

Stabilité des noyaux atomiques

Un atome est constitué d'un noyau entouré d'un cortège d'électrons.

Le noyau de l'atome

• Composition

Les particules élémentaires constituant le noyau sont appelées les **nucléons**. Il existe deux types de nucléons : les **protons** et les **neutrons**.

	proton	neutron
Masse (kg)	$1,67263 \cdot 10^{-27}$	$1,67492 \cdot 10^{-27}$
charge	+ e	0

– La charge e est la charge électrique élémentaire :
 $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

– Un proton et un neutron ont quasiment la même masse.

Le nombre de masse A d'un noyau est égal au **nombre de nucléons** qu'il contient.

Le nombre de charge d'un noyau, ou **numéro atomique Z**, est égal au **nombre de protons** qu'il contient.

Le numéro atomique Z est caractéristique d'un élément donné. Un atome de cet élément, électriquement neutre, possède Z électrons, mais un ion du même élément possède un nombre d'électrons différent de Z .

Z représente le nombre de protons contenus dans le noyau et pas le nombre d'électrons que possède l'atome correspondant.

Un noyau atomique s'écrit alors symboliquement :

${}^A_Z X$ où X représente le symbole de l'élément chimique considéré. On peut en déduire la composition du noyau :

Z protons et $N = A - Z$ neutrons.

Exemple : Le noyau d'un atome de carbone ${}^{12}_6 C$ contient 6 protons et $12 - 6 = 6$ neutrons.

• Isotopie

Des noyaux sont **isotopes** s'ils ont **même nombre de protons**, mais des **nombre de neutrons différents**.

Des noyaux isotopes appartiennent au même élément chimique. Leurs nombres de charge sont égaux, mais leurs nombres de masse sont différents.

Exemple : Les noyaux ${}^{12}_6 C$ et ${}^{14}_6 C$ sont des isotopes du carbone. Le carbone 12 possède 6 protons et 6 neutrons, alors que le carbone 14 possède 6 protons et 8 neutrons.

Pour un élément donné, on définit **l'abondance naturelle** de chaque isotope par son pourcentage en masse x dans un mélange naturel de cet élément.

Quelle que soit l'origine de l'échantillon, l'abondance naturelle de chaque isotope d'un élément ne varie quasiment pas.

La radioactivité

• Stabilité d'un noyau

La cohésion du noyau atomique est due à l'interaction forte. Cependant, certains isotopes d'un élément sont stables, alors que d'autres se transforment spontanément.

Un **noyau radioactif** est un noyau instable qui se **décompose spontanément** en donnant naissance à un noyau différent et en émettant un rayonnement radioactif.

Le noyau qui se désintègre est appelé **noyau-père**. Le noyau auquel il donne naissance est appelé **noyau-fils**.

• Domaines de stabilité et d'instabilité

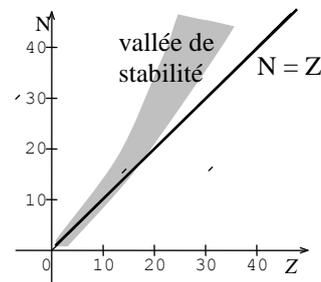
Un « **diagramme (N, Z)** » fournit les domaines de stabilité et d'instabilité des noyaux. Les **isotopes stables** se trouvent dans la zone du diagramme appelée « **vallée de stabilité** ».

– Pour $Z < 20$, les noyaux stables se situent au voisinage de la droite $N = Z$; leurs nombres de neutrons et de protons sont donc voisins.

Exemples : ${}^4_2 He$, ${}^{12}_6 C$

– Pour $Z > 20$, les noyaux stables se situent au-dessus de la droite $N = Z$; leur nombre de neutrons est donc supérieur à leur nombre de protons.

Exemples : ${}^{56}_{26} Fe$, ${}^{108}_{47} Ag$



METHODE

Reconnaître des noyaux isotopes

On considère deux noyaux atomiques de nombres de masse et de nombres de charges respectifs (A, Z) et (A', Z').

• On compare **leurs nombres de charge Z et Z'** .

– Si $Z \neq Z'$, les deux noyaux appartiennent à des éléments différents : ils ne sont donc **pas isotopes**.

– Si $Z = Z'$, les deux noyaux appartiennent au **même élément**.

• On compare alors **leurs nombres de masse A et A'** .

– Si $A = A'$, les deux noyaux sont **identiques**.

– Si $A \neq A'$, les deux noyaux sont **isotopes**.

Certains noyaux sont tels que $Z \neq Z'$, mais $A = A'$: ils ne sont évidemment pas isotopes.

Exemple :

Les noyaux (8 ; 4) et (9 ; 4), de même nombre de charge 4, sont isotopes.

En revanche, les noyaux (8 ; 4) et (8 ; 5), de nombres de charge différents, ne sont pas isotopes.

Les Réactions Nucléaires

Les émissions radioactives

En se désintégrant, un noyau radioactif émet des rayonnements, qui peuvent être **des particules** ou **des radiations**. Des appareils, comme le compteur Geiger-Muller, permettent de détecter ces émissions.

– Les **particules α** , notées ${}^4_2\text{He}$, sont des **noyaux d'hélium** constitués de 4 nucléons (2 protons et 2 neutrons) et portant la charge $+2e$. Une feuille de papier suffit à les arrêter.

– Les **particules β^-** , notées ${}^0_{-1}\text{e}$, sont des **électrons** de masse $m_e = 9,1.10^{-31}$ kg et portant la charge $-e$. Quelques mètres d'air, ou une feuille d'aluminium de quelques millimètres d'épaisseur, suffisent à les arrêter.

– Les **particules β^+** , notées ${}^0_{+1}\text{e}$, sont des **positons**, antiparticules des électrons (même masse et charge opposée $+e$). Les positons disparaissent très rapidement après leur émission, car ils s'annihilent avec les électrons qu'ils rencontrent.

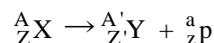
Il ne faut pas confondre proton et positon. Ces deux particules portent la même charge, mais leurs masses sont très différentes : la masse du proton vaut environ 1 600 fois celle de l'électron, et donc du positon.

– Le **rayonnement γ** est une onde de même nature que la lumière, mais beaucoup plus énergétique, de longueur d'onde de l'ordre de 10^{-4} nm. Il faut une importante épaisseur de béton ou de plomb pour se protéger de ce rayonnement.

Les lois de conservation

On appelle **réaction nucléaire** la désintégration d'un noyau-père radioactif ${}^A_Z\text{X}$ en un noyau-fils ${}^{A'}_{Z'}\text{Y}$ avec émission d'un rayonnement radioactif ${}^a_z\text{p}$.

On modélise cette réaction par une équation du type :



où ${}^a_z\text{p}$ peut être soit une particule (α , β^- , β^+), soit une radiation (γ).

Une réaction nucléaire modifie les noyaux atomiques mis en jeu, donc la nature des éléments chimiques : il n'y a donc pas conservation des éléments.

Dans une réaction chimique, il y a conservation des éléments, car la transformation fait intervenir les électrons et ne modifie pas les noyaux.

Le nombre de charge du noyau-père est égal à la somme des nombres de charge du noyau-fils et du rayonnement émis : $Z = Z' + z$

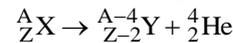
Le nombre de masse du noyau-père est égal à la somme des nombres de masse du noyau-fils et du rayonnement émis : $A = A' + a$

Les équations des réactions nucléaires

Suivant sa position par rapport à la « vallée de stabilité » d'un diagramme (N, Z), un noyau radioactif se désintègre différemment.

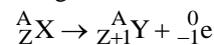
• La radioactivité α

Les noyaux les plus massifs, dont le nombre de masse A est supérieur à 140, se désintègrent en émettant une particule α selon la réaction d'équation :

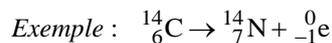
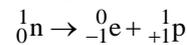


• La radioactivité β^-

Les noyaux situés au-dessus de la vallée de stabilité, qui possèdent trop de neutrons par rapport au nombre de protons, se désintègrent en émettant un électron :

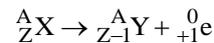


L'électron émis ne provient pas du cortège électronique de l'atome, mais de la transformation d'un neutron en proton dans le noyau :

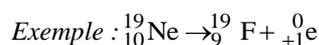


• La radioactivité β^+

Les noyaux situés en dessous de la vallée de stabilité, qui possèdent trop de protons par rapport au nombre de neutrons, se désintègrent en émettant un positon :



Le positon émis provient de la transformation d'un proton en neutron dans le noyau : ${}^1_1\text{p} \rightarrow {}^0_{+1}\text{e} + {}^1_0\text{n}$



• L'émission γ

Elle accompagne les transformations précédentes lorsque le noyau-fils ${}^{A'}_{Z'}\text{Y}$ est produit dans un état d'énergie importante, dit état excité et noté ${}^{A'}_{Z'}\text{Y}^*$. Pour revenir à son état stable, d'énergie la plus basse, le noyau-fils perd de l'énergie en émettant une radiation : ${}^{A'}_{Z'}\text{Y}^* \rightarrow {}^{A'}_{Z'}\text{Y} + \gamma$

METHODE

Identifier le type de radioactivité d'un noyau

Le phosphore ${}^{32}_{15}\text{P}$, radioactif, se désintègre en soufre ${}^{32}_{16}\text{S}$. On se propose d'identifier le type de radioactivité du phosphore 32.

• On écrit la **forme générale de l'équation** d'une réaction nucléaire : ${}^{32}_{15}\text{P} \rightarrow {}^{32}_{16}\text{S} + {}^a_z\text{p}$

• On écrit la **conservation du nombre de charge** : $Z = Z' + z$, soit : $15 = 16 + z$ et $z = -1$.

• On écrit la **conservation du nombre de masse** : $A = A' + a$, soit : $32 = 32 + a$ et $a = 0$.

• On déduit du rayonnement émis le type de radioactivité : émission d'un électron ${}^0_{-1}\text{e}$, d'où radioactivité β^- .

Décroissance Radioactive

Evolution de la population d'un échantillon radioactif

• Constante de désintégration

Il est impossible de prédire l'instant précis auquel un noyau radioactif se désintégrera. En revanche, on connaît la **probabilité de désintégration** de ce noyau par unité de temps.

Pendant la durée Δt , le nombre de noyaux radioactifs présents dans un échantillon varie de la quantité ΔN telle que :

$$\Delta N = -\lambda N(t) \Delta t \quad \left| \begin{array}{l} \lambda > 0 \text{ constante de désintégration} \\ \text{radioactive (s}^{-1}\text{)} \\ N(t) \text{ nombre de noyaux à l'instant } t \\ \Delta t \text{ durée en seconde (s)} \end{array} \right.$$

– La constante de désintégration radioactive est caractéristique d'un noyau donné. Elle ne dépend ni de ses conditions physiques et chimiques, ni de son âge.

– Comme $\Delta N < 0$, on retrouve bien que le nombre de noyaux radioactifs décroît au cours du temps.

• Activité d'un échantillon radioactif

Il est impossible de mesurer directement le nombre de noyaux radioactifs présents dans un échantillon à l'instant t . On définit donc l'activité de l'échantillon, mesurable grâce à un compteur.

L'activité $A(t)$ d'un échantillon radioactif à l'instant t , exprimée **en becquerel (Bq)**, est le nombre de désintégrations radioactives dans l'échantillon par unité de temps :

$$A(t) = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| \quad \left| \begin{array}{l} A \text{ activité en becquerel (Bq)} \\ \Delta N \text{ variation du nombre de noyaux} \\ \Delta t \text{ durée en seconde (s)} \end{array} \right.$$

Un becquerel représente une désintégration par seconde.

Exemples :

- Le corps humain a une activité d'environ 10^4 Bq.
- Le radon libéré par les roches a une activité de l'ordre de 10 à 10^2 Bq par mètre cube d'air.
- Les sources radioactives utilisées au laboratoire ont des activités de l'ordre de 10^4 à 10^7 Bq.

Loi de décroissance radioactive

• Expressions de N et de A

L'équation différentielle vérifiée par N s'obtient en considérant un intervalle de temps dt très petit :

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

Le nombre de noyaux radioactifs $N(t)$ présents à l'instant t dans un échantillon est donné par la **loi de décroissance radioactive** :

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

avec N_0 nombre de noyaux radioactifs initialement présents.

Si on considère un intervalle de temps dt très petit, l'activité s'écrit comme la vitesse de désintégration :

$$A(t) = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}, \text{ soit } A(t) = \lambda N(t)$$

• Temps de demi-vie et constante de temps

Le temps de demi-vie $t_{1/2}$ d'un noyau radioactif est la durée au bout de laquelle la **moitié des noyaux radioactifs** initialement présents dans l'échantillon **se sont désintégrés**.

La demi-vie $t_{1/2}$ est aussi la durée au bout de laquelle l'activité initiale de l'échantillon est divisée par 2.

On appelle **constante de temps τ** l'inverse de la constante de désintégration λ :

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad \text{avec } \tau \text{ en seconde (s).}$$

On peut alors écrire, d'après la définition de la demi-vie : $N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$

La demi-vie $t_{1/2}$, la constante de désintégration λ et la constante de temps τ vérifient les relations :

$$\lambda t_{1/2} = \ln 2 \text{ et } t_{1/2} = \tau \ln 2$$

Conséquences et applications de la radioactivité

• Effets biologiques

Les émissions radioactives peuvent détruire ou altérer gravement les cellules du corps humain. Le danger augmente avec l'activité de la source radioactive, mais dépend aussi de la durée d'exposition et du type de radioactivité.

Par ailleurs, bien contrôlée, l'exposition à une source radioactive peut être utilisée à des fins médicales en radiothérapie ou en imagerie.

• Datation

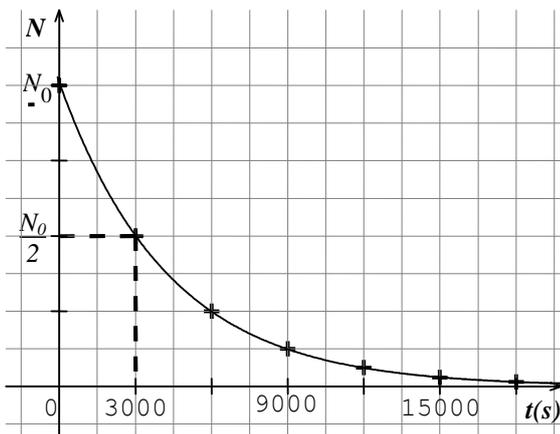
Le principe de la **datation** est basé sur l'existence d'isotopes d'un même élément ayant des demi-vies différentes. La composition isotopique actuelle étant connue, on peut, par comparaison avec la composition isotopique d'un échantillon ancien, déterminer l'âge de ce dernier.

Exemple : Le carbone 14 est fréquemment utilisé pour dater des objets (élaborés à partir de matière végétale ou animale) vieux de mille à trente mille ans environ.

METHODE

Déterminer λ à partir de mesures expérimentales

• Première méthode : à l'aide de la courbe $N(t)$,



On repère sur le graphe la valeur de N_0 correspondant à l'instant initial, puis on détermine l'instant $t_{1/2}$ correspondant à $N = \frac{N_0}{2}$

On en déduit alors λ , grâce à la relation : $\lambda t_{1/2} = \ln 2$

Exemple :

Sur la courbe, on lit $t_{1/2} = 3\,000$ s, soit $\lambda = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.

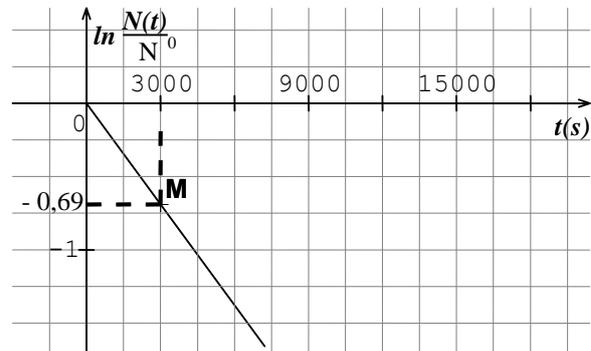
On peut procéder de même avec la courbe $A(t)$.

• Deuxième méthode : à l'aide de la droite $\ln \frac{N(t)}{N_0}$

D'après la loi de décroissance radioactive, on a :

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

La constante de désintégration λ est égale à la valeur absolue de la pente de la droite tracée : on détermine graphiquement sa valeur en considérant les points O et M(3000 ; -0,69).



Exemple :

La pente de la courbe vaut $-2,3 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, soit $\lambda = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.

On peut procéder de même avec la courbe $A(t)$.

