

BIOPHYSIQUE DES RADIATIONS

Tut' rentrée – Cours 2a - La Noyau

Le noyau

Introduction

- La matière est constituée d'atomes
- L'atome est constitué d'un noyau et d'électrons qui gravitent autour de celui-ci
- Ce noyau est constitué de Z protons chargés positivement et de N neutrons non chargés.
- L'ensemble Protons + Neutrons forme les Nucléons.

$\begin{matrix} A \\ Z \\ X \end{matrix}$	A	Nombre de masse / nombre de nucléons
	Z	Numéro atomique / nombre de protons

- Lorsque l'atome est non ionisé, son nombre de protons est égal au nombre de ses électrons.

Classification des nuclides.

Chimique

TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

La masse atomique relative est donnée avec cinq chiffres significatifs. Pour les éléments qui n'ont pas de nucléides stables, la valeur entre parenthèses indique le nombre de masse du nucléide de l'élément ayant la durée de vie la plus grande.

Toutefois, pour les trois éléments Th, Pa et U qui ont une composition isotopique terrestre connue, une masse atomique est indiquée.

C'est grâce au n° atomique Z que sont classés chimiquement les éléments dans le tableau périodique de Mendeleïev.

♥ Moyens Mnémotechnique ♥

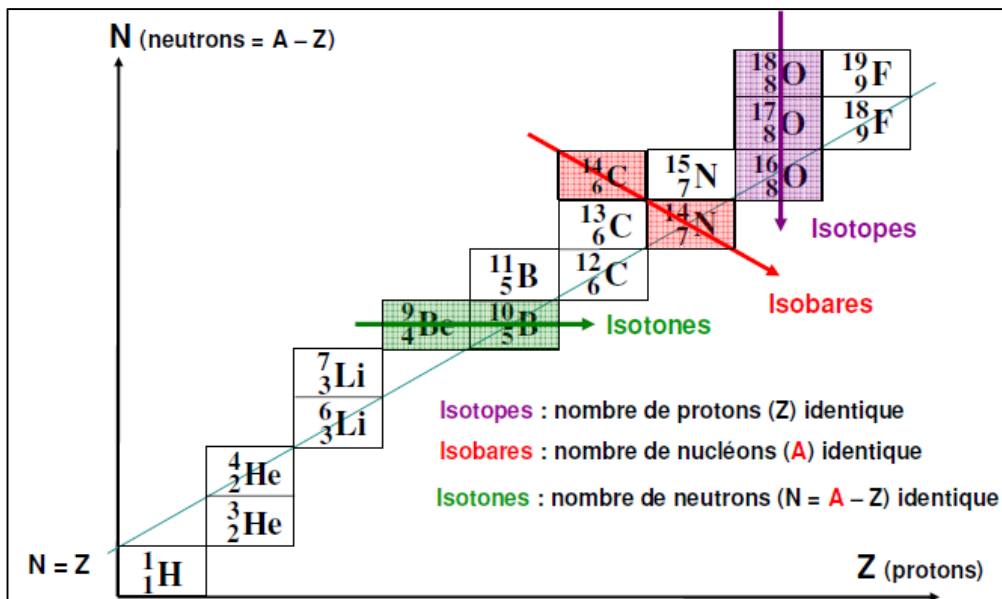
2eme ligne : **L**ili **b**esa bien chez **n**otre **f**lorentin **N**estor

3eme ligne : **N**apoléon **m**angea **a**llègrement **s**ix **p**oulets **s**ans **c**laquer d'**a**rgent.

Gaz rares : **H**ector **n**égligea d'**a**rracher le **k**orsage de **X**ena puis **r**entra

Halogènes : **F**lorentin **c**laqua **b**rutalemtent **I**rène **à** terre

Physique : La table des nuclides



En abscisse : le nombre de protons
En ordonnée : le nombre de neutrons.

On peut ainsi remarquer qu'il existe différentes sortes d'un même élément, ce sont des isotopes d'un même élément.

Les isotop <u>e</u> s	Ce sont les mêmes éléments, <u>avec le même nombre de protons Z</u> , mais avec un nombre de neutrons N différents.
Les isob <u>a</u> res	Ce sont deux éléments distincts, avec un nombre de protons Z différents, mais <u>un même nombre de nucléons A</u> .
Les isotop <u>e</u> s	Ce sont deux éléments distincts, soit avec 2 nombres de protons différents, mais qui ont <u>le même nombre de neutrons N</u> .
Les isomères	Ce sont <u>deux noyaux avec Z, A et N identiques</u> . Mais l'un des deux a un excédent d'énergie nucléaire = un <u>niveau d'énergie interne différent</u> ! Ce qui le rend instable. Pour le distinguer on rajoute un « m » comme métastable à côté du symbole de l'élément. Le surplus d'énergie sera libéré en un rayon Gamma.

Composition des nucléides

Les nucléons.

Il existe deux sortes de **nucléons** notés **A** : Les **Protons** et les **Neutrons**.

Le proton	<p>Il est noté dans les bilans de réactions de transformations de 3 manières différentes :</p> ${}^1_1p \text{ ou } {}^1_1H \text{ ou } H^+$ <p>Le proton est une particule stable à l'état libre (hors du noyau).</p>
Le neutron	<p>Il se note 1_0n lors des réactions nucléaires</p> <p>A l'intérieur du noyau, le neutron est stable mais à l'extérieur du noyau, le neutron est instable, suivant la réaction ci-dessous :</p> ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e + \bar{\nu} + 0,78MeV$ <p>$\bar{\nu}$ est un antineutrino, particule électriquement neutre produite dans la désintégration β^- nucléaire.</p>

POINT CULTURE G

La période du neutron $T_{1/2} = 12\text{min}$ est très intéressante puisque lorsqu'on effectue une réaction de **fusion** nucléaire, le seul déchet est le neutron \rightarrow période courte \rightarrow élimination très rapide \rightarrow pas de déchets. A contrario, la réaction de fission nucléaire aboutit à de nombreux déchets radioactifs.

Les Particules élémentaires

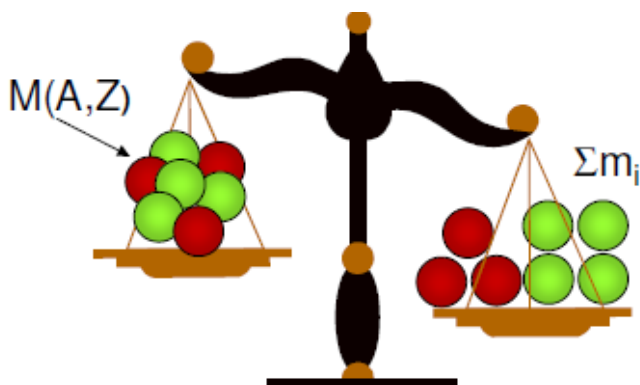
Ce sont de très petites particules qui regroupées, forment les protons et neutrons.

On en distingue 2 types :

- * **Les leptons** : famille qui comprend les électrons, les neutrinos, les antineutrinos ...
- * **Les quarks** : particules les plus petites connues à ce jour. Ils sont de 2 types :
 - \hookrightarrow Les Quarks UP : + 2/3 de la charge élémentaire
 - \hookrightarrow Les Quarks DOWN : -1/3 de la charge élémentaire

On comprend donc bien qu'un proton est formé de 2 Quarks UP et 1 Quark DOWN : $2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$ et qu'un neutron est formé de 1 Quark UP et 2 Quarks DOWN : $2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$

Défaut de masse et énergie de liaison (+++)



La masse d'un noyau constitué est inférieure à la somme des masses de ses constituants :

$$M(A,Z) < \sum m_i$$

Le **défaut de masse** $\Delta M(A, Z)$ est donc égal à la différence entre toutes les masses des constituants et la masse du noyau c'est-à-dire :

$$\sum m_i - M(A,Z) = \Delta M(A,Z) \text{ « défaut de masse »}$$

Ce Défaut de masse peut aussi avoir une équivalence énergétique d'après l'équation $E=mc^2$

Cette énergie équivaut à **l'énergie de liaison des nucléons** noté E_l telle que :

$$\heartsuit E_l [\text{MeV}] = 931.5 \times \Delta M [\text{u}] \heartsuit$$

$$\text{Puisque } 1\text{u} = 931.5 \text{ MeV}$$

De plus, si l'on apporte à un noyau une énergie équivalente à l'énergie de liaison de ses nucléons, on peut le briser en ses différentes particules élémentaires.

Ceci fonctionne également dans le cas d'un atome.

☞ L'énergie de liaison des électrons étant négligeable devant celle des nucléons, le défaut de masse de l'atome équivaut au défaut de masse de son noyau !

Exemple

Calculez L'énergie de liaison du noyau d'Oxygène $^{16}_8\text{O}$

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

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

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

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

On calcule d'abord le défaut de masse ΔM :

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

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

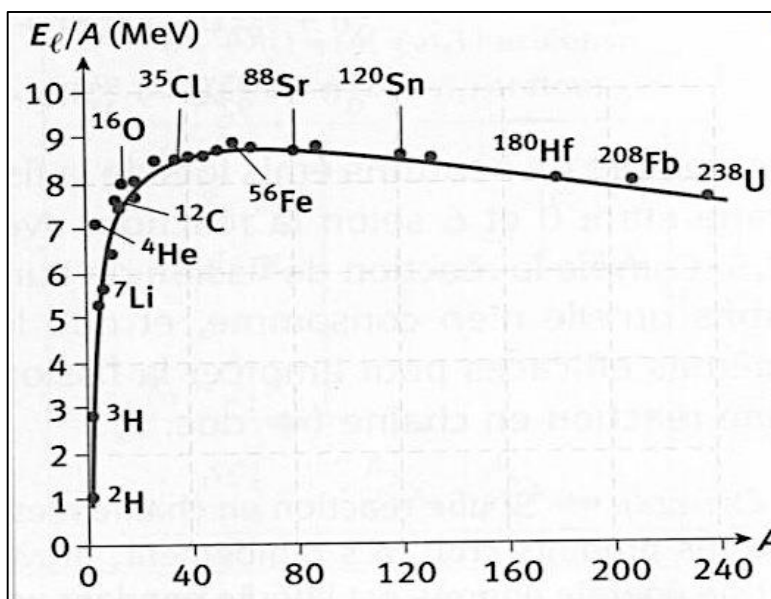
Puis on calcule l'équivalent du défaut de masse en énergie de liaison

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

Pour résumer : L'énergie de liaison des nucléons d'un noyau est l'énergie qu'il faut fournir pour le dissocier.

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

Courbe de stabilité nucléaire



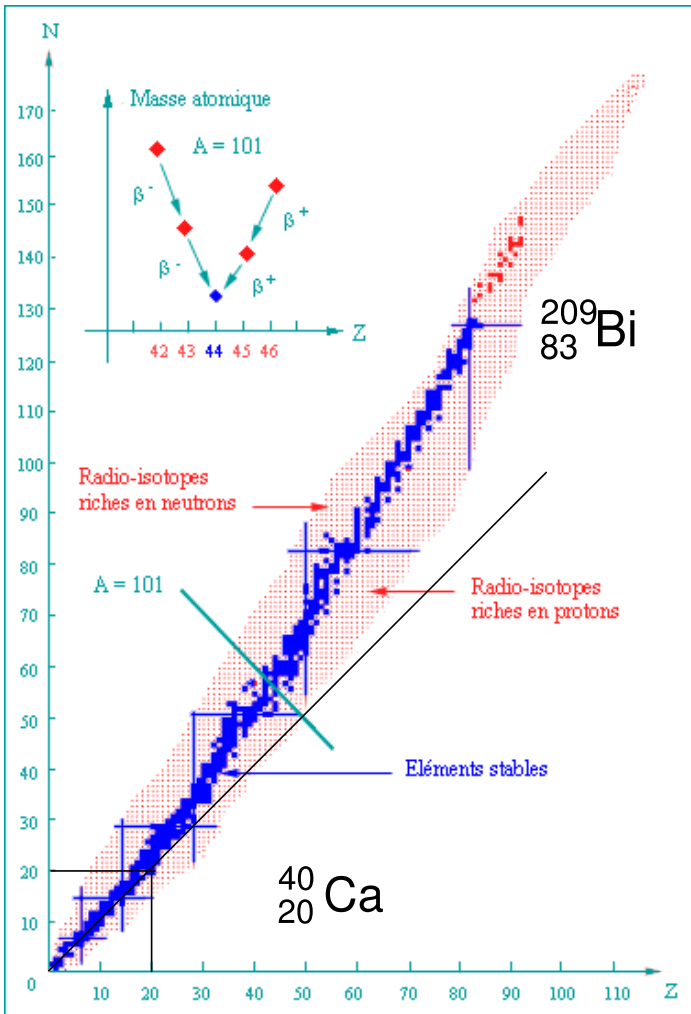
En abscisse : le nombre de nucléons

En ordonnée : l'énergie de liaison par nucléon (E_l/A)

Il existe un seuil maximum d'environ **8.5 MeV/nucléons**, où l'on retrouve les éléments les plus stables : le nickel et le fer (qui sont les deux constituants du noyau terrestre.)

Plus E_l/A est élevée, plus les nucléons sont unis entre eux, plus le noyau est stable.

Les facteurs de stabilité nucléaire



La vallée de stabilité correspond aux noyaux les plus stables, les transformations radioactives permettent de se rapprocher de cette vallée.

Pour les noyaux légers ($Z \leq 20$) :

$$Z = N$$

Pour les noyaux lourds ($Z > 20$) : plus de neutrons sont nécessaires pour assurer la stabilité, en effet les protons exercent des forces répulsives entre eux.

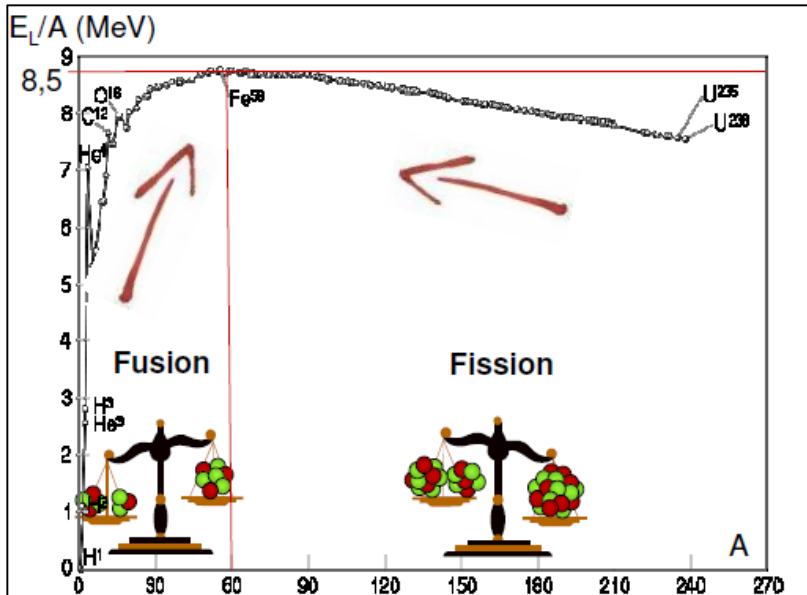
$$N > Z$$

Les forces nucléaires

Les forces nucléaires assurent la cohésion du noyau et donc sa stabilité. Leurs intensités sont déterminées par l'énergie moyenne de liaison du noyau. Elles résultent des interactions entre les nucléons :

Forces électrostatiques (coulombienne)	Ce sont des forces répulsives concernant les protons et qui explique <u>l'excès de neutron</u> à l'intérieur des noyaux lourds. Elle est inversement proportionnelle au carré de la distance r séparant les charges ($1/r^2$).
Forces spécifiques du noyau	<ul style="list-style-type: none"> * Interaction faible force répulsive \Rightarrow explique les transformations radioactives * Interaction forte (agit à très petite échelle) force attractive (mais répulsive à très courte distance, assurant l'incompressibilité du noyau) qui assure la cohésion du noyau grâce à la mise en commun de gluons

La Fission et la Fusion

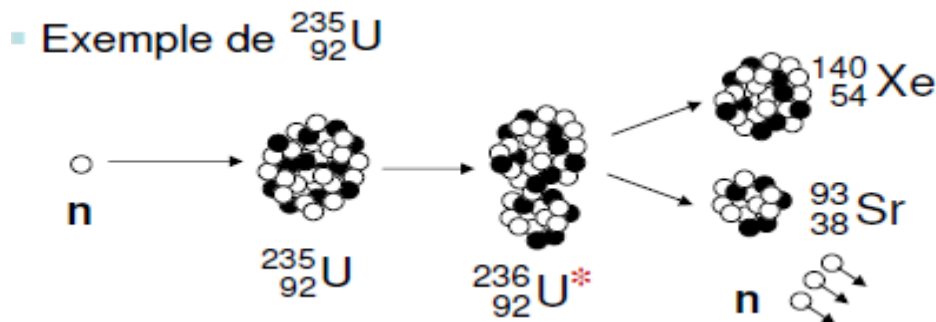


Si on se réfère à la courbe de stabilité nucléaire :

- * La fusion de 2 petits noyaux donne un noyau qui a une masse plus petite, qui est donc plus stable.
- * La fission d'un gros noyau donne 2 noyaux plus petits, plus légers, donc plus stables.

La différence d'énergie de liaison par nucléons est plus importante entre 2 petits noyaux, qu'entre deux noyaux lourds. On en déduit que **la fusion libère plus d'énergie que la fission**.

La Fission



On bombarde l'uranium d'un neutron lent, qui devient de ce fait instable. L'instabilité du noyau provoque sa **fission** en 2 noyaux plus petits et en 3 neutrons. Ces 3 neutrons libérés seront réutilisés pour fissionner à nouveau : c'est **la réaction en chaîne** qui se déroule dans un réacteur nucléaire.

Calcul de l'énergie libérée

$$\begin{array}{rclclcl}
 {}^1_0\text{n} & + & {}^{235}_{92}\text{U} & \rightarrow & {}^{140}_{54}\text{Xe} & + & {}^{93}_{38}\text{Sr} & + & 3 {}^1_0\text{n} \\
 E_{L/A} & 0 & 7,5 & & 8,2 & 8,5 & 0 & & \\
 & & \times 235 & & \times 140 & \times 93 & & & \\
 E_L(\Delta M) & 0 & 1762,5 & & 1148 & 790,5 & 0 & & \\
 \text{Total avant} & = & 1762,5 \text{ MeV} & & \text{après} & = & 1938,5 \text{ MeV} & & \\
 \Delta E_L & = & 1938,5 - 1762,5 = 176 \text{ MeV} & & & & & &
 \end{array}$$

Autre possibilité de calcul



✓ Avec les $\Delta E_{L/A}$:

$$\Delta E = 140(8,2 - 7,5) + 93(8,5 - 7,5) + 2(0 - 7,5)$$

3 n libres dont 2 libérés

$$= 98 + 93 - 15 = 176 \text{ MeV}$$

✓ Avec \mathcal{M} en u:

$$\mathcal{M}(235,92) = 235,04 \quad \mathcal{M}(140,54) = 139,92 \quad \mathcal{M}(93,38) = 92,91 \quad m_n = 1,00866$$

$$\Delta M = \mathcal{M}(235,92) + m_n - \mathcal{M}(140,54) - \mathcal{M}(93,38) - 3m_n = 176 \text{ MeV}$$

✓ Énergie en Joules libérée par 1 g d' ${}^{235}_{92}\text{U}$:

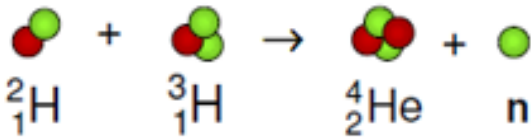
$$\left. \begin{array}{l} 176 \text{ MeV sont libérés par un noyau} = 235 \text{ u} \\ 1 \text{ u} = 1/\mathcal{N}g = 1/6,025 \cdot 10^{23} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g} \end{array} \right\} \Delta E = \frac{176}{235 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24}} \text{ MeV}$$

$$\Delta E = 4,5 \cdot 10^{23} \text{ MeV pour 1 g}$$

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \Rightarrow \Delta E = 4,5 \cdot 10^{23} \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 7,2 \cdot 10^{10} \text{ J}$$

☞ L'énergie libérée équivaut à **2 tonnes de pétrole** (pour 1g d'uranium)

La Fusion




Dans cet exemple de **fusion nucléaire**, on peut observer un processus où deux noyaux atomiques légers s'assemblent pour former un noyau plus lourd et un seul neutron.


Calcul de l'énergie libérée


	${}^2_1\text{H}$	+	${}^3_1\text{H}$	\rightarrow	${}^4_2\text{He}$	+	n	
$E_{L/A}(\text{MeV})$	1		2,8		7		0	
	x2		x3		x4			
$E_L(\Delta M)$	2		8,4		28			

Total avant = 10,4 Mev
après = 28 Mev

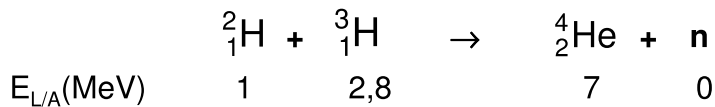
$\Delta E = 28 - 10,4 = 17,6 \text{ MeV libérés}$

${}^1_1\text{H}$


${}^2_1\text{H}$


${}^3_1\text{H}$


Autres calculs possibles...

✓ Avec les $\Delta E_{\text{L/A}}$:

$$\Delta E = 2(7 - 2,8) + 2(7 - 1) + 1(0 - 2,8) = 17,6 \text{ MeV}$$

✓ Avec \mathcal{M} en u:

$$\mathcal{M}(2,1) = 2,014102 \quad \mathcal{M}(3,1) = 3,016049 \quad \mathcal{M}(4,2) = 4,002603 \quad m_n = 1,00866$$

$$\Delta M = \mathcal{M}(2,1) + \mathcal{M}(3,1) - \mathcal{M}(4,2) - 1.m_n = 17,6 \text{ MeV}$$

✓ Énergie en Joules libérée par 1 g d' ${}^4_2\text{He}$ formé :

$$\left. \begin{array}{l} 17,6 \text{ MeV sont libérés par un noyau} = 4 \text{ u} \\ 1 \text{ u} = 1/\mathcal{N} \text{ g} = 1/6,025 \cdot 10^{23} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g} \end{array} \right\} \Delta E = \frac{17,6}{4 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24}} \text{ MeV}$$

$$\Delta E = 26,5 \cdot 10^{23} \text{ MeV pour 1 g}$$

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \Rightarrow \Delta E = 26,5 \cdot 10^{23} \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 42,4 \cdot 10^{10} \text{ J}$$

☞ L'énergie libérée équivaut à **12 tonnes de pétrole** (pour 1g d'uranium)

Suite du cours :

Les transformations radioactives