.2. Etude du diagramme (N, Z).



On distingue 4 domaines différents :

- Le domaine en rouge représente les éléments chimiques stables (vallée de la stabilité)

On constate que pour des noyaux légers ($A < 20$) les noyaux stables sont sur la bissectrice.

Au-delà ($A > 20$), les noyaux stables s'écartent de cette bissectrice. Ils ont besoin de plus de neutrons que de protons pour rester stables.

Question : compléter les phrases suivantes.

- Le domaine en bleu représente les noyaux instables ayant un excès de
- Le domaine en vert représente les noyaux instables ayant un excès de
- Le domaine en orange représente les noyaux instables ayant un excès de.....

Réponses :

- Le domaine en bleu représente les noyaux instables ayant un excès de neutrons.
- Le domaine en vert représente les noyaux instables ayant un excès de protons
- Le domaine en orange représente les noyaux instables ayant un excès de masse

L'instabilité des noyaux entraînent une désintégration de ceux-ci.

I. Évolution temporelle d'une population de noyaux radioactifs

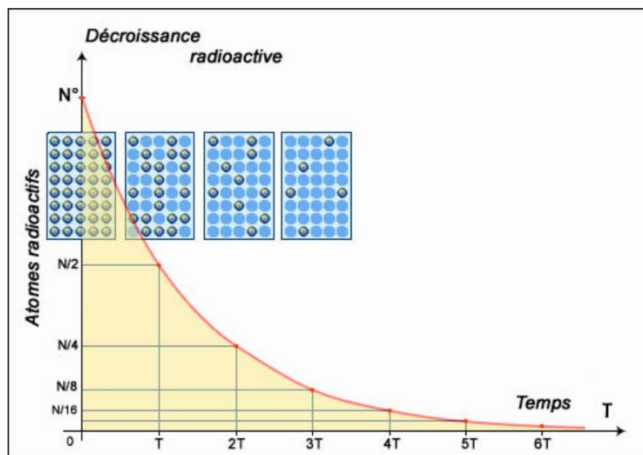
1. Décroissance radioactive.

Document 1 :

La loi de décroissance radioactive est une loi fondamentale de la radioactivité. Quand un noyau émet une particule alpha ou un électron bêta, il se transforme : c'est ainsi que du radium devient du radon, du tritium de l'hélium ! De ce fait, le nombre d'atomes de l'espèce radioactive diminue inexorablement. Il en va de même du nombre de désintégrations par seconde, que l'on

appelle activité de la source radioactive, et du nombre de rayonnements émis. Nombre d'atomes radioactifs, nombre de désintégrations, nombre de rayonnements émis marchent de concert. Ils décroissent de la même façon !

Source : <https://www.laradioactivite.com/site/pages/PeriodeActivite.htm>



DemiVie
Le nombre de noyaux d'un échantillon radioactif diminue de moitié au bout d'un temps caractéristique appelé "période radioactive". Cette division par deux ne dépend pas de l'âge des noyaux. Au bout de deux périodes, le nombre de noyaux est divisé par quatre, au bout de trois périodes par huit, etc... Cette loi de décroissance en fonction du temps est dite exponentielle. La période est, avec la nature des rayonnements émis, la principale caractéristique d'un élément radioactif.
©IN2P3

Source : <https://www.laradioactivite.com/site/pages/PeriodeActivite.htm>

Question : Indiquer sur le schéma comment déterminer le temps de demi-vie $t_{1/2}$ (anciennement appelée période radioactive)

2. Activité.

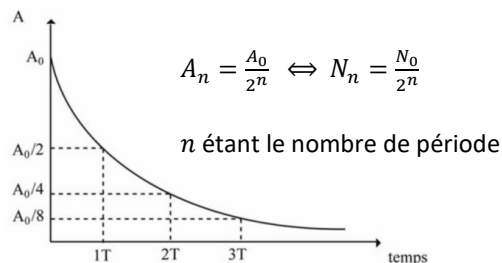
Etude de la loi de décroissance radioactive peut s'effectuer à partir du nombre N de noyaux radioactifs restants ou bien à partir de l'activité A.

L'activité d'un échantillon radioactif est le nombre de désintégration par seconde.

Elle s'exprime en Becquerel (Bq)

1 Bq = 1 désintégration / seconde

On peut tracer le graphique $A = f(t)$ équivalent au précédent $N = f(t)$



Deux expressions de l'activité peuvent être données quand t tend vers 0 :

- L'activité $A(t)$ traduit la variation du nombre de noyaux radioactifs au cours du temps : $A(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$
- L'activité $A(t)$ est proportionnelle au nombre de noyaux restants : $A(t) = \lambda \cdot N(t)$

λ la constante de désintégration radioactive. Elle est caractéristique du noyau radioactif. Elle s'exprime en s^{-1}

Etablissons l'équation différentielle traduisant la loi de décroissance radioactive :

A partir des deux expressions de l'activité, on peut écrire que :

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda \cdot N(t)$$

$\frac{dN(t)}{dt}$: dérivée de N par rapport au temps

Il s'agit d'une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants.

$$\Leftrightarrow \frac{dN(t)}{N(t)} = -\lambda \cdot dt$$

$$\text{Soit } \frac{dN(t)}{N(t)} + \lambda \cdot dt = 0$$

On peut écrire également écrire pour des durées Δt plus longues que la variation (négative) du nombre de noyaux $\Delta N = N(t) - N_0$ est proportionnelle à la durée Δt , aux nombres de noyaux restants $N(t)$ et à la constante de désintégration radioactive λ .

$$\text{On a alors } \Delta N = -\lambda \cdot N(t) \cdot \Delta t$$

$$\text{Soit } \frac{\Delta N(t)}{\Delta t} = -\lambda \cdot N(t)$$

3. Résolution mathématique de l'équation différentielle traduisant la décroissance radioactive en fonction de $N(t)$.

Le problème à résoudre est donc le suivant : on cherche à déterminer l'expression du nombre de noyaux restants au cours du temps $N(t)$ qui vérifie l'équation $\frac{dN(t)}{N(t)} + \lambda \cdot dt = 0$

La résolution s'effectue en **une** étape (car il n'y a pas de solution particulière dans ce cas).

$$\text{Résolution de l'équation sans second membre, c'est-à-dire } \frac{dN(t)}{N(t)} + \lambda \cdot dt = 0$$

$$\text{En séparant les variables } N(t) \text{ et } t \quad \Leftrightarrow \frac{dN(t)}{N(t)} = -\lambda \cdot dt$$

$$\text{On peut écrire que la solution de l'équation différentielle a pour expression } |N(t)| = A \cdot e^{[-\lambda \cdot t]} + B$$

$$\text{Question : Montrer que la solution de l'équation différentielle est : } N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} .$$

$$\text{On peut écrire que la solution de l'équation différentielle a pour expression } |N(t)| = K \cdot e^{[-\lambda \cdot t]}$$

où K est une constante à déterminer

Détermination de la constante K par les conditions initiales

On se place dans les conditions initiales : à $t = 0$ on a $N(0) = N_0$

N_0 est le nombre de radioactifs initial.

$$\Leftrightarrow K \cdot e^{-k \cdot 0} = N_0$$

$$\Leftrightarrow K = N_0 \quad \text{avec } e^{-k \cdot 0} = 1$$

La solution complète de l'équation différentielle est donc : $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$: il s'agit de la loi de décroissance radioactive.

$$\text{On note } \tau \text{ la constante de temps. } \tau = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{unité : seconde})$$

$$\text{La relation } N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \text{ peut s'écrire } N(t) = N_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Application à la désintégration de l'argent 108 (Bac Asie 2006)

On soumet à un flux de neutrons lents un échantillon d'argent ne contenant que des atomes d'argent 107. Un noyau d'argent 107 capte un neutron et il se forme un noyau d'argent 108. Le noyau d'argent 108 est radioactif. Il se désintègre suivant plusieurs processus compétitifs dont la radioactivité β^- et la radioactivité β^+ .

Donnée: extrait de la classification périodique fournissant les symboles des éléments et leur numéro atomique

Rh Z = 45	Pd Z = 46	Ag Z = 47	Cd Z = 48	In Z = 49
--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

1. Capture d'un neutron.

- 1.1. Rappeler les deux lois de conservation qui permettent d'écrire l'équation d'une réaction nucléaire.
- 1.2. Écrire l'équation de la réaction de capture d'un neutron par un noyau d'argent 107.

2. Désintégration du noyau d'argent 108.

- 2.1. Rappeler la nature des particules émises au cours des radioactivités β^- et β^+ . Écrire leur symbole.
- 2.2. Écrire les équations correspondant à chacune des transformations radioactives pour l'argent 108.

Réponses :

1. Capture d'un neutron.

- 1.1. Les deux lois de conservation lors d'une réaction nucléaire sont :
 - la conservation du nombre de charges,
 - la conservation du nombre de nucléons.

1.2. équation de la réaction de capture d'un neutron par un noyau d'argent 107: ${}^{107}_{47}\text{Ag} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{108}_{47}\text{Ag}$

(l'écriture du neutron ${}^1_0\text{n}$ pouvait se déduire des lois de conservation précédentes)

2. Désintégration du noyau d'argent 108.

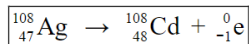
2.1. La radioactivité β^- s'accompagne de l'émission d'un électron de symbole : ${}^0_{-1}\text{e}$.

La radioactivité β^+ s'accompagne de l'émission d'un positon de symbole : ${}^0_1\text{e}$.

2.2. Désintégration β^- : ${}^{108}_{47}\text{Ag} \rightarrow {}^A_Z\text{X} + {}^0_{-1}\text{e}$

Lois de conservation : $108 = A + 0$ donc $A = 108$

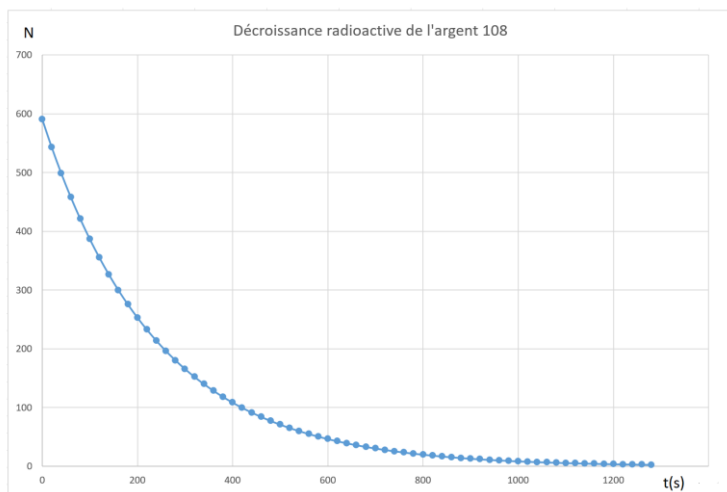
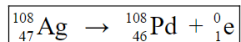
et $47 = Z - 1$ donc $Z = 48$ donc X est l'élément Cadmium Cd



Désintégration β^+ : ${}^{108}_{47}\text{Ag} \rightarrow {}^A_Z\text{Y} + {}^0_1\text{e}$

or : $108 = A + 0$ donc $A = 108$

et $47 = Z + 1$ donc $Z = 46$ donc Y est l'élément Palladium Pd



Question : Déterminer graphiquement la valeur de la demi-vie radioactive de l'argent 108 et de la constante de temps τ

En déduire la valeur de λ dans le cas de la désintégration de l'argent 108

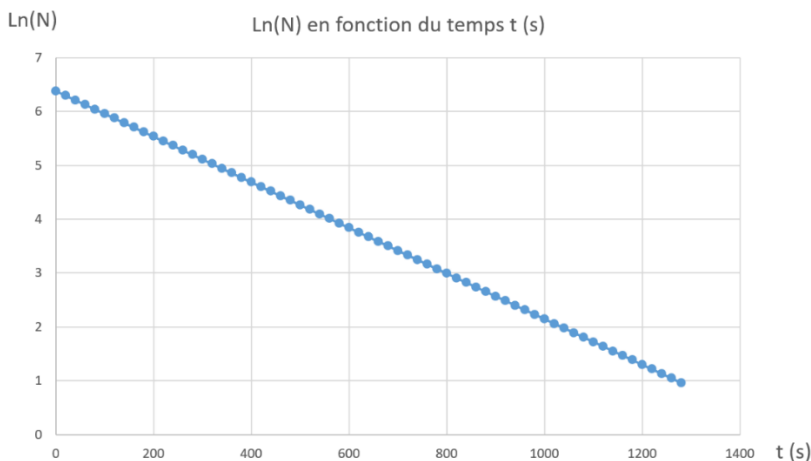
Réponse :

Le temps de demi-vie est égal à

La constante de temps est égale à $\tau = 236$ s

La constante de décroissance radioactive est

donc égale à $\lambda = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{236} = 4,24 \times 10^3$ s



Question : déterminer la valeur de la constante radioactive λ à partir du graphique suivant, correspond à l'équation :

$$\ln N(t) = -\lambda \cdot t + \ln N_0$$

Réponse : Il faut déterminer la valeur du coefficient directeur de la droite.

$$\lambda = \frac{6,38-1,00}{1200-0} = 4,48 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

4. Relation entre temps de demi-vie $t_{1/2}$ et constante radioactive λ .

Rappel : Le temps de demi-vie est la durée correspondant à la désintégration de la moitié des noyaux radioactifs initialement présents dans l'échantillon.

Question : Montrer que $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$

Réponse : Relation entre la constante de désintégration et la demi-vie $t_{1/2}$

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

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

$\Leftrightarrow \ln 1 - \ln 2 = -\lambda \cdot t_{1/2} \qquad \ln 1 = 0$

$\Leftrightarrow \ln 2 = \lambda \cdot t_{1/2}$

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

5. Relation entre la constante de temps τ et la demi-vie $t_{1/2}$

On a $\tau = \frac{1}{\lambda} \qquad \Leftrightarrow t_{1/2} = \ln 2 \cdot \tau$

6. Activité.

Etude de la loi de décroissance radioactive peut s'effectuer à partir du nombre N de noyaux radioactifs restants ou bien à partir de l'activité A.

L'activité d'un échantillon radioactif est le nombre de désintégration par seconde.

Elle s'exprime en Becquerel (Bq)

1 Bq = 1 désintégration / seconde

La relation entre l'activité $A(t)$ le nombre de noyaux restants $N(t)$ est :

$A(t) = \lambda \cdot N(t)$

λ est la constante de désintégration radioactive.

