

# BIOPHYSIQUE DES RADIATIONS

## *Tut' rentrée – Cours 2 - La Radioactivité*

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

|           |   |                                      |
|-----------|---|--------------------------------------|
| ${}^A_ZX$ | 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.  $xZ = x e^-$

## Classification des nuclides.

## Chimique

[illegible]

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

♥ Moyens Mémo Technique ♥

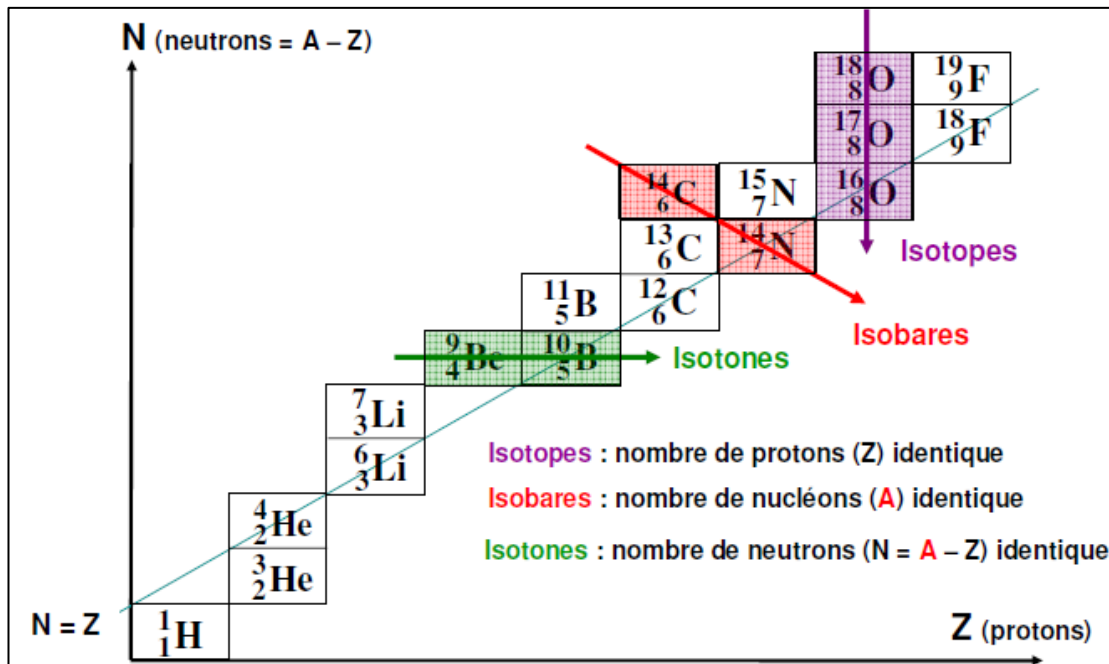
2eme ligne : **Lili** **besa** **bien** **chez** **notre** **oncle** **florentin** **Nestor**

3eme ligne : Napoléon mangea allègrement six poulets sans claquer d'argent.

Gaz rares : Hector négligea d'arracher le korsage de Xena puis rentra

Halogènes : Florentin claqu<sup>a</sup> brutale<sup>m</sup>ent Irène à terre

## Physique : La table des nuclides



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 :  ${}^{12}_6\text{C} = 98,89\%$

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

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

|              |   |
|--------------|---|
| Les isotopes | Ce sont les mêmes éléments, avec le même nombre de protons <u>Z</u> , mais avec un nombre de neutrons N différents.   |
| Les isobares | Ce sont deux éléments distincts, avec un nombre de protons Z différents, mais un même nombre de nucléons <u>A</u> .   |
| Les isotones | Ce sont deux éléments distincts, soit avec 2 nombres de protons différents, mais qui ont le même nombre de neutrons <u>N</u> .  |
| Les isomères | Ce sont deux noyaux avec Z identique, A identique, N constant. Mais l'un des deux a un excédent d'énergie nucléaire,<br>Ce qui le rend instable. Pour le distinguer on rajoute un « m » comme métastable à côté du symbole de l'élément.<br>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 peut également être <b>stable</b> à l'état <u>libre</u> hors du noyau.</p>   |
| Le neutron | <p>Il se note <math>{}_0^1n</math> lors des réactions nucléaires</p> <p>A l'intérieur du noyau, le neutron est <b>stable</b> mais peut donner lieu, dans certaines conditions à une réaction de transformation :</p> ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e + \bar{\nu} + 0,78MeV$ <p><math>\bar{\nu}</math> est un antineutrino, particule électriquement neutre produite dans la désintégration <math>\beta^-</math> nucléaire.</p> <p>☛ À l'extérieur du noyau, le neutron est <b>TOUJOURS</b> instable, suivant la même réaction ci-dessus.</p> |

#### ☛ 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.

### Les Particules élémentaires

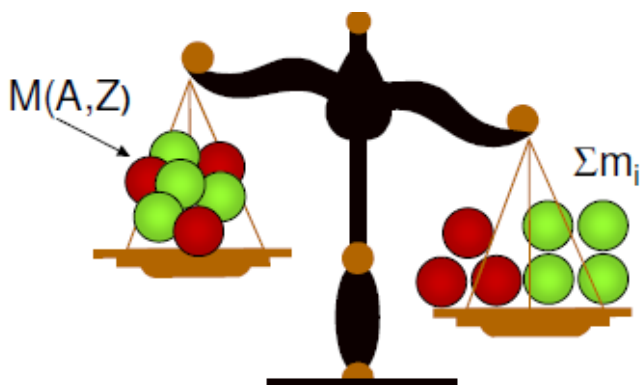
Ce sont de très petites particules qui regroupées, forment les protons et neutrons.

On en distingue 2 sortes :

- \* **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 :
  - ☞ Les Quarks UP : + 2/3 de la charge élémentaire
  - ☞ 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  $E=mc^2$

Le tutorat est gratuit, toute vente ou reproduction est interdite.

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.

### 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  $\Delta M$  :

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

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

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

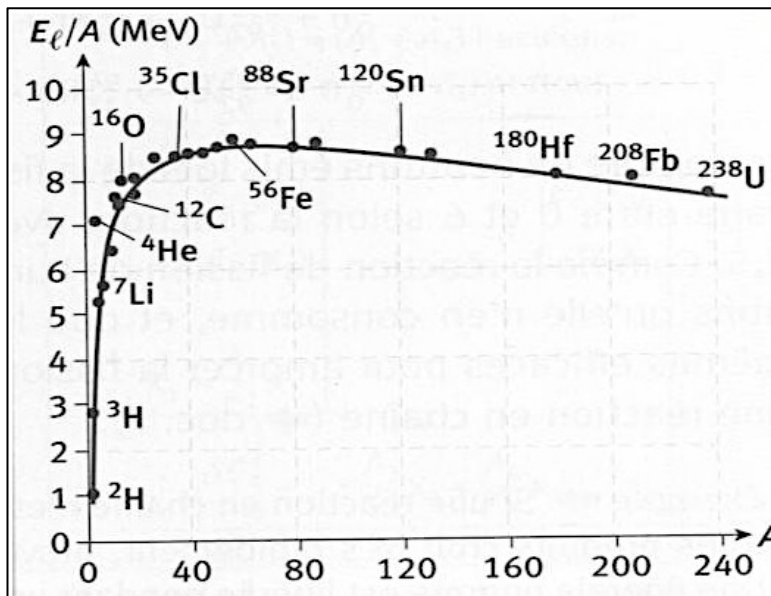
$$E_L = 0,137 \times 931,5 = 127,6 \text{ MeV}$$

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



En abscisse : le nombre de nucléons

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

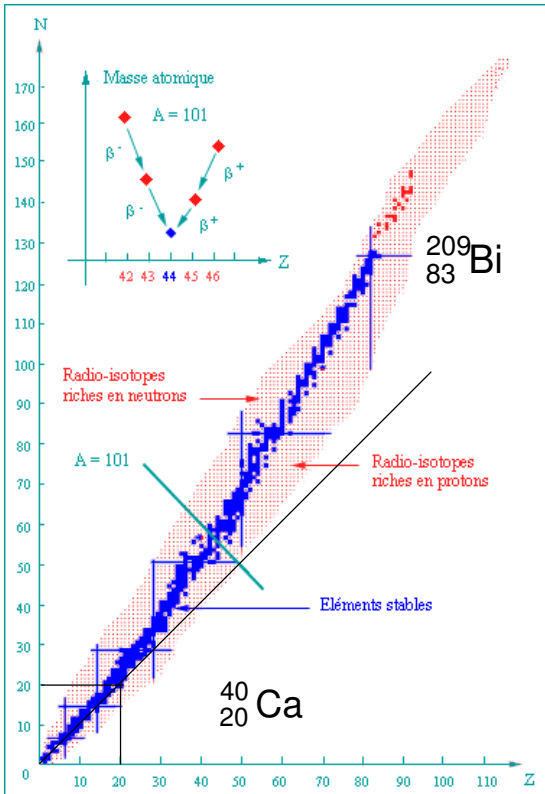
Il existe **un seuil maximum** d'environ **8.5 MeV/nucléons**, où l'on retrouve les éléments les plus stables : le nickel et le fer (qui sont les deux constituants du noyau terrestre.)

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

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.



## 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.

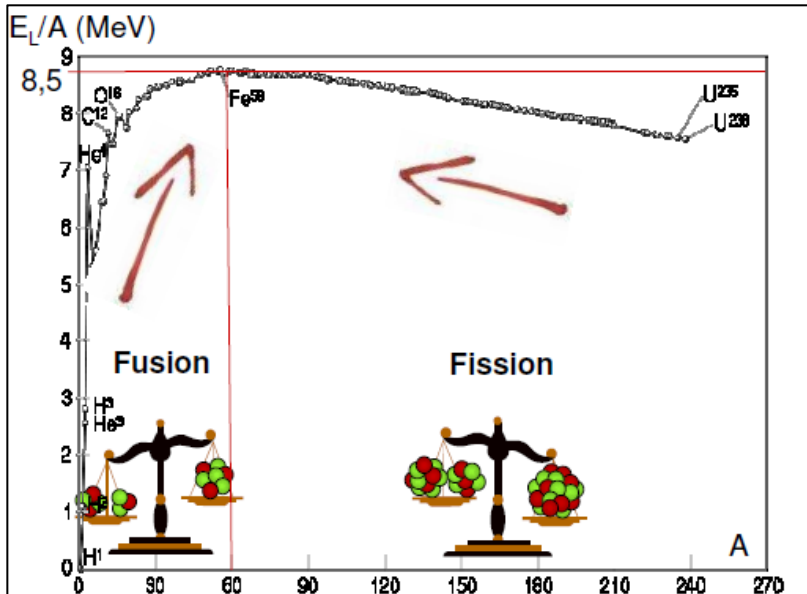
$$N > Z$$

## 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 <b>forces répulsives</b> concernant les protons et qui explique l' <u>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"> <li>* <b>Interaction faible</b> force répulsive <math>\Rightarrow</math> explique les transformations radioactives</li> <li>* <b>Interaction forte (agit à très petite échelle)</b> force attractive (mais répulsive à très courte distance par incompressibilité) qui assure la cohésion du noyau grâce à la mise en commun de gluons</li> </ul> |

## La Fission et la Fusion

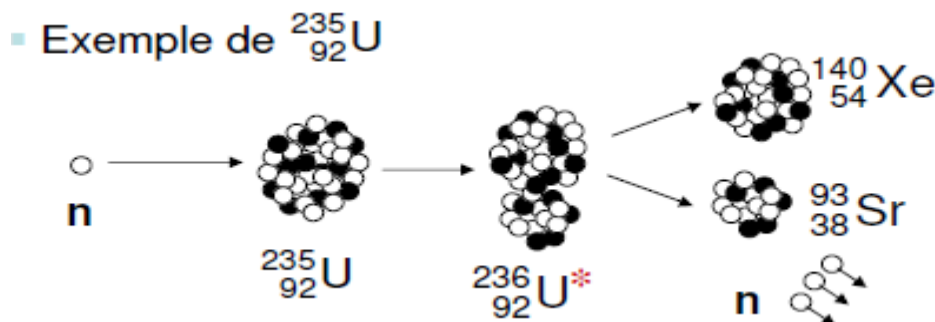


Si on se réfère à **la courbe de stabilité nucléaire** :

- \* 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**.

### La Fission

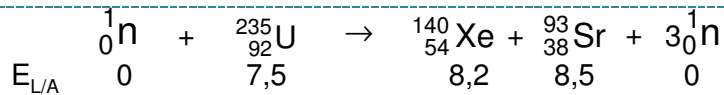


On bombarde l'uranium d'un neutron lent, qui devient de ce fait instable. L'instabilité du noyau provoque sa **fission** en 2 noyaux plus petits et en 3 neutrons. Ces 3 neutrons libérés seront réutilisés pour fissionner à nouveau : c'est **la réaction en chaîne** qui se déroule dans un réacteur nucléaire.

### Calcul de l'énergie libérée

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

## 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'  ${}^{235}_{92}\text{U}$  :

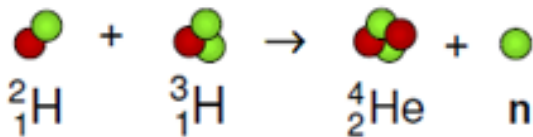
$$\left. \begin{array}{l} 176 \text{ MeV sont libérés par un noyau} = 235 \text{ u} \\ 1 \text{ u} = 1/\mathcal{N} \text{g} = 1/6,025 \cdot 10^{23} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g} \end{array} \right\} \Delta E = \frac{176}{235 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24}} \text{ MeV}$$

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

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

☞ L'énergie libérée équivaut à **2 tonnes de pétrole**.

## La Fusion

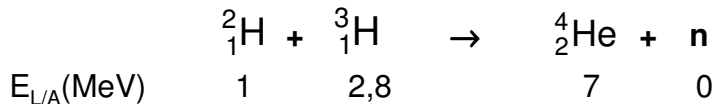


Dans cet exemple de **fusion nucléaire**, on peut observer un processus où deux noyaux atomiques légers s'assemblent pour former un noyau plus lourd et un seul neutron.

## Calcul de l'énergie libérée

|   |                                   |               |                              |  |
|---|-----------------------------------|---------------|------------------------------|--|
|   | ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H}$ | $\rightarrow$ | ${}^4_2\text{He} + \text{n}$ |  |
| $E_{L/A}(\text{MeV})$                             | 1      2,8                        |               | 7      0                     |  |
|   | x2      x3                        |               | x4                           |  |
| $E_L(\Delta M)$                                   | 2      8,4                        |               | 28                           |  |
| Total avant = 10,4 MeV      après = 28 MeV        |                                   |               |                              |  |
| $\Delta E = 28 - 10,4 = 17,6 \text{ MeV libérés}$ |                                   |               |                              |  |

## Autres calculs possibles...

✓ 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:

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

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

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

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

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

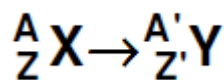
$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \Rightarrow \Delta E = 26,5 \cdot 10^{23} \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 42,4 \cdot 10^{10} \text{ J}$$

☞ L'énergie libérée équivaut à **12 tonnes de pétrole**.

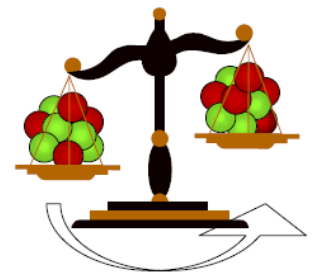
## La radioactivité ☠

## 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 de masse moindre donc plus stable:



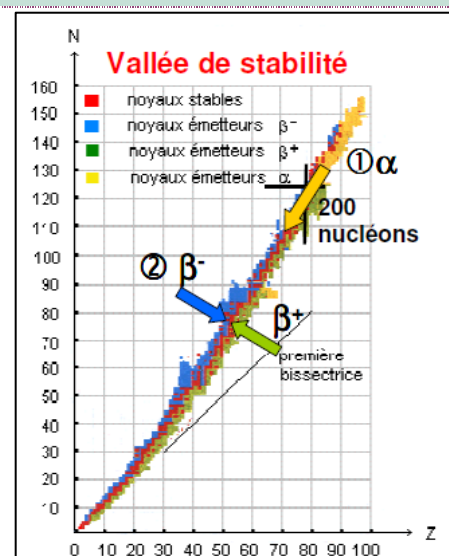
L'élément fils Y a toujours une masse inférieure à l'élément père X. On a une perte de masse, qui est convertie en énergie. Cette énergie est emportée par la ou les particules, les photons résultants de la désintégration.



## Les différentes transformations

**Les noyaux radioactifs instables** vont se transformer en noyaux stables. Selon le noyau d'origine on distingue:

- \* **L'émission alpha** : émission d'un noyau d'Hélium  ${}^4_2\text{He}^{++}$ , elle concerne les noyaux lourds.
- \* **Les transformations isobariques** :
  - ☞ **Émission  $\beta^-$**  si excès de neutrons dans le noyau
  - ☞ **Émission  $\beta^+$**  si excès de protons dans le noyau
- \* **Les transformations isomériques** : Il peut y avoir transformation isomérique si après le départ d'une particule  $\alpha$  ou  $\beta$ , le noyau fils se retrouve dans un état excité. Il va alors spontanément se désexciter par émission d'un rayonnement électromagnétique  $\gamma$  qui emportera l'excédent d'énergie.


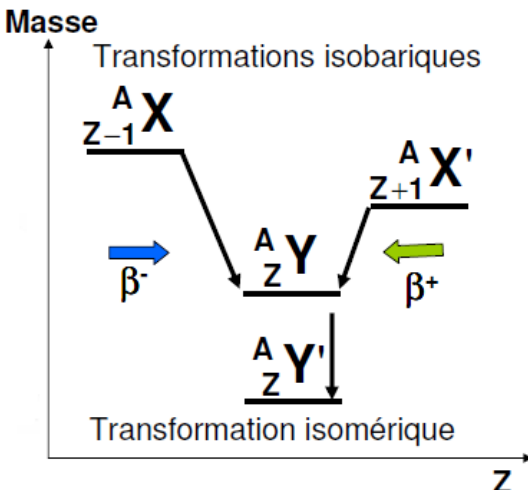



**Pour résumer**

On peut donc avoir :

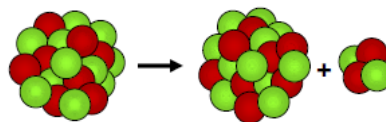
- \* Une émission  **$\alpha$  pure** : rend le noyau stable.
- \* Une émission  **$\beta$  pure** : rend le noyau stable.
- \* Radioactivité  **$\alpha$  suivie de  $\gamma$**  : si le départ de la particule  $\alpha$  a laissé le noyau instable.
- \* Radioactivité  **$\beta$  suivie de  $\gamma$**  : si le départ de la particule  $\beta$  a laissé le noyau instable.
- \* Émission d'un  **$\gamma$  pur**
- \* Capture électronique/ Conversion interne

**Schématisation des transformations**

|   |   |   |
|---|---|---|
|  | On a une <b>transformation <math>\beta^-</math></b> , un neutron disparaît pour former un proton. On passe donc de <b><math>Z-1</math> à <math>Z</math></b> . Il y a également perte de masse entre X et Y, le noyau fils Y devient donc plus stable par rapport au père. |  |
|  | On a une <b>transformation <math>\beta^+</math></b> , un proton disparaît pour former un Neutron. On passe de <b><math>Z+1</math> à <math>Z</math></b> . 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 <b>transformation isomérique</b> , l'atome se stabilise par libération d'énergie, donc par une diminution de sa masse.  |   |

**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).

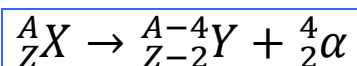
**La radioactivité alpha**

**La particule  $\alpha$**  est formée de 4 nucléons (2p, 2n) : c'est **le noyau  $\alpha$**  de l'atome d'hélium. Le **noyau d'He** est très stable (son énergie de liaison est de 7 MeV/ nucléon).

Le nombre de protons Z change : l'élément fils formé (Y) est donc différent de l'élément père (X)

**Bilan masse-énergie**

La réaction de désintégration est la suivante :

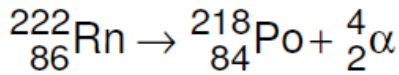


On soustrait à la masse du noyau initial les masses du noyau fils et de la particule  $\alpha$ . On obtient alors une **déficit de masse** qui sera emporté sous forme **d'énergie cinétique** par la particule  $\alpha$  formée :

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

### Exemple

Le Radon se transforme en Polonium



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

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

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

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

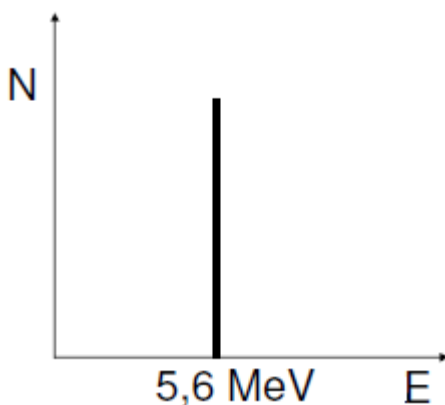
### Spectre d'énergie

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

- \* Énergie cinétique de la particule  $\alpha$
- \* Énergie 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  $\alpha$  de telle sorte que **la particule  $\alpha$**  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.



Si on reprend l'exemple du Radon transformé en Polonium ci-dessus, On se rend compte qu'on obtient **un spectre de raie caractéristique de l'émission  $\alpha$** .

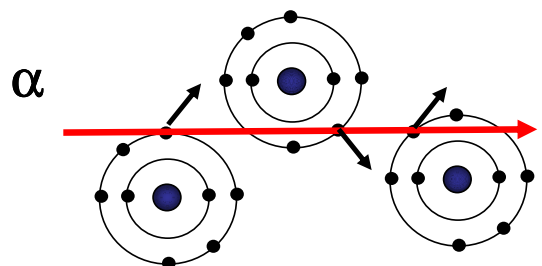
Avec une énergie de 5.6 MeV libérée dès qu'une particule  $\alpha$  est émise.  
*NB : le spectre de raie à 5,6 MeV est spécifique de la transformation du Radon en Polonium.*

### Parcours dans la matière

**Les particules  $\alpha$**  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  $\alpha$  dans la matière va provoquer :

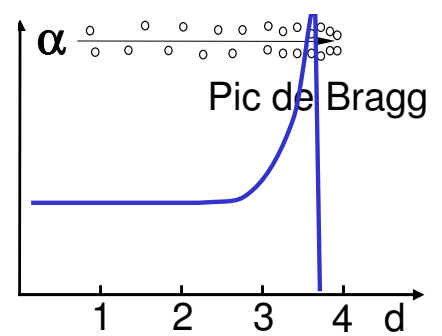
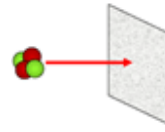
- \* Des ionisations
- \* Une perte progressive de l'énergie des particules alpha, qui se traduit par un ralentissement puis l'arrêt total des particules  $\alpha$ .





C'est en fin de parcours que les particules alpha provoquent le plus d'ionisations. 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.



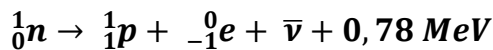
Une source externe de rayonnement alpha ne représente donc aucun danger.

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

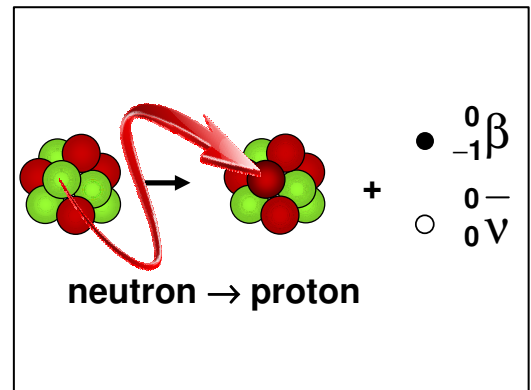
#### Désintégration $\beta^-$

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 :



Dans la transformation  $\beta^-$  la particule émise a plusieurs synonymes :  ${}_0^{-1}\beta$  ou  $\beta^-$  ou  ${}_{-1}^0e$  ou  $e^-$

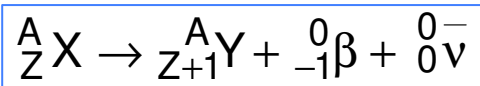
Cette particule n'existe pas initialement dans le noyau X, elle naît donc de la transformation du neutron en proton vu ci-dessus.



#### Bilan masse-énergie

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

La transformation  $\beta^-$  d'un noyau X est alors :



Il y a bien conservation du nombre du **nombre de nucléons (A)** et du **nombre de charges (Z)** lors de la transformation.

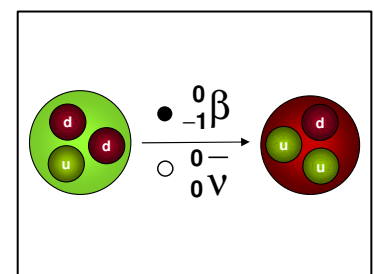
La transformation d'un neutron en proton est due à l'inversion d'un quark.

Il y a conservation de l'énergie. Le défaut de masse  $\Delta M$  est la différence entre la masse de l'atome initial X et la masse de l'atome fils Y :

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

$$\Delta M = M(A, Z) - Zm_e - M(A, Z+1) + (Z+1)m_e - m_e$$

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

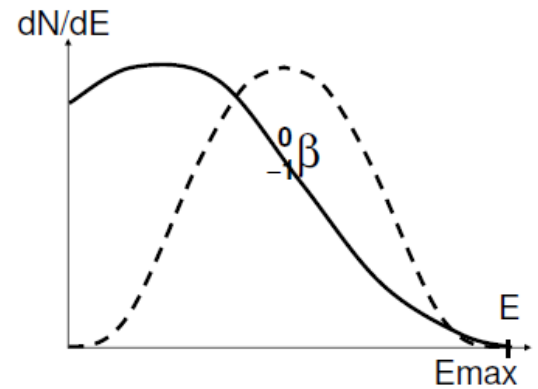


**L'énergie disponible** se répartit en **énergie cinétique** pour le noyau fils, la particule  $\beta^-$  et l'antineutrino.

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

L'énergie est donc partagée entre la particule  $\beta^-$  et l'antineutrino selon un **spectre continu**.

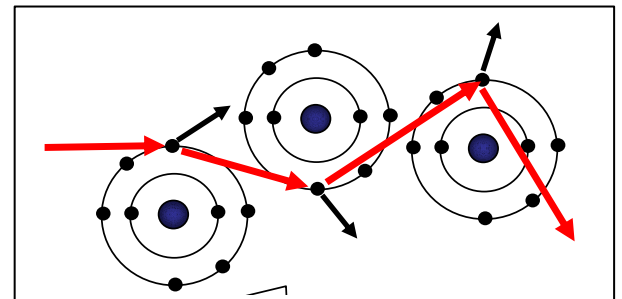
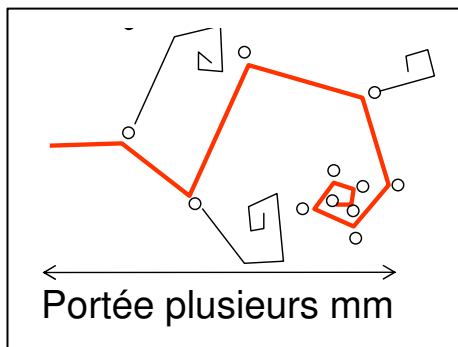
**Seule la particule  $\beta^-$  est détectable.**



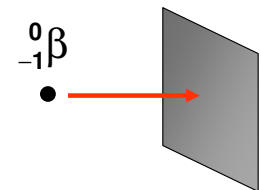
## Parcours dans la matière

Chaque fois qu'une **particule  $\beta^-$**  percute un électron, elle le met en mouvement : elle lui donne **une énergie cinétique**. Si la particule  $\beta^-$  a encore une énergie cinétique importante, elle pourra percuter d'autres électrons. À chaque « choc », la particule **change de trajectoire** et elle **perd de l'énergie cinétique**.

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

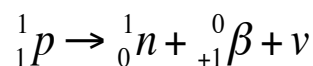


De plus, d'un point de vu radioprotection, les particules  $\beta^-$  sont arrêtées par une feuille de métal.



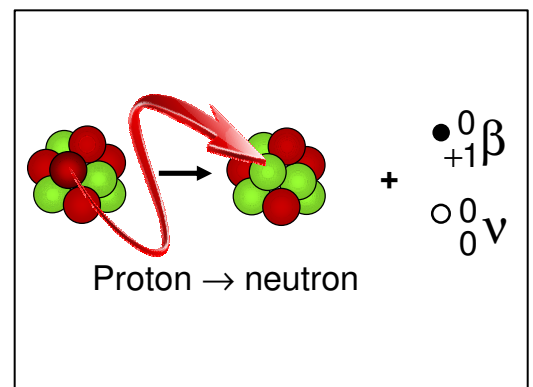
## Désintégration $\beta^+$

C'est la **réaction inverse** de la transformation  $\beta^-$ . 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 :



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

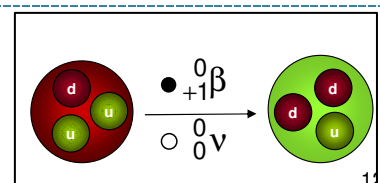
Elle ne peut pas être créée spontanément. Elle naît obligatoirement de la transformation du proton en neutron.



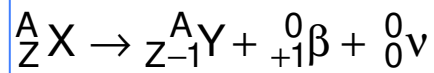
## Bilan masse énergie

**La transformation  $\beta^+$**  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**.



La réaction de désintégration  $\beta^+$  est donc :



Le défaut de masse est :

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

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

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

☛ Lors du calcul du  $\Delta M$  d'une réaction de désintégration  $\beta^+$ , il faut soustraire la masse de 2 électrons !  
Contrairement à la réaction  $\beta^-$  où ceci n'est pas nécessaire par simplification mathématique.

$\Delta M$  ne peut pas être négatif : on doit obligatoirement avoir une perte de masse pour obtenir un noyau fils plus stable.

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

Énergétiquement, la transformation  $\beta^+$  est donc une transformation à SEUIL♥♥♥♥.

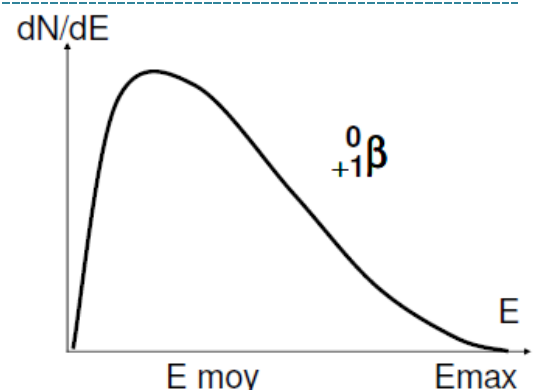
L'énergie de la réaction doit être  $> 1.022 \text{ MeV}$ . Sinon ce n'est plus une transformation  $\beta^+$  mais une capture électronique que nous verrons juste après.

### Spectre d'énergie.

C'est comme pour la  $\beta^-$ , 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 est faible, l'énergie délivrée sera au final répartie entre la **particule  $\beta^+$**  et le **neutrino**.

Voici la courbe du spectre continu en énergie de la transformation  $\beta^+$ .

Contrairement à la courbe précédente, celle-ci commence à l'origine du repère. Cela est dû à la force de répulsion entre les  $\beta^+$  et le noyau, qui sont tous deux de même charge.



Seule la particule  $\beta^+$  est détectable.

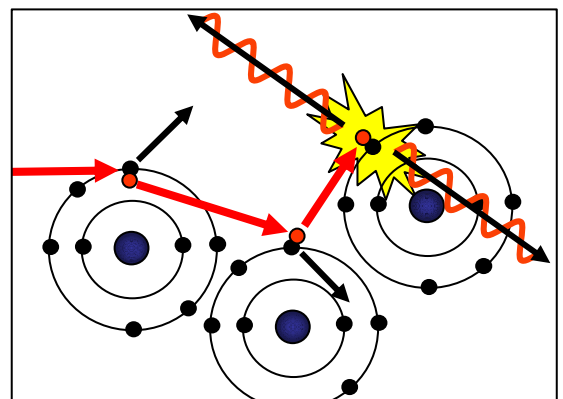
### Parcours dans la matière

Le **positon** a une grande énergie cinétique. Il percute des électrons et continue jusqu'à épuisement de son énergie cinétique.

Le positon peut aussi se coller à un électron du cortège électronique : cela va produire un **phénomène d'ANNIHILATION** (quand une particule rencontre son antiparticule).

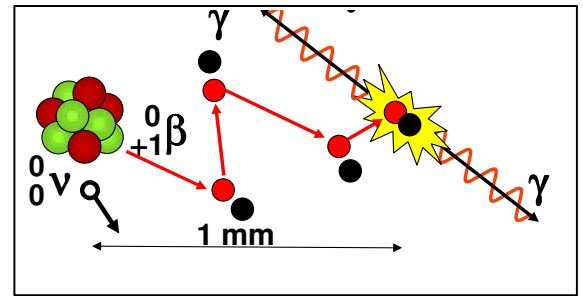
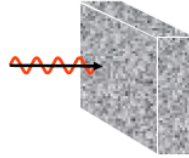
Cette **réaction d'annihilation** se caractérise par deux phénomènes :

- \* 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  $\gamma$  est de  $180^\circ$ , ils partent donc dans une direction opposée.



La portée de la particule  $\beta^+$  est courte car elle va vite s'annihiler avec un électron.

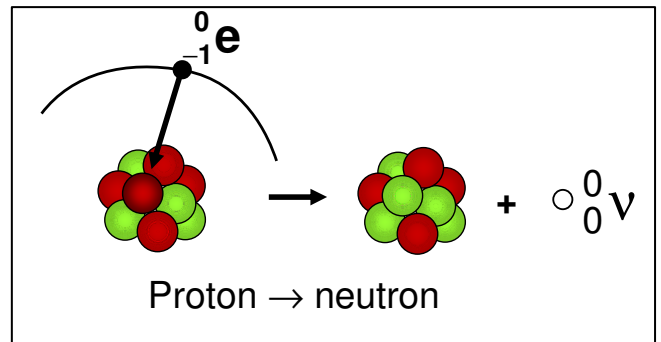
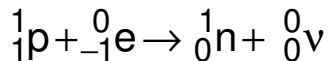
Cependant, celle des **photons gamma** est très grande (de l'ordre de plusieurs mètres). Ils sont arrêtés par du **plomb** ou du **béton**.



## 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 :



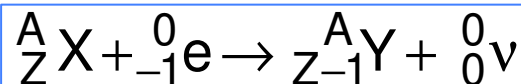
Sy aura automatiquement **réarrangement**

**électronique de l'atome fils Y** par émission de photons de fluorescence ou électron 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 fils se retrouve en état d'excitation.

## Bilan masse énergie

La **réaction de capture électronique** est :



**Le défaut de masse :**

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

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

## Exemple

Soit la transformation suivante :  ${}_{81}^{201}\text{Tl} + e^- \rightarrow {}_{80}^{201}\text{Hg} + \nu$

On donne :  $\mathcal{M}(201, 81) = 200.97079 \text{ u}$  ;  $\mathcal{M}(201, 80) = 200.97028 \text{ u}$  ;  $W_k \text{ du } {}^{201}\text{Tl} = -85 \text{ keV}$

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

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

**0.475 MeV < 1.022 MeV** :  $\beta^+$  impossible

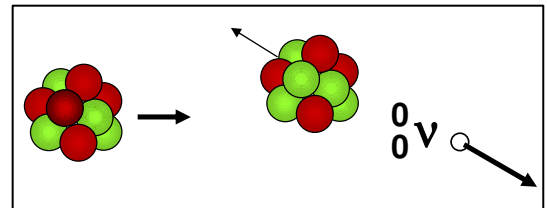
**0.475 MeV > 85 keV** : capture électronique de la couche K possible

☞ **Remarque** : Pour les noyaux instables en excès de protons, les désintégrations  $\beta^+$  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 défaut de masse  $\Delta M$  est très légèrement  $> 1.022$  MeV

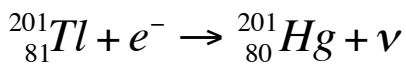
### Spectre d'énergie

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 a émission de **photons de fluorescence** ou **d'électron d'Auger**.



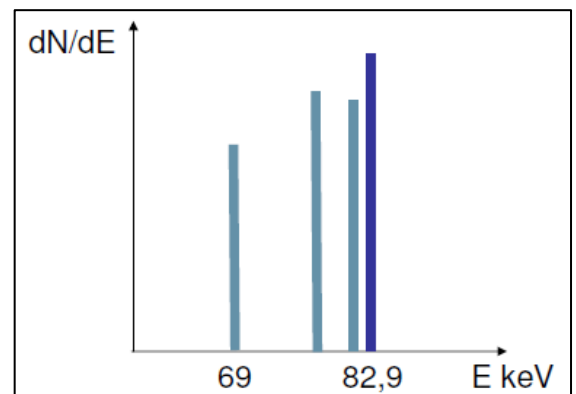
♥ On aura donc un spectre de raies atomique. ♥

### Exemple



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

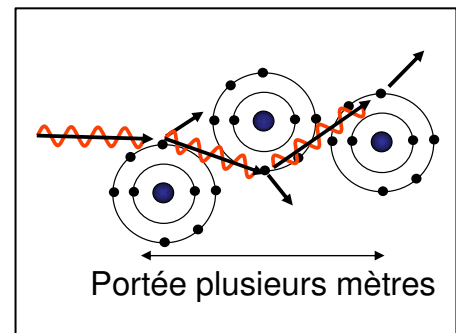
| keV                 | $W_K$ | $W_L$ | $W_M$ | $W_N$ | $W_O$ |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ${}^{201}\text{Tl}$ | 85    | 14    | 2     | 0,4   | 0,1   |
| ${}^{201}\text{Hg}$ | 83    | 14    | 2,5   | 0,5   | 0,1   |
| $W_i - W_K$         |       | 69    | 80,5  | 82,5  | 82,9  |



### Parcours dans la matière

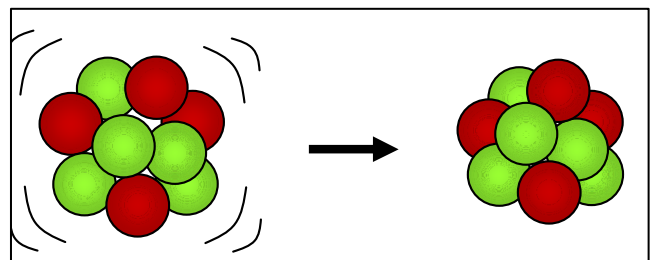
Le neutrino ne provoque pas d'interaction (indétectable)

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



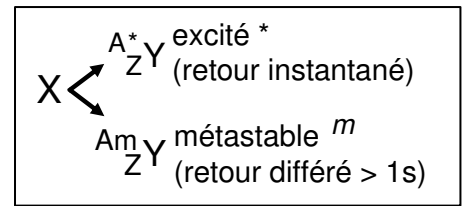
### Les transformations isomériques.

**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.

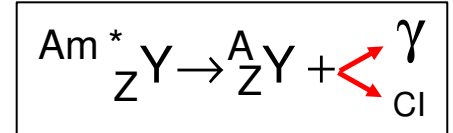


Il a 2 possibilités suite au départ de la particule

- ✱ Soit le noyau produit se trouve dans un état excité, Il retournera instantanément à son état d'équilibre.
  - ✱ 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



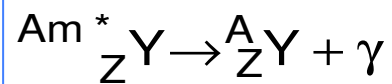
Lors du retour à l'état stable du noyau, l'excès d'énergie est libéré grâce à l'émission d'un **photon  $\gamma$**  ou grâce à un phénomène de **conversion interne (CI)**.



## Radioactivité $\gamma$

Il s'agit du retour à l'état stable **instantanément** du noyau par émission d'un photon  $\gamma$ . Le photon  $\gamma$  provient **du noyau** de l'élément : il a une **origine nucléaire** (+++)

La **désintégration  $\gamma$**  :



**Le défaut de masse :**

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

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

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

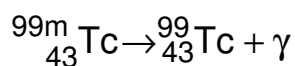
## Spectre d'énergie

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** ! ♥

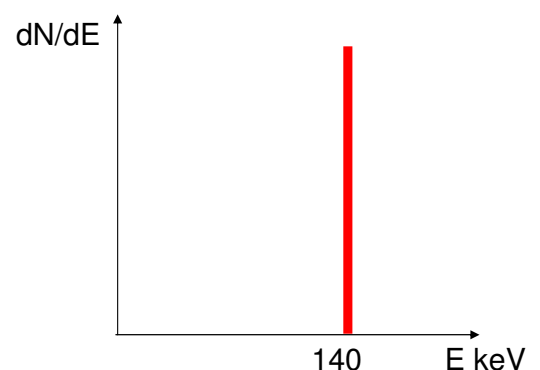
### Exemple du Technétium



On donne les masses:  $\mathcal{M}(^{99m}_{43}\text{Tc}) = 98,90655$  ;  $\mathcal{M}(^{99}_{43}\text{Tc}) = 98,90640$

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

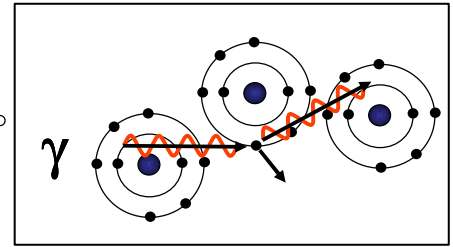
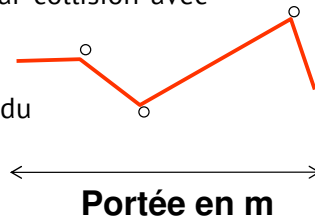
$$E_d = 0,00015 \times 931,5 = 0,14 \text{ MeV} = \mathbf{140 \text{ keV}} = E_\gamma$$





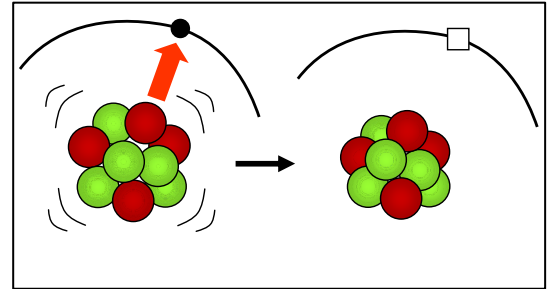
## Parcours dans la matière

**Les photons  $\gamma$**  provoquent des ionisations par collision avec des électrons. (Effet photo-électrique, diffusion Compton, création de paire...). Ils ne seront **atténués** que par du plomb ou du béton.



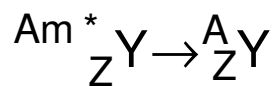
## Conversion interne

Dans **la conversion interne**, il n'y a pas d'émission de photon  $\gamma$ . **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 les électrons Auger.



## Bilan masse énergie

La réaction de désintégration :



Le défaut de masse :

$$\Delta M = M(A_m, Z) - Zm_e - [M(A, Z) - Zm_e]$$

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

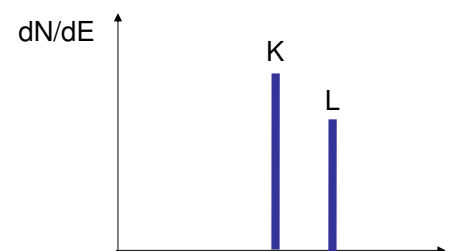
On déduit :

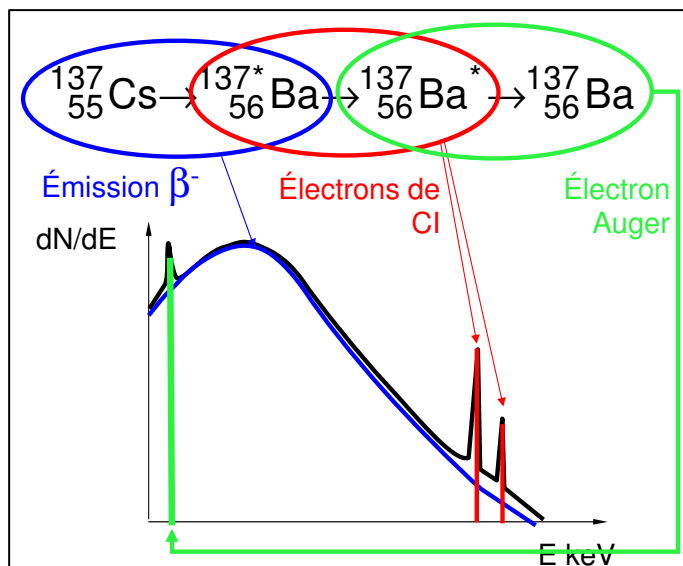
$$E_c (\text{électron ionisé}) = E_d - |W_i| = \Delta M \times 931,5 - |W_i|$$

## Spectre d'énergie

L'énergie disponible est emportée par l'électron atomique: pas de spectre nucléaire  $\bullet^*$ .

On obtient donc un spectre électronique atomique de raie.



Exemple d'une succession de transformations radioactives

**Réaction 1** : émission  $\beta^-$ , spectre continu, formation de Barium excité

**Réaction 2** : conversion interne, spectre atomique de raies.

**Réaction 3** : formation d'un électron Auger et retour à l'état fondamental.