

La radioactivité et les réactions nucléaires

I. Stabilité et instabilité des noyaux.

1. Composition du noyau d'un atome.

- En 1911, Ernest Rutherford (physicien anglais) a découvert que l'atome (dont l'ordre de grandeur du rayon est de l'ordre de 100 pm) possède un noyau (dont l'ordre de grandeur du rayon est de quelques femtomètres ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$)).
- En conséquence le noyau de l'atome est « 100 000 » fois plus petit que l'atome. De plus, il rassemble pratiquement toute la masse de l'atome.
- Le noyau est constitué de particules appelées nucléons. Les nucléons sont de deux types : les **protons et les neutrons**.

Nucleon	proton	neutron
Masse	$m_p = 1,67265 \times 10^{-27} \text{ kg}$	$m_n = 1,67496 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Charge	$q_p = +e = 1,602189 \times 10^{-19} \text{ C}$	$q_n = 0 \text{ C}$

(C est le symbole du Coulomb unité de charge électrique et e représente la charge élémentaire).

- Toute charge électrique Q s'exprime en un nombre entier de charges élémentaires : $Q = \pm n e$
- La masse du neutron est voisine de celle du proton : $m_p \sim m_n$
- Le nombre de nucléons est noté A , on l'appelle aussi le **nombre de masse**.
- Le nombre de protons que contient le noyau est noté Z . On l'appelle le **numéro atomique** ou le **nombre de charge**.
- Les deux nombres A et Z suffisent pour caractériser un noyau.
- Le nombre de neutrons : $N = A - Z$.

2. Isotopes.

- A chaque couple de valeurs (Z, A) , correspond un type de noyau que l'on note : ${}^A_Z X$ où X est le symbole de l'élément chimique.
- En conséquence, cette notation représente le noyau d'un atome.
- Des noyaux possédant le même nombre de protons mais des nombres différents de neutrons sont appelés isotopes.
- Il existe environ 350 noyaux naturels et plus de 2500 noyaux artificiels obtenus en laboratoire.

3. Masse d'un noyau.

- On utilise une unité adaptée à la physique nucléaire : l'**unité de masse atomique** qui représente le douzième de la masse de l'isotope 12 du carbone:
 - $1 \text{ u} = 1,6605402 \times 10^{-27} \text{ kg}$.
- Exemple : la masse d'un noyau d'Hélium ${}^4_2\text{He}$ est $m(\text{He}) \sim 4,00151 \text{ u}$.
- En conséquence, la masse d'un noyau ${}^A_Z X$ est voisine de A en unité atomique et c'est pour cela que A est aussi appelé le nombre de masse.
- Un nucléon étant environ 1850 fois plus lourd qu'un électron, la **masse d'un noyau est voisine de celle de l'atome correspondant**.

4. Stabilité des noyaux.

- La stabilité des noyaux résulte de la compétition entre l'interaction forte, responsable de l'attraction des nucléons et de l'interaction électromagnétique responsable de la répulsion entre les protons.
- L'**interaction forte est intense mais de très courte portée** (de l'ordre du femtomètre : 10^{-15} m , soit un milliardième de micromètre.)

- La stabilité des noyaux obéit aussi aux lois de la mécanique quantique : **un noyau possédant trop de particules de même type est instable.**
- Dans les petits noyaux, il y a une tendance à la symétrie : le nombre de protons est égal au nombre de neutrons pour les noyaux stables.

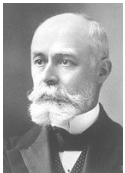
Un noyau instable est un noyau qui possède soit trop de protons, soit trop de neutrons, soit trop de nucléons

Exemples : le carbone 14 est instable, l'oxygène 14 est instable, de même l'uranium 238 est instable.

- La cohésion du noyau est due à l'existence d'une interaction forte, attractive qui unit l'ensemble des nucléons et qui prédomine devant l'interaction électrique (répulsion entre les protons).
- Il y a antagonisme entre l'interaction forte et la répulsion des protons.
- **Dans certains cas la cohésion n'est pas suffisante, on dit que les noyaux sont instables. Ils se désintègrent spontanément, on dit qu'ils sont radioactifs. Ce sont des radionucléides.**

II. Qu'est-ce que la radioactivité ?

1. Une surprise pour un physicien de la fin de XIX^{ème} siècle



En 1896, le physicien français Henri Becquerel (1852-1908) avait rangé sa plaque photographique près de sels d'uranium qu'il était en train d'étudier. Quelle ne fut pas sa surprise quand il s'aperçut que le film photographique avait été impressionné sans avoir été exposé à la lumière. Il en déduit que l'uranium émettait des rayonnements invisibles ressemblant aux rayons X découverts, l'année précédente, par Wilhelm Roentgen, physicien allemand, et découvre ainsi la radioactivité.



Marie Curie (1867-1934) et Pierre Curie (1859-1906) se consacrent à l'étude de la radioactivité et découvrent deux corps radioactifs : le radium et le polonium. Ces travaux leur valent la prix Nobel de physique en 1903, qu'ils partagent avec Henri Becquerel. Marie Curie obtient encore le prix Nobel de chimie en 1911.

2. Réactions nucléaires spontanées

Lorsqu'un noyau A_ZX est instable, il subit une transformation spontanée conduisant à la formation d'un nouveau noyau A_ZY . Ce phénomène porte le nom de radioactivité car cette transformation radioactive s'accompagne de l'émission de particules et de rayonnements électromagnétiques.

A_ZX est appelé le noyau père et A_ZY est appelé le noyau fils

Pour un élément radioactif, la désintégration est un phénomène :

- NUCLEAIRE : c'est-à-dire ne concernant que le noyau de l'atome,
- UNIQUE : chaque noyau ne peut se désintégrer qu'une fois,
- SPONTANÉ : la désintégration ne nécessite aucune intervention extérieure,
- INCONTROLABLE : il est impossible d'arrêter une désintégration,
- ALEATOIRE : le moment où débute la désintégration d'un noyau est indéterminé.

3. Les Emissions Radioactives.

- Une source radioactive peut émettre des **particules et un rayonnement γ** .
- Les particules émises sont de trois types : les particules α , β^- et β^+ .

a. Les particules α (alpha).

- Ce sont des particules, constituées de noyaux d'hélium dont l'écriture symbolique :
 ${}^4_2\text{He}$ ion He^{2+} .
- Ces particules sont éjectées à grande vitesse $V \sim 2 \times 10^7 \text{ m.s}^{-1}$.
- Ce ne sont pas des particules relativistes. ($V < 0,10 \times c$: c célérité de la lumière dans le vide)
- Les particules sont directement ionisantes mais peu pénétrantes.
- Elles sont arrêtées par une feuille de papier et par une épaisseur de quelques centimètres d'air.
- Elles pénètrent la peau sur une épaisseur de l'ordre de quelques micromètres. Elles ne sont pas dangereuses pour la peau.
- Par contre, elles sont dangereuses par absorption interne : inhalation, ingestion.

b. Les particules β (beta).

On distingue :

- Les particules β^- qui sont des électrons, de masse : $m(\beta^-) = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ et de charge $q(\beta^-) = -e = 1,602189 \times 10^{-19} \text{ C}$

- Les particules β^+ qui sont des positons (antiparticule de l'électron) de masse $m(\beta^+) = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ et de charge $q(\beta^+) = +e = 1,602189 \times 10^{-19} \text{ C}$

- Les particules sont émises à grande vitesse $v \sim 2,8 \times 10^8 \text{ m. s}^{-1}$. Ce sont des particules relativistes.
- Elles sont plus pénétrantes mais moins ionisantes que les particules α .
- Elles sont arrêtées par un écran de Plexiglas ou par une plaque d'aluminium de quelques centimètres.
- Elles pénètrent la peau sur une épaisseur de quelques millimètres. Elles sont dangereuses pour la peau.

c. Le rayonnement γ (gamma).

- Il accompagne l'émission de rayonnements α , β^- et β^+ .
- Il est constitué d'une onde électromagnétique de très courte longueur d'onde ($\lambda \sim 10^{-12} \text{ m}$ et $f \sim 10^{20} \text{ Hz}$).
- Le rayonnement est constitué de photons qui se déplacent à la vitesse de la lumière et dont la masse est nulle.
- Ils ne sont pas directement ionisants, mais ils sont très pénétrants. Ils peuvent traverser jusqu'à 20 cm de plomb.
- Par interaction avec les atomes des substances traversées, ils peuvent donner naissance à des électrons qui eux sont ionisants.

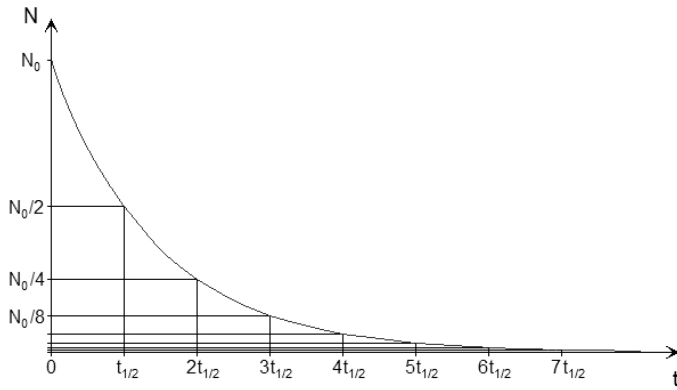
4. L'activité radioactive.

L'activité d'un échantillon contenant des noyaux radioactifs est le nombre de désintégration produites par seconde. Son unité est le bequerel de symbole Bq :

$$1\text{Bq} = 1 \text{ désintégration par seconde}$$

L'activité d'un échantillon dépend du type de noyau radioactif qu'il contient et est proportionnelle au nombre de ces noyaux.

Chaque élément radioactif est caractérisé par sa **courbe de décroissance radioactive**, qui représente l'évolution du nombre de noyaux restant dans l'échantillon (N) en fonction du temps (t). Cette courbe a toujours la même allure, c'est une courbe **exponentielle** décroissante :



Le **temps de demi-vie** $t_{1/2}$, appelé **période radioactive**, est la durée nécessaire pour que la moitié des noyaux présents initialement se soient désintégrés. On constate sur la courbe ci-dessus qu'au bout de $2t_{1/2}$ le nombre de noyau a encore diminué de moitié, et ainsi de suite.

5. Les équations de la radioactivité.

a. Les Lois de conservation : Loi de Soddy.

Toutes les réactions nucléaires vérifient les lois de conservation suivantes :

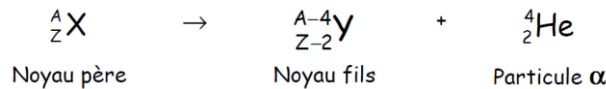
- Conservation de la charge électrique (nombre de charges).
- Conservation du nombre total de nucléons.
- Conservation de l'énergie.
- Conservation de la quantité de mouvement (grandeur que vous verrez plus tard).

Lois de Soddy :

- Conservation du nombre de nucléons : $A = A' + A''$
- Conservation du nombre de charge : $Z = Z' + Z''$

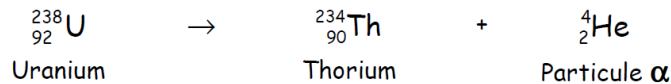
b. Radioactivité α

Un noyau lourd instable éjecte une particule α et donne un noyau fils plus léger, généralement dans un état excité :

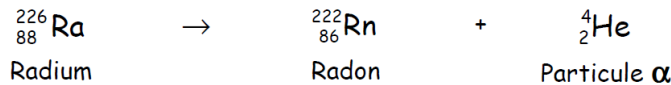


Exemples :

- L'uranium 238 est émetteur α :

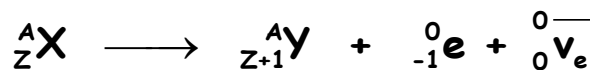


- Le radium 226 est émetteur α :



c. Radioactivité β^-

Cette radioactivité se manifeste lorsque le noyau présente un excès de neutrons. Au cours de la désintégration, il y a émission d'un électron noté ${}^0_{-1}e$.



Exemple :

- le carbone 14 est émetteur β^- :

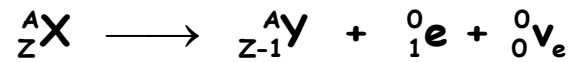


Le noyau père possède trop de neutrons, un neutron se transforme alors en proton :



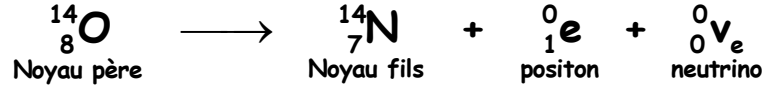
d. Radioactivité β^+

Cette radioactivité se manifeste lorsque le noyau d'un atome possède trop de protons. Au cours de la désintégration, il y a émission d'un positon noté 0_1e



Exemple :

l'oxygène 14 est émetteur β^+ , l'équation de la réaction:



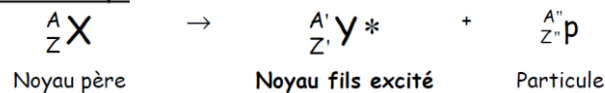
Le noyau père possède trop de protons, un proton se transforme en neutron et un positon est émis



e. La radioactivité γ .

Le noyau fils est le plus souvent dans un état instable, il libère son excédant d'énergie sous forme de rayonnement γ . On dit qu'il se désexcite. IL y a 2 étapes :

première étape : transmutation



Deuxième étape : désexcitation

