

# Radioactivité : le noyau



## I. Composition des nuclides

Le noyau est constitué de  $A = Z + N$  nucléons, répartis en  $Z$  protons et  $N$  neutrons

- ❖  **$Z$  = nombre de protons = nombre de charges = nombre d'électrons = numéro atomique**  
Il est à l'origine de la classification de Mendeleïv, dans laquelle  $Z$  est caractéristique de l'élément chimique.  
Le proton est une particule **stable** à l'état libre.
- ❖  **$N = A - Z$  = nombre de neutrons**  
Le neutron est une particule **instable** hors du noyau et se transforme alors spontanément selon la réaction suivante :  ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e + \bar{\nu}$

Les nucléons sont eux-mêmes constitués de particules élémentaires

- ❖ **Les quarks** : on a des quarks **up** avec une charge de  $+\frac{2}{3}$  et des quarks **down** avec une charge de  $-\frac{1}{3}$   
Un neutron est composé de 2 quarks down et 1 quark up (udd)  
Un proton est composé de 2 quarks up et 1 quark down (uud)
- ❖ **Les leptons** : électrons, neutrinos, antineutrinos

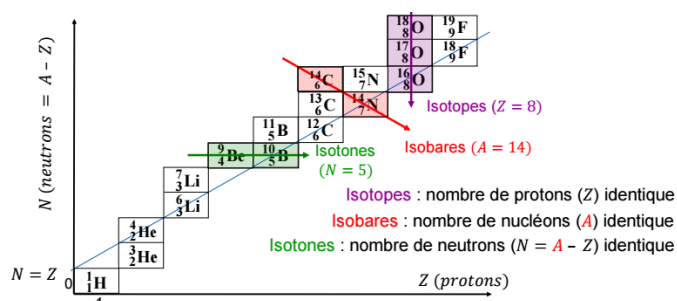
NB : Il existe une dernière catégorie : les **bosons**, qui sont des particules d'interactions

## II. Classification des nuclides

- ❖ On a une classification « chimique » avec le **tableau périodique des éléments**, dite classification de Mendeleïv. On classe les éléments dans ce tableau grâce au **numéro atomique  $Z$** .

Tableau périodique des éléments

- ❖ On utilise également la **table des nuclides** qui est une classification « physique »



Les isotopes	Même nombre de Protons $Z$ donc même élément chimique. Ils sont dans une même <b>colonne</b> .
Les isobares	Même nombre de nucléons $A$ . Ils sont dans une même <b>diagonale</b> .
Les isotones	Même nombre de Neutrons $N$ . Ils sont dans une même <b>ligne</b> .
Les isomères	Même $Z$ et même $A$ mais niveau d'énergie interne différent.

Notion d'abondance isotopique : C'est la proportion de chacun des isotopes d'un noyau dans un milieu naturel.

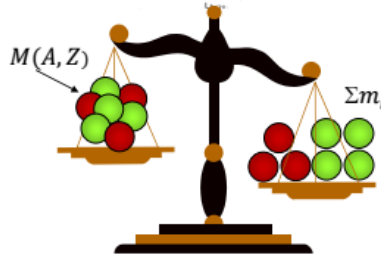
exemple du carbone :  $^{12}_6\text{C}$  (99% avec  $N=6$ ),  $^{13}_6\text{C}$  (1% avec  $N=7$ ) et  $^{14}_6\text{C}$  (traces, avec  $N=8$ )

	$^{14}_6\text{C}$	$^{15}_7\text{N}$
	$^{13}_6\text{C}$	$^{14}_7\text{N}$
$^{11}_5\text{B}$	$^{12}_6\text{C}$	
$^{10}_5\text{B}$		

Z

### III. Défaut de masse et énergie de liaison

La masse d'un noyau constitué est **inférieure** à la somme des masses de ses constituants :  $M(A, Z) < \sum m_i$



- Il y a donc une perte de masse qui est convertie en énergie, appelée le **défaut de masse**  $\Delta M(A, Z)$  qui est égal à la différence entre la somme de toutes les masses des constituants du noyau et la masse du noyau :  

$$\Delta M(A, Z) = \sum m_i - M(A, Z)$$

nb : par convention on note la masse d'un noyau  $M(A, Z)$  ; la masse d'un atome  $\mathcal{M}(A, Z)$  ; le défaut de masse  $\Delta M(A, Z)$

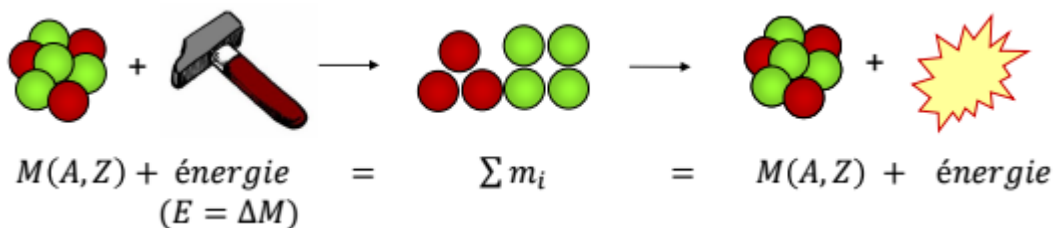
- Le défaut de masse équivaut à une **énergie** : **l'énergie de liaison des nucléons**  

$$E_L [\text{MeV}] = 931,5 \times \Delta M [\text{u}]$$

Remarque : l'énergie de liaison des électrons ( $\neq$  énergie de liaison des nucléons  $E_L$ ) est négligeable par rapport à celle des nucléons. Ainsi le défaut de masse de l'atome équivaut au défaut de masse du noyau.

L'énergie de liaison des nucléons est de l'ordre du MeV, celle des électrons du keV et celle des atomes de l'eV.

- Cette énergie de liaison des nucléons est celle qui les lie entre eux dans le noyau, autrement dit c'est l'énergie qu'il faut apporter si on veut fragmenter un noyau en ses nucléons élémentaires.



Au contraire si on veut réunir des nucléons pour en faire un noyau, le noyau résultant aura une masse plus faible et de l'énergie sera libérée.

Exemple : Calculer l'énergie de liaison du noyau d'Oxygène  $^{16}_8\text{O}$

Données :

$$M(16,8) = 15,99491\text{u}$$

$$M_p = 1,00728\text{u}$$

$$M_n = 1,00866\text{u}$$

$$M_e = 0,00055\text{u}$$

On calcule d'abord le défaut de masse  $\Delta M$  :

$$\Delta M = 8m_e + 8m_p + 8m_n - M(16,8)$$

$$\Delta M = 0,0044 + 8,05824 + 8,06928 - 15,99491 = 0,137\text{u}$$

Puis on calcule l'équivalent du défaut de masse en énergie de liaison

$$E_L = 0,137 \times 931,5 = 127,6\text{MeV}$$

Deuxième méthode : on utilise l'atome d'hydrogène

On calcule d'abord le défaut de masse  $\Delta M$  :

$$\Delta M = 8m_H + 8m_n - M(16,8)$$

$$\Delta M = 8,06264 + 8,06928 - 15,99491 = 0,137u$$

Données :

$$M(16,8) = 15,99491u$$

$$m_H = 1,00783 u$$

$$m_n = 1,00866u$$

Puis on calcule l'équivalent du défaut de masse en énergie de liaison

$$E_L = 0,137 \times 931,5 = 127,6\text{MeV}$$

Troisième méthode : on utilise directement les équivalents énergétiques en MeV/c<sup>2</sup>

Données :

$$M(16,8) = 15,99491u$$

$$m_p = 1,00728u$$

$$m_n = 1,00866u$$

$$m_e = 0,00055u$$

$$E_L = 8 \times 931,5 \times m_p + 8 \times 931,5 \times m_n + 8 \times 931,5 \times m_e - 931,5 \times M(16,8))$$

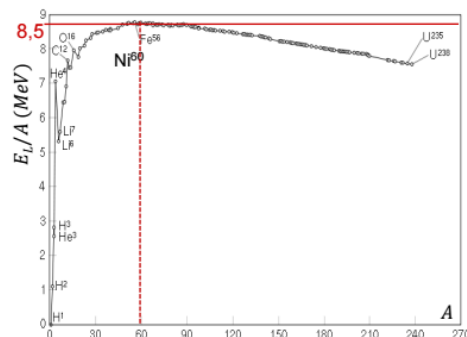
$$= 8 \times 938,28 + 8 \times 939,56 + 8 \times 0,511 - 15,99491 \times 931,5$$

$$= 127,6 \text{ MeV}$$

## IV. Facteurs de stabilité nucléaire

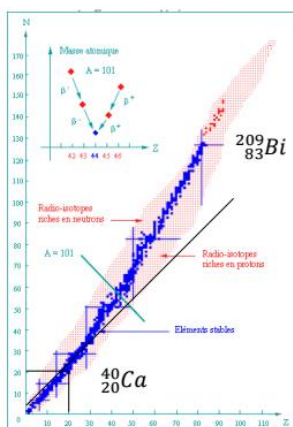
### 1- L'énergie de liaison par nucléons

Plus l'**énergie de liaison par nucléons** ( $E_L/A$ ) est **importante** plus le noyau est **stable**. Le but pour être le plus stable possible est d'avoir une **masse minimale** avec une **énergie de liaison maximale**.



- $E_L/A$  augmente jusqu'à son maximum (8,5MeV) puis diminue pour les noyaux les plus lourds ( $A > 120$ )
- Le Fer et le Nickel sont les éléments les plus stables
- On observe des maxima pour certains noyaux légers à combinaison stable (nombres magiques)

### 2-Le nombre de neutrons (A-Z)



La répartition protons/neutrons intervient dans la **stabilité** du noyau.

- Pour les noyaux légers, jusqu'au  $^{40}_{20}\text{Ca}$  on a  **$Z=N$** . Ils sont situés sur la première bissectrice qu'on appelle la **vallée de stabilité**.
- Pour les noyaux lourds,  **$N > Z$**  car il faut plus de neutrons pour diminuer la répulsion des charges due aux protons : les neutrons stabilisent le noyau. On s'éloigne de la première bissectrice.

### 3-Parité du nombre de nucléons

La **parité** est un facteur de **stabilité** car les nucléons ont un spin de  $\pm \frac{1}{2}$  donc ils ont tendance à se regrouper par paire avec un nucléon de signe opposé pour donner un système plus stable.

## V. Forces nucléaires

- ❖ Responsables de la cohésion, de la stabilité du noyau
- ❖ Leurs intensités correspondent à l'énergie moyenne de liaison du noyau
- ❖ Elles sont liées aux interactions des nucléons entre eux

### 1- La force électrostatique

- De type coulombien
- Concerne **uniquement les protons** dans le noyau
- Elle est **répulsive** : s'oppose à la cohésion
- Elle permet d'expliquer l'**excès de neutrons** dans les noyaux lourds : les neutrons s'interposent entre les protons pour diminuer cette force de répulsion

### 2- Les forces nucléaires spécifiques

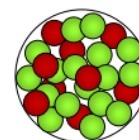
- De 2 types
- S'exercent à des distances **très faibles** ( $10^{-15}\text{m}$ )
- Existents uniquement au niveau du noyau

<u>Interaction faible</u>	<u>Interaction forte</u>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Répulsive</b></li> <li>- Explique les transformations isobariques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Attractive</b></li> <li>- 100 à 1000 fois &gt; à la force électrostatique</li> <li>- <b>Répulsive à très courte distance</b>, ce qui permet l'incompressibilité des nucléons</li> <li>- Correspond à la mise en commun de particules d'interactions entre les quarks : les gluons</li> </ul>

## VI. Modèles nucléaires

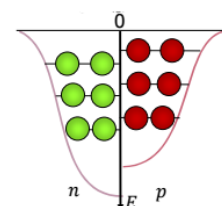
### 1-Modèle de la goutte sphérique

- Le noyau est une sphère contenant les nucléons liés entre eux par l'interaction forte
- Densité homogène des charges
- Explique l'**incompressibilité** du noyau
- Ne permet pas de comprendre les nombres magiques



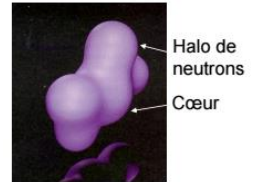
### 2-Le modèle en couche

- Explique la stabilité particulière des noyaux à nombres magiques : les couches pleines permettent une meilleure stabilité
- Explique l'existence du niveau fondamental et des niveaux excités



### 3-Le modèle mixte

- Représente le noyau avec un cœur et un halo de neutrons à la périphérie
- Explique la stabilité particulière de certains noyaux lourds riches en neutrons



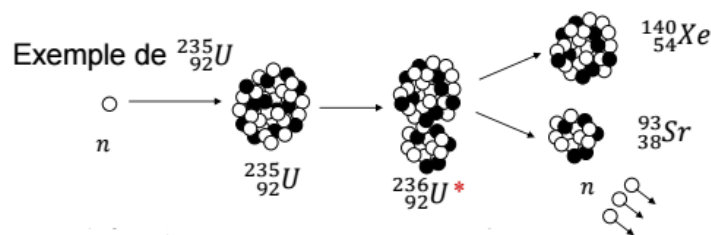
## VII. Fission et fusion nucléaires

### 1- La fission nucléaire

Si on prend un très gros noyau que l'on coupe en 2 noyaux plus petits, la masse de ces 2 noyaux formés sera **inférieure** à celle du noyau d'origine. On aura un **défaut de masse**, donc potentiellement une **libération d'énergie**.

Exemple : fission de l'uranium

On envoie un neutron lent qui va percuter un gros noyau (uranium). Le noyau devient alors **instable** et se sépare en **2 noyaux plus petits**. La réaction libère aussi 3 neutrons.



Calcul de l'énergie libérée :

Données :

$$\mathcal{M}(235,92) = 235,04\text{u}$$

$$\mathcal{M}(140,54) = 139,92\text{u}$$

$$\mathcal{M}(93,38) = 92,91\text{u}$$

$$m_n = 1,00866\text{u}$$

On calcule d'abord le défaut de masse  $\Delta M$  :

$$\Delta M = \mathcal{M}(235,92) + m_n - [\mathcal{M}(140,54) + \mathcal{M}(93,38) + 3 m_n]$$

$$\Delta M = 0,1927\text{u}$$

Puis on calcule l'équivalent du défaut de masse en énergie de liaison :

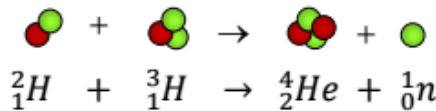
$$E_L = 0,1927 \times 931,5 = 176 \text{ MeV}$$

### 2- La fusion nucléaire

En **regroupant 2 petits noyaux** en un **noyau plus gros** ayant une  $E_L/A$  plus forte, on va aussi **produire de l'énergie**.

Exemple : fusion de 2 isotopes de l'hydrogène

Le deutérium  $^2_1\text{H}$  et le tritium  $^3_1\text{H}$  fusionnent pour donner un noyau d'Helium  $^4_2\text{He}$ , beaucoup plus stable, et un neutron.



Calcul de l'énergie libérée :

Données :

$$\mathcal{M}(2,1) = 2,014102\text{u}$$

$$\mathcal{M}(3,1) = 3,016049\text{u}$$

$$\mathcal{M}(4,2) = 4,002603\text{u}$$

$$m_n = 1,00866\text{u}$$

On calcule d'abord le défaut de masse  $\Delta M$  :

$$\Delta M = \mathcal{M}(2,1) + \mathcal{M}(3,1) - [\mathcal{M}(4,2) + 1 m_n]$$

$$\Delta M = 0,018888\text{u}$$

Puis on calcule l'équivalent du défaut de masse en énergie de liaison :

$$E_L = 0,018888\text{u} \times 931,5 = 17,6 \text{ MeV}$$