

Département de physique

# **Cours de Radioactivité**

**BCG (S1)- Module P211**

**Pr. A. EL BAKKALI**

2023/2024

# **Plan du cours**

**A- Notions de physique atomique**

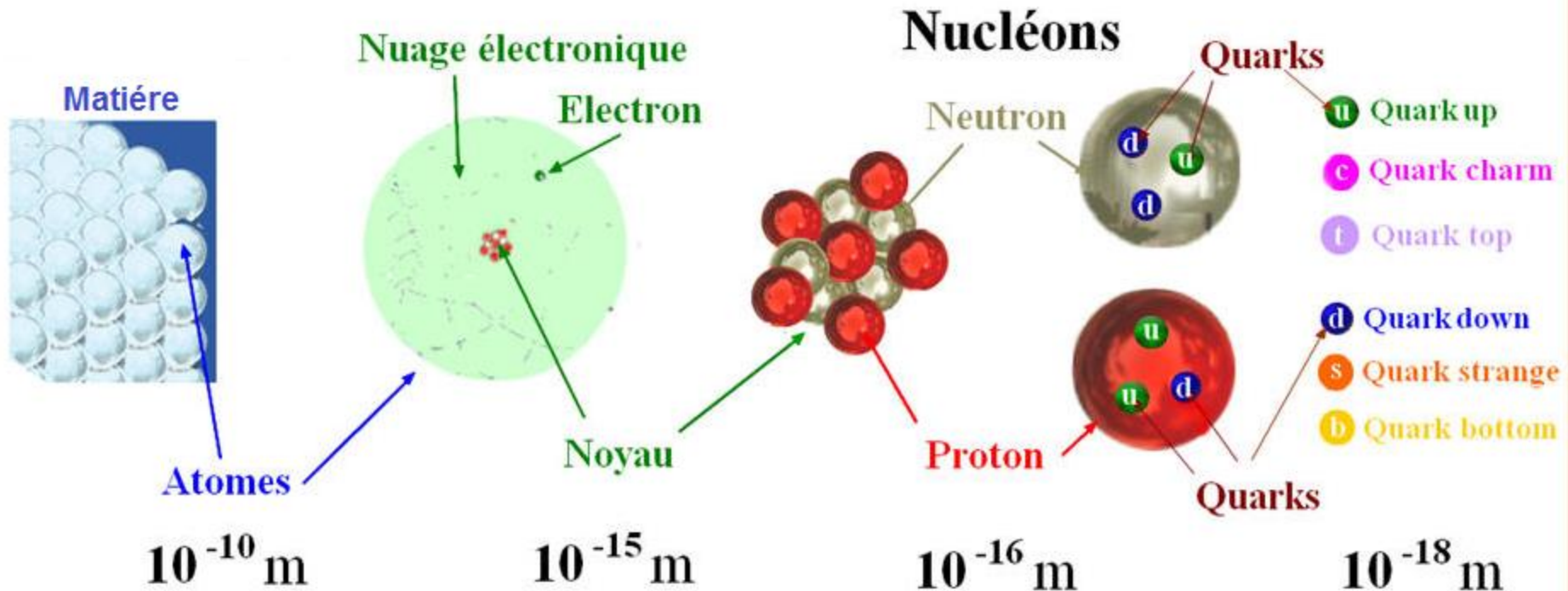
**B- Transformations radioactives**

**C- Applications : Datation, Dosimétrie...**

# **A- Notions de physique atomique**

# Les constituants de la matière

La matière est composée d'un ensemble d'atomes. L'**atome** est constitué d'un **noyau central** chargé positivement autour duquel tournent des électrons chargés négativement.



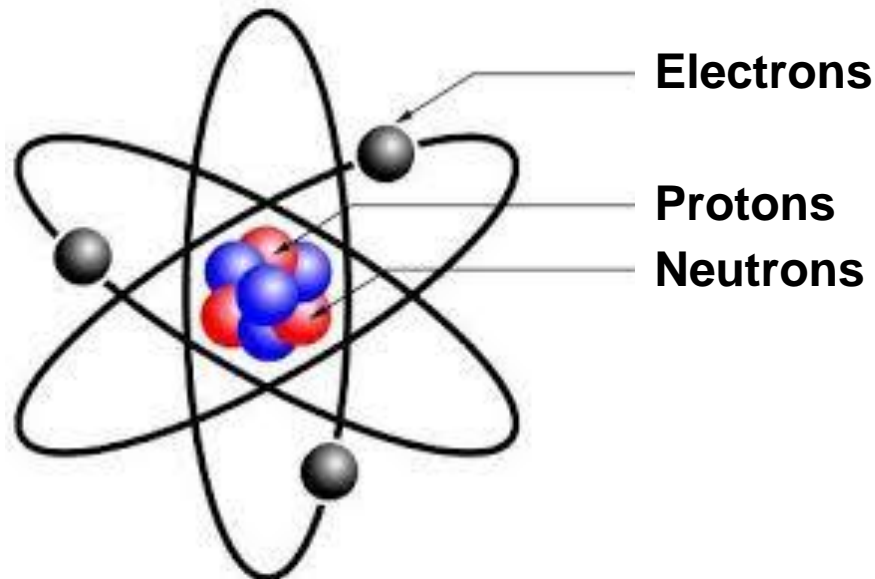
# Les constituants des atomes

**Les atomes sont constitués :**

➤ **D'un noyau constitué de nucléons :**

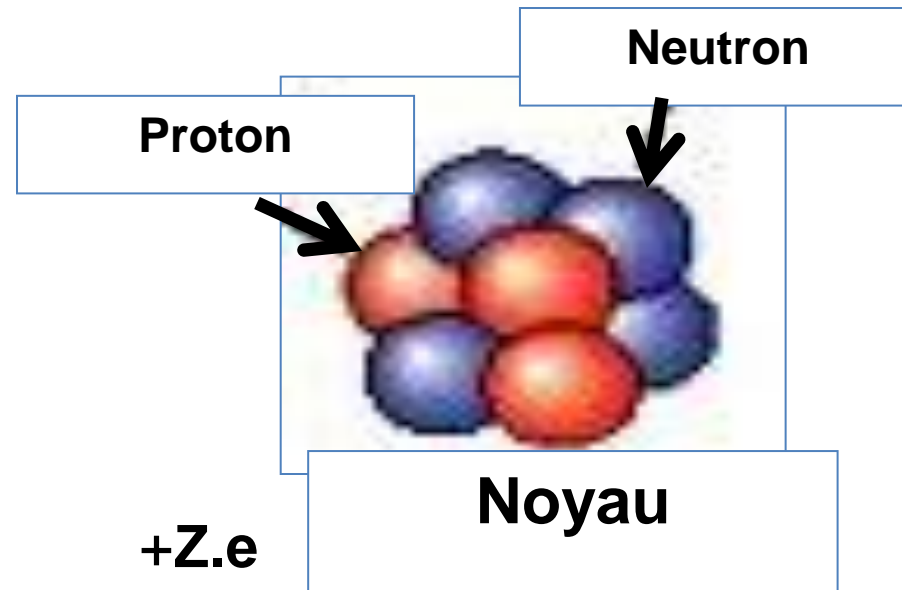
- **Protons ( charge +)**
- **Neutrons ( charge nulle)**

➤ **D'électrons (charge -), situés sur des orbites.**



# Les constituants des noyaux atomiques

Le noyau atomique a la charge positive  $+Z.e$ . Le nombre atomique  $Z$  correspond au numéro atomique de l'élément chimique correspondant dans le système périodique des éléments. La charge élémentaire  $e$  est égale à la valeur absolue de la charge d'un électron.

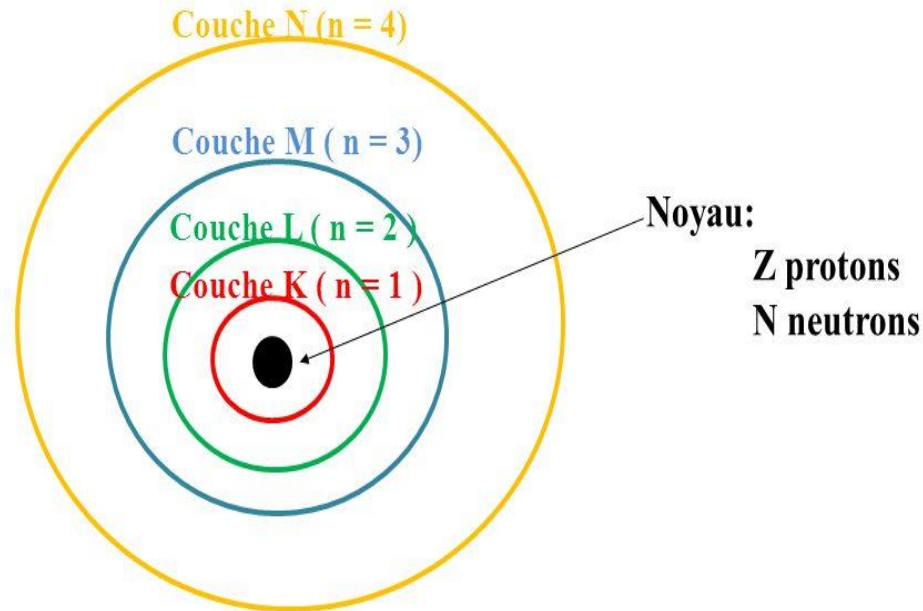


Le noyau atomique est constitué de protons et neutrons. Ces constituants du noyau sont appelés **Nucléons**.

Les noyaux atomiques de **nombre de masse  $A$**  sont constitués de  **$Z$  protons** et  **$N$  neutrons**, avec  **$A = N + Z$** .

# Couches et orbitales atomiques

Les électrons sont retenus sur leur orbite par leur **énergie de liaison** (elle dépend de la position orbitaire et elle est caractéristique de l'élément).



La couche **K (n=1)** peut contenir 2 électrons.

La couche **L (n=2)** peut contenir 8 électrons.

La couche **M (n=3)** peut contenir 18 électrons.

...

Le nombre maximum d'électrons que peut contenir une couche électronique donnée vaut  $2 n^2$ . Chaque électron présente une énergie bien spécifique.

# Couches principales

Chaque valeur du nombre quantique principal  $n$  définit une couche électronique, de sorte que tous les électrons possédant le même nombre  $n$  appartiennent à la même couche. Chaque couche est désignée par une lettre :

$n = 1 \rightarrow$  couche K

$n = 2 \rightarrow$  couche L

$n = 3 \rightarrow$  couche M

$n = 4 \rightarrow$  couche N

$n = 5 \rightarrow$  couche O

## Sous-couches ; orbitales atomiques

Des électrons possédant à la fois une même valeur de  $n$  et une même valeur de  $l$  appartiennent à la même sous-couche. Ces sous-couches sont appelées orbitales et sont également désignées par des lettres :

$l = 0 \rightarrow$  sous-couche s

$l = 1 \rightarrow$  sous-couche p

$l = 2 \rightarrow$  sous-couche d

$l = 3 \rightarrow$  sous-couche f



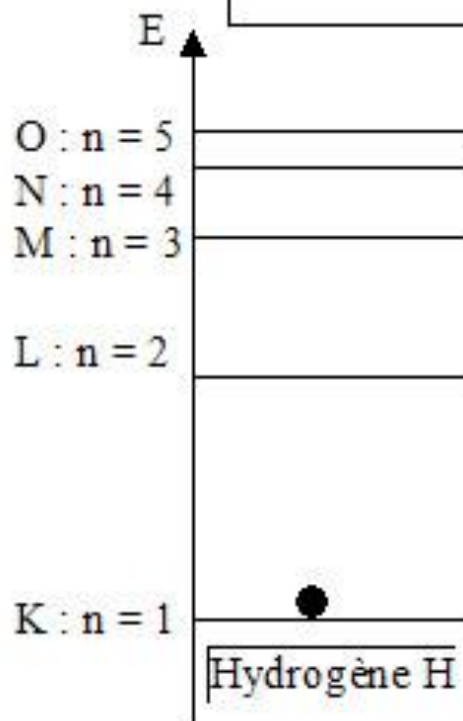
Les orbitales atomiques sont caractérisées par trois nombres quantiques, le nombre quantique **principal n** qui définit la taille de l'orbitale, le nombre quantique **azimutal l** qui précise la forme de l'orbitale, et le nombre quantique **magnétique m<sub>l</sub>**, qui spécifie son orientation dans un champ magnétique. Les deux électrons dans une même orbitale se distinguent par un quatrième nombre quantique, le nombre quantique de **spin s**.

n couche	l sous couche	m case	s	nombre d'électrons	
				sous couche	couche
1=K	0 = 1s	0	$\pm 1/2$	2	2
2=L	0 = 2s 1 = 2p	0	$\pm 1/2$	2	8
		-1	$\pm 1/2$	2	
		0	$\pm 1/2$	2	
		1	$\pm 1/2$	2	
3=M	0 = 3s 1 = 3p	0	$\pm 1/2$	2	18
		-1	$\pm 1/2$	2	
	0	$\pm 1/2$	2		
	1	$\pm 1/2$	2		
	2 = 3d	-2	$\pm 1/2$	2	
		-1	$\pm 1/2$	2	
		0	$\pm 1/2$	2	
		1	$\pm 1/2$	2	
		2	$\pm 1/2$	2	

# Exemples

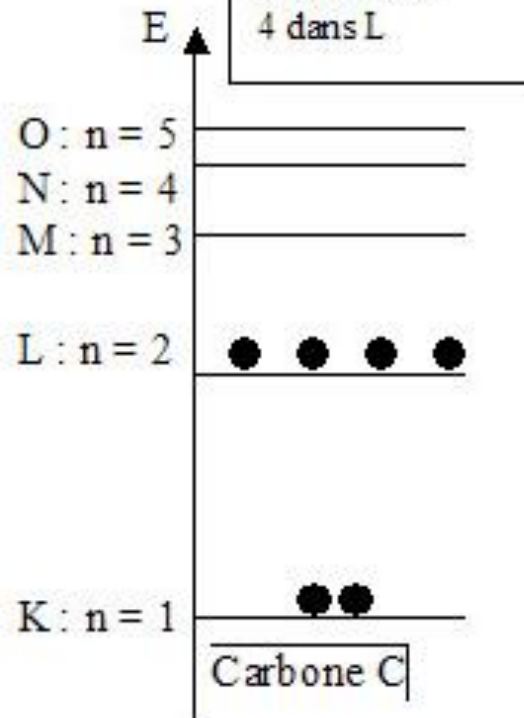
## Hydrogène

1 électron :  
dans la couche K



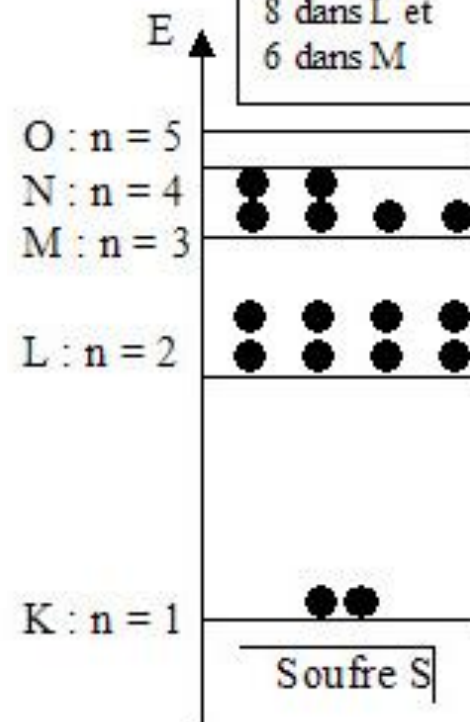
## Carbone

6 électrons :  
2 dans K et  
4 dans L



## Soufre

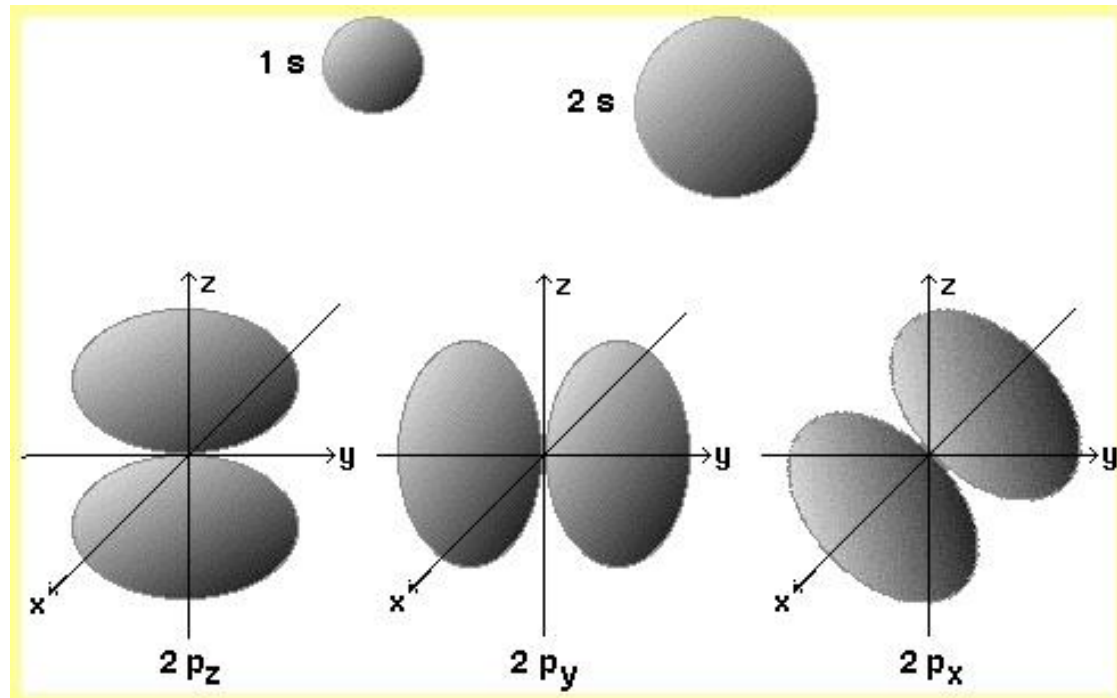
16 électrons :  
2 dans K,  
8 dans L et  
6 dans M



# Géométrie des orbitales atomiques

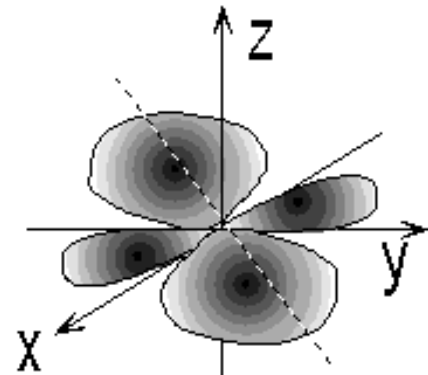
Les orbitales atomiques sont représentées par des formes géométriques à trois dimensions indiquant la région de l'espace où la probabilité de trouver **l'électron est de 95 %**, où la **densité du nuage électronique est la plus élevée**.

Pour les sous-couches s, les orbitales sont de forme sphérique, leur diamètre augmentant avec la valeur du nombre quantique principal n. Pour les 3 sous-couches p, les orbitales ont la forme d'**altères** orientés suivant les 3 axes de coordonnées X, Y et Z en fonction du nombre quantique magnétique  $m_l$ .

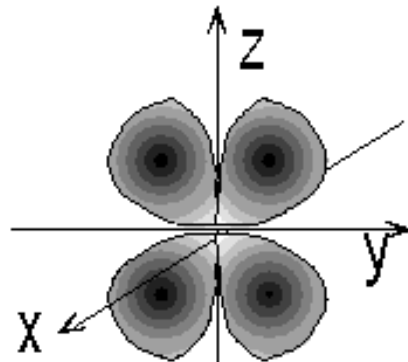


La forme géométrique des 5 orbitales d est beaucoup plus complexe.

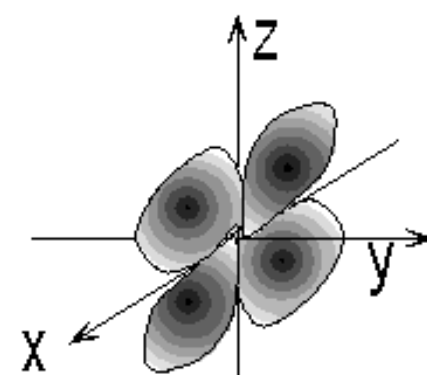
Pour  $l = 2$  correspondent 5 orbitales de type d ( $m = -2, -1, 0, +1$  et  $+2$ ).



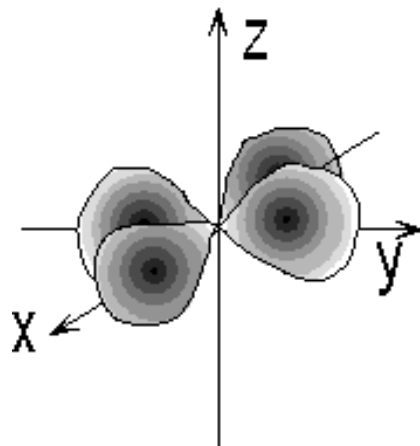
$d_{xy}$



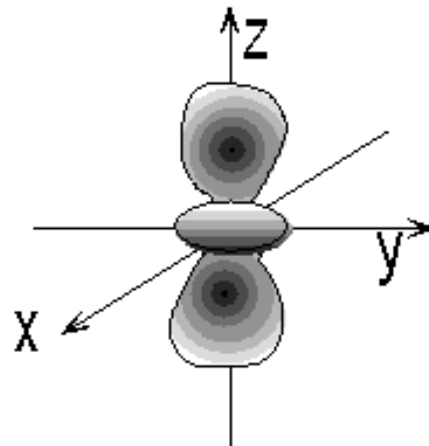
$d_{yz}$



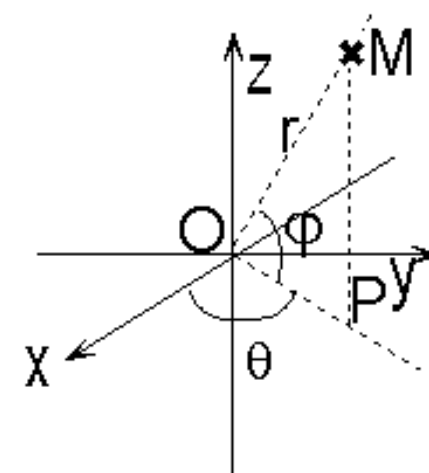
$d_{xz}$



$d_{x^2-y^2}$



$d_{z^2}$



# Configuration électronique

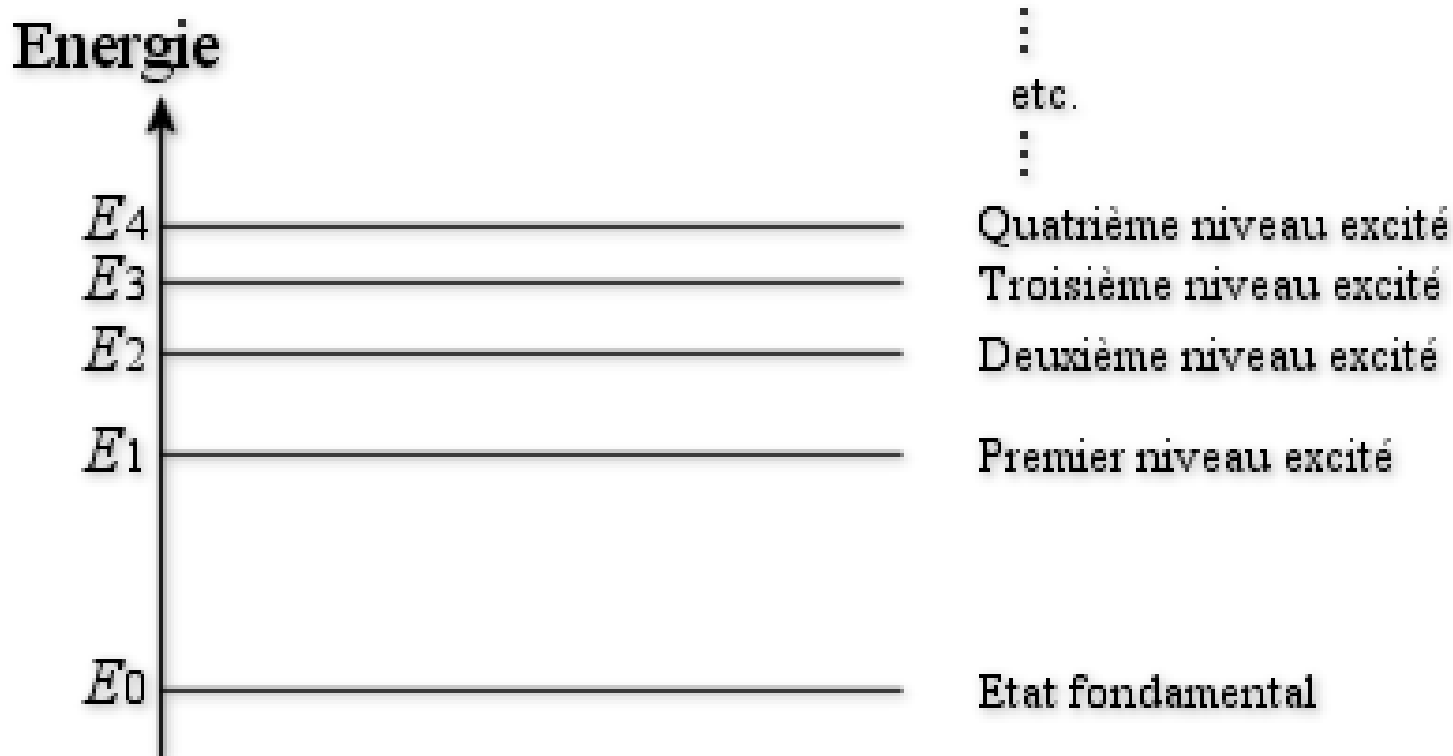
La configuration électronique d'un atome polyélectronique est la façon dont les  $Z$  électrons de l'atome sont répartis sur les différentes orbitales.

La notion de niveau d'énergie s'applique à tout système microscopique (noyau, atome, molécule...). Il existe trois grands types de niveau d'énergie microscopique :

- **Les niveaux d'énergie électronique ( cas d'un atome isolé).**
- **Les niveaux d'énergie nucléaire correspondants aux différents niveaux d'énergie du noyau.**
- **Les niveaux d'énergie au sein d'une molécule.**

# Transition électronique

Le noyau fils formé à l'issue d'une désintégration radioactive peut être produit soit à l'état fondamental, soit dans un état excité. Le diagramme en énergie du noyau peut être représenté schématiquement sous la forme ci-après :

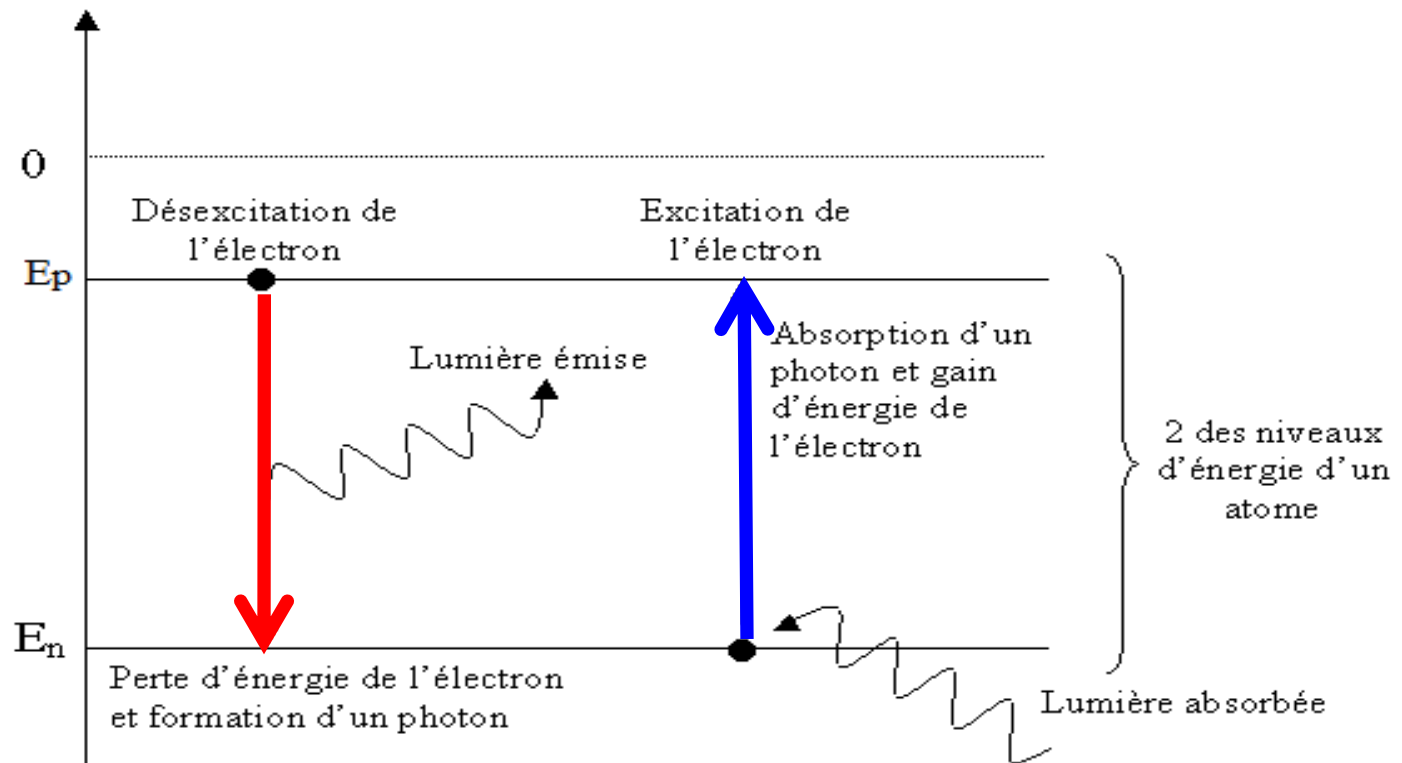


**Transition radiative**

# Transition radiative

Un atome peut gagner ou céder de l'énergie en faisant transiter un électron d'un niveau d'énergie quantifiée  $E_n$  à  $E_p$ . C'est une transition d'énergie électronique. Lors d'une transition électronique, les atomes émettent ou absorbent des photons. Lors d'une transition radiative, les noyaux instables émettent des émissions radioactives pour retrouver leur stabilité.

## Énergie des niveaux

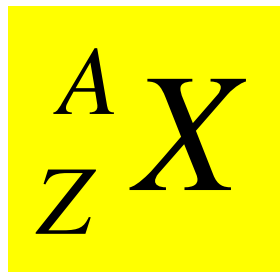


$$\Delta E = |E_n - E_p| = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{\Delta E}$$

# Notation d'un noyau ou élément radioactif

Un noyau comportant  $Z$  protons et  $N$  neutrons est noté sous la forme

$A$  est le nombre de **nucléons** :  $A = Z + N$ .



Exemple :  ${}^{235}_{92}\text{U}$  et  ${}^{12}_6\text{C}$

## Classification des noyaux

- Les noyaux ayant le même nombre  $Z$  de protons s'appellent des **isotopes**.
- Les noyaux ayant le même nombre  $N$  de neutrons s'appellent des **isotones**.
- Les noyaux ayant le même nombre  $A$  de nucléons s'appellent des **isobares**.



# Classification des noyaux

		N = A - Z : Nombre de neutrons							
11									$^{19}\text{O}$
10								$^{17}\text{N}$	$^{18}\text{O}$
9								$^{16}\text{N}$	$^{17}\text{O}$
8							$^{14}\text{C}$	$^{15}\text{N}$	$^{16}\text{O}$
7						$^{12}\text{B}$	$^{13}\text{C}$	$^{14}\text{N}$	$^{15}\text{O}$
6					$^{10}\text{Be}$	$^{11}\text{B}$	$^{12}\text{C}$	$^{13}\text{N}$	
5				$^8\text{Li}$	$^9\text{Be}$	$^{10}\text{B}$	$^{11}\text{C}$		
4			$^6\text{He}$	$^7\text{Li}$			$^{10}\text{C}$		
3				$^6\text{Li}$	$^7\text{Be}$				
2		$^3\text{H}$	$^4\text{He}$						
1	n	$^2\text{H}$	$^3\text{He}$		$^A\text{X}$		Nucléide stable		
0		$^1\text{H}$		$^A\text{X}$	$^A\text{X}$	$^A\text{X}$	Nucléide instable		
	0	1	2	3	4	5	6	7	
		Z : Nombre de protons							

# Grandeurs fondamentales

Grandeurs	Unités légales du Système International (SI)		Unités usuelles en physique des radiations ou anciennes unités *		
<b>Charge électrique</b>	coulomb	C	charge de l'électron	e	$1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
<b>Energie</b>	joule	J	(erg)* électron volt	eV	$10^{-7} \text{ J}$ $1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
<b>Dose absorbée</b>	gray ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	Gy	(rad)*	rad	$10^{-2} \text{ Gy}$
<b>Exposition</b>		C / kg air	(Roentgen)*	R	$2.58 \cdot 10^{-4} \text{ C / kg air}$
<b>Dose équivalente</b>	sievert	Sv	röntgen équivalent man	rem	10 mSv
<b>Activité</b>	becquerel	Bq	(curie)*	Ci	37 GBq

# Grandeurs fondamentales

Grandeurs	Unités légales SI		Unités usuelles en physique des radiations		
	<b>Longueur</b>	mètre	m	centimètre (angström)* Fermi (femtomètre)	cm Å fm
<b>Masse</b>	kilogramme	kg	gramme u.m.a.	g	$10^{-3}$ kg $1 / \mathcal{N} 10^{-3}$ kg
<b>Temps</b>	seconde	s	heure jour	h j	3600 s 86400 s
<b>Intensité électrique</b>	ampère	A			

Nombre d'Avogadro  $\mathcal{N}_A = 6.022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

# Unité de masse atomique (u.m.a.)

Elle est définie comme 1/12 de la masse d'un atome du nucléide  $^{12}\text{C}$  (carbone), non lié, au repos et dans son état fondamental. Un atome de  $^{12}\text{C}$  a une masse de 12 u et, si on prend  $N_A$  (nombre d'Avogadro) atomes de  $^{12}\text{C}$  (1 mole d'atomes), une masse de 12 g est obtenue. En conséquence une **u.m.a.** vaut :

$$1 \text{ u.m.a.} = \frac{12 \cdot 10^{-3} \text{ kg}}{12 N_A} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Particule	Masse		Charge	
	Gramme	u.m.a	C	e
Electron	$9,109\ 382 \cdot 10^{-28}$	$5,485\ 799 \cdot 10^{-24}$	$-1,602\ 176 \cdot 10^{-19}$	-1
Proton	$1,674\ 927 \cdot 10^{-24}$	1,007 276	$+1,602\ 176 \cdot 10^{-19}$	+1
Neutron	$1,672\ 622 \cdot 10^{-24}$	1,008 665	0	0

$$1 \text{ u.m.a.} = \frac{931,5 \text{ MeV}}{c^2}$$

# Propriétés des atomes

**A** nucléons ( nombre de masse )

**Z** protons ( nombre atomique, propriétés chimiques )

**N=A-Z** neutrons ( propriétés nucléaires )

Atomes naturels ou artificiels  
stables ou radioactifs

} **Nucléides**



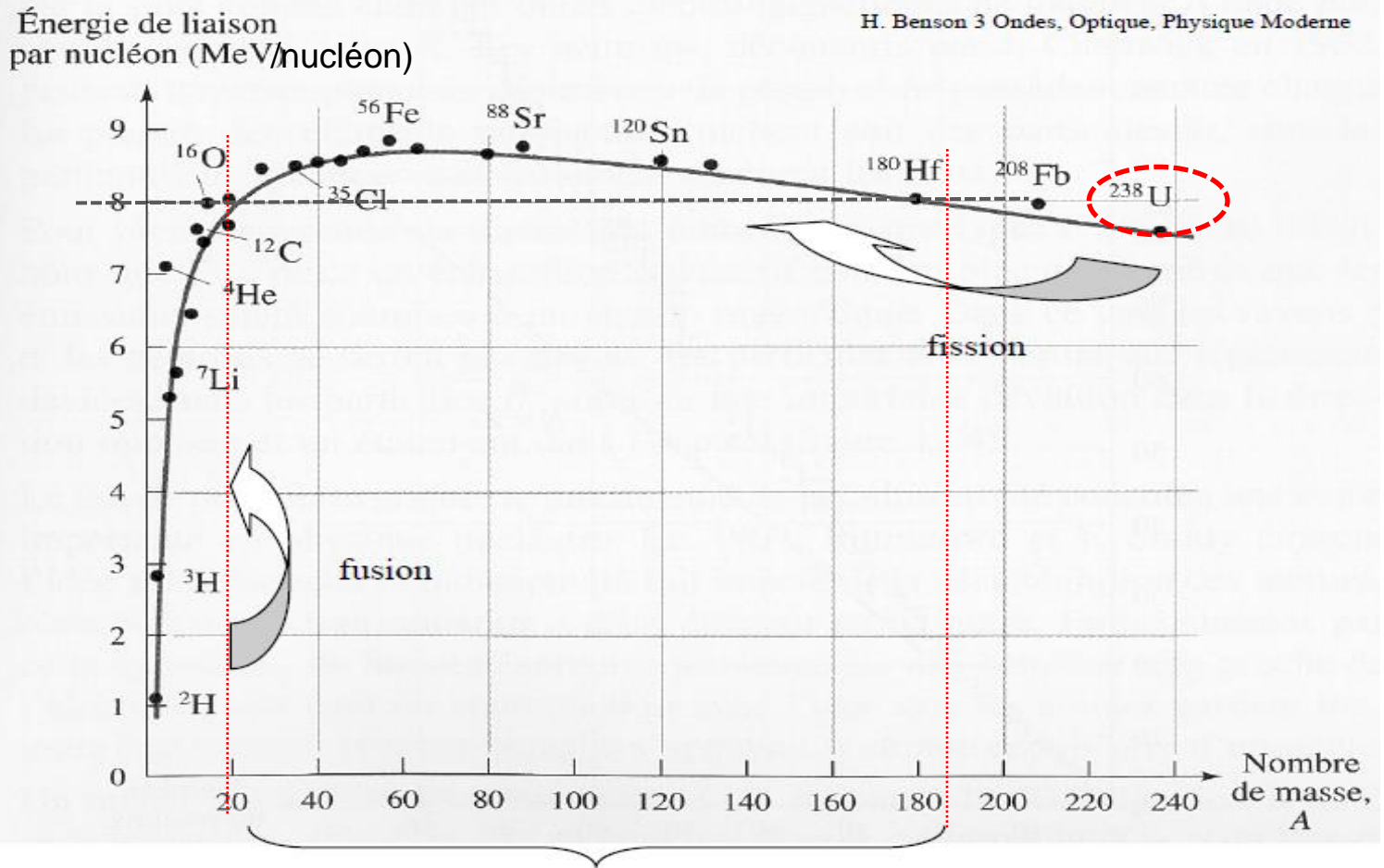
$$Z \approx \frac{A}{1.98 + 0.0155A^{2/3}}$$

**Stabilité**



# Stabilité des noyaux

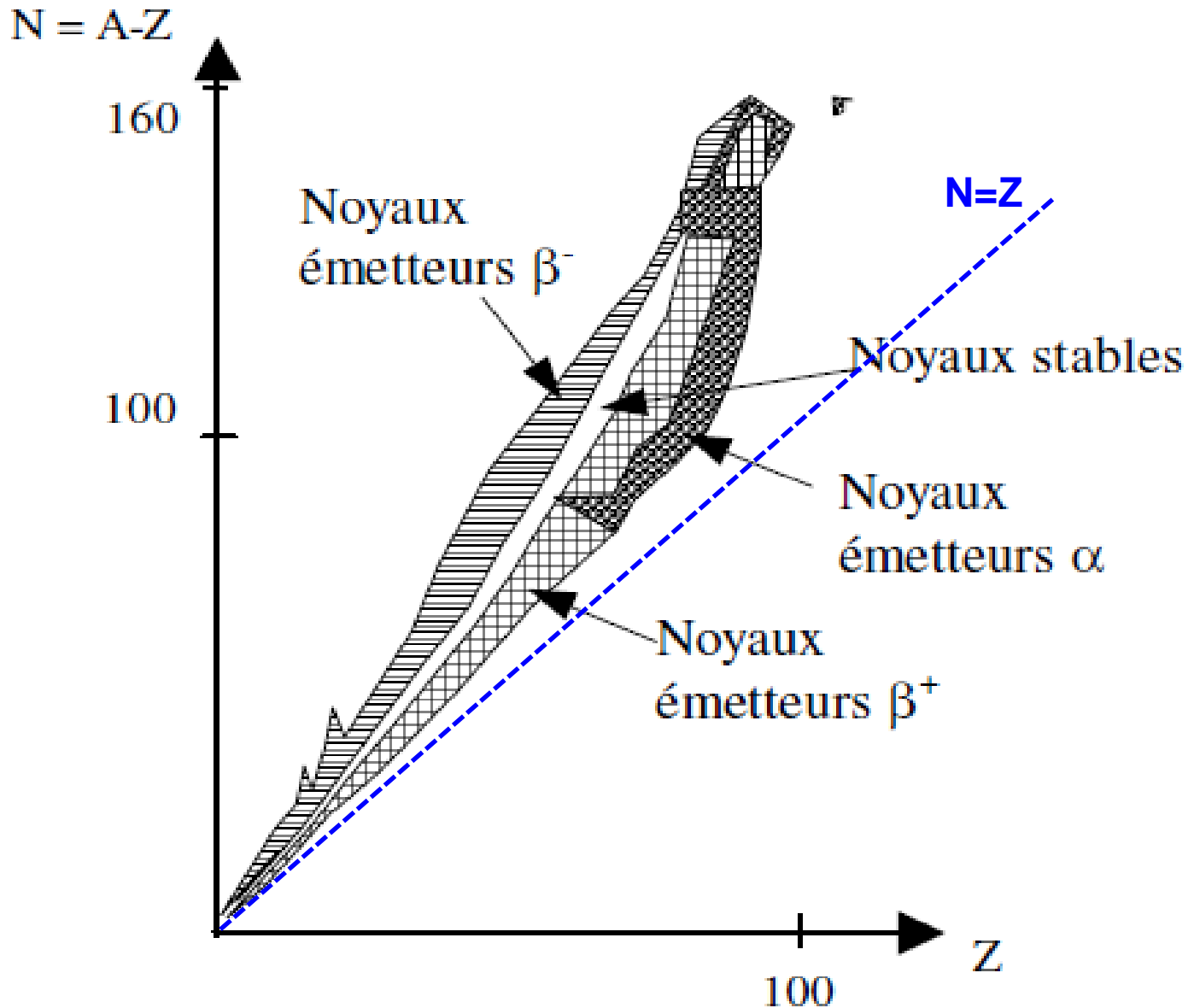
H. Benson 3 Ondes, Optique, Physique Moderne



Courbe d'Aston

Les nucléides les plus stables sont ceux pour lesquels il faut beaucoup d'énergie pour extraire un nucléon : ces nucléides se trouvent donc proches du maximum de la courbe. Le maximum est atteint pour l'énergie de liaison par nucléon vaut approximativement **8.795 MeV**. Les noyaux stables ont donc une énergie de liaison par nucléon élevée. La courbe montre que les noyaux stables sont ceux dont le nombre de masse n'est ni trop petit, ni trop grand ( $20 < A < 190$ ).

# Stabilité des noyaux



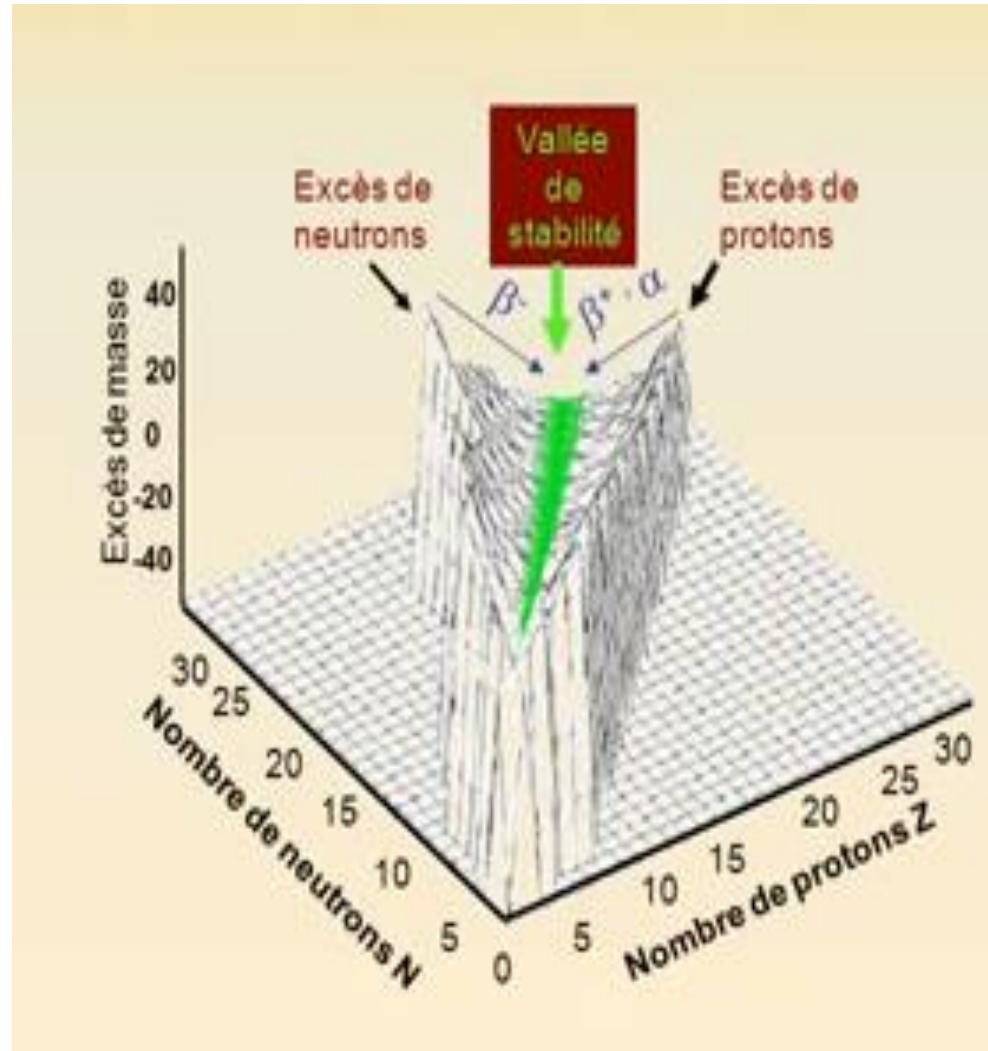
# Stabilité des noyaux

➤ Les noyaux situés à gauche de la zone de stabilité sont trop riches en neutrons : un neutron peut se transformer en un proton avec émission d'un électron → **radioactivité  $\beta^-$** .

➤ Les noyaux situés à droite de la zone de stabilité sont trop riches en protons : un proton peut se transformer en un neutron avec émission d'un positon → **radioactivité  $\beta^+$** .

➤ Les noyaux trop riches en nucléons émettent des noyaux d'hélium (**particules  $\alpha$** ).

➤ L'équation d'une réaction nucléaire vérifie les lois de **conservation de la charge électrique et du nombre de nucléons**.



- Noyaux stables : aucune radioactivité.
- Noyaux instables : **émissions radioactives**

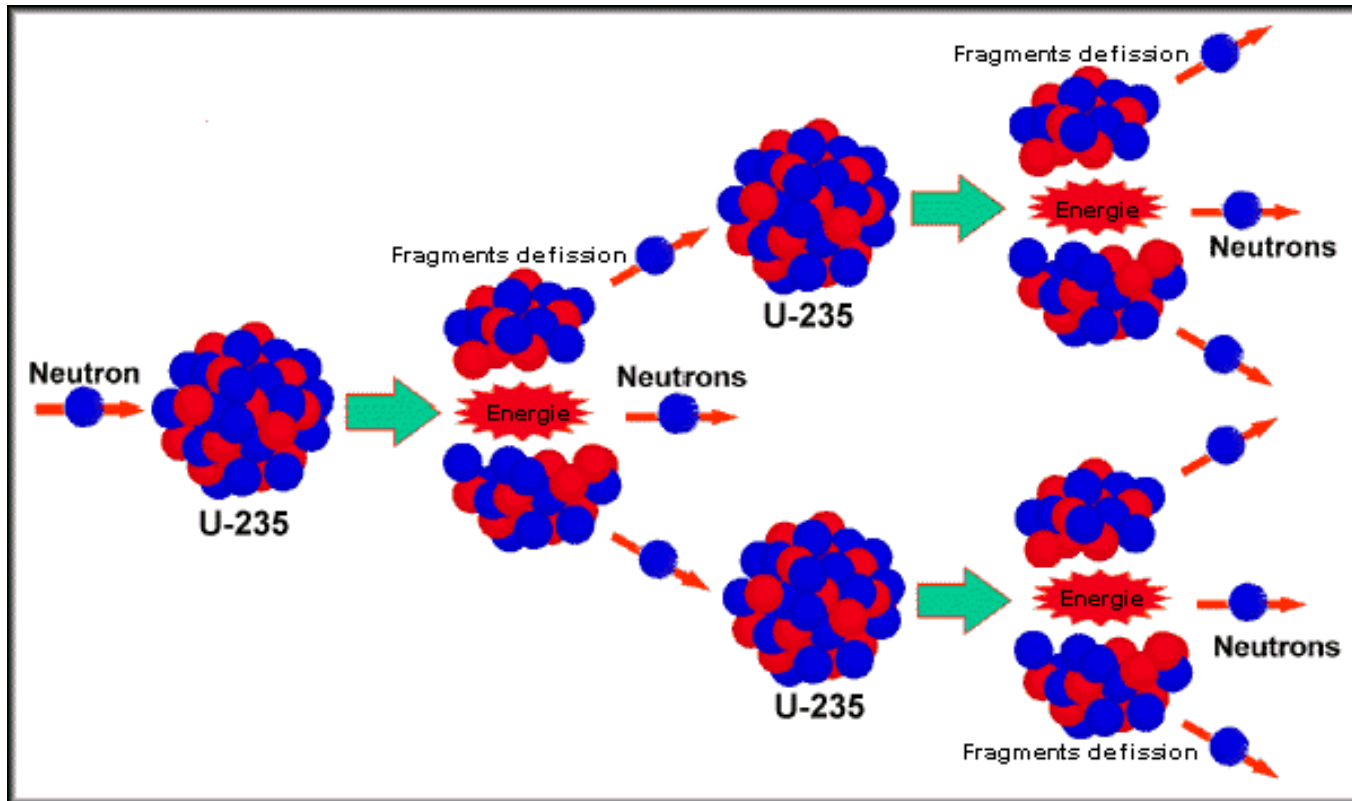


# Types des réactions : Fission et fusion

Les nucléides instables ont deux possibilités pour évoluer vers des états de plus grande stabilité, selon qu'il s'agit de noyaux lourds ou légers :

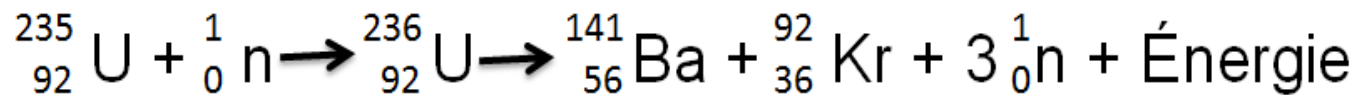
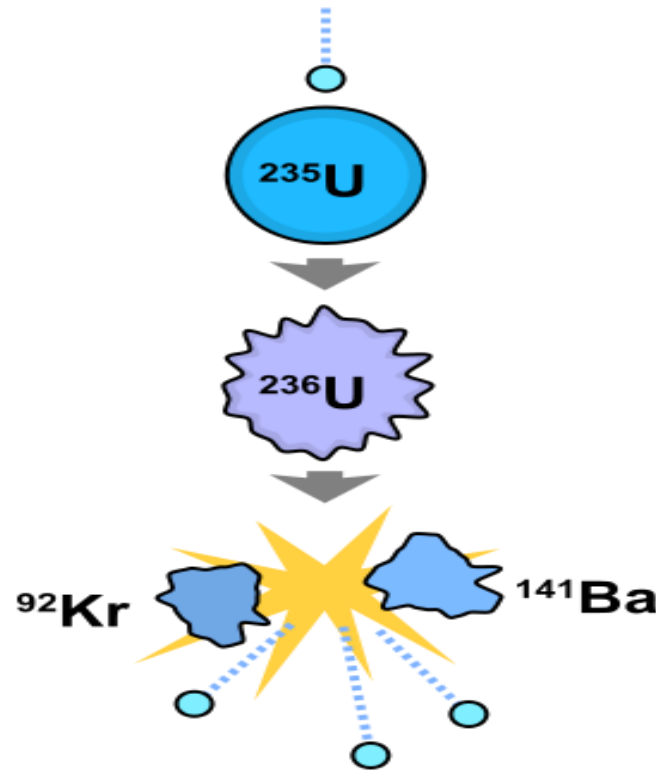
Certains **noyaux lourds (comme par exemple l'Uranium 235) peuvent se briser pour** donner naissance à deux noyaux plus légers et situés dans la zone de stabilité : c'est la **réaction nucléaire de fission**.

La fission nucléaire est l'éclatement d'un noyau instable en deux noyaux plus légers et quelques particules élémentaires. Cet éclatement s'accompagne d'un dégagement de chaleur, c'est à dire d'énergie.



# Fission

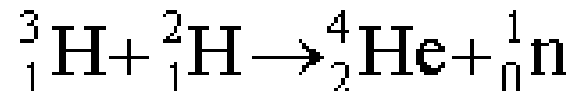
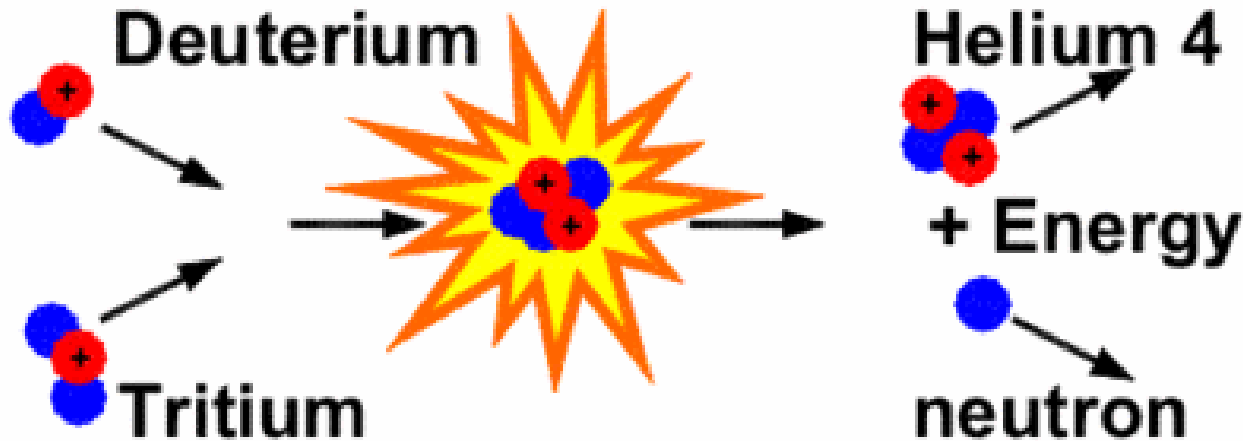
La fission nucléaire de l'uranium 235 en est un exemple. Lorsqu'un noyau d'uranium 235 absorbe un neutron, il devient alors de l'uranium 236. Ce dernier est tellement instable qu'il se brise en deux noyaux plus légers. Dans le cas de l'uranium 236, les deux noyaux formés sont du baryum 141 et du krypton 92.



# Fusion

Certains **noyaux légers ont la possibilité de « fusionner »** en un seul noyau situé plus haut sur la courbe et donc plus stable : c'est la **réaction nucléaire de fusion**.

Lors d'une réaction de fusion nucléaire, deux noyaux légers (par exemple Deuterium et Tritium) s'agglomèrent en un noyau plus lourd et plus stable (Helium dans ce cas).



# **B- Transformations radioactives**

# Masse des noyaux et énergie de liaison

En mesurant la masse des noyaux au repos et celles des nucléons, les scientifiques se sont aperçu **que la masse d'un noyau est toujours inférieure à la somme des masses des nucléons qui le compose.**

Cette différence de masse est appelée défaut de masse  $\Delta m$  et se calcule comme suit :

$$\Delta m = Zm_p + (A-Z)m_n - m(A,Z)$$

$m(A,Z)$  est la masse du noyau

**Énergie de liaison :**

$$E_l(A,Z) = \Delta m \cdot c^2 = \left( Zm_p + (A-Z)m_n - m(A,Z) \right) \cdot c^2$$

**Énergie de liaison par nucléons :**

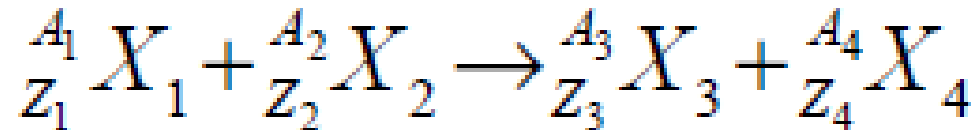
Elle est égale à l'énergie de liaison du noyau divisée par le nombre de nucléons présents dans ce noyau :

$$\frac{E_l(A,Z)}{A}$$

Elle s'exprime généralement en **MeV/nucléon.**

# Bilan de masse et d'énergie d'une réaction nucléaire

Soit une réaction nucléaire quelconque d'équation :



L'énergie libérée par la transformation nucléaire est donnée par :

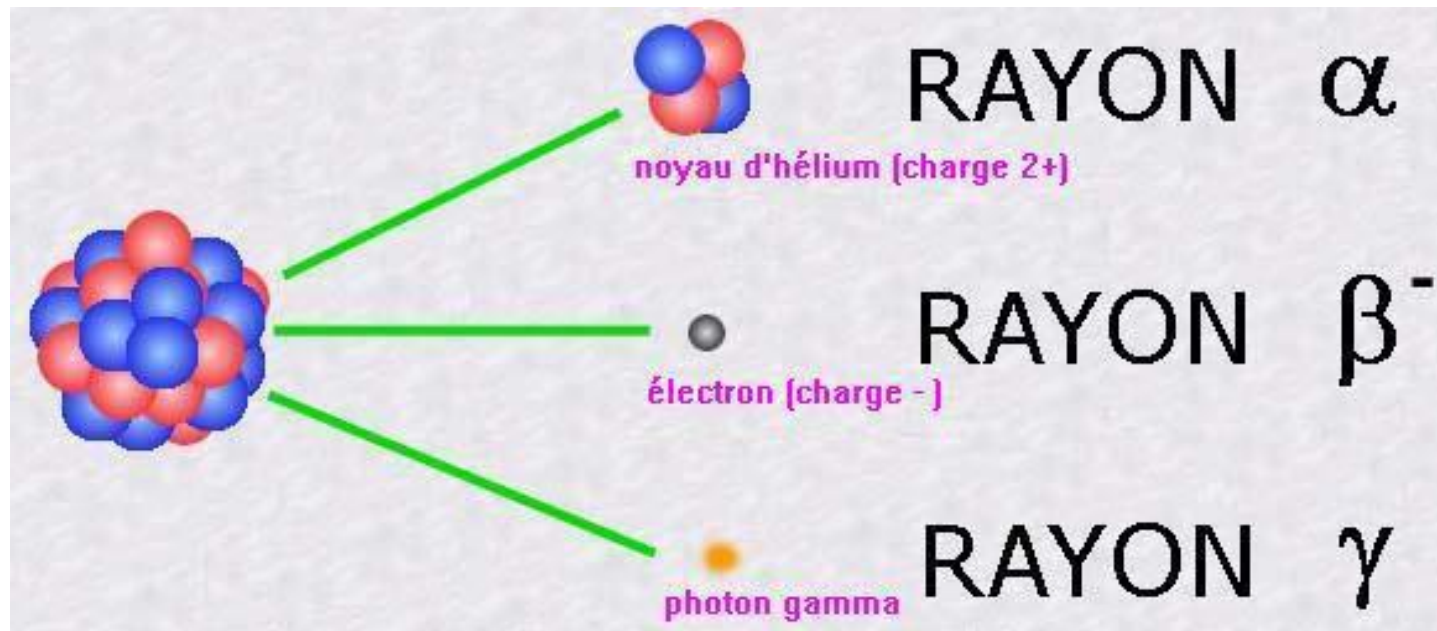
$$E_{\text{libérée}} = \Delta E = \Delta m \cdot c^2 = \left( m(X_3) + m(X_4) - (m(X_1) + m(X_2)) \right) \cdot c^2$$

Ou en utilisant les énergies de liaison des noyaux comme suit :

$$E_{\text{libérée}} = \Delta E = E_l(X_1) + E_l(X_2) - (E_l(X_3) + E_l(X_4))$$

# Types de désintégrations radioactives

La radioactivité est une propriété des noyaux instables; des noyaux ayant un excès de protons ou de neutrons. Ces noyaux se "transforment" (ils émettent des particules) jusqu'à ce qu'ils soient stables. On dit que **les noyaux se désintègrent**. Ces désintégrations s'accompagnent de l'émission de rayonnements.

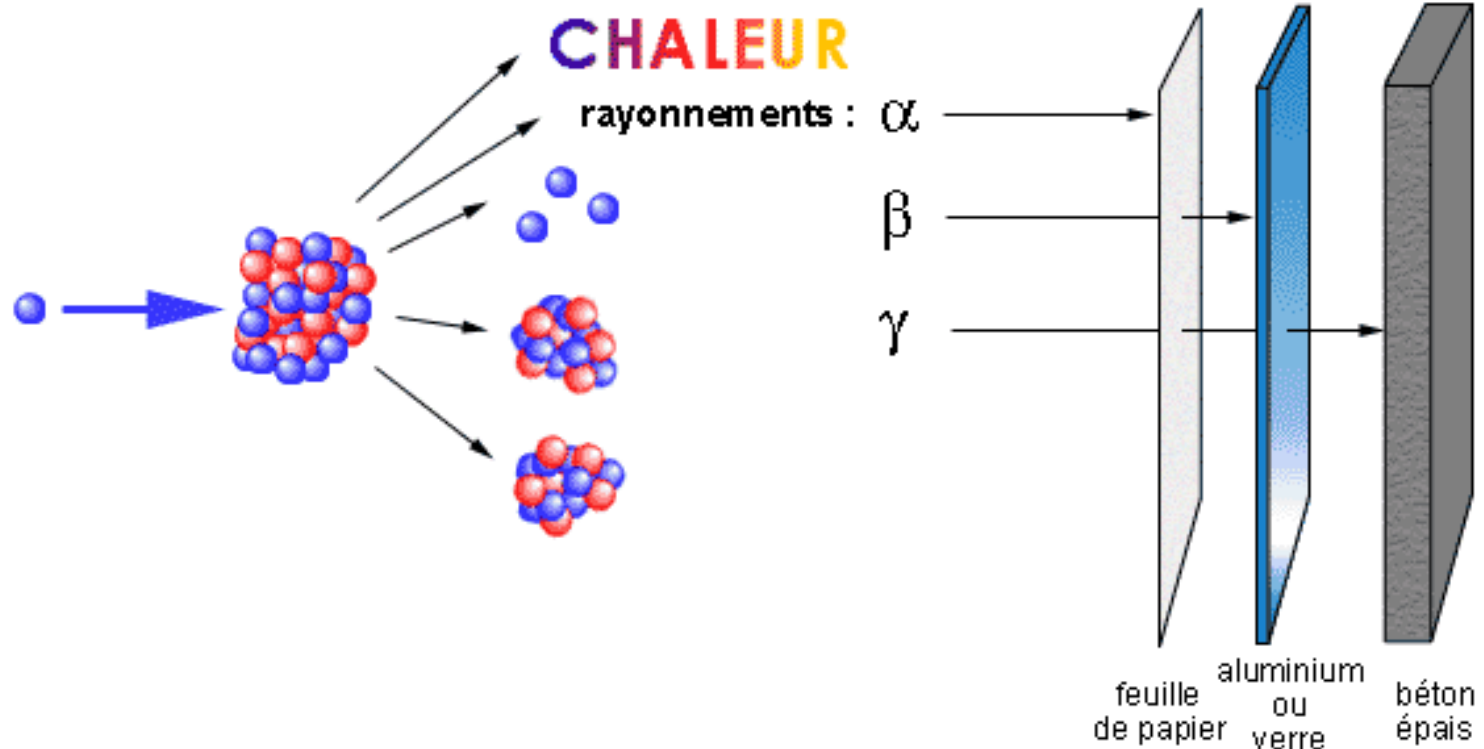


Les noyaux instables redeviennent stables en émettant de l'énergie sous forme de particules ou de rayonnement. Donc tout noyau instable tend à minimiser son énergie, ce qui implique une transmutation d'un noyau instable en un autre plus stable.

Ces variétés de radioactivité ne sont pas forcément émises simultanément.

# Types de désintégrations radioactives

Les **rayonnement alpha** et **bêta** sont dus à un réarrangement interne du noyau et correspondent à une éjection de particules. Le rayonnement alpha est **arrêté par une simple feuille de papier** tandis que le rayonnement bêta est **arrêté par une feuille d'aluminium de quelques millimètres d'épaisseur**. Le **rayonnement gamma** est un rayonnement électromagnétique (de même nature que la lumière). Il correspond à une libération d'énergie par le noyau. Il est **atténué par une forte épaisseur de plomb ou de béton** et est généralement consécutif à un rayonnement alpha ou bêta.



Rayonnements émis lors d'une fission



# Radioactivité $\alpha$

**La radioactivité alpha ( $\alpha$ )** c'est la division et l'émission de particules alpha. Elle concerne surtout tous les gros noyaux dont le plus gros est l'uranium 238 comportant 92 protons et 136 neutrons. De tels Noyaux instables émettent un noyau léger d'hélium afin de devenir moins gros et ainsi de se rapprocher de la vallée de stabilité.

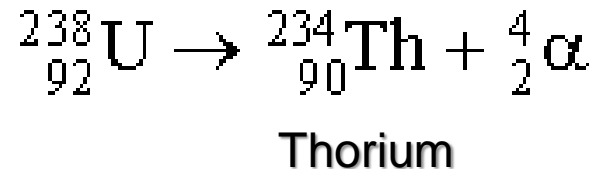


La particule  $\alpha$  est en réalité un noyau d'hélium 4 :  ${}^4_2\text{He}$ .

Elle se compose de 4 nucléons : 2 protons et 2 neutrons.

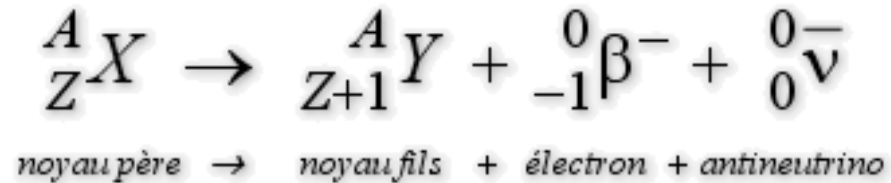
## Exemple :

L'Uranium 38 est un nucléide radioactif naturellement présent dans le sol. L'équation de désintégration  $\alpha$  s'écrit :



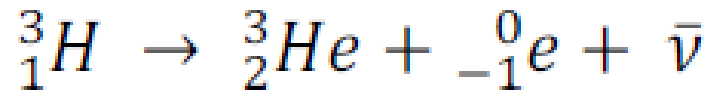
# Radioactivité $\beta^-$

**La radioactivité bêta ( $\beta^-$ )** : c'est la présence dans le noyau de forces capables de transformer un nucléon c'est-à-dire un neutron en proton ou un proton en neutron. Cette transformation ne change pas le nombre de nucléons et émet soit un électron soit une particule chargée positivement. Ils existent deux sortes de radioactivités bêta. Tout d'abord la radioactivité bêta moins qui est l'émission d'un électron accompagnant la transformation d'un neutron en proton.



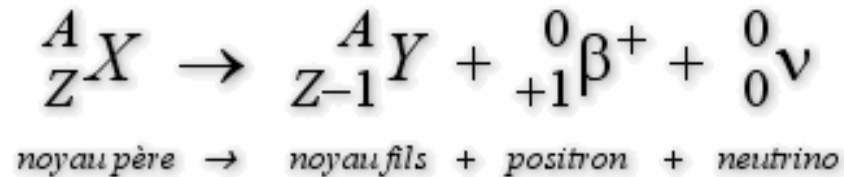
Cette particule  $\beta^-$  n'est rien d'autre qu'un **électron**. L'antineutrino, c'est une « antiparticule » : il s'agit de la particule d'antimatière associée au neutrino.

Exemple :



# Radioactivité $\beta^+$

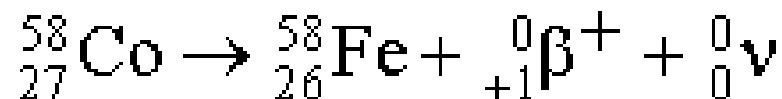
La **radioactivité bêta plus** est l'émission d'une positon accompagnant la transformation d'un proton en neutron.



Le  $\beta^+$  est une antiparticule appelée positron ou positon. Il s'agit de la particule d'anti-matière associée à l'électron, ainsi on aurait pu l'appeler «anti-électron». C'est une particule qui a même masse que l'électron mais qui a une charge opposée.

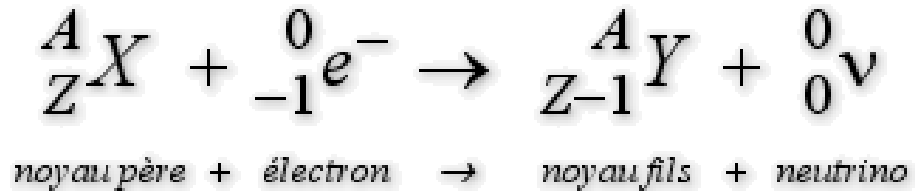
Le neutrino et l'antineutrino sont les particules les plus abondantes de l'univers, mais paradoxalement, on sait très peu de choses sur elles. En particulier, on ne connaît pas leur masse.

Exemple :



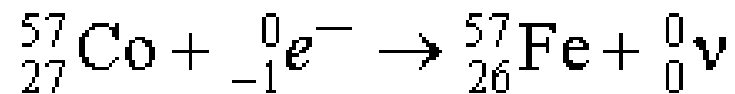
# Capture Electronique CE

Dans la radioactivité par capture électronique, le noyau père absorbe une particule légère (un électron) et émet une particule légère (un neutrino).



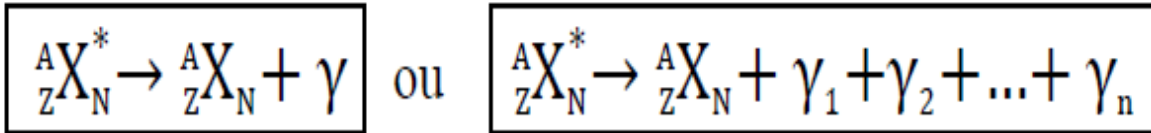
La radioactivité par CE est une **transformation isobarique** (même  $A$  entre noyau père et noyau fils).

Exemple :



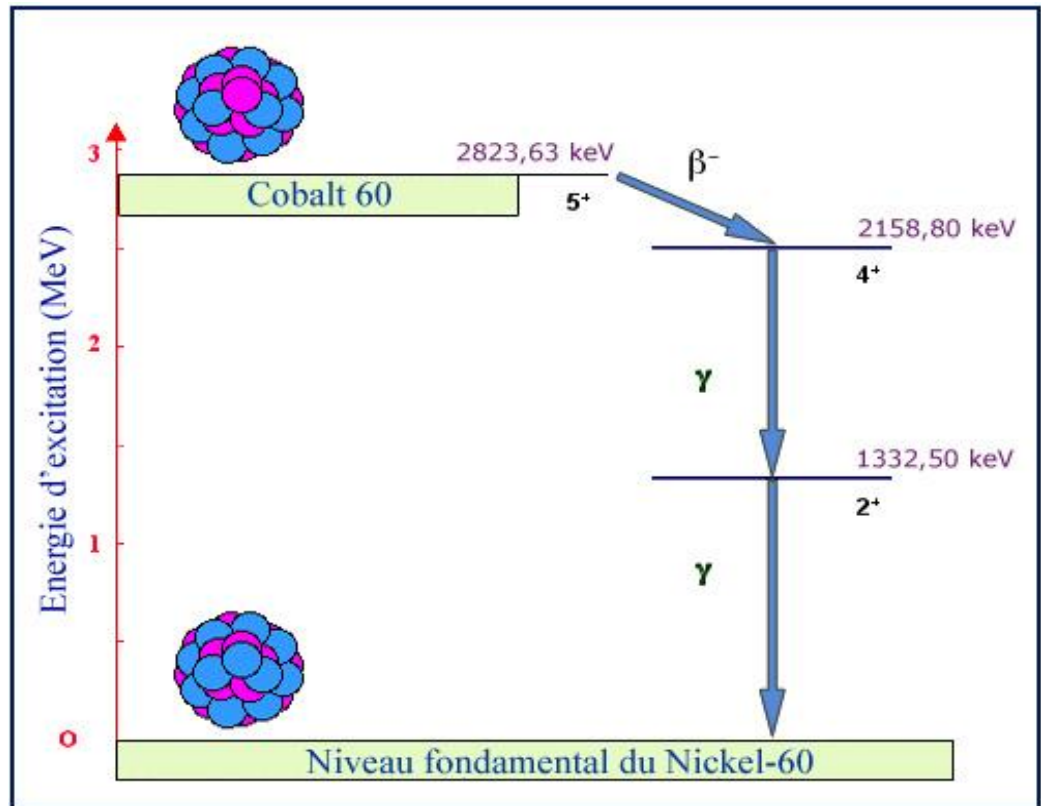
# Radioactivité gamma

**La radioactivité gamma ( $\gamma$ )** : c'est une radioactivité électromagnétique invisible à l'homme. Lors d'une radioactivité alpha ou bêta, les noyaux qui viennent d'être créés sont encore dans un état excité. Ils vont perdre leur excès d'énergie en émettant un flux de photons (porteurs de l'énergie lumineuse), le rayonnement gamma.

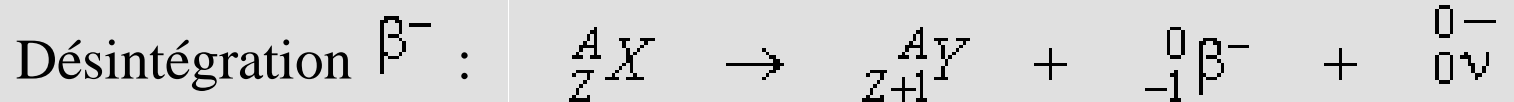


**Exemple :**

Le Cobalt 60 se transforme en nickel 60 "excité", qui lui-même retrouve sa stabilité en émettant des rayonnements gamma.



# Équations générales de désintégration alpha, bêta et CE



# Loi de décroissance : Noyau

Étant donné une population de  $N(t)$  noyaux radioactifs à la date  $t$ . On note  $\Delta N$  la variation de cette population pendant une durée  $\Delta t$ . Du fait de la désintégration d'un certain nombre de noyaux radioactifs, la population  $N(t)$  décroît et la variation correspondante  $\Delta N$  est négative.

$$\Delta N(t) = -\lambda N \cdot \Delta t$$

$\lambda$  est la **constante radioactive**, elle est caractéristique du type de noyau pour la **désintégration** étudiée (unité :  $s^{-1}$ ).

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

avec  $\tau = 1/\lambda$  = la **constante de temps** et  $N_0$  le nombre de noyaux radioactifs initialement présents dans l'échantillon

## Activité d'une source radioactive

L'activité  $A$  mesure le nombre moyen de désintégrations par unité de temps. L'activité est exprimée en becquerels (Bq). Un becquerel correspond à une désintégration par seconde :

$$A = \lambda N$$
$$A_0 = \lambda N_0$$



$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

# Loi de décroissance : Masse

$N_0$  : nombre d'atomes initial.

$N_t$  : nombre d'atomes restant au temps  $t$ .

Le nombre de noyaux ou d'atomes radioactifs décroît exponentiellement avec le temps.

1 mole d'un élément radioactif a une masse  $M$  :

$M \longrightarrow N_A \text{ atomes}$

$m(g) \longrightarrow N \text{ atomes}$



$$N_0 = \frac{m_0}{M} N_A \quad \text{et} \quad N_t = \frac{m_t}{M} N_A$$

$$N_t = \frac{m_t}{M} N_A = \frac{m_0}{M} N_A e^{-\lambda t}$$



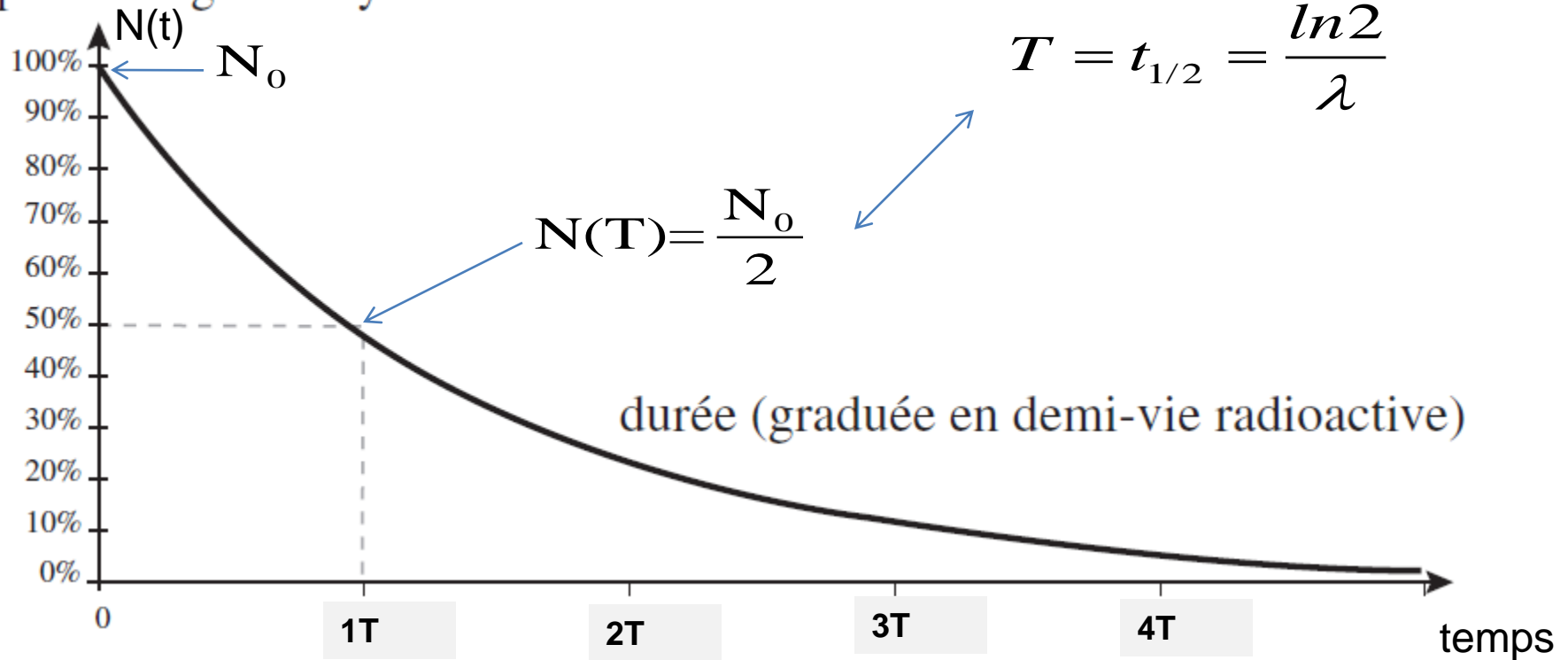
$$m_t = m_0 e^{-\lambda t}$$



# Période radioactive : T

La demi-vie, ou **période radioactive**, d'un nucléide radioactif est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux radioactifs initialement présents dans un échantillon s'est désintégrée.

pourcentage de noyaux radioactifs



Au bout d'une durée égale à  $n$  période ( $t=n \cdot t_{1/2}$ ) le nombre de noyaux radioactifs encore présents dans l'échantillon est :

$$N(t) = \frac{N_0}{2^n} \quad \longrightarrow \quad A(t) = \frac{A_0}{2^n}$$

# **C- Applications : Datation, Dosimétrie...**

# Principe de la datation par le carbone 14

La datation est l'attribution d'une date. Ce terme peut donc s'appliquer à un événement, un objet, un document, un fossile, une couche géologique ou encore un niveau archéologique. Il désigne globalement la démarche, scientifique ou non, qui consiste à déterminer l'intervalle de temps séparant l'élément daté du temps présent.

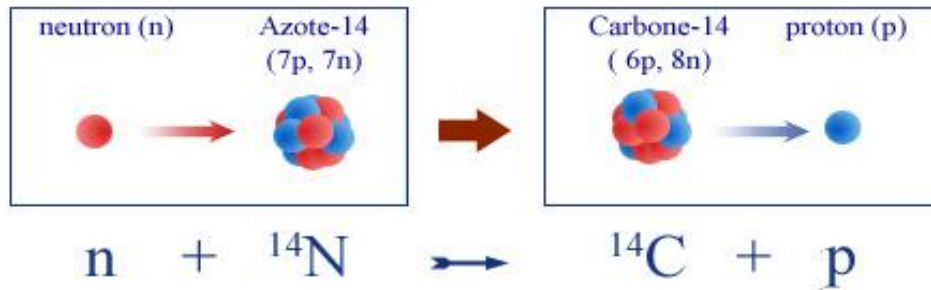
Le carbone 14 ou radiocarbone est un isotope radioactif du carbone dont la période radioactive (ou demi-vie) est égale à peu près **5734 ± 40 ans** selon des calculs relevant de la physique des particules datant de 1961.

Une plante ou un animal vivant, son organisme échange du carbone avec son environnement si bien que le carbone qu'il contient aura la même proportion de  $^{14}\text{C}$  (carbone 14) que dans la biosphère. Lorsque l'organisme meurt, il ne reçoit plus de  $^{14}\text{C}$  et celui qu'il contient va se désintégrer peu à peu. Le rapport isotopique  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  de l'organisme est inférieur de quelques pour cents à celui de la biosphère. Durant sa vie, la proportion de  $^{14}\text{C}$  présent dans l'organisme par rapport au carbone total ( $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  et  $^{14}\text{C}$ ) est donc aisément rapportable à celle existant dans l'atmosphère du moment.

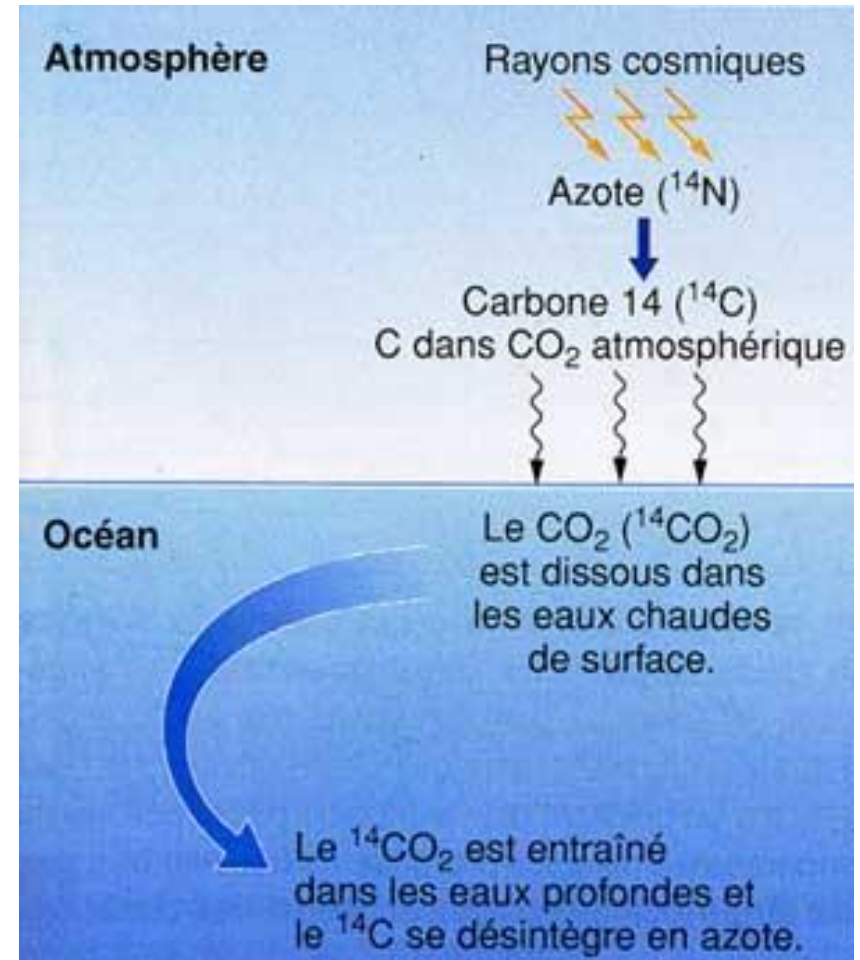
La datation par le carbone 14 se fonde ainsi sur la présence dans tout organisme de radiocarbone en infime proportion (de l'ordre de  $10^{-12}$  pour le rapport  $^{14}\text{C}/\text{C}$  total). À partir de l'instant où un organisme meurt, la quantité de radiocarbone qu'il contient ainsi que son activité radiologique décroissent au cours du temps selon une loi exponentielle. Un échantillon de matière organique issu de cet organisme peut donc être daté en mesurant soit le rapport  $^{14}\text{C}/\text{C}$  total avec un spectromètre de masse, soit son activité **X** années après la mort de l'organisme.

# Formation de l'azote 14

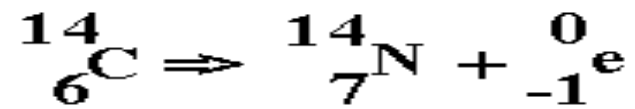
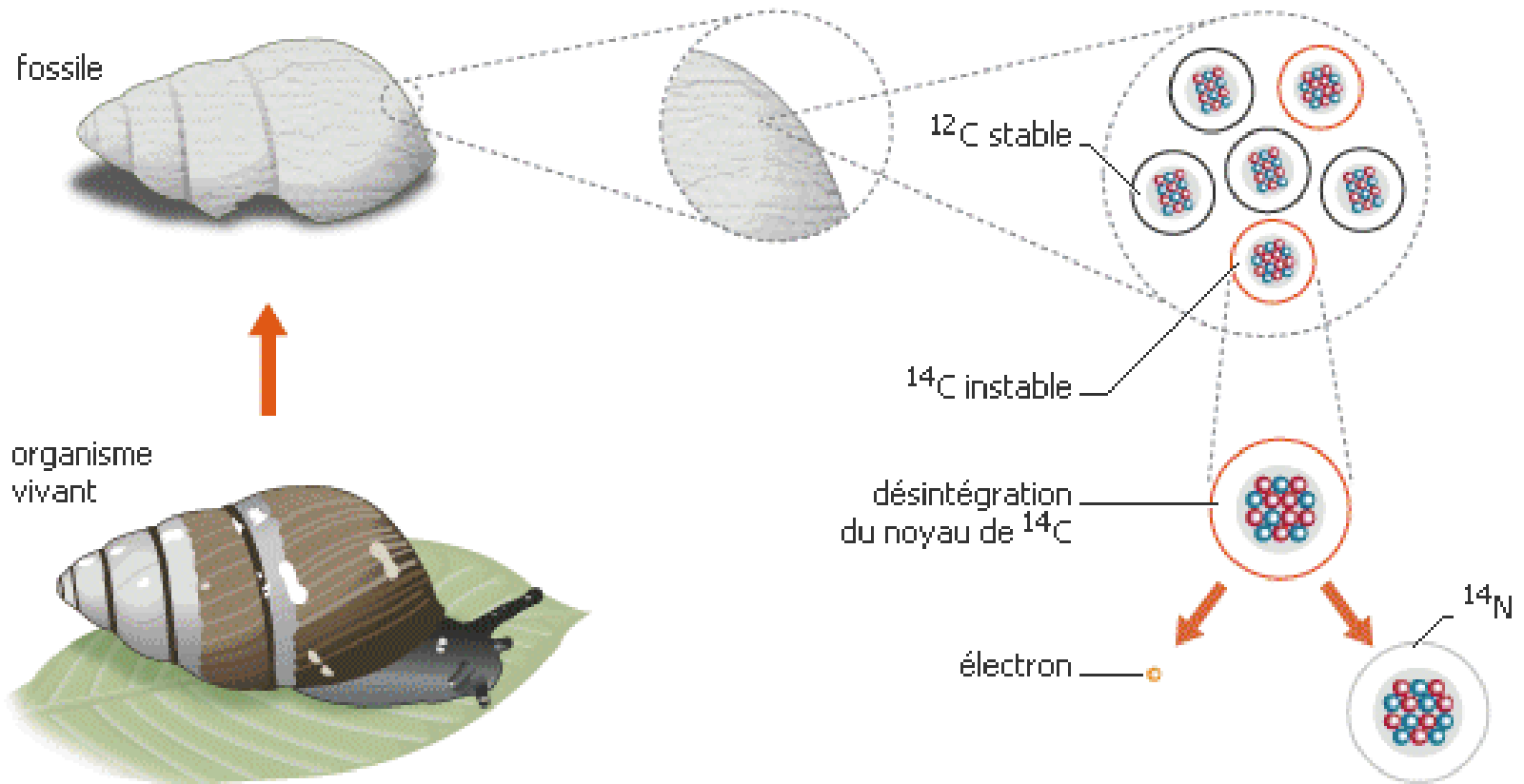
Dans la haute atmosphère, des réactions nucléaires initiées par le rayonnement cosmique produisent un flux de neutrons libres. Après avoir été ralentis par collision avec les molécules de l'air, les neutrons dans une certaine gamme d'énergie (cinétique) réagissent avec l'azote pour former du radiocarbone, selon l'équation bilan :



Cette réaction est privilégiée du fait que l'azote constitue 78,11 % de l'atmosphère de la Terre.



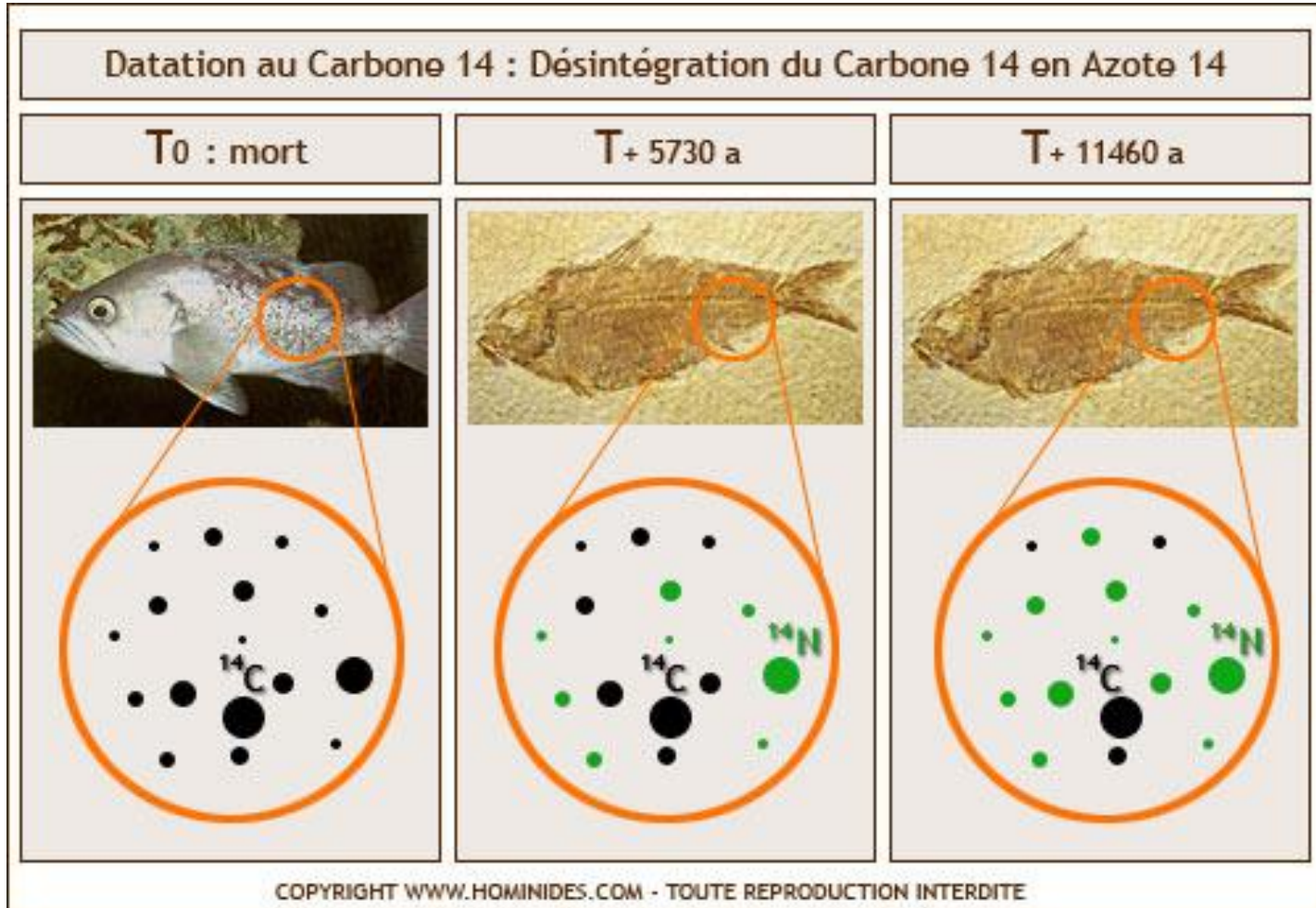
# Désintégration du carbone 14



Tout au long de sa vie, un organisme va emmagasiner du Carbone 14 présent dans l'atmosphère. Après sa mort, le C14 va décroître progressivement.

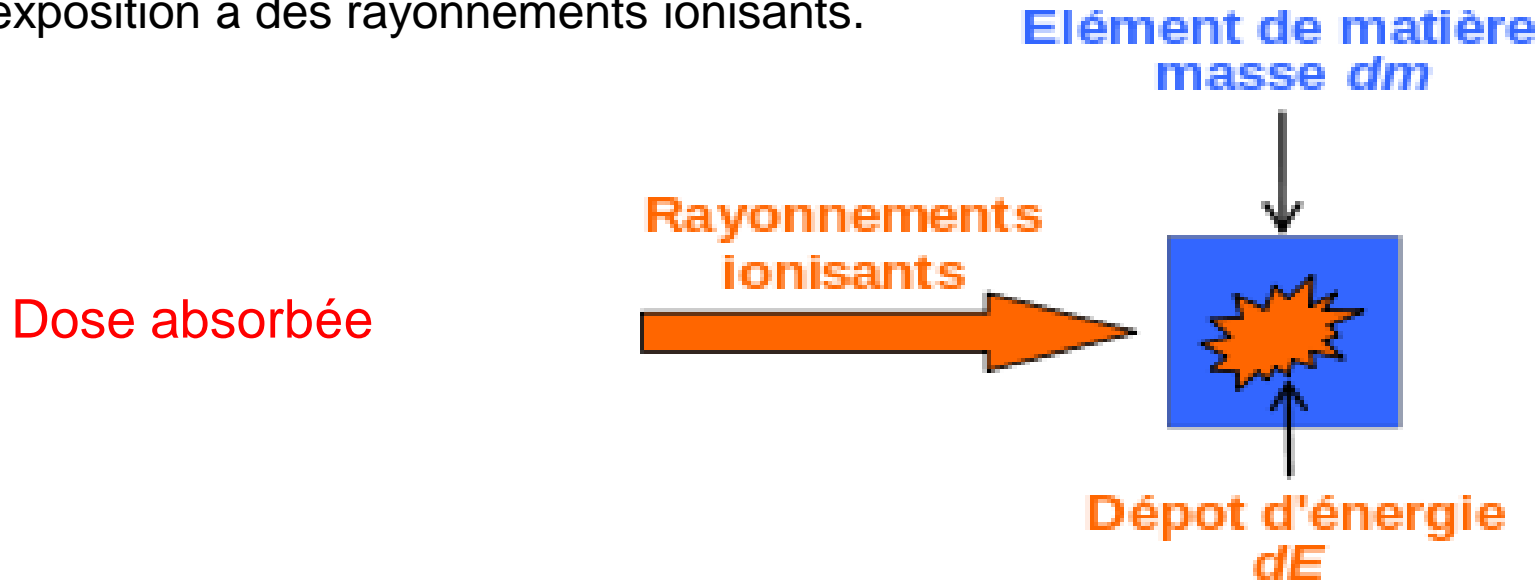
**Lors de sa désintégration le C14 se transforme en Azote 14 (N14).**

En presque **5 734 ans** la moitié des atomes de C14 aura disparu (demi-vie du C14), remplacés par des atomes de N14. Plus on avance dans le temps, plus la quantité de **Carbone 14** est faible et devient de moins en moins mesurable.



# Dosimétrie

La dosimétrie est la détermination quantitative de la dose absorbée par un organisme ou un objet, c'est-à-dire l'énergie reçue par unité de masse, suite à l'exposition à des rayonnements ionisants.



La dose en un point est le quotient du dépôt d'énergie  $dE$  dans un petit élément de matière par la masse  $dm$  de ce petit élément de matière.

La dose absorbée est un concept fondamental pour la mesure des effets des rayonnements ionisants. Elle est utilisée dans tous les domaines où interviennent ces rayonnements (rayons X et radioactivité), notamment :

**Physique nucléaire,**

**Industrie nucléaire,**

**Radiothérapie : Radioprotection.**

**Imagerie médicale : Radiologie, médecine nucléaire, radiopharmacie...**

## Exemple : Datation géologique.

1. Il existe trois types de désintégrations radioactives :  $\alpha$ ,  $\beta^+$ ,  $\beta^-$  ; quelle est la nature des particules émises dans chacune de ces désintégrations ?
2. Le potassium  ${}_{19}^{40}\text{K}$  est radioactif et se désintègre en donnant l'argon  ${}_{18}^{40}\text{Ar}$ .
  - 2.1. Ecrire l'équation de désintégration. Rappeler les règles utilisées.
  - 2.2. De quel type de désintégration s'agit-il ?
  - 2.3. Définir la demi-vie radioactive, notée  $t_{1/2}$  .
  - 2.4. La demi-vie du potassium 40 est  $t_{1/2} = 1.3 \cdot 10^9$  ans. En déduire la valeur de sa constante radioactive  $\lambda$ .

Dans certaines roches volcaniques, on décèle la présence de potassium  ${}_{19}^{40}\text{K}$  radioactif. Lors d'une éruption volcanique, tout l'argon produit s'évapore sous l'effet de la température et de la pression : on dit que la lave se dégaze. A cette date, considérée comme instant initial  $t=0$ , la lave volcanique solidifiée ne contient pas d'argon. Plus tard, à l'instant  $t$ , on effectue un prélèvement de roche sur le site d'un ancien volcan. Un spectrographe détermine la composition massique de ce prélèvement, qui contient, entre autres :  $m_{\text{K}} = 1.57$  mg de  ${}_{19}^{40}\text{K}$  et  $m_{\text{Ar}} = 82.0$   $\mu\text{g}$  de  ${}_{18}^{40}\text{Ar}$ .

3. Déterminer le nombre d'atomes de potassium 40 ( $N_{\text{K}}$ ) et le nombre d'atomes d'argon ( $N_{\text{Ar}}$ ) à la date du prélèvement.
4. On note  $N_0$  le nombre d'atomes de potassium 40 contenus à l'instant initial  $t = 0$  (lors du dégazage) dans la roche prélevée à l'instant  $t$ . Justifier la relation  $N_0 = N_{\text{K}} + N_{\text{Ar}}$ .
5. Exprimer le nombre d'atomes  $N_{\text{K}}(t)$  de potassium 40 en fonction de  $t$ ,  $N_0$  et  $\lambda$ .
6. Déterminer la date approximative de l'éruption.

**Données :** on suppose que  $M(\text{K}) \approx M(\text{Ar}) = 40.0$  g.mol<sup>-1</sup> ;  $N_{\text{A}} = 6.02 \cdot 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>.



# Références

<http://scphysiques2010.voila.net/1sph04.htm>.

Pr A. El Bouadili, cours d'atomistique, BCG.

[http://guy.vielh.free.fr/fiches/principes/couche\\_m.htm](http://guy.vielh.free.fr/fiches/principes/couche_m.htm).

<http://www.astrosurf.com/adaes/expo-energie-et-lumiere-3.html>

[http://www.aclg.ulg.ac.be/Create/ConfigurationElectronique\\_CG/page\\_05.htm](http://www.aclg.ulg.ac.be/Create/ConfigurationElectronique_CG/page_05.htm)

<http://www4.ac-nancy-metz.fr/physique/CHIM/Jumber/ATOMISTIQUE/atomistique.htm>

<https://nuxeo.u-bordeaux1.fr/nuxeo/site/esupversions/d6d00088-fa6f-4175-b758-7dedf934baab/content/access.htm>

<http://e.m.c.2.free.fr/niveaux-energie-hydrogene-emission-absorption.htm>

<http://guy.chaumeton.pagesperso-orange.fr/tstp05phc.htm>

<http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/dico/d/physique-fission-nucleaire-2462>

<http://bv.alloprof.qc.ca/science-et-technologie/l%27univers-materiel/les-transformations-nucleaires/les-types-de-transformations-nucleaires-fission-et-fusion-nucleaires.aspx>

<http://freephysique.free.fr/cours%2021.html>

<http://guy.chaumeton.pagesperso-orange.fr/tstp05phc.htm>

<http://molaire1.perso.sfr.fr/radioactiv.html>

<http://www.fondation-lamap.org/fr/page/11171/la-radioactivite>

<http://mutations-radioactivite.e-monsite.com/pages/i-radioactivite-effets/3-les-differents-types-de-radioactivite.html>

<https://nuxeo.u-bordeaux1.fr/nuxeo/site/esupversions/8918abf2-73fb-4d73-a2e4-fa684d48dc98/content/access.htm>

<http://www.meteolafleche.com/Physiquecorpusculaire/stabilitedunoyau/radioactivite.html>

Catherine.nauraye Institut Curie, Centre de Protonthérapie d'Orsay, Bases physiques de l'utilisation médicale des rayonnements ionisants

<http://chemphys.ustrasbg.fr/mpb>

CHAPITRE 4 : NOYAUX RADIOACTIFS

Chapitre 5 : Noyaux, masse et énergie

CHAPITRE 4 DÉCROISSANCE RADIOACTIVE

physique nucléaire, LCD-Physique, avril-mai 2011

Chapitre 6, radioactivité et ses effets.

[http://www.laradioactivite.com/fr/site/pages/Radioactivite\\_Gamma.htm](http://www.laradioactivite.com/fr/site/pages/Radioactivite_Gamma.htm).

<http://old.iupac.org/didac/Didac%20Fr/Didac03/Content/M05.htm>

[http://nte-serveur.univ-lyon1.fr/geosciences/geodyn\\_ext/Cours/CoursTT2ocean.htm](http://nte-serveur.univ-lyon1.fr/geosciences/geodyn_ext/Cours/CoursTT2ocean.htm)

<http://datationcarbone14.free.fr/cycle.htm>.

# Exemples

**A-** Un objet ancien en bois, contenant 240g de carbone, a une activité égale à **5Bq**.

- Déterminer l'âge de cet objet sachant que le rapport isotopique  $\frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}} = 1,3 \cdot 10^{-12}$ .

La période du  ${}^{14}\text{C}$  est 5730 ans et l'abondance isotopique du  ${}^{12}\text{C}$  est 98,89%.

**B-** Un médecin utilise une source de cobalt radioactif pour traiter certains malades. Le cobalt a une masse atomique de 60 et une période de 5 ans. La masse de la source est de 6 mg et seulement 1% des atomes de la source sont radioactifs.

1- Combien d'atomes radioactifs y a-t-il dans la source?

2- Quelle est l'activité de cette source?

3- Lorsque l'activité de cette source n'est plus que 1/16 de sa valeur initiale, elle devient trop faible pour l'utilisation médicale. Pendant combien de temps le médecin peut-il utiliser sa source de cobalt?

Dans le  $\text{CO}_2$  présent dans l'air, le rapport  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  est constant. Cette constance provient du fait que la quantité de  $^{14}\text{C}$ , générée dans l'atmosphère par la réaction va de pair avec la quantité qui disparaît par désintégration.

L'activité du carbone dans un être vivant représente **0.007  $\mu\text{Ci}$  par kg**. Lorsqu'un être vivant décède, l'absorption de carbone s'arrête et la quantité de  $^{14}\text{C}$  radioactif diminue si bien que le rapport  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ , partant l'activité du carbone diminue.

Après environ 5750 années (demi-vie), la moitié du  $^{14}\text{C}$  présent a disparu par rayonnement.

En mesurant l'activité et en analysant la quantité du carbone, on peut déterminer de manière relativement précise, l'âge d'un fossile ou d'un autre objet.

On détermine l'âge des matières jusqu'à 45.000 ans à l'aide d'une datation au  $^{14}\text{C}$ , mais les plus grandes précisions ont été obtenues dans le cas d'âges allant jusqu'à environ 50 000 ans.

**Nouveau** : en 2010, une nouvelle méthode de datation a été mise au point. Sur le même principe que la méthode au Carbone 14 elle évite cependant de prélever des échantillons du fossile. Cette [nouvelle méthode de datation non destructrice va permettre de dater des éléments pour lesquels il était impensable de prélever un élément.](#)

### **Potassium-Argon (K-Ar) :**

Cette méthode mesure la concentration des isotopes Argon 40 et Potassium 40. Elle est principalement utilisée pour dater des dépôts de roches magmatiques (notamment les cendres volcaniques retrouvées sur certains sites de fouille) et permet une datation **d'un million à plusieurs centaines de millions d'années.**

### **Rubidium-Strontium $^{87}\text{Rb}$ - $^{87}\text{Sr}$ :**

Ici encore le principe est identique : c'est le Rubidium 87 qui se désintègre en formant du Strontium 87. En 48,8 milliards d'années la moitié des atomes de Rubidium sera désintégrée, remplacée par des atomes de Strontium. Cette méthode nécessite également de réaliser des mesures sur des roches de la même origine (soit magmatique, soit des minéraux d'une même roche). La méthode permet de réaliser des mesures de roches **jusqu'à quelques milliards d'années.**