



BIOPHYSIQUE S1

PARTIE 1 : LE NOYAU

I. 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 protons Z chargés positivement et de neutrons N non chargés.
- L'ensemble Protons + Neutrons forme les Nucléons.



A = nombre de masse
Z = numéro atomique

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

II. Classification des nuclides.

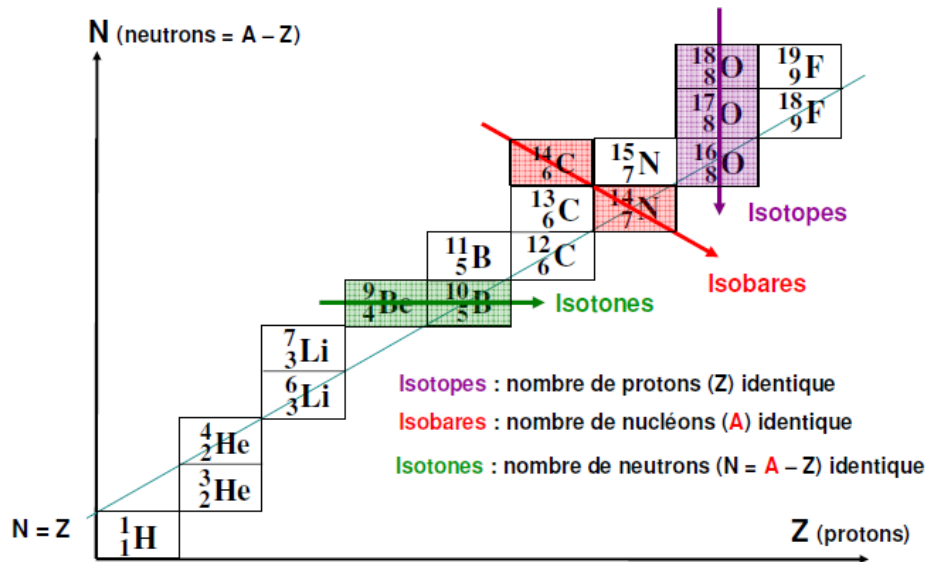
A. Chimique :

TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

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

Moyen Mémo Technique :

2eme ligne : **L**ili **b**esa **b**ien **c**hez **n**otre **o**ncl**e** **f**lorentin **N**estor
 3eme ligne : **N**apoléon **m**ang**e**a **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**rutale**m**ent **I**rène **a**terre



B. PHYSIQUE : La table des nuclides

Nous avons donc en abscisse le nombre de protons, et en ordonnée le nombre de neutrons.

Ce tableau permet de très bien distinguer 3 différentes sortes d'éléments.

On peut aussi remarquer qu'il existe différentes sortes d'un même élément.

Prenons pour exemple le carbone naturel : $^{12}_6\text{C} = 98,89\%$

$^{13}_6\text{C} = 1,11\%$

$^{14}_6\text{C}^* = \text{Traces}$

1) Les isotopes

Ce sont les mêmes éléments, avec le même nombre de protons Z , mais avec un nombre de neutrons N différents.

2) Les isobares :

Ce sont deux éléments distincts, avec un nombre de protons Z différents, mais un même nombre de nucléons A .

3) Les isotones :

Ce sont deux éléments distincts, soit avec 2 nombres de protons différents, mais qui ont le même nombre de neutrons N .

4) Les isomères :

Ce sont deux noyaux avec Z identique, A identique, N constant. Mais l'un des deux a un excédent d'énergie nucléaire,

Ce qui le rend instable. Pour le distinguer on rajoute un « m » comme métastable à côté du symbole de l'élément.

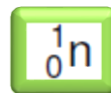
Le surplus d'énergie sera libéré en un rayon Gamma.

III. Les nucléons.

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

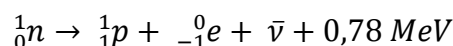
Le Proton est noté dans les bilans de réactions de transformations de 2 manières différentes : 1_1p ou H^+

Le proton peut également être stable à l'état libre hors du noyau.



Le Neutron quant à lui est noté comme ceci lors des réactions nucléaires :

A l'intérieur du noyau, le neutron est stable mais peut donner lieu, dans certaines conditions à une réaction de transformation :



Est un antineutrino, particule de charge électrique neutre produite dans la désintégration β^- nucléaire.



ATTENTION : A l'extérieur du noyau, le neutron est **TOUJOURS** instable, suivant la même réaction ci-dessus.

POINT CULTURE G

(La période du neutron $T=12\text{min}$ 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)

IV. Les Particules élémentaires.

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

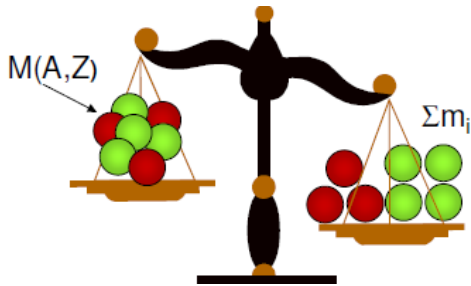
On en distingue 2 sortes :

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

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

Et qu'un neutron est formé de 1 Quark UP et 2 Quarks DOWN $\rightarrow 2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$

V. Défaut de masse et énergie de liaison ++.



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

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 : $\Sigma m_i - M(A,Z) = \Delta M(A,Z)$ « 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 et qui vaut **$E_L = 931.5 \times \Delta M$** (avec E_L en MeV et ΔM en u)

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

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.

Exemple : Calculez L'énergie de liaison du noyau d'Oxygène ${}^8_{16}\text{O}$

$$M({}^{16}_8\text{O}) = 15,99491 \text{ u}$$

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

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

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

On calcule d'abord le défaut de masse ΔM :

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

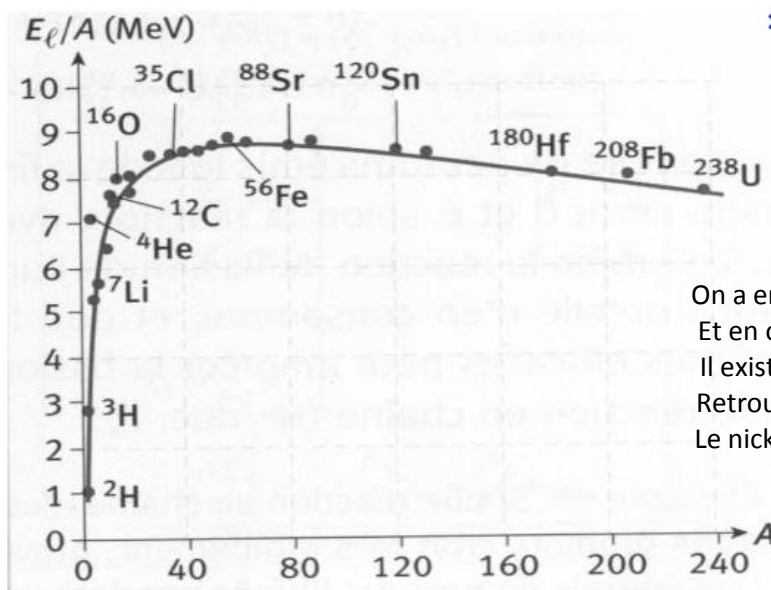
$$\Delta M = 0,0044 + 8,05824 + 8,06928 - 15,99491 = 0,137 \text{ u}$$

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 (ceci est la même chose pour l'énergie de liaison de l'atome qui est l'énergie qu'il faut fournir pour le dissocier en noyau et électrons).
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.



On a en abscisse le nombre de nucléons
Et en ordonnées l'énergie de liaison par nucléon.
Il existe un seuil maximum d'environ 8.5 MeV/nucléon, 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.

De plus, on remarque qu'au bout du seuil maximum, la courbe est décroissante. Ce qui veut dire qu'à partir du seuil, plus un noyau est gros, plus il devient instable.

VI. 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.

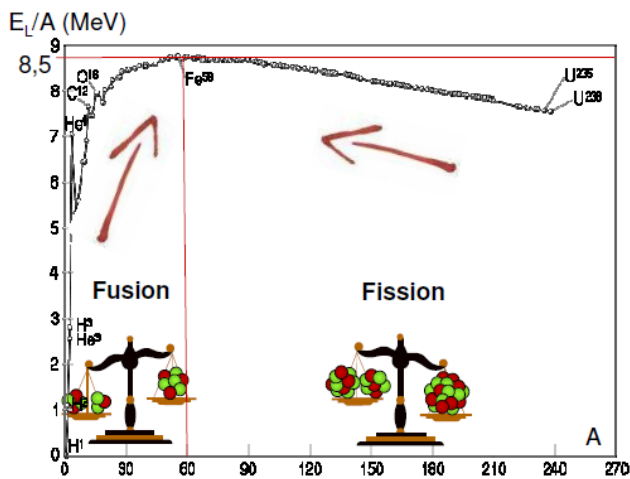
A. Forces électrostatiques (coulombienne)

Ce sont des forces répulsives concernant les protons et qui explique l'excès de neutron à l'intérieur des noyaux lourds

B. Forces spécifiques du noyau

- **Interaction faible** : force répulsive \Rightarrow explique les transformations radioactives
- **Interaction forte (agit à très petite échelle)** : force attractive (mais répulsive à très courte distance par incompressibilité) qui assure la cohésion du noyau grâce à la mise en commun de gluons

VII. La Fission et la Fusion

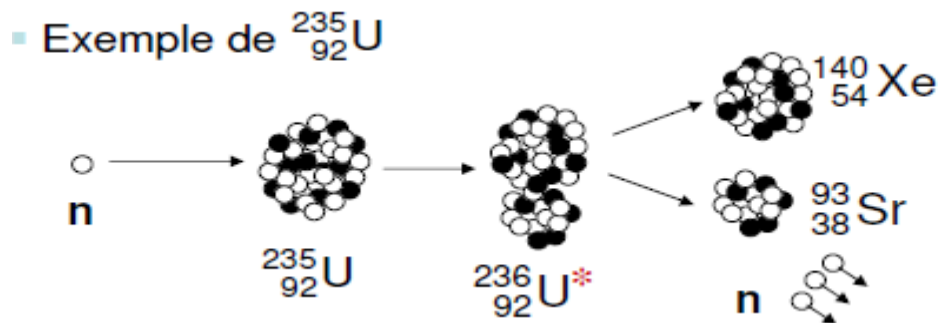


Si on se réfère à la courbe de stabilité nucléaire, la fusion de 2 petits noyaux donne un noyau qui a une masse plus petite, qui est donc plus stable

De même, si on fissionne un gros noyau, on obtient 2 noyaux plus petits, donc plus légers, donc plus stables.

De plus, 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

A. La Fission



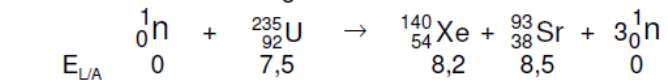
On bombarde l'uranium d'un neutron lent, qui devient de ce fait instable.

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 → réaction en chaîne dans un réacteur nucléaire

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

Autres calculs de l'énergie libérée



✓ 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

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

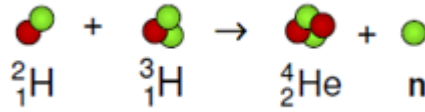
✓ Avec \mathcal{M} en u:

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

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

B. La Fusion

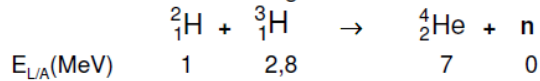
Dans cet exemple de fusion nucléaire, on peut observer un processus où deux noyaux atomiques légers s'assemblent pour former un noyau plus lourd et un seul neutron



• 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	
	$\times 2$		$\times 3$		$\times 4$			
$E_L(\Delta M)$	<u>2</u>		<u>8,4</u>		<u>28</u>			
	Total avant = 10,4 Mev				après = 28 Mev			
	$\Delta E = 28 - 10,4 = 17,6 \text{ MeV}$ libérés							

• Autres calculs de l'énergie libérée



✓ Avec les $\Delta E_{L/A}$:

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

✓ Avec \mathcal{M} en u:

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

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

PARTIE 2 : LA RADIOACTIVITE

I. Généralités.

Transformation radioactive : mutation (ou désintégration) d'un noyau atomique.

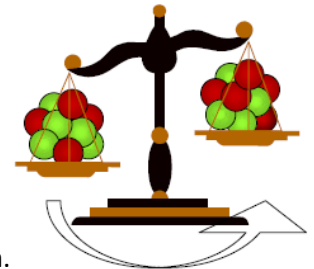
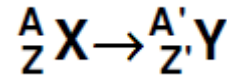
On change de noyau atomique, donc d'élément chimique.

On dit que l'élément père X se transforme en élément fils Y.

L'élément fils Y a toujours une masse inférieure à l'élément père X.

On a donc une perte de masse, qui est convertie en énergie.

Cette énergie est emportée par la ou les particules, les photons résultants de la désintégration.



Classification des transformations radioactives.

Les noyaux radioactifs instables vont se transformer en noyaux stables.

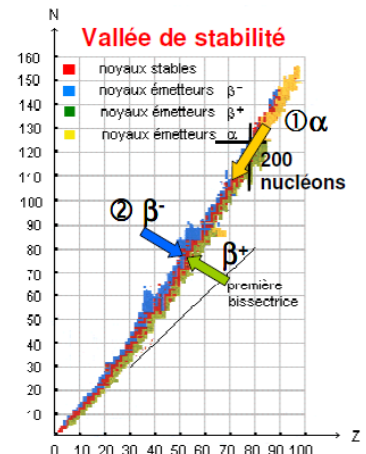
Selon le noyau d'origine on distingue:

A. Emission α

C'est l'émission d'un noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$ pour des noyaux trop lourds.

B. Transformations isobariques

- **Emission β^- (si excès de neutrons)** : Il s'agit d'une transformation pour les noyaux qui ont plus de neutrons que de protons. Il faut donc qu'un neutron se transforme en proton, ce qui s'accompagne d'une émission β^- .



-Emission β^+ (si excès de protons) : Il s'agit d'une transformation pour les noyaux qui ont trop de protons par rapport aux neutrons. Un proton se transforme donc en neutron, et l'on va avoir une émission β^+

C. Transformations isomériques

Il peut y avoir transformation isomérique si après le départ d'une particule α ou β , le noyau fils se retrouve dans un état excité. Il va alors spontanément se désexciter par émission d'un rayonnement électromagnétique γ qui emportera l'excédent d'énergie.

On peut donc avoir :

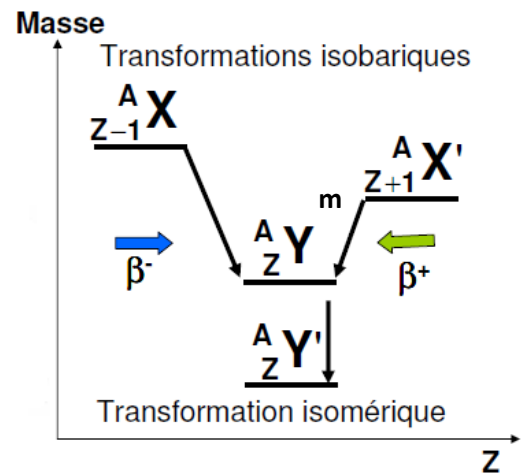
- Une émission α pure \rightarrow rend le noyau stable.
- Une émission β pure \rightarrow rend le noyau stable.
- Radioactivité α suivie de γ \rightarrow si le départ de la particule α a laissé le noyau instable.
- Radioactivité β suivie de γ \rightarrow si le départ de la particule β a laissé le noyau instable.
- Emission d'un γ pur
- Capture électronique/ Conversion interne

Schématisation des transformations.

β^- : On a une **transformation β^-** , un neutron disparaît pour créer un proton. On passe donc de $Z-1$ à Z . Il y a également perte de masse entre X et Y . Le noyau fils devient donc plus stable par rapport au père.

β^+ : On a une **transformation β^+** , un proton disparaît pour créer un Neutron. On passe de $Z+1$ à Z . Il y a une perte de masse entre X' et Y . Le noyau fils Y devient donc également plus stable que le père.

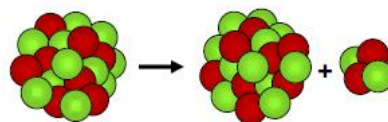
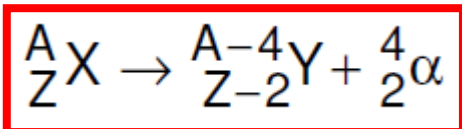
$^A_Z Y^m$: Le noyau fils se retrouve instable. En effectuant une **transformation isomérique**, l'atome va se stabiliser par libération d'énergie, donc par une Diminution de sa masse.



D. Lois de conservation lors des transformations radioactives

- Conservation du nombre de nucléons (A) et du nombre de charges (Z).
- Conservation de l'énergie totale du système (bilan masse-énergie).
- Conservation de la quantité de mouvement (explique le spectre énergétique de la transformation). ($p=mv$)

II. La radioactivité alpha

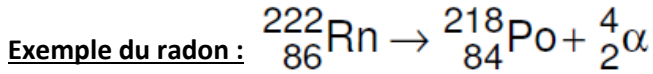


La particule α est formée de 4 nucléons (2p, 2n) : c'est le noyau de l'atome d'hélium ${}^4_2\text{He}$
 Le nombre de protons Z change : l'élément fils formé (Y) est donc différent de l'élément père (X)

Bilan masse-énergie

On soustrait à la masse du noyau initial les masses du noyau fils et de la particule α . On obtient alors une différence de masse qui sera emportée sous forme d'énergie cinétique par la particule α formée.

$$\Delta M = \mathcal{M}(A,Z) - \mathcal{M}(A-4,Z-2) - \mathcal{M}(4,2)$$



On donne : $M(222,86) = 222.0176 \text{ u}$; $M(218, 84) = 218.009 \text{ u}$; $M(4, 2) = 4.0026 \text{ u}$

$$\Delta M = 222.0176 - 218.009 - 4.0026 = 6.10^{-3} \text{ u}$$

$$E_d = 6.10^{-3} * 931.5 = 5.6 \text{ MeV}$$

L'énergie disponible par cette réaction est donc de 5.6 MeV

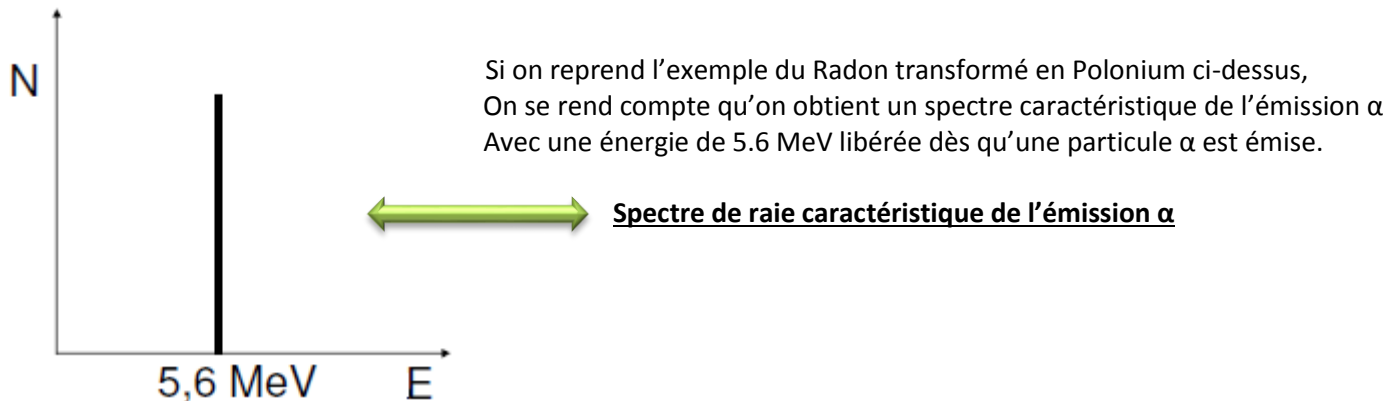
Spectre d'énergie :

L'énergie disponible est libérée sous forme d'énergie cinétique partagée entre les 2 noyaux formés :

- Energie cinétique de la particule α
- Energie de recul du noyau Y

La loi de conservation de la quantité de mouvement ($p=mv$) permet de montrer que E_d se répartit entre Y et α de telle sorte que **la particule α** emporte la **quasi-totalité** de l'énergie libérée par la réaction. Par contre, on peut qualifier sa vitesse de **non relativiste** (négligeable par rapport à la lumière). En effet sa vitesse est environ de 15 000 km/s, donc 20 fois plus lente que celle de la lumière.

En revanche le **noyau Y** va emporter **très peu (voire aucune) d'énergie cinétique** à cause de sa grosseur. Il aura une vitesse de recul très faible.

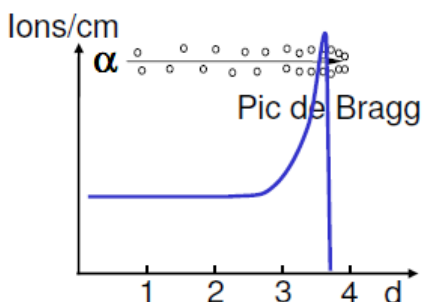
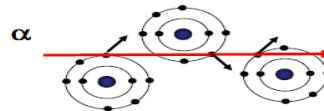


Parcours dans la matière

Les particules α étant lourdes et chargées, elles vont tout bousculer sur leur passage, en ayant une trajectoire rectiligne mais avec une faible vitesse.

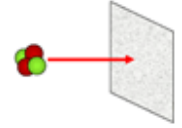
Le passage de particules α dans la matière va provoquer :

- Des ionisations
- Une perte progressive de l'énergie des particules alpha, qui se traduit par un ralentissement puis l'arrêt total des particules α



C'est en fin de parcours que les particules alpha provoquent le plus d'ionisation. On obtient donc une courbe caractéristique avec un **pic de Bragg**.

Dans l'air, quelques cm sont nécessaires pour arrêter les particules alpha, alors que **10µm** suffisent dans les tissus. Une simple feuille de papier est donc capable d'arrêter ces particules.



Une source externe de rayonnement alpha ne représente donc aucun danger.

En revanche, l'absorption ou l'inhalation de particules alpha provoque de nombreuses ionisations, D'où peut résulter une destruction des muqueuses (grave ++)

III. Les transformations isobariques

A. Désintégration β^-

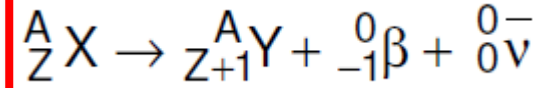
Cette transformation est valable pour les noyaux qui ont un excédent de neutron. Un neutron va donc se transformer en proton en suivant cette transformation : ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e + \bar{\nu} + 0,78 \text{ MeV}$

Dans la transformation β^- la particule émise a plusieurs synonymes : ${}^0_{-1}\beta$ ou β^- ou ${}^0_{-1}e$ ou e

Cette particule n'existe pas initialement dans le noyau X, elle naît donc de la transformation du neutron en proton vu ci-dessus.

On a donc un neutron qui donne un proton (qui reste dans le noyau) une particule β^- qui est émise, et un antineutrino (charge nulle et masse négligeable).

La transformation β^- d'un noyau X est alors :



Il y a bien conservation du nombre de nucléons (A) et du nombre de charges (Z) lors de la transformation. La transformation d'un neutron en proton est due à l'inversion d'un quark. $Udd \rightarrow Uud$

Bilan masse-énergie :

Il y a conservation de l'énergie. Le défaut de masse ΔM est la différence entre la masse de l'atome initial et la masse de l'atome fils Y :

$$\begin{aligned} \Delta M &= \mathcal{M}(A,Z) - Zm_e - [\mathcal{M}(A,Z+1) - (Z+1)m_e + m_e] \\ &= \mathcal{M}(A,Z) - Zm_e - \mathcal{M}(A,Z+1) + (Z+1)m_e - m_e \end{aligned}$$

$$\boxed{\Delta M = \mathcal{M}(A,Z) - \mathcal{M}(A,Z+1)}$$

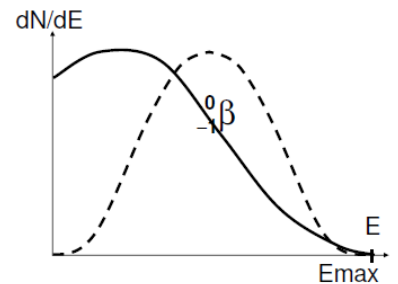
Spectre d'énergie :

L'énergie disponible va se répartir en énergie cinétique pour le noyau fils, la particule β^- et l'antineutrino.

Du fait de la masse du noyau fils, son énergie cinétique de recul sera quasi nulle.

L'énergie est donc partagée entre la particule β^- et l'antineutrino selon un **spectre continu** :

Seule la particule β^- est détectable.

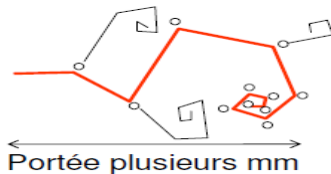


Parcours dans la matière :

Chaque fois qu'une particule β^- va percuter un électron, elle va le mettre en mouvement.

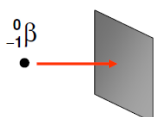
Donc lui donner une énergie cinétique. Si cette même particule β^- a toujours une E_c élevée,

elle va rebondir et percuter un autre électron. Chaque fois qu'elle percute un électron, sa trajectoire change et son énergie cinétique diminue.



Si on additionne bout à bouts ses trajets, on obtient un parcours qui est relativement long, mais à portée courte.

De plus, d'un point de vue radioprotection, les particules β^- sont arrêtées par une feuille de métal.



B. Désintégration β^+

C'est la réaction inverse de la transformation β^-

Cette transformation est valable pour les noyaux qui ont un excédent de proton. Un proton va donc se transformer en neutron en suivant cette transformation : ${}^1_1\text{p} \rightarrow {}^1_0\text{n} + {}^0_{+1}\beta + {}^0_0\nu$

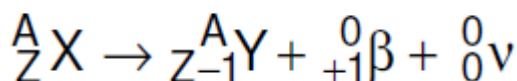
La particule émise est : ${}^0_{+1}\beta$ ou β^+ ou ${}^0_{+1}\text{e}$ ou positon

Elle ne peut pas être créée spontanément. Elle naît obligatoirement de la transformation du proton en neutron.

De plus, la transformation β^+ libère un neutrino, de charge nulle et de masse inférieure à celle de l'électron.

La transformation d'un proton en neutron correspond également à l'inversion d'un quark. $\text{Uud} \rightarrow \text{Udd}$

La réaction de désintégration β^+ est donc :



Bilan masse-énergie :

$$\begin{aligned}\Delta M &= \mathcal{M}(A,Z) - Zm_e - [\mathcal{M}(A,Z-1) - (Z-1)m_e + m_e] \\ &= \mathcal{M}(A,Z) - \cancel{Zm_e} - \mathcal{M}(A,Z-1) + \cancel{(Z-1)m_e} - m_e\end{aligned}$$

$$\Delta M = \mathcal{M}(A,Z) - \mathcal{M}(A,Z-1) - 2m_e$$



ATTENTION : Lors du calcul du ΔM d'une réaction de désintégration β^+ , il faut soustraire la masse de 2 électrons !
Contrairement à la réaction β^- où ceci n'est pas nécessaire par simplification mathématique.

ΔM ne peut pas être négatif car lors de la transformation isobarique, vous avez une perte de masse car on cherche à avoir un noyau plus léger donc plus stable.

Donc : $\mathcal{M}(A,Z) - \mathcal{M}(A,Z+1) > 2m_e$

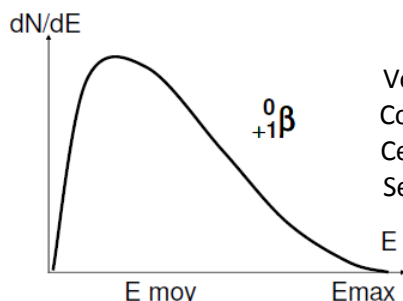
Energétiquement, cela équivaut à : $[\mathcal{M}(A,Z) - \mathcal{M}(A,Z-1)].931,5 > 2.0,511 \text{ MeV} = 1,022 \text{ MeV}$.

La transformation β^+ est donc une transformation à SEUIL.

L'énergie de la réaction doit être **>1.022 MeV**. Sinon ce n'est plus une transformation β^+ mais une capture électronique que nous verrons juste après.

Spectre d'énergie.

C'est comme pour la β^- , d'après la loi de conservation de quantité de mouvement, on considère que l'énergie se répartit entre les trois particules formées : le noyau de recul, le positon et le neutrino. Mais comme l'énergie de recul sera faible, l'Ed sera au final réparti entre la particule β^+ et le neutrino.



Voici la courbe du spectre continu en énergie de la transformation β^+ .

Contrairement à la courbe précédente, celle-ci commence à l'origine du repère.

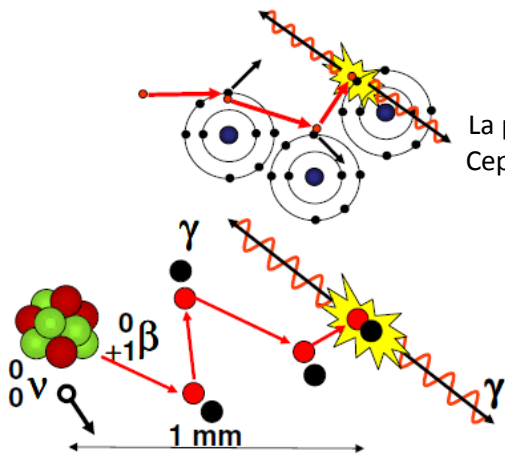
Cela est dû à la force de répulsion entre les β^+ et le noyau, qui sont tous deux de même charge. Seule la particule β^+ est détectable.

Parcours dans la matière :

Vous avez un positon qui a une grande énergie cinétique. Il va percuter des électrons et continuer grâce à son énergie cinétique jusqu'à épuisement de celle-ci où le positon va rester coller à un électron d'un cortège électronique. Cela va produire un phénomène **d'ANNIHILATION** (quand une particule rencontre son antiparticule).

Cette réaction d'annihilation se caractérise par deux phénomènes :

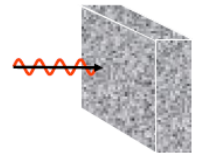
- 2 photons gamma qui emportent chacun sous forme d'énergie l'équivalent de la masse d'un électron (0.511 MeV)
- L'angle entre les 2 photons est de 180° , ils partent donc dans une direction opposée.



La portée de la particule β^+ est courte car elle va vite s'annihiler avec un électron. Cependant, celle des photons gammas est très grande (de l'ordre de plusieurs mètres)

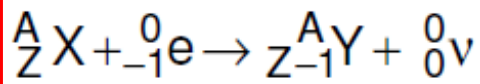


Les **photons gamma** peuvent être **ATTENUÉS** (Et non arrêtés !!!) par du plomb ou du béton.



C. Désintégration par capture électronique

La capture électronique est une autre désintégration possible en cas d'excès de protons dans le noyau.



Le noyau, trop riche en proton, capte un électron (en général de la couche profonde K). On a donc une réaction de suppression de la charge d'un proton qui va donner : ${}^1_1 p + {}^0_{-1} e \rightarrow {}^1_0 n + {}^0_0 \nu$

S'il y a capture d'un électron de la couche profonde, il y aura automatiquement réarrangement électronique de l'atome fils Y Par émission de photons de fluorescence ou électron d'Auger.

Ceci est tout à fait compréhensible, vu que l'électron absorbé par le noyau laisse une case vacante au sein du cortège électronique. L'atome se retrouve donc en état d'excitation \rightarrow réarrangement électronique de l'atome fils.

Bilan masse-énergie :

$$\Delta M = \mathcal{M}(A,Z) - Zm_e + m_e - [\mathcal{M}(A,Z-1) - (Z-1)m_e]$$

$$\Delta M = \mathcal{M}(A,Z) - \mathcal{M}(A,Z-1)$$

Cette fois ci, pour que la réaction soit possible, il faudra que $\Delta M > |W_\mu|$

Exemple numérique :

$$m(201,81) = 200.97079 \text{ u} ; m(201,80) = 200.97028 \text{ u}$$

$$W_k \text{ du } {}^{201}\text{Tl} = -85 \text{ keV}$$

$$\text{Calcul : } \Delta M = 200.97079 - 200.97028 = 5.10^{-4} \text{ u}$$

$$E = 5.10^{-4} \times 931.5 = 0.475 \text{ MeV}$$

$$0.475 \text{ MeV} < 1.022 \text{ MeV} \rightarrow \text{pas de } \beta^+ \text{ possible}$$

$$0.475 \text{ MeV} > 85 \text{ keV} \rightarrow \text{capture électronique de la couche K possible}$$

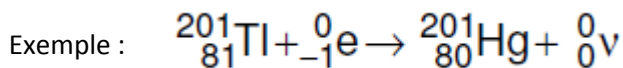
Remarque : Pour les noyaux instables en excès de protons, les désintégrations β^+ et CE sont possibles.

- Au-dessous du seuil de 1.022 MeV, seule la capture électronique sera possible.
- Au-dessus de ce seuil, les 2 sont en compétition : la CE est plus probable lorsque les nombres de masse A sont élevés et lorsque le ΔM est très légèrement $> 1.022 \text{ MeV}$

Spectre d'énergie :

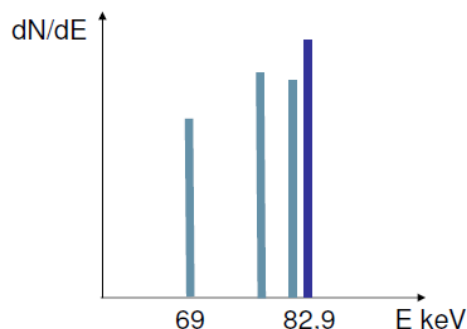
On a un gros noyau de recul qui ne bouge presque pas et un neutrino qui emporte toute l'énergie.

Mais vu que le neutrino est indétectable, il n'y aura pas de spectre nucléaire de la capture électronique. Par contre, puisqu'on a réarrangement du noyau fils, on va avoir émission de photon de fluorescence ou d'électron d'Auger. On aura donc un spectre de raies **atomique**.



Le seul spectre détectable est celui des réarrangements électroniques de ${}^{201}_{80}\text{Hg}$:

keV	W_K	W_L	W_M	W_N	W_O
${}_{81}\text{Tl}$	85	14	2	0,4	0,1
${}_{80}\text{Hg}$	83	14	2,5	0,5	0,1
$W_i - W_K$		69	80,5	82,5	82,9



Parcours dans la matière :

Le neutrino ne provoque pas d'interaction (indétectable)

Les photons émis indirectement interagissent avec la matière. Ils ont une longue portée et seront atténués par du plomb ou du béton.

IV. Les transformations isomériques.

Les transformations isomériques se font sans changement de nature du noyau. La transformation porte sur les niveaux d'énergie des nucléons. En effet, les nucléons se répartissent sur des niveaux d'énergies comme les électrons. Certaines transformations isobariques peuvent aboutir à un état intermédiaire du noyau où persiste un excédent d'énergie. Les nucléons occupent alors des niveaux d'énergie supérieurs à ceux de l'état fondamental.

Il va donc y avoir 2 possibilités suite au départ de la particule :

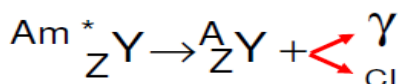
- 1) Soit le noyau produit se trouve dans un état excité, Il retournera instantanément à son état d'équilibre.
- 2) Soit ce noyau produit sera dans un état métastable, avec un retour différé à son état d'équilibre stable (temps >1 sec)

La différence est donc le temps de retour à l'état stable :

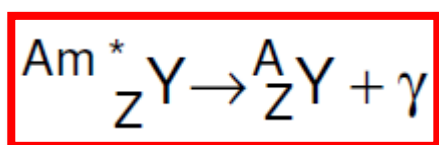
X

$\begin{matrix} \swarrow & \searrow \\ A^*_Z Y & A^*_Z Y \\ \text{excité}^* & \text{excité}^* \\ \text{(retour instantané)} & \text{(retour instantané)} \\ \swarrow & \searrow \\ A^*_m Z Y & A^*_m Z Y \\ \text{métastable}^m & \text{métastable}^m \\ \text{(retour différé > 1s)} & \text{(retour différé > 1s)} \end{matrix}$

Lors du retour à l'état stable du noyau, l'excès d'énergie est libéré grâce à l'émission d'un **photon γ** ou grâce à un phénomène de **conversion interne (CI)** :



A. Radioactivité γ



Il s'agit du retour à l'état stable **instantanément** du noyau par émission d'un photon γ .

Le photon γ provient **du noyau** de l'élément ! (origine nucléaire)

$$\begin{aligned} \Delta M &= \mathcal{M}(A_m, Z) - Z m_e - [\mathcal{M}(A, Z) - Z m_e] & E_d &= \Delta M \times 931,5 = E_\gamma \\ &= \mathcal{M}(A_m, Z) - \mathcal{M}(A, Z) \end{aligned}$$

Spectre d'énergie :

Les gros noyaux emportent peu d'énergie donc ont une vitesse faible voire nulle.

L'énergie disponible est alors emportée par le photon.

On a donc un **spectre électromagnétique nucléaire de raie unique** !

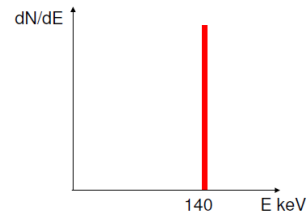
Exemple pour le Technétium : ${}^{99m}_{43}\text{Tc} \rightarrow {}^{99}_{43}\text{Tc} + \gamma$

$$\mathcal{M}(99m,43) = 98,90655$$

$$\mathcal{M}(99,43) = 98,90640$$

$$\Delta M = 98,90655 - 98,90640 = 0,00015 \text{ u}$$

$$E_d = 0,00015 \times 931,5 = 0,14 \text{ MeV} = 140 \text{ keV}$$



Parcours dans la matière : Les photons γ provoquent des ionisations par collisions avec des électrons. (Effet photo-électrique, diffusion Compton, création de paires...). Ils ne seront **atténués** que par du plomb ou du béton.

B. Conversion interne.

Dans la conversion interne, il n'y a pas d'émission de photon γ . L'énergie en excès est transmise à un électron de l'atome qui est alors ionisé. L'ionisation est susceptible d'engendrer des réarrangements électroniques tels que les photons de fluorescence et électrons d'Auger.

$$\Delta M = \mathcal{M}(Am, Z) - Z m_e - [\mathcal{M}(A, Z) - Z m_e]$$

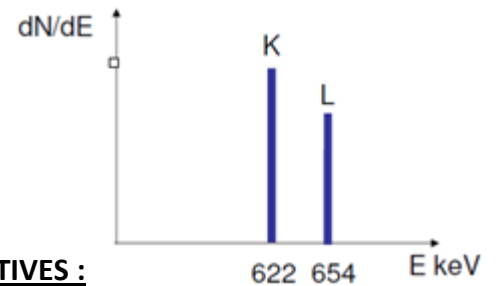
$$= \mathcal{M}(Am, Z) - \mathcal{M}(A, Z)$$

$$E_d = \Delta M \times 931,5 = E_\gamma$$

$$E_c(e_i) = E_d - |W_i|$$

Spectre d'énergie :

L'énergie disponible est emportée par l'électron atomique: pas de spectre nucléaire. On obtient donc **un spectre électronique atomique de raie.**



EXEMPLE DE SPECTRE D'UNE SUCCESSION DE TRANSFORMATIONS RADIOACTIVES :

