

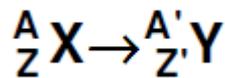
# BIOPHYSIQUE DES RADIATIONS

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

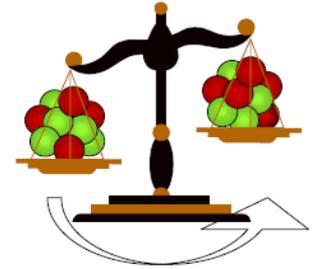
### La radioactivité ☠

#### 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

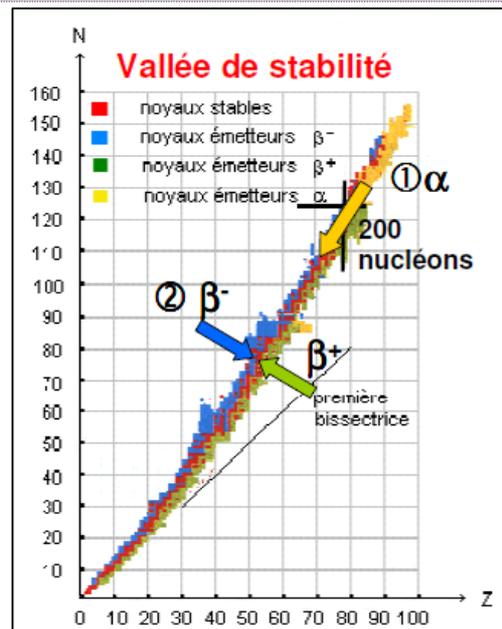
**Les noyaux radioactifs instables** vont se transformer en noyaux stables. Selon le noyau d'origine on distingue :

- \* **L'émission alpha** : émission d'un noyau d'Hélium  ${}^4_2\text{He}^{++}$ , 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 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



elle

d'un

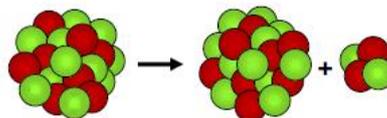
## Schématisation des transformations

 $\beta^-$	On a une <b>transformation <math>\beta^-</math></b> , un neutron disparaît pour former un proton. On passe donc de <b>Z-1 à Z</b> . Il y a également perte de masse entre X et Y, le noyau fils Y devient donc plus stable par rapport au père.	
 $\beta^+$	On a une <b>transformation <math>\beta^+</math></b> , un proton disparaît pour former un Neutron. On passe de <b>Z+1 à Z</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

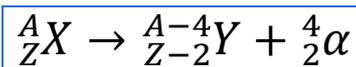


**La particule  $\alpha$**  est formée de 4 nucléons (2p, 2n) : c'est **le noyau  ${}^4_2\text{He}^*$**  de l'atome d'hélium. Le **noyau d'He** est très stable (son énergie de liaison est de 7 MeV/ nucléon).

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 :

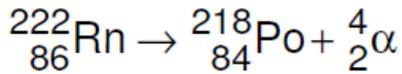


On soustrait à la masse du noyau initial les masses du noyau fils et de la particule  $\alpha$ . On obtient alors un **défaut de masse** qui sera emporté sous forme **d'énergie cinétique** par la particule  $\alpha$  formée :

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

**Exemple**

Le Radon se transforme en Polonium



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

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

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

L'énergie disponible par cette réaction est donc de **5,6 MeV**

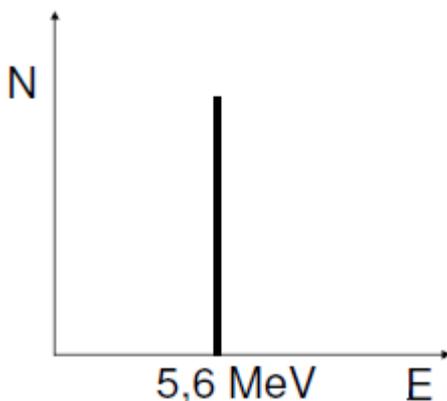
**Spectre d'énergie**

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

- \* 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 revanche le noyau Y va emporter très peu, voire aucune 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,

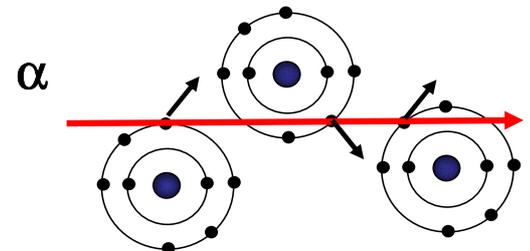
On se rend compte qu'on obtient un spectre de raie caractéristique de l'émission  $\alpha$ .

**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  $\alpha$ .



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

### III. Les transformations isobariques

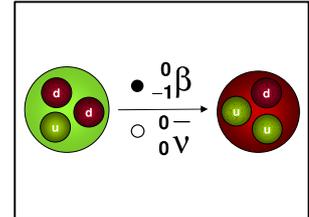
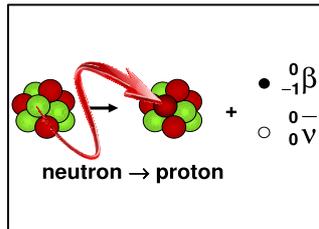
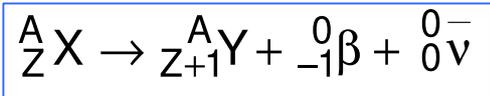
Transformation à nombre de masse A et nombre de charge constant  
 Seul Z donc le nombre de protons et neutrons change  
 On aboutit à un nouvel élément  
 Il y a évolution vers une masse minimale

#### Désintégration β<sup>-</sup>

Elle est due à un déséquilibre avec excès de neutron dans le noyau qui est remplacé par un proton

#### Réaction de désintégration

Transformation β<sup>-</sup> d'un noyau X :



Le neutron se transforme en proton et cette transformation émet une **particule β<sup>-</sup>** (ou électron e<sup>-</sup>) et un **antineutrino** (charge nulle et masse négligeable).



La transformation d'un neutron en proton est due à l'inversion d'un quark (down vers up)

#### 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 X et la masse de l'atome fils Y :

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

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

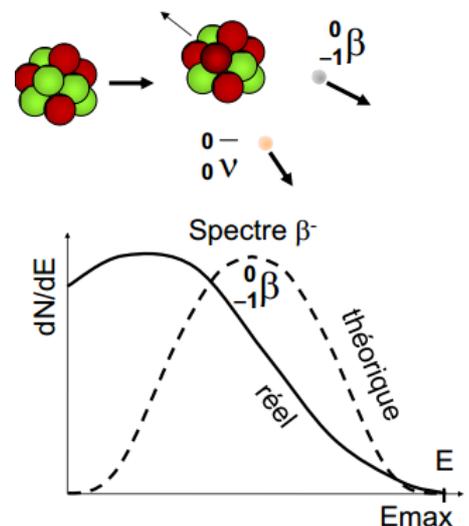
$$\Delta M = M(A, Z) - M(A, Z+1)$$

#### Spectre d'énergie

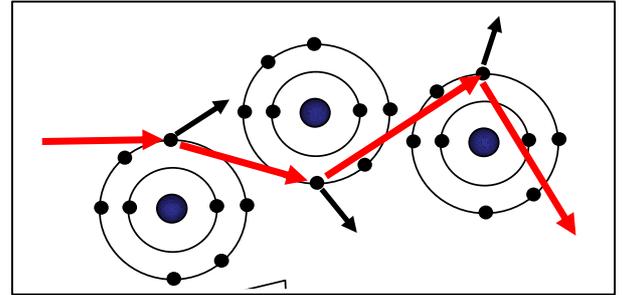
**L'énergie disponible** :  $E_d = E_c(\text{recul}) + E_c(\beta^-) + E_c(\nu)$

L'énergie disponible issue de la réaction correspond au défaut de masse, elle se répartie en énergie cinétique de recul pour le noyau fils (quasi nulle du à sa masse), pour l'électron et l'antineutrino (partage aléatoire de l'énergie entre β<sup>-</sup> et ν entre 0 et E<sub>max</sub>)

Seule la particule β<sup>-</sup> est détectable et apparait sous forme de spectre continu



**Particules  $\beta^-$**  : avec une vitesse proche de celle de la lumière (0.9c) ce sont des **particules relativistes** pour la plupart. Ces particules sont chargées et **interagissent donc obligatoirement avec la matière** et provoquent des **ionisations et excitation**. Leur **parcours est non rectiligne** et leur **portée est millimétrique**.

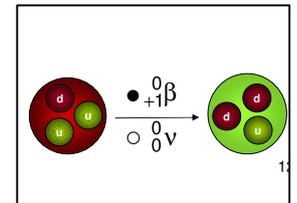
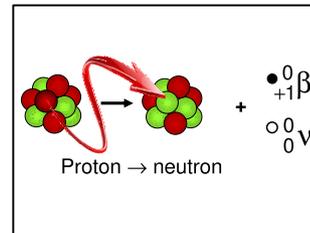
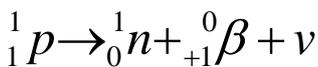
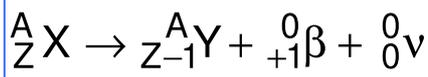


## Désintégration $\beta^+$

Elle est due à un déséquilibre avec excès de **proton dans le noyau qui est remplacé par un neutron**

### Réaction de désintégration

Le proton se transforme en neutron et cette transformation émet une **particule  $\beta^+$**  (ou positon, antimatière de l'électron) et un **neutrino  $\nu$**  (charge nulle et masse négligeable). De même, on a ici une inversion de quark, de up en down transformant proton en neutron.



### Bilan masse énergie

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 :

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

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

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

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

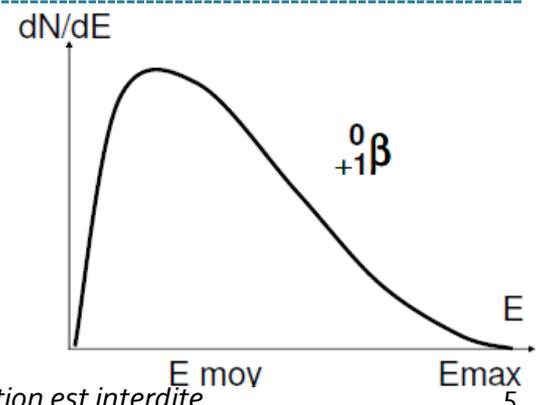
Ainsi cette réaction est à seuil, elle ne peut pas se faire si l'énergie libérée est inférieure à 2 fois la masse d'un électron c'est-à-dire que **l'énergie de la réaction doit être supérieure 1.022 MeV**.

Si elle est inférieure la désintégration se fera par **capture électronique**.

### Spectre d'énergie.

L'énergie se répartit entre les trois particules formées : le **noyau (recoil = négligeable)** le **positon** et le **neutrino**. L'énergie est donc répartie aléatoirement entre la **particule  $\beta^+$**  et le **neutrino**.

**Seule la particule  $\beta^+$  est détectable et apparaît sous forme de spectre continu**

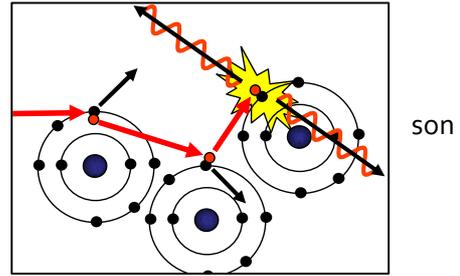


**Parcours dans la matière**

**Le positon** a une grande énergie cinétique et une portée courte

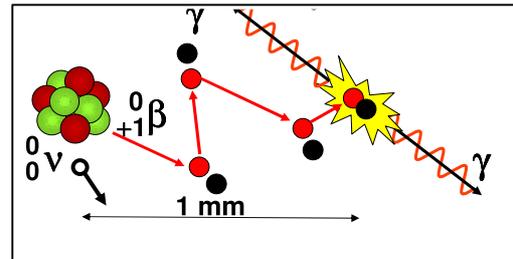
Il peut soit :

- Rentrer en collision avec l'électron jusqu'à épuisement de énergie
- Réagir particule/antiparticule avec l'électron : réaction d'annihilation avec émission de 2 photon à 180°



La réaction d'annihilation produit 2 photons gammas d'énergie équivalent à la masse d'un électron (0.511 Mev)

Les photons gamma interagissent de façon non obligatoire avec la matière et sont **atténués par le plomb ou le béton**

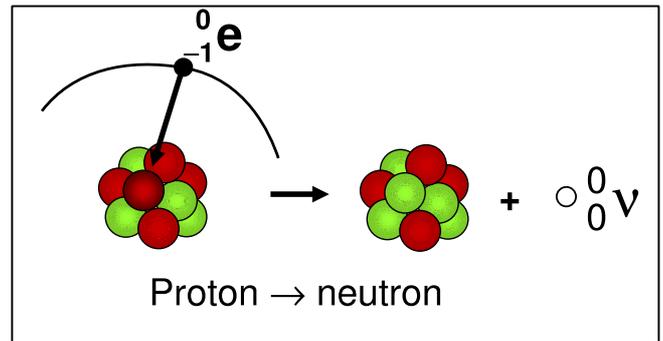
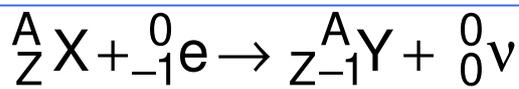
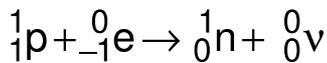


**Désintégration par capture électronique**

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

**Réaction de désintégration**

Le noyau, trop riche en proton, capte un électron de la couche k le plus souvent :



Du à la perte d'un électron, l'atome subira un réarrangement électronique entrainant la création d'un photon de fluorescence ou d'un électron Auger

**Bilan masse énergie**

**Le défaut de masse :**

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

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

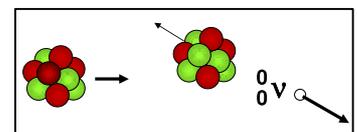
Pour les noyaux instables en excès de protons, les **désintégrations β<sup>+</sup> et CE** sont possibles.

- \* Au-dessous du seuil de 1.022 MeV, seule la capture électronique sera possible.
- \* Au-dessus de ce seuil et si le défaut de masse est supérieur à |W<sub>k</sub>| les 2 sont en compétition

**Specre d'énergie**

L'énergie de la réaction est répartie entre :

- Le noyau (recul négligeable)
- Le neutrino (indétectable il prend toute l'énergie) :  $E_{\text{neutrino}} = E_d - |W_k|$



Il n'y a pas de spectre d'origine nucléaire détectable

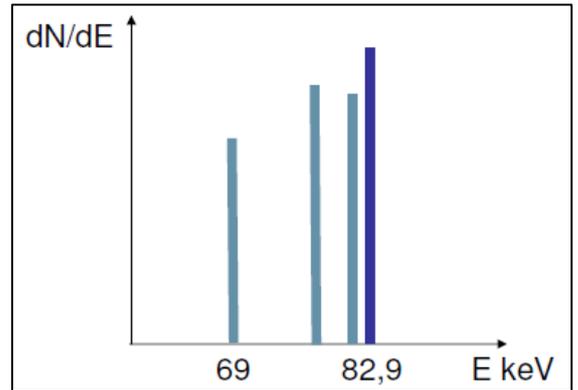
Les réarrangements électroniques vont néanmoins être responsables d'un **specre atomique de raie**

**Exemple**



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

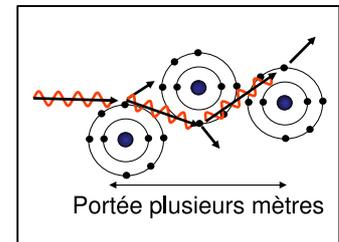


**Parcours dans la matière**

Le neutrino ne provoque pas d'interaction (indétectable)

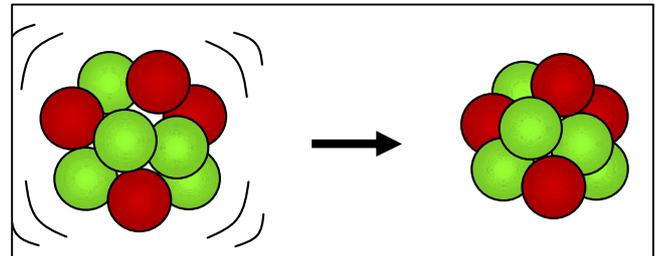
**Les photons** émis indirectement interagissent avec la matière.

Ils ont une longue portée (plusieurs m) et seront **atténués** par du **plomb** ou du **béton**.



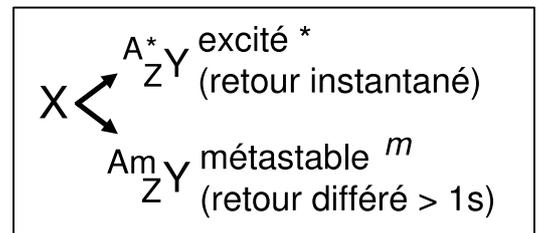
**Les transformations isomériques.**

**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.

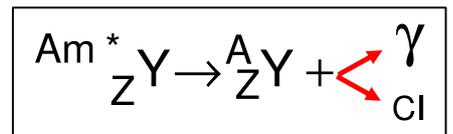


Il a 2 possibilités suite au départ de la particule

- \* 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



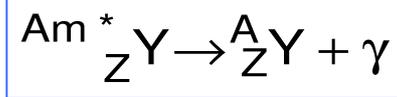
Lors du retour à l'état stable du noyau, l'excès d'énergie est libéré grâce à l'émission d'un **photon  $\gamma$**  ou grâce à un phénomène de **conversion interne (CI)**.



## 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** :

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

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

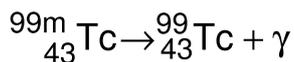
$$E_d = E_\gamma = \Delta M \times 931,5$$

## 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 uniquement.

On a un **spectre électromagnétique nucléaire de raie**

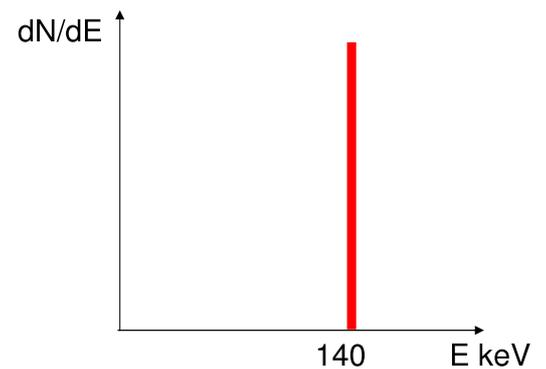
### Exemple du Technétium



On donne les masses:  $M(99m, 43) = 98,90655$  ;  $M(99, 43) = 98,90640$

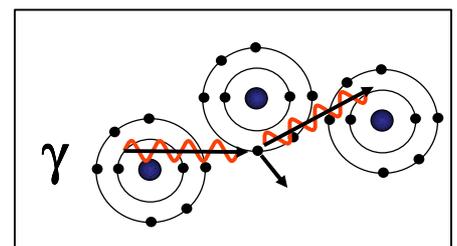
$$\Delta M = 98,90655 - 98,90640 = 0,00015 \text{ u}$$

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



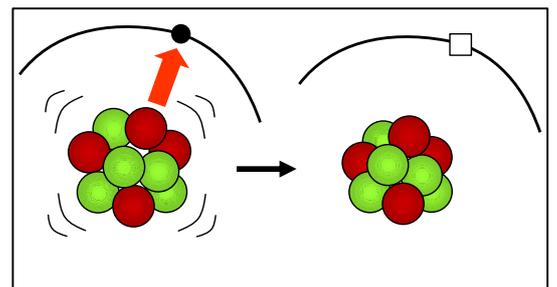
## Parcours dans la matière

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.

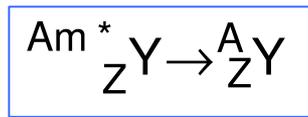


## Conversion interne

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**.



**La réaction de désintégration :**



**Le défaut de masse :**

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

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

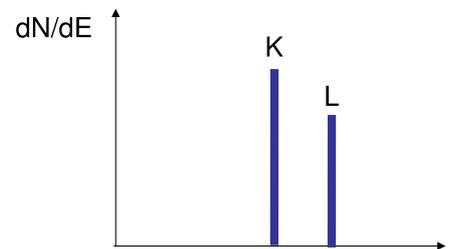
On déduit :

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

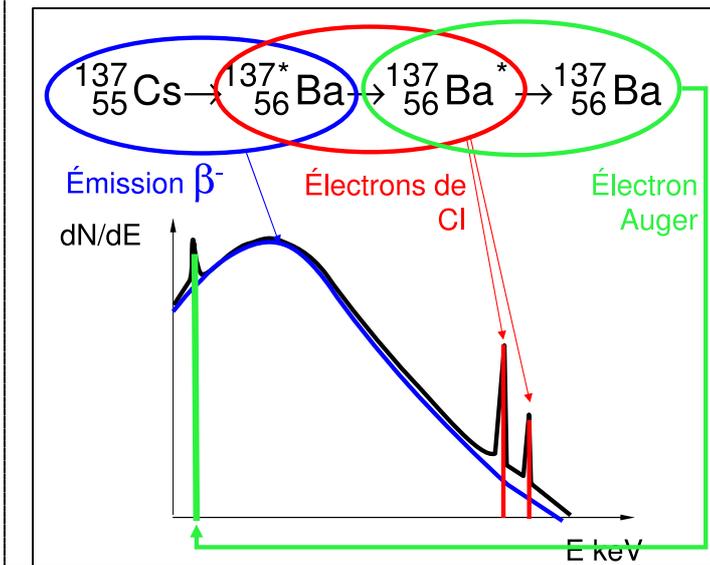
**Spectre d'énergie**

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.

**Bon courage pour cette année !  
 L'UE3a est avec vous !**