

Résumé de cours : réactions nucléaires

Un **atome** est constitué par un noyau (très petit, dimension de l'ordre du Femtomètre $1\text{fm}=10^{-15}\text{m}$) situé au centre d'un espace vide (de rayon 1000 fois plus grand environ) dans lequel se déplacent les électrons.

Constitution et symbole d'un noyau :

La représentation symbolique du noyau d'un atome est ${}_{Z}^{A}\text{X}$:

- * **A = nombre de masse** = nombre de nucléons (protons + neutrons) dans le noyau
- * **Z = numéro atomique** ou nombre de charge = nombre de protons dans le noyau
- * **N = A-Z = nombre de neutrons** présents dans le noyau
- * **X** est le **symbole de l'élément chimique** de numéro atomique Z, qui se trouve dans la case n°Z de la classification périodique des éléments chimiques.

Des noyaux ayant le même nombre de protons mais un nombre de neutrons différent sont **isotopes**.

Ils ont le même symbole X et ils appartiennent au même élément chimique, et se retrouvent donc rassemblés dans la même case de la classification périodique.

Exemple : ${}_{6}^{14}\text{C}$ et ${}_{6}^{12}\text{C}$ possèdent 6 protons dans leur noyau et se trouvent à la 6^{ème} case de la classification périodique. Mais ils ont réciproquement $14-6=8$ et $12-6=6$ neutrons.

Quelles sont les **forces** qui assurent la cohésion du noyau ? (qui permettent aux nucléons de rester unis)

- * Les forces gravitationnelles agissent sur les nucléons et elles sont attractives... mais ce sont les forces les plus faibles, et sont négligeables devant les forces électriques ou nucléaires fortes.
- * Les forces électriques n'agissent pas sur les neutrons (charge électrique nulle) et sont répulsives entre protons (charge électrique positive)... elles tendent donc à détruire le noyau !
- * Les forces nucléaires sont les plus fortes de toutes, mais elles ne peuvent agir qu'à très courte distance, entre 2 nucléons voisins.

Les neutrons doivent donc être présents dans le noyau en quantité suffisante pour s'intercaler entre les protons et limiter ainsi l'effet répulsif des forces électriques (dont la valeur diminue si la distance augmente).

On connaît aujourd'hui plus de 1500 noyaux différents correspondant à seulement 112 éléments chimiques. Mais seulement 260 d'entre eux sont stables ! les autres se désintègrent **spontanément** et évoluent ainsi vers une forme plus stable : on dit alors qu'ils sont **radioactifs**.

Le **noyau père X** donne ainsi naissance à un **noyau fils Y** : cette transformation radioactive s'accompagne de l'émission de particules (α , β^- , β^+) et de rayonnements électromagnétiques appelés **rayons γ** .

Les **rayons γ** ont une fréquence 10^6 à 10^8 fois plus grande que celle de la lumière visible.

Le noyau fils est en général créé dans un **état excité** noté **Y***, puis les nucléons se réarrangent pour conduire à l'**état fondamental Y** (le plus stable) en libérant de l'énergie sous forme de rayonnement γ .

L'énergie E du photon γ est liée à la fréquence ν de l'onde électromagnétique associée par la relation :

$$E = h \cdot \nu \quad \text{avec } E \text{ en J} \quad \nu \text{ en Hz} \quad \text{et} \quad h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}^{-1} = \text{constante de Planck}$$

Autre unité d'énergie : **électron-Volt** $1\text{eV}=1,60 \cdot 10^{-19}\text{J}$ $1\text{keV}=1,60 \cdot 10^{-16}\text{J}$ $1\text{MeV}=1,60 \cdot 10^{-13}\text{J}$

Lois de conservation : Au cours d'une réaction nucléaire, il y a **conservation de la charge électrique** et **conservation du nombre total de nucléons A**.

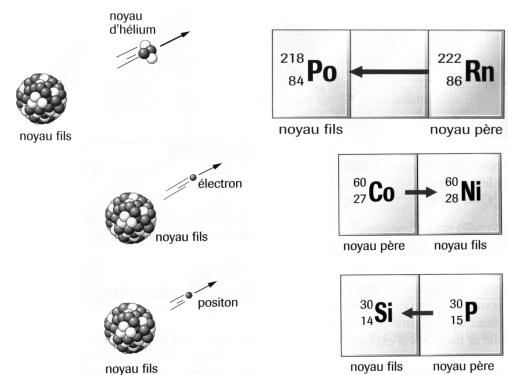
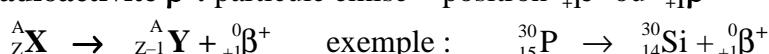
Radioactivité α : particule émise = noyau d'hélium ${}_{2}^{4}\text{He}$ ou ${}_{2}^{4}\alpha$



Radioactivité β^- : particule émise = électron ${}_{-1}^0\text{e}^-$ ou ${}_{-1}^0\beta^-$



Radioactivité β^+ : particule émise = positron ${}_{+1}^0\text{e}^+$ ou ${}_{+1}^0\beta^+$



loi de décroissance radioactive :

Un noyau instable est susceptible à tout moment de se transformer en un noyau plus stable, grâce à une transformation nucléaire appelée **désintégration radioactive**.

Mais attention! **un noyau instable ne vieillit pas** : il se transforme en un autre noyau d'un seul coup, sans avoir subi de modifications progressives. Un noyau jeune a autant de chances de se désintégrer qu'un noyau âgé.

Avant d'avoir subi une désintégration, tous les noyaux sont identiques et il est impossible de prévoir lequel va se désintégrer en premier : **le phénomène de désintégration d'un noyau est imprévisible et aléatoire**, c'est à dire qu'il respecte les **lois du hasard**.

Ce caractère aléatoire de la désintégration radioactive d'un noyau permet d'interpréter le comportement d'une population macroscopique (**un grand nombre de noyaux identiques**) par une **loi statistique** et de prévoir **ainsi son évolution**.

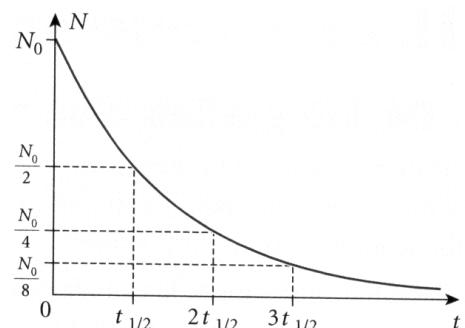
Soit un échantillon radioactif (un morceau de roche) contenant à l'instant t un nombre N de noyaux radioactifs **identiques** (c'est à dire de même symbole ${}_{Z}^{A}X$).

Chaque type de noyau radioactif est caractérisé par une constante $t_{1/2}$ appelée **durée de demi-vie** ou **période radioactive** : **durée nécessaire pour que la moitié de la quantité initiale de noyaux radioactifs contenus dans l'échantillon se désintègre**.

Activité \mathcal{A} d'un échantillon contenant N noyaux radioactifs à une date t

\mathcal{A} = nombre de noyaux qui se désintègrent par seconde

unité = Becquerel (Bq) $1\text{Bq} = \text{une désintégration par seconde}$



L'**Activité \mathcal{A}** d'un échantillon est ainsi proportionnelle au nombre N de noyaux radioactifs qu'il contient.

L'Activité \mathcal{A} décroît au cours du temps de la même façon que N , donc \mathcal{A} est réduite de moitié à chaque fois qu'il s'écoule une durée égale à $t_{1/2}$.

Application à la datation par le carbone 14 :

Le carbone 14 qui se forme en permanence dans la haute atmosphère est radioactif β^- : ${}_{6}^{14}\text{C} \rightarrow {}_{7}^{14}\text{N} + {}_{-1}^0\beta^-$

Sa durée de demi-vie est $t_{1/2} = 5,7 \cdot 10^3$ ans.

On constate que l'activité \mathcal{A} d'un morceau de bois trouvé dans une grotte préhistorique est 8 fois plus faible que l'activité \mathcal{A}_0 d'un morceau de bois de même masse fraîchement coupé aujourd'hui. On suppose que lorsque le morceau de bois a été coupé par les hommes préhistoriques, il avait une activité identique à \mathcal{A}_0 .

Depuis combien de temps le morceau de bois a-t-il été coupé ?

D'après la courbe ci-dessus (loi de décroissance radioactive) il s'est écoulé $3 \times t_{1/2}$ soit 17.10^3 ans

Équivalence masse-énergie :

Tout système matériel possède une énergie (appelée **énergie de masse**) dont la valeur est $E = m.c^2$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide, soit $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ m s'exprime en kg et E en Joule (J)

Ainsi de l'énergie peut se transformer en matière, et inversement la matière peut perdre une partie de sa masse qui va se transformer en énergie ! $\Delta E = \Delta m \times c^2$

Donc si la masse d'un système diminue, son énergie de masse diminue et ce système fournit de l'énergie au milieu extérieur sous forme de rayonnement électromagnétique ou d'énergie cinétique des particules formées.

Remarques : Le Joule n'est pas une unité adaptée à l'échelle des noyaux, on utilisera plutôt l'électronvolt et ses multiples $1\text{eV}=1,60 \cdot 10^{-19}\text{J}$ $1\text{MeV}=1,60 \cdot 10^{-13}\text{J}$

Les masses peuvent aussi s'exprimer en unité de masse atomique : $1\text{u} = 1,6605 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$

Exemple : * masse du proton $m(p) = 1,0073 \text{ u} = 1,0073 \times 1,6605 \cdot 10^{-27} = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

* Energie de masse du proton = $m.c^2 = 1,6726 \cdot 10^{-27} \times (3,00 \cdot 10^8)^2 = 1,505 \cdot 10^{17} \text{ J}$
soit en MeV: $1,505 \cdot 10^{17} / 1,60 \cdot 10^{-13} = 941 \text{ MeV}$

Energie de liaison du noyau :

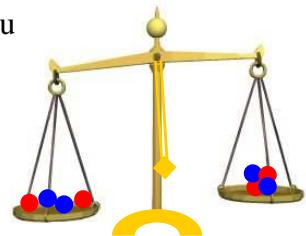
La masse M d'un noyau est inférieure à la somme des masses des protons et des neutrons qui le constituent !

On appelle **énergie de liaison Eℓ** du noyau ${}^A_Z X$ l'énergie qui a été libérée lorsque ce noyau s'est formé à partir de ses constituants : Z protons et N neutrons avec N=(A-Z).

$$E\ell = |\Delta m| \times c^2 = [Z.m_p + (A-Z).m_n - M] \cdot c^2$$

Exemple : calcul de l'énergie de liaison du noyau d'hélium ${}^4_2 He$

Données : M(${}^4_2 He$) = 4,0015 u m(p) = 1,0073 u m(n) = 1,0087 u



$|\Delta m| = M(\text{nucléons séparés}) - M(\text{noyau}) = 2.m_p + (4-2).m_n - M = 2 \times 1,0073 + 2 \times 1,0087 - 4,0015 = 3,04 \cdot 10^{-2} \text{ u}$
La masse diminue pendant l'union des nucléons grâce aux forces nucléaires donc de **l'énergie est libérée**.

Calcul de l'énergie libérée en J : $E\ell = 3,04 \cdot 10^{-2} \times 1,6605 \cdot 10^{-27} \times (3,00 \cdot 10^8)^2 = 4,54 \cdot 10^{-12} \text{ J}$

Calcul de l'énergie libérée en MeV : $E\ell = 4,54 \cdot 10^{-12} / 1,60 \cdot 10^{-13} = 28,3 \text{ MeV}$

Energie de liaison par nucléon :

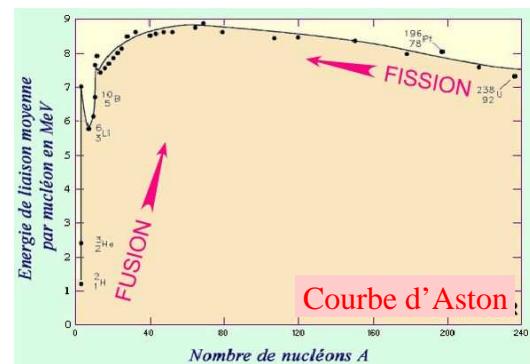
Pour comparer la stabilité des différents noyaux, on calcule l'énergie nécessaire pour arracher un nucléon à chaque noyau, appelé «énergie de liaison par nucléon», et égale à $E\ell/A$ ($28,3/4 = 7,08 \text{ MeV}$ pour ${}^4_2 He$)

Plus il est difficile d'arracher un nucléon, donc plus $E\ell/A$ est grand, plus le noyau correspondant est stable (en moyenne $E\ell/A \approx 7$ à 8 MeV)

Les noyaux les plus stables sont de taille moyenne, voisins du fer ${}^{56}_{26} Fe$

Donc les petits noyaux ont tendance à s'unir : réaction de **fusion**

Les gros noyaux ont tendance à se scinder en deux : réaction de **fission**



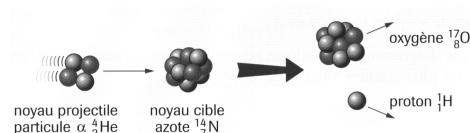
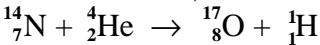
Réactions nucléaires provoquées :

La radioactivité (rayonnements α , β^- , β^+ et γ) correspond à des réactions nucléaires qui se produisent **spontanément**.

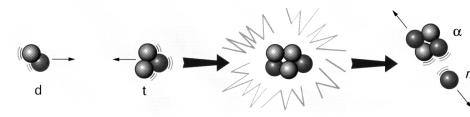
La réaction nucléaire est **provoquée** lorsqu'il est nécessaire qu'un noyau projectile vienne frapper le noyau cible afin de donner naissance à de nouveaux noyaux.

Un apport d'énergie initial est donc nécessaire, même si globalement la réaction libère de l'énergie (diminution de masse).

- **transmutation** : un noyau cible se transforme en un autre noyau de masse voisine, suite à l'impact d'un noyau projectile

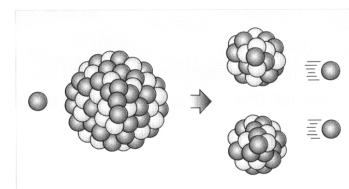
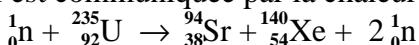


- **fusion** de 2 petits noyaux qui, sous l'effet de l'agitation thermique, se rencontrent et restent unis par les forces nucléaires



L'énergie libérée par les étoiles provient de réactions de fusion.

- **fission** d'un « noyau lourd » qui donne naissance à 2 noyaux plus légers sous l'effet d'un choc avec un neutron thermique (son énergie cinétique lui est communiquée par la chaleur ambiante).



Remarque : L'ensemble des différentes fissions possibles de l'uranium 235 libère en moyenne 2,47 neutrons par fission. Ces neutrons sont susceptibles à leur tour d'engendrer d'autres fissions...

Il en résulte une réaction en chaîne, c'est à dire une EXPLOSION ! qui libère en peu de temps énormément d'énergie : c'est ce qui se produit dans la bombe A.