

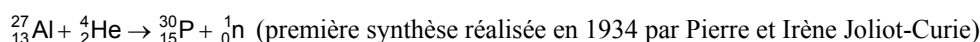
# Chimie nucléaire

## 1. Stabilité des atomes

On connaît près de 2000 noyaux d'atomes mais seulement 279 sont stables, c'est-à-dire qu'ils ne se désintègrent pas. Quelques règles simples permettent d'identifier les noyaux stables :

- pour les noyaux légers ( $Z < 20$ ), les noyaux stables ont un nombre de protons égal au nombre de neutrons
- pour les atomes 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  $10^{14} \text{ g/cm}^3$ )
- 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. Il est possible de synthétiser au laboratoire des radio-isotopes (artificiels) qui n'existent pas à l'état naturel :



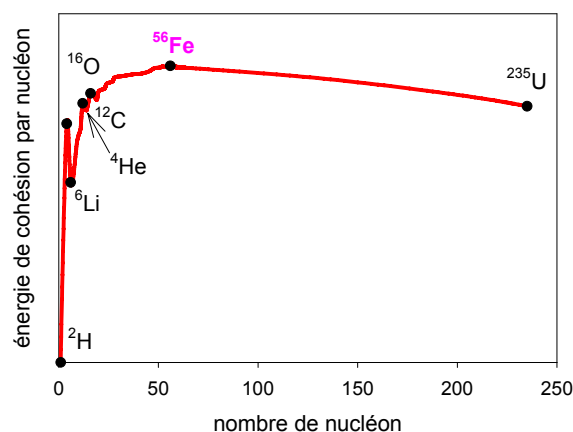
Si l'on compare la masse du noyau et la masse individuelle des protons et neutrons qui le composent, on trouve un défaut de masse dans le noyau qui correspond à **l'énergie de cohésion du noyau**. Cette énergie peut être calculée à l'aide de la **relation d'Einstein** :  $E = mc^2$  avec  $c = 3.10^8 \text{ ms}^{-1}$

**Exemple :** énergie de cohésion du noyau de  ${}^{235}\text{U}$

masse des nucléons =  $(92 \times 1,00728 + 143 \times 1,00867) = 236,9096 \text{ uma}$   
 masse du noyau =  $235,0439 \text{ uma}$   
 énergie de cohésion =  $1,8657 \times 1,6606 \cdot 10^{-27} (3.10^8)^2$   
**énergie de cohésion =  $2,79 \cdot 10^{-10} \text{ Joule/atome} = 1,67 \cdot 10^{14} \text{ J Mol}^{-1}$**

Quand on trace l'énergie de cohésion par nucléon, on constate que le **noyau le plus stable** est celui de  ${}^{56}\text{Fe}$ . Ceci explique la grande abondance du fer dans l'univers.

On voit que des réactions de fusion ou de fission des noyaux peuvent fournir des quantités d'énergie énormes. (facteur d'environ  $10^6$  par rapport aux réactions chimiques classiques où les noyaux sont conservés intacts).

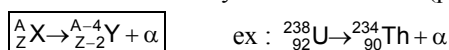


## 2. Réactions nucléaires

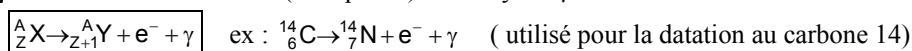
### 2.1. Radioactivité

La radioactivité a été découverte par Becquerel en 1896. Il découvrit que le sulfate d'uranyle et de potassium  $\text{K}_2\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2$  émettait un rayonnement capable d'impressionner une plaque photographique emballée dans un papier. Il put démontrer que ces émissions provenaient de l'échantillon d'uranium. Il existe plusieurs types de radioactivité :

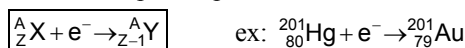
- **radioactivité  $\alpha$**  : émission d'un noyau d'hélium  $\text{He}^{2+}$  (particules  $\alpha$ )



- **radioactivité  $\beta$**  : émission d'un électron ( $n \rightarrow p + e^-$ ) et de rayons  $\gamma$



- **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 ( $p + e^- \rightarrow n$ ) :



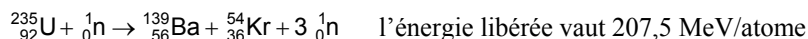
Les émissions de rayons  $\gamma$  (photons) et de particules  $\beta$  (électrons et positons) par des substances radioactives peuvent être détectées par des compteurs Geiger (Becquerel (Bq) = 1 désintégration/s =  $27 \cdot 10^{-12}$  Curies): les radiations ionisent le gaz qui occupent la chambre du compteur (de l'argon en général), et les ions ainsi produits permettent le passage d'un courant qui est ensuite détecté. L'exposition aux rayonnements ionisants ( rayons X,  $\gamma$ , neutrons, particules  $\alpha$ ) endommage les cellules, les tissus ainsi que les gènes. Par exemple, l'absorption de  $7 \times 10^{-10}$  moles de particules  $\alpha$  émis par  ${}^{238}\text{U}$  est fatale.

La radioactivité naturelle est la principale source d'exposition aux rayonnements : 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  ${}^{14}\text{C}$  et  ${}^{40}\text{K}$  : 13%).

En 1934, Frédéric Joliot et Irène Curie préparent le premier **radio-isotope artificiel** ( ${}^{30}\text{P}$ ) en bombardant une plaque l'aluminium par des particules  $\alpha$  :  ${}_{13}^{27}\text{Al} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_{15}^{30}\text{P} + {}_0^1\text{n}$  puis  ${}_{15}^{30}\text{P} \rightarrow {}_{14}^{30}\text{Si} + {}_0^1\text{e}$

## 2.2. Fission nucléaire

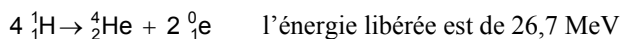
Une réaction nucléaire au cours de laquelle un noyau se scinde en deux fragments plus petits est appelée fission nucléaire. L'uranium  $^{235}_{92}\text{U}$  (0,72%) subit la fission quand il absorbe un neutron thermique (vitesse lente) :



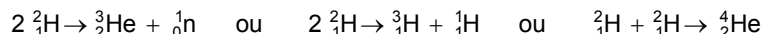
On définit la **masse critique** comme étant la plus petite masse pour laquelle on produit un nombre de neutrons supérieur au nombre de neutrons absorbés : on a alors une réaction en chaîne, contrôlée dans une centrale nucléaire.

## 2.3. Fusion nucléaire

La réaction de fusion nucléaire produit plus d'énergie que la fission. Ces réactions se produisent dans le soleil :



La maîtrise des réactions de fusion nucléaire en vue de produire de l'électricité est un vrai challenge technologique (projet ITER de Tokamak européen ou de fusion par énergie laser aux USA, les températures doivent atteindre des millions de degrés !!). Etant donné que l'Hydrogène et le Deutérium abondent, on peut envisager les réactions suivantes :



## 3. Datation au carbone 14

### 3.1. Loi de décroissance radioactive

Tous les processus nucléaires ont une cinétique du premier ordre. Le taux de transformation d'un nucléide radioactif par unité de temps est proportionnel au nombre de nucléides présents :

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad \text{avec } \lambda \text{ est la } \textbf{constante radioactive},$$

Après intégration, on a obtenu la **loi de décroissance radioactive** :  $N = N_0 e^{-\lambda t}$ ,  $N_0$  est le nombre de nucléides au temps  $t = 0$

On définit la **période T** ou **temps de 1/2 vie** d'un nucléide radioactif comme étant le temps nécessaire à la transformation de la moitié de  $N_0$  initial :

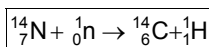
$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Le tableau ci-contre donne les périodes de quelques radionucléides utilisés pour les datations. Les isotopes à durée de vie longue sont utilisés en géologie pour la datation des roches.. Compte tenu de la période du  $^{14}\text{C}$  (5730 ans), la datation est très efficace pour dater des objets vieux d'un peu moins de 30 000ans.

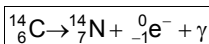
Radionucléide parent	Radionucléide fille stable	Temps de 1/2 vie (années)
à durée de vie longue		
$^{40}\text{K}$	$^{40}\text{Ar}$	$1,25 \times 10^9$
$^{87}\text{Rb}$	$^{87}\text{Sr}$	$4,88 \times 10^{10}$
$^{232}\text{Th}$	$^{208}\text{Pb}$	$1,40 \times 10^{10}$
$^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}$	$7,04 \times 10^8$
$^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}$	$4,47 \times 10^9$
à durée de vie courte		
$^{14}\text{C}$	$^{14}\text{N}$	$5,73 \times 10^3$

### 3.2. 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  $\text{CO}_2$  puis dans les tissus des plantes par photosynthèse. La concentration dans les plantes vivantes (et dans les animaux qui les mangent) est maintenue constante de par l'équilibre avec l'atmosphère ; le nombre de désintégration par unité de temps et de masse est également constant pour tous les organismes vivants (15,3 désintégration par minute et par gramme de carbone total noté dpm  $\text{g}^{-1}$ ). Quand la plante meurt, la concentration en  $^{14}\text{C}$  décroît à cause de la désintégration :



On mesure dans l'échantillon que l'on veut dater soit la proportion de carbone 14 par rapport au carbone total (isotope  $^{12}\text{C}$  et  $^{13}\text{C}$ ) à l'aide d'un spectromètre de masse soit le nombre  $v$  de désintégration par unité de temps et de masse (exprimé en dpm) qui est proportionnel au nombre de nucléide  $N$ . Avec la loi de décroissance on en déduit l'âge de l'échantillon.

$$v(t) = v(t=0) e^{-\lambda t}$$

**Exemple :** datation du site mégalithique de Stonehenge.

On a prélevé des échantillons de charbon de bois provenant de mines à Stonehenge. Le taux de désintégration obtenu est de 9,65 dpm  $\text{g}^{-1}$

$$\text{L'âge de ces échantillons est : } t = -\frac{T}{\ln 2} \times \ln \left[ \frac{v(t)}{v(t=0)} \right] = -\frac{5730}{0,693} \times \ln \left[ \frac{9,65}{15,3} \right] = 3810 \text{ années}$$