

Chapitre 1 : Structure de l'atome

Les savants du XIX^{ème} siècle, en mettant en évidence les lois pondérales de la chimie, ont établi une échelle où tous les éléments connus se classent par nombre de masse. En choisissant arbitrairement l'unité pour l'élément le plus léger ($H=1$), tous les éléments se voient alors attribuer un nombre de masse bien défini. La chimie moderne a montré que ces propriétés sont dues à l'existence des atomes. Chaque élément correspond à une espèce d'atomes ou à une famille d'isotopes ayant une masse donnée.

1.1. L'atome

L'atome est constitué d'un noyau (protons + neutrons) et d'électrons. L'élément est défini par son numéro atomique, qui correspond au nombre de protons présents dans le noyau.

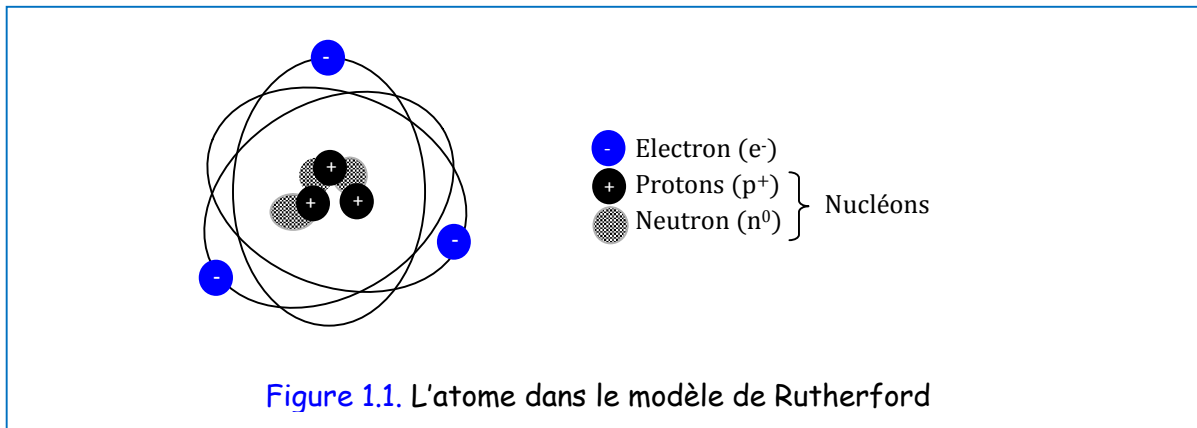
Exemple : le noyau de l'hydrogène est constitué d'un seul proton. Le noyau d'hélium est constitué de 2 protons et 2 neutrons.

Les protons ont une charge positive, alors que les neutrons sont électriquement neutres. Autour du noyau atomique se trouvent les "électrons". Il s'agit de petites particules "gravitant" autour du noyau.

Les électrons sont de charges négatives, pour compenser la charge positive des protons et ainsi rendre l'atome électriquement neutre. On trouve ainsi dans un atome le même nombre de protons et d'électrons.

Les ions sont en fait des atomes ayant gagné ou perdu des électrons, ils sont ainsi chargés négativement (anions) ou positivement (cations).

La masse de l'atome est concentrée dans une petite région chargée positivement : le noyau central. La figure 1.1 illustre l'atome dans le modèle de Rutherford.



Caractéristiques de l'atome

- Atome = électrons + noyau. Diamètre d'un atome : 10^{-10} m (1 Å)
- Noyau = protons + neutrons. Diamètre d'un noyau : 10^{-15} m (1 fm)
- Electron: charge électrique négative $|e|=1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Masse de l'électron : $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg.
- Proton : charge électrique positive. Masse du proton : $1,673 \cdot 10^{-27}$ kg
- Neutron : électriquement neutre. Masse du neutron : $1,675 \cdot 10^{-27}$ kg ;
 $m_n \approx m_p = 1836 m_e$

Pour une espèce d'atome ${}^A_Z X$

- Une espèce donnée de noyau s'appelle un nucléide (nuclide) : ${}^A_Z X$
- Les A et Z sont des entiers. Ils caractérisent un atome ou son noyau.
- Le nombre de protons Z fixe la charge du noyau
- Le nombre de nucléons A fixe la masse du noyau
- La charge totale du noyau : $+Ze$
- La charge totale des électrons : $-Ze$

Exemple : ${}^{16}_8 O$ et ${}^{27}_{13} Al$

1.1.1. Les isotopes

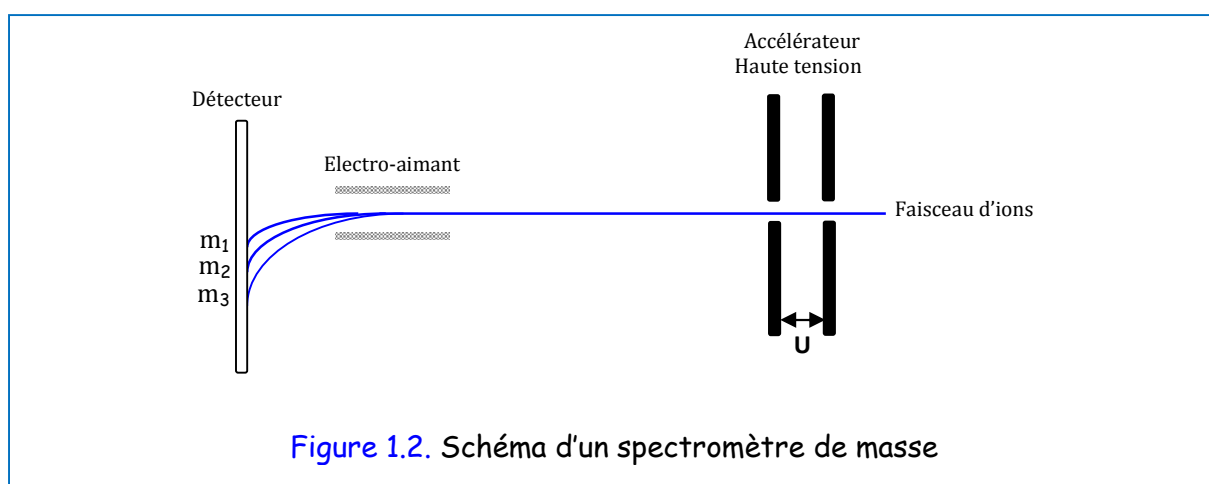
Des atomes peuvent avoir un même numéro atomique Z et des nombres de masse A différents. On dit qu'ils sont des isotopes d'un même élément.

Exemple : ${}^{16}_8 O$; ${}^{17}_8 O$; ${}^{18}_8 O$

${}^{35}_{17} Cl$; ${}^{37}_{17} Cl$

Détermination de la masse des isotopes

Dans un spectromètre de masse, un gaz est bombardé d'électrons de manière à créer des ions chargés positivement par éjection d'un ou plusieurs électrons. Ces ions sont accélérés par un champ électrique puis déviés plus ou moins fortement suivant leur masse par un champ magnétique. Un détecteur permet de visualiser le point d'impact de l'ion et donc d'en déduire sa masse avec une très grande précision. On peut séparer les isotopes d'un élément et mesurer leurs abondances en utilisant un spectromètre de masse (Figure 1.2).



Un grand nombre d'éléments existe à l'état naturel sous forme d'un mélange d'isotopes. La masse moyenne d'un élément est donnée par la relation:

$$m = \frac{\sum m_i x_i}{100}, \quad m_i : \text{masse de l'isotope } i ; x_i : \text{abondance relative (\%)}$$

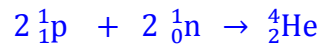
Tableau 1.1. Exemples d'isotopes naturels, leurs abondances et leurs masses

Elément	Isotope	Abondance (%)	Masse (10^{-27} kg)
Hydrogène	${}^1_1\text{H}$	99,98	1,673
	${}^2_1\text{H}$	0,015	3,344
Carbone	${}^{12}_6\text{C}$	98,89	19,926
	${}^{14}_6\text{C}$	1,11	21,592
Chlore	${}^{35}_{17}\text{Cl}$	75,77	58,066
	${}^{37}_{17}\text{Cl}$	24,23	61,382

1.1.2. La cohésion du noyau

Energie de cohésion

Si on considère la formation d'un noyau d'hélium He à partir des nucléons selon la réaction :



Cette réaction s'accompagne d'une perte de masse Δm qui se transforme en énergie ΔE (conservation de la matière) :

$$\Delta E = -E_I = \Delta m \cdot C^2$$

$$\Delta m = m_{\text{finale}} - m_{\text{initiale}}$$

ΔE : énergie de formation ($\Delta E < 0$), C : célérité de la lumière = $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

On définit l'énergie de cohésion, $E_I = -\Delta E$, comme étant l'énergie nécessaire pour détruire un noyau en neutrons et en protons ($\Delta E > 0$).

Unité de l'énergie de cohésion

Les principales unités utilisées sont : le joule, l'eV et le MeV. $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ et $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$.

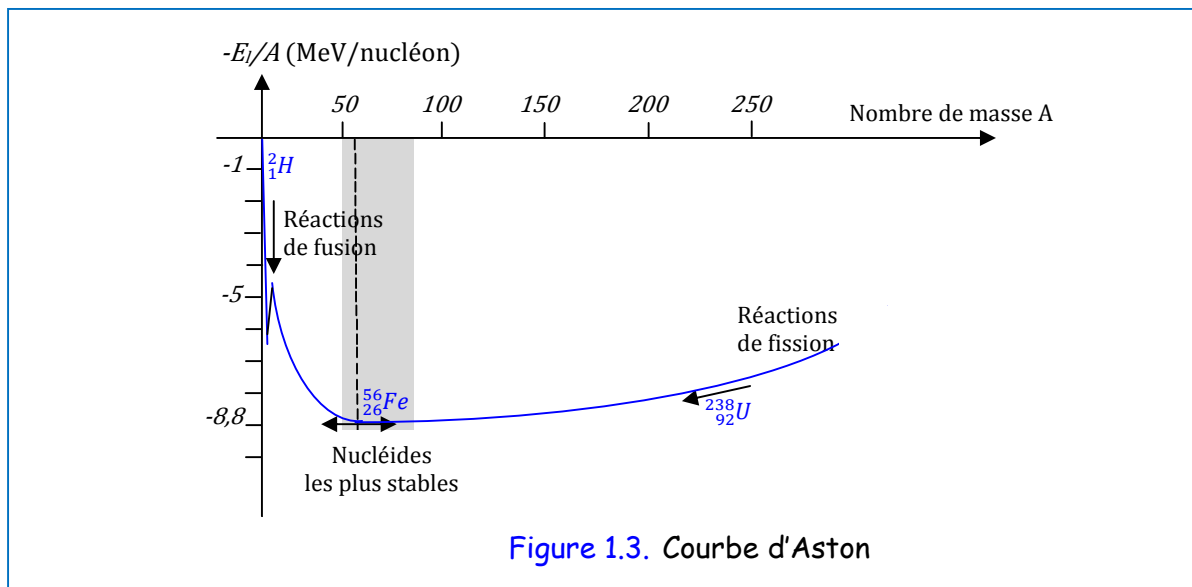
L'électron volt est l'énergie d'un électron soumis à une différence de potentiel (ddp) de 1 volt. $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. $1 \text{ V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Stabilité du noyau

On définit aussi l'énergie de cohésion par nucléon par la relation :

$$\Delta E' = E_I / A$$

Cette énergie mesure la stabilité des noyaux (plus $\Delta E'$ est grande, plus le noyau est stable). En général, l'énergie de cohésion par nucléon est inférieure à 8,9 MeV quelque soit l'élément considéré. La courbe d'Aston, représentée par la figure 1.3, donne la variation de : $-E_I/A = \Delta E/A$ en fonction de A . Cette courbe permet de visualiser facilement les noyaux les plus stables. Ceux-ci correspondent aux plus basses valeurs de $-E_I/A$.



La pente de la courbe d'Aston est très importante pour la zone des atomes "légers" de nombre de masse $A < 20$. Pour les atomes "lourds" de numéro atomique $Z > 20$, cette pente est beaucoup plus faible.

Les atomes dont l'énergie de liaison moyenne est faible ($E_l / A < 7,5$ MeV) tendent à se stabiliser et à se rapprocher de la zone de stabilité maximale vers $Z = 58$.

Deux processus différents sont possibles:

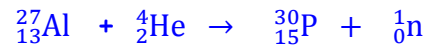
Les atomes légers donnent des réactions nucléaires de fusion et les atomes lourds des réactions de fission.

Actuellement, il existe près de 2000 noyaux d'atomes connus dont seulement 279 stables (ils ne se désintègrent pas).

Les principales règles qui permettent d'identifier les noyaux stables sont:

- ✓ Pour les noyaux légers ($Z < 20$), les noyaux stables ont un nombre de protons égal au nombre de neutrons.
- ✓ Pour les noyaux lourds, il faut plus de neutrons que de protons afin de neutraliser les forces de répulsion croissantes entre les protons (la masse volumique du noyau est d'environ 10^{14} g/cm³).
- ✓ 80% des noyaux stables possèdent un nombre pair de protons et 78% un nombre pair de neutrons.

Tous les éléments qui contiennent plus de 83 protons sont radioactifs et il est possible de synthétiser au laboratoire des radio-isotopes (artificiels) qui n'existent pas à l'état naturel, exemple de la première synthèse réalisée en 1934 par Irène Curie et Frédéric Joliot :



1.2. Radioactivité - Réactions nucléaires

La radioactivité a été découverte par Becquerel en 1896 et il existe plusieurs types:

1.2.1. Types de radioactivité

a. Radioactivité α

C'est l'émission d'un noyau d'hélium He^{2+} (particules α) : ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + \alpha$

Exemple : ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + \alpha$

Ces particules sont expulsées avec des vitesses relativement faibles et sont arrêtées par quelques centimètres d'air ou par une feuille de papier, mais elles sont très ionisantes et donc dangereuses. La radioactivité α concerne les noyaux lourds ($A > 200$).

b. Radioactivité β^-

C'est l'émission d'un électron (particules β^-) et de rayons γ : ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + e^- + \gamma$

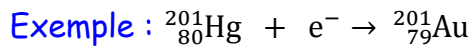
Exemple : ${}_{6}^{14}\text{C} \rightarrow {}_{7}^{14}\text{N} + e^- + \gamma$

La radioactivité β^- concerne les noyaux riches en neutrons situés à gauche de la vallée de stabilité. Il n'y a pas d'électron dans le noyau, mais le noyau peut en émettre en transformant un neutron excédentaire en un électron et un proton suivant le bilan : ${}_0^1\text{n} \rightarrow {}_1^1\text{p} + {}_{-1}^0\text{e}$

Les particules β^- sont assez peu pénétrantes. Elles sont arrêtées par quelques millimètres d'aluminium.

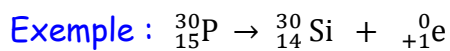
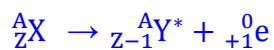
c. Radioactivité par capture d'électron ou capture K

L'électron de la couche la plus interne K est capturé par le noyau et s'associe avec un proton pour donner un neutron ($p + e^- \rightarrow n$) : ${}^A_ZX + e^- \rightarrow {}^A_{Z-1}Y$



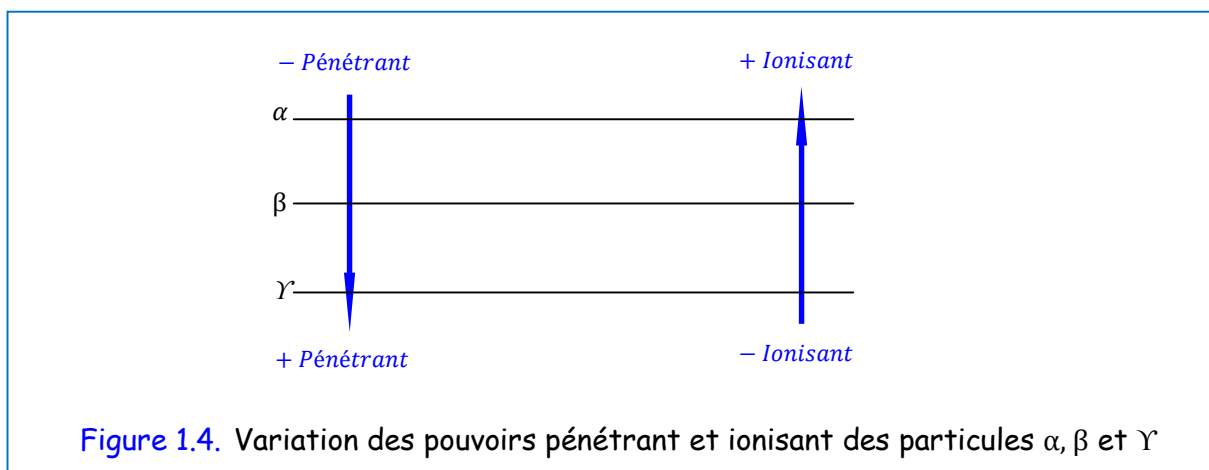
d. Radioactivité β^+

C'est l'émission de positons ${}^0_{+1}e$, appelée aussi rayonnement β^+ :



Cette radioactivité β^+ ne concerne que des noyaux artificiels qui possèdent trop de protons. Ce positon ne peut provenir que de la transformation d'un proton excédentaire suivant le bilan suivant : ${}^1_1\text{P} \rightarrow {}^1_0\text{n} + {}^0_{+1}e$

Ces particules β^+ ont une durée de vie très courte. Lorsqu'elles rencontrent un électron, les deux particules s'associent pour donner de l'énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique γ suivant le bilan : ${}^0_{-1}e + {}^0_{+1}e \rightarrow \gamma$



Les émissions des rayons γ (photons) et des particules β (électrons et positons) par des substances radioactives peuvent être détectées par des compteurs Geiger. Ces radiations ionisent le gaz qui occupe la chambre du compteur (Ar en général), et les ions ainsi produits permettent le passage d'un courant qui est ensuite détecté.

1.2.2. Radioactivité naturelle

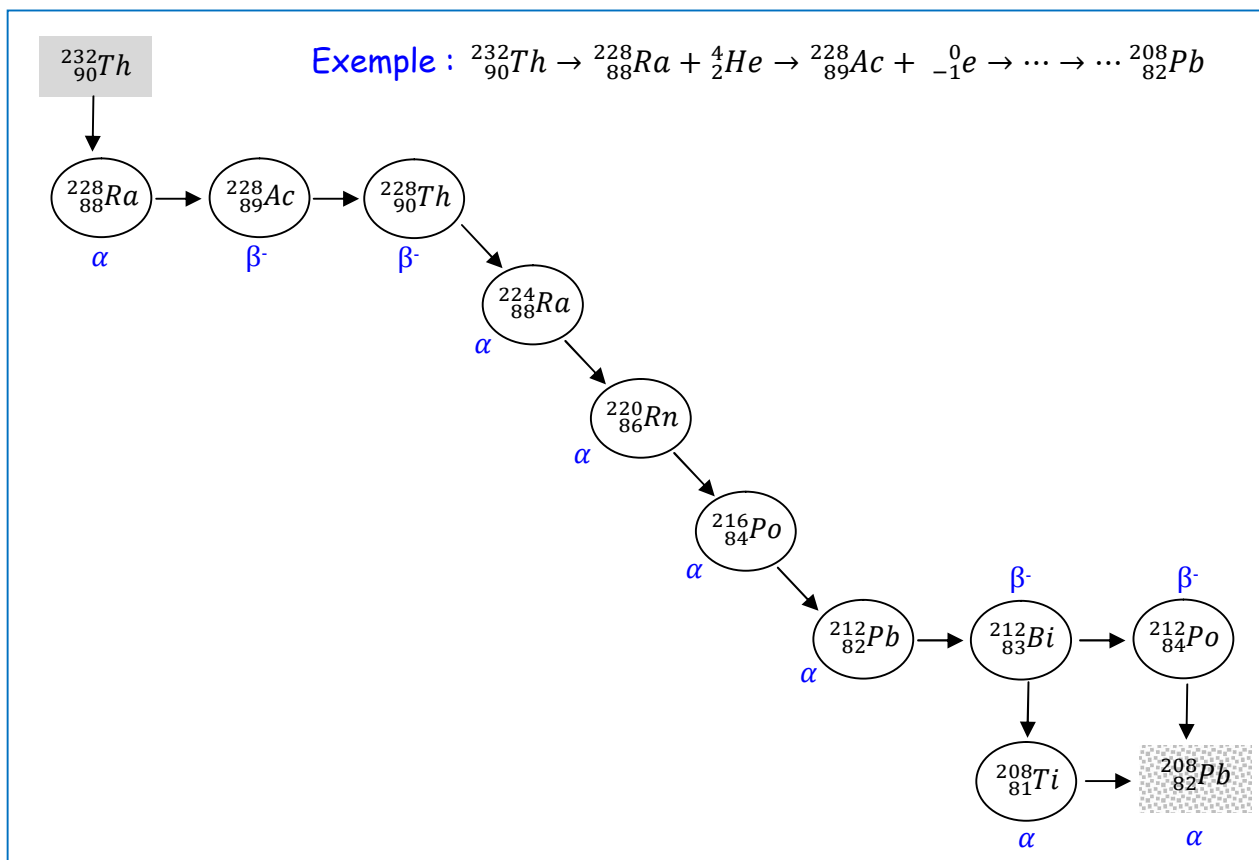
La radioactivité naturelle est une désintégration spontanée du noyau en donnant un noyau radioactif ou stable accompagnée de diverses radiations. Elle se produit si $\frac{A-Z}{Z} \geq 1,5$. Elle provient des rayons cosmiques (17%), du gaz radon (sous-produit de désintégration de l'uranium (50%)), du sol (granit 20%) et du corps humain lui-même (désintégration de $^{14}_6\text{C}$ et de $^{40}_{19}\text{K}$ (13%)).

a. Les familles radioactives naturelles

Quand la désintégration donne un noyau radioactif, il se désintègre en donnant à son tour un noyau qui peut être radioactif et ainsi de suite. Il y a alors une série de nucléides qui apparaissent l'un après l'autre et l'ensemble constitue une famille radioactive. On distingue trois familles radioactives :

Famille du thorium

Cette famille est constituée des noyaux dont les nombres de masse vérifient $A = 4n$ (n entier).



Famille de l'uranium

Cette famille est constituée des noyaux dont les nombres de masse vérifient $A = 4n+2$ (n entier).

Exemple : ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$; ${}^{234}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{234}_{91}\text{Pa} + {}^0_{-1}\text{e}$; ${}^{234}_{91}\text{Pa} \rightarrow \dots \rightarrow \dots {}^{206}_{82}\text{Pb}$.

Famille de l'actino-uranium

Cette famille est constituée des noyaux dont les nombres de masse vérifient $A = 4n+3$ (n entier).

Exemple : ${}^{235}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{231}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$; ${}^{231}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{231}_{91}\text{Pa} + {}^0_{-1}\text{e}$; ${}^{231}_{91}\text{Pa} \rightarrow \dots \rightarrow \dots {}^{207}_{82}\text{Pb}$.

Dans chacune de ces trois familles, on aboutit à un isotope stable de Pb : ${}^{206}_{82}\text{Pb}$, ${}^{207}_{82}\text{Pb}$ ou ${}^{208}_{82}\text{Pb}$.

b. Loi de désintégration radioactive

Soit la désintégration radioactive : $A^* \rightarrow B$ où B est stable.

Expérimentalement, on peut compter le nombre de particules émises par unité de temps. Ce nombre est égal à : $-\frac{dN}{dt}$

$-dN$: Variation du nombre de noyaux radioactifs A^* pendant dt (très court)

N : Nombre de noyaux instables (radioactifs) présents à l'instant t

La variation de $-\frac{dN}{dt}$ (vitesse de désintégration) en fonction de N est une loi linéaire.

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

λ : Constante radioactive ou de désintégrations en s^{-1} ou min^{-1} , etc. C'est une constante pour un isotope donné, elle le caractérise.

L'intégration de l'équation $-\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N$ entre $t = 0$ et t donne :

A $t = 0$, $N = N_0$ et à $t \neq 0$, $N = N_t$

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N, \quad \frac{dN}{N} = -\lambda \cdot dt$$

$$\Rightarrow N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \text{ (loi de désintégration radioactive)}$$

Activité ou intensité radioactive ou vitesse de désintégration (A)

Elle est définie comme étant le nombre de désintégrations par unité de temps, exprimée par la relation : $A = -\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N$

L'activité radioactive est donnée en désintégrations par unité de temps (dpm, dps,) ou en Bq (1 Bq=1dps) et en curie (Ci).

1 Curie : Nombre de désintégrations par seconde et par gramme de radium (^{226}Ra) soit $3,7 \cdot 10^{10}$ dps.

Période radioactive

La période ou temps de demi-vie d'un noyau radioactif est le temps au bout duquel la moitié des noyaux radioactifs présents à $t = 0$ est désintégrée (Figure 1.5)

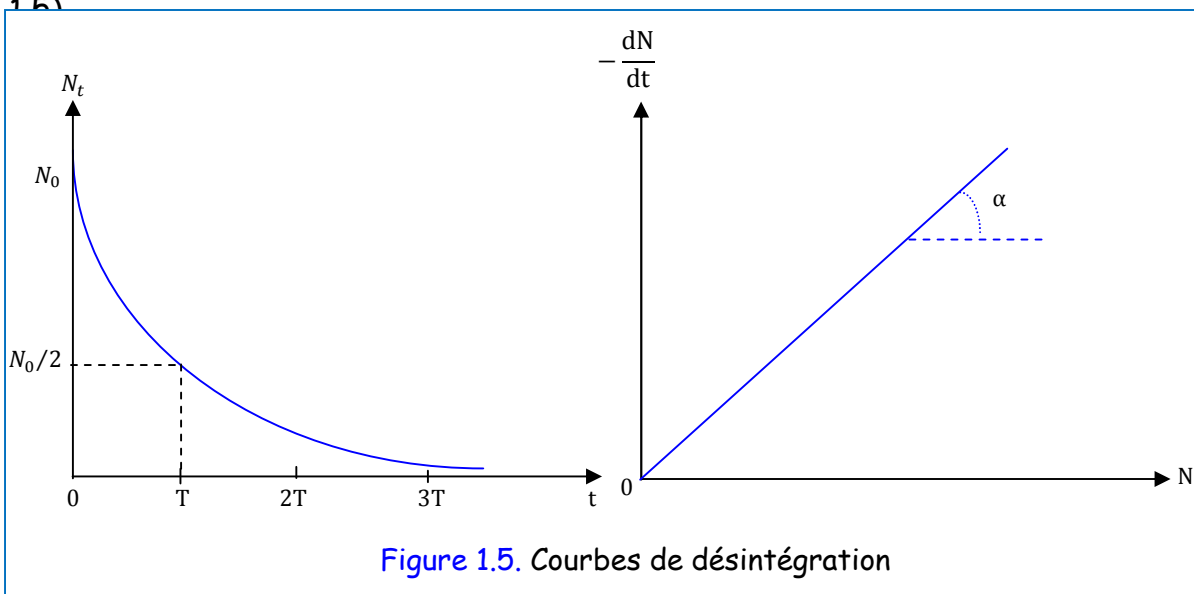


Figure 1.5. Courbes de désintégration

$$\text{A } t=T, N_t = \frac{N_0}{2}, T = \frac{\text{Log}2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

T ne dépend pas du nombre initial de noyaux, de la température ou de la pression. Elle caractérise un radioélément comme cela est montré dans le tableau 1.2.

Tableau 1.2. Quelques radioéléments et leurs périodes.

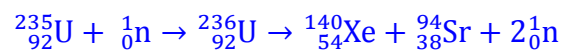
Radionucléide père	Radionucléide fils	Période (année)
^{40}K	^{40}Ar	$1,25 \cdot 10^9$
^{232}Th	^{208}Pb	$1,40 \cdot 10^{10}$
^{238}U	^{206}Pb	$4,47 \cdot 10^9$
^{14}C	^{14}N	$5,73 \cdot 10^3$

1.2.3. Radioactivité artificielle

La radioactivité artificielle a lieu quand on bombarde des noyaux cibles par des particules (projectiles). On distingue trois types de réactions nucléaires:

a. Réactions de fission nucléaire

Si on bombarde un noyau de ^{235}U par un neutron, on produit un noyau de ^{236}U dans un état très excité (instable). C'est ce noyau qui va subir la fission et former deux fragments. Ces derniers produisent du ^{140}Xe et du ^{94}Sr avec émission de 2 neutrons. La réaction de fission globale est alors :



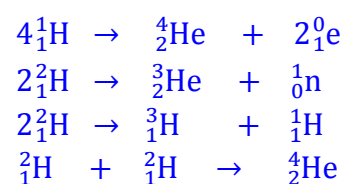
On définit la masse critique comme étant la plus petite masse pour laquelle on produit un nombre de neutrons supérieur au nombre de neutrons absorbés : on a alors une réaction en chaîne, contrôlée dans une centrale nucléaire.

b. Réactions de fusion nucléaire

La fusion nucléaire est la combinaison de deux noyaux légers pour former un noyau unique plus gros, avec dégagement d'énergie. Cette réaction est empêchée par la répulsion électrique qui s'exerce sur les deux particules qui ne peuvent s'approcher l'une de l'autre pour fusionner.

La fusion nucléaire doit se produire dans un matériau dense pour que suffisamment d'atomes puissent fusionner et fournir une quantité d'énergie significative. Pour cela, il faut élever la température du matériau pour que les particules atteignent une énergie suffisante de façon à vaincre la barrière de répulsion électrique. Ce procédé est appelé fusion thermonucléaire. Ces températures doivent être de l'ordre de celle du soleil ($1,5 \cdot 10^7\text{K}$).

La réaction de fusion nucléaire produit plus d'énergie que la fission. Ces réactions se produisent dans le soleil. L'énergie libérée par la réaction 1 ci-dessous est de 26,7 MeV) :



c. Réactions de transmutation

Ces réactions produisent des nucléides de nombre de masse égal ou très voisin de celui du nucléide qui a servi de cible. Les nucléides formés sont soit stables soit radioactifs :



écriture abrégée : ${}^{14}_7\text{N} (\alpha, p) {}^{17}_8\text{O}$

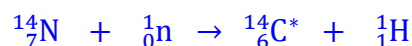
1.3. Domaines d'application

Les réactions nucléaires artificielles présentent un domaine d'utilisation large est divers, on cite particulièrement :

- ✓ Armement : missiles nucléaires, bombe atomique, etc.
- ✓ Energie : production de l'électricité
- ✓ Médecine : l'iode radioactif est utilisé dans l'examen scintigraphique de la thyroïde, irradiations de tumeurs, etc.
- ✓ Industrie : traceurs radioactifs pour le contrôle de nombreux procédés de fabrication industriels.
- ✓ Archéologie : utilisation du Carbone 14 pour la datation d'objets anciens.

Principe de la datation

Le ${}^{14}\text{C}$ radioactif est produit de manière continue dans l'atmosphère par l'action des neutrons des rayons cosmiques sur l'azote ${}^{14}\text{N}$ de l'atmosphère suivant la réaction :



Cet isotope s'incorpore dans les molécules de CO_2 puis dans les tissus des plantes par photosynthèse. La concentration du carbone 14 dans les organismes vivants est maintenue constante de par l'équilibre avec l'atmosphère ; le nombre de désintégrations par unité de temps et de masse est également constant (15,3 dpm et par gramme de carbone total noté $\text{dpm}\cdot\text{g}^{-1}$). Quand la vie cesse, la concentration en ${}^{14}\text{C}$ décroît à cause de la désintégration selon la réaction :



On mesure dans l'échantillon que l'on veut dater soit la proportion de carbone 14 par rapport au carbone total à l'aide d'un spectromètre de masse soit le nombre

de désintégration par unité de temps et de masse (en dpm) A qui est proportionnel au nombre de nucléides N . Avec la loi de désintégration, on en déduit l'âge de l'échantillon :

$$A_t = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Exemple : Echantillon de charbon provenant d'une mine ancienne : la mesure du taux de désintégration a donné $9,65 \text{ dpm} \cdot \text{g}^{-1}$. Sachant que la période du carbone 14 est de 5730 années, l'âge de cet échantillon est :

$$t = -\frac{T}{\ln 2} \ln \left[\frac{A_t}{A_0} \right] = -\frac{5730}{0,693} \ln \left[\frac{9,65}{15,3} \right] = 3810 \text{ années.}$$

1.4. Risques et effets biologiques

Il a été montré que plus l'activité d'une source radioactive est grande, plus elle présente un risque plus important. L'action sur les tissus vivants dépend de plusieurs paramètres, notamment :

- ✓ le nombre de particules reçues par seconde, qui dépend de l'activité A et de la distance de la source.
- ✓ l'énergie et de la nature des particules.
- ✓ la nature des tissus touchés.

L'exposition aux rayonnements ionisants (α, β, γ) endommage les cellules, les tissus ainsi que les gènes.

Exemple : l'absorption de $7 \cdot 10^{-10}$ moles de particules α émises par $^{238}_{92}\text{U}$ est fatale.