

# Cours 4

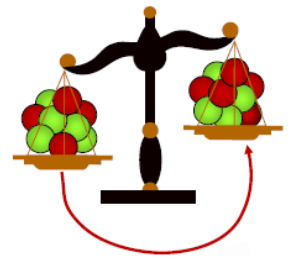
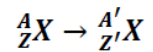
## Les transformations radioactives



### I. Généralités

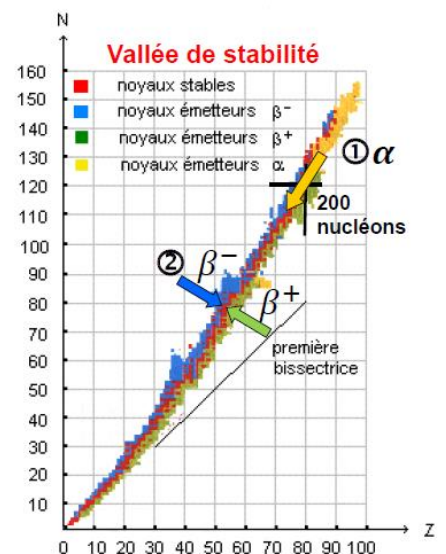
#### A. Définition

- Une **transformation radioactive** est une mutation (ou désintégration spontanée) d'un noyau atomique : un noyau père **instable** se transforme en un noyau fils de moindre masse.
- Cette **perte de masse** correspond à un gain d'énergie de liaison  $E_L \rightarrow$  libération d'énergie  $\rightarrow$  émission d'une particule ou d'un photon : c'est la **radioactivité**.
- Parmi les noyaux **naturels**, 274 sont **stables** et 51 sont **radioactifs**. Cette radioactivité naturelle est partout : rayonnements cosmiques, radioactivité tellurique, l'eau, les aliments, mais aussi le corps humain.
- Il existe également de nombreux noyaux radioactifs **artificiels**.



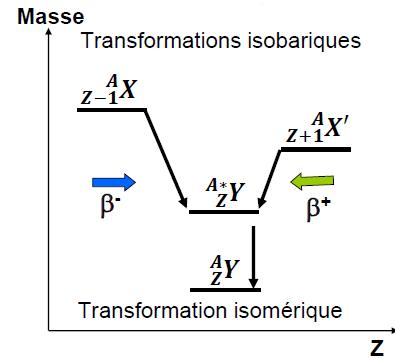
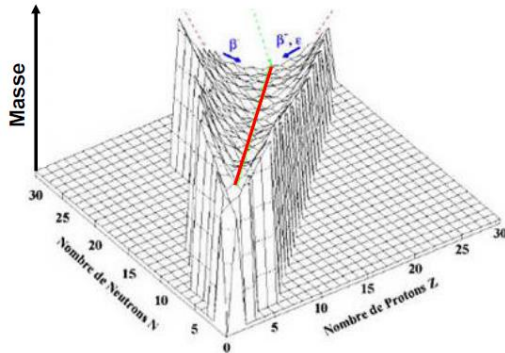
#### B. Classification

- Les noyaux radioactifs instables vont se transformer en noyaux stables. Il existe **3 types** de transformations radioactives :
  - **L'émission  $\alpha$**  = partition d'un noyau lourd ( $A > 200$  nucléons)
  - Les **transformations isobariques**, avec  $A = \text{constante}$  : en cas d'excès de neutrons ou de protons, transformation d'un neutron en proton (émission  $\beta^-$ ) ou inversement (émission  $\beta^+$ ).
  - Les **transformations isomériques** (comme l'émission  $\gamma$ ) : modification de l'énergie du noyau par désexcitation.



### C. Évolution vers une masse inférieure

- Lors des transformations radioactives, il y a toujours une **diminution de la masse** de l'élément concerné → augmentation de l' $E_L$  → **stabilité** maximale du noyau.
- L'illustration de la **vallée de stabilité** (cf photo à gauche ci-dessous) prouve que, pour un même nombre de nucléons, les noyaux les plus stables sont ceux qui ont la masse la plus faible.


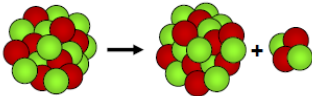


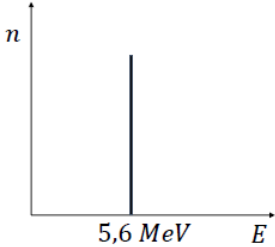
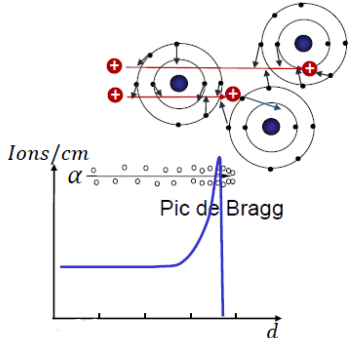

### D. Lois de conservation (+++)

1. Conservation du nombre de **nucléons** (A) et du nombre de **charges** (Z).
2. Conservation de l'**énergie totale** du système.
3. Conservation de la **quantité de mouvement** ( $p = mv$ ).

/!\ ATTENTION : La masse totale ne se conserve **pas** (+++).

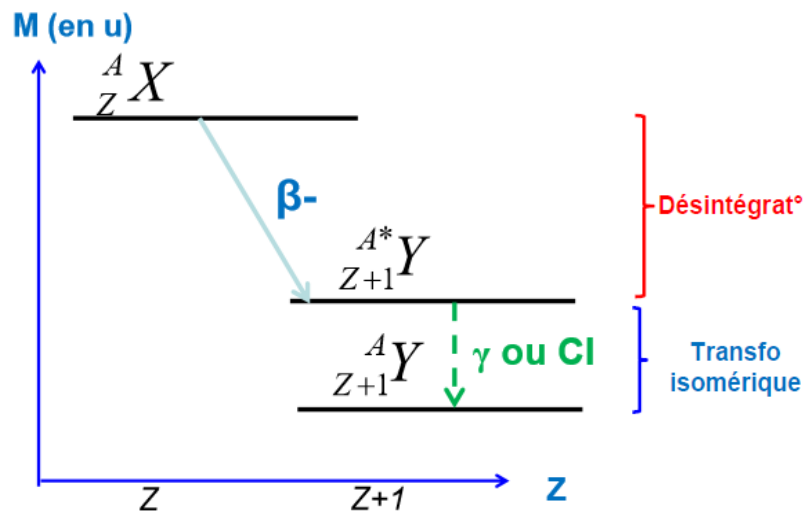
## II. Radioactivité alpha ( $\alpha$ )

<p><b>Généralités</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Un noyau père <b>lourd</b> (<math>A &gt; 200</math> nucléons) se désintègre en un noyau fils plus léger avec émission d'une particule <math>\alpha</math>.</li> <li>- Particule <math>\alpha</math> = noyau <b>d'Hélium</b> (<math>2p + 2n</math>). C'est le seul noyau complexe émis spontanément, car il est particulièrement <b>stable</b> : <math>E_L/A = 7</math> MeV/nucléon.</li> </ul> 
<p><b>Réaction de désintégration</b> (+++)</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> <math display="block">\frac{A}{Z}X \rightarrow \frac{A-4}{Z-2}Y + \frac{4}{2}\alpha</math> </div>  <p>→ Z change : Y, l'élément fils, est donc un <b>nouvel élément</b> (<math>\neq</math> de X, le noyau père).</p>

<p><b>Bilan masse-énergie</b> <b>(++)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le défaut de masse est : <math display="block">\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A - 4, Z - 2) - \mathcal{M}(4, 2)</math></li> <li>- L'énergie disponible est : <math>E_d [\text{MeV}] = 931,5 \times \Delta M [\text{u}]</math>.</li> </ul>
<p><b>Spectre énergétique</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'énergie disponible est libérée sous forme d'énergie cinétique (<math>E_c</math>), partagée entre les noyaux formés.</li> <li>- La particule <math>\alpha</math> étant beaucoup plus légère que <math>\gamma</math>, elle emporte presque toute l'énergie sous la forme d'<math>E_c \rightarrow</math> spectre de raie (<math>E_c</math> est entre 4 et 10 MeV).</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>NB</b> : en réalité, le noyau fils emporte un peu d'énergie, c'est « l'<math>E_c</math> de recul », mais elle est négligeable.</li> </ul>
<p><b>Parcours dans la matière</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La particule <math>\alpha</math> est <b>lourde</b> et <b>chargée</b>, sa vitesse est faible (non relativiste) <math>\rightarrow</math> trajectoire <b>rectiligne</b> dans la matière.</li> <li>- Sa charge positive attire les électrons <math>\rightarrow</math> ionisations des atomes, donc <b>effets biologiques</b> importants.</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- Maximum d'ionisations en fin de parcours = <b>pic de Bragg</b>.</li> <li>- Interactions <b>obligatoires</b> avec la matière <math>\rightarrow</math> particules <math>\alpha</math> arrêtées par une feuille de papier.</li> </ul>
<p><b>Applications biomédicales</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <u>Radioprotection</u> : en source externe, <b>aucun danger</b> car les particules <math>\alpha</math> sont arrêtées par la couche cornée de la peau. Si exposition interne : <b>effet radiobiologique important</b> au contact des tissus (ionisations).</li> <li><math>\rightarrow</math> <u>Exemple</u> : l'inhalation du Radon-222, principale source d'irradiation naturelle, expose les poumons à la radioactivité <math>\alpha</math>.</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- <u>Radiothérapie métabolique</u> : effet ionisant à <b>courte distance</b>, permettant la destruction locale des cellules cancéreuses.</li> <li><math>\rightarrow</math> <u>Exemple</u> : l'Actinium-225 dans le traitement des cancers de la prostate métastatiques.</li> </ul>

### III. Diagramme de désintégration (+++)

- C'est une représentation graphique regroupant les principales caractéristiques d'une désintégration radioactive.
- Ordonnée : **masse** des éléments (en u).
- Abscisse : numéro atomique (**Z**) des éléments.
- Segments horizontaux : **niveaux d'énergie**.
- Flèches : **transformations radioactives** ayant lieu.



❖ Exemple (cf diagramme ci-dessus) :


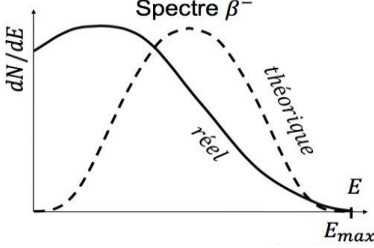
- L'élément père subit une réaction  $\beta^-$  donc il donne un élément fils avec  $Z+1 \rightarrow$  décalage d'une unité vers la droite sur l'axe des abscisses (! si on avait une réaction  $\beta^+$  on aurait  $Z-1$  donc décalage vers la gauche).
- L'élément fils a un excès d'énergie donc il subit une transformation isomérique  $\rightarrow$   $Z$  idem donc on reste sur la même colonne.
- On descend au fur et à mesure car plus les éléments sont stables plus ils sont légers. De même pour les niveaux d'énergie : plus les éléments sont stables et plus leur énergie diminue.
- À la fin de ces réactions, l'élément fils est le plus stable donc c'est le plus léger et le moins énergétique  $\rightarrow$  c'est le plus en bas du diagramme.

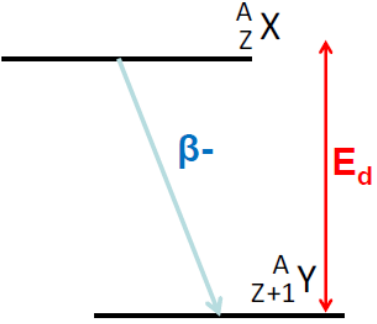
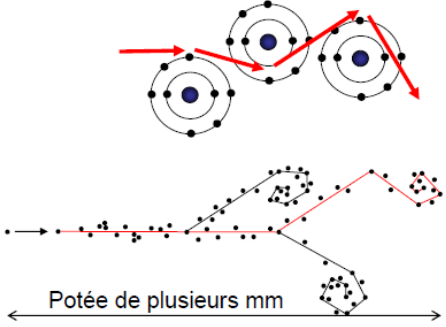
## IV. Transformations isobariques

Ces transformations se produisent sans changement du nombre de masse A. C'est la répartition neutrons/protons qui change → **Z et N changent**, donc élément fils ≠ élément père.


Il existe **3 types** de transformations isobariques :

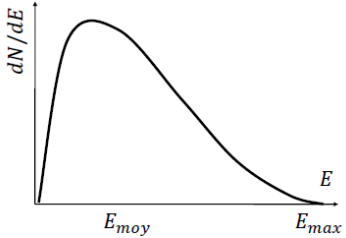
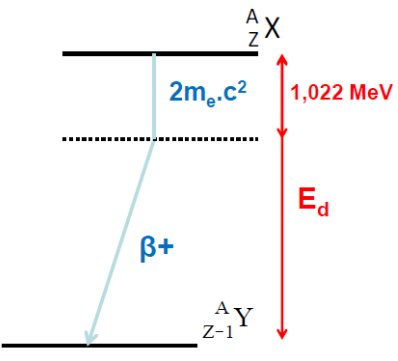
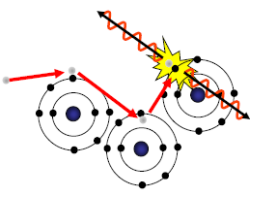
### A. La désintégration β<sup>-</sup>

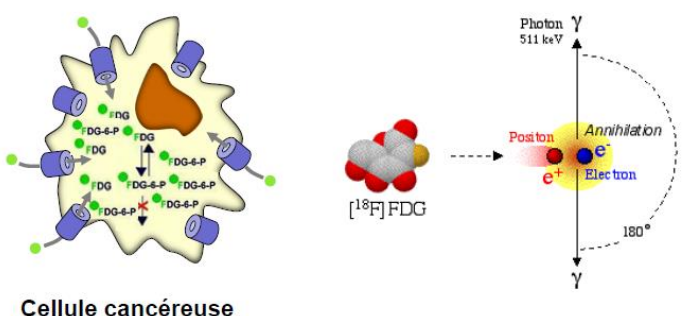
<p><b>Généralités</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Concerne les noyaux ayant un <b>excès de neutrons</b> : transformation d'1 neutron en 1 proton par inversion d'un quark down en un quark up : <math>n = u\bar{d}d \rightarrow p = u\bar{u}d</math>.</li> </ul> ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e + {}^0_0\bar{\nu}$ 
<p><b>Réaction de désintégration (+++)</b></p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> <math display="block">{}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}\beta + {}^0_0\bar{\nu}</math> </div> <ul style="list-style-type: none"> <li>- L'électron naît de la transformation, il ne <b>préexiste pas</b> dans le noyau.</li> <li>- <b>Antineutrino</b> : charge nulle, masse très faible, très pénétrant mais non ionisant, pas un REM.</li> </ul>
<p><b>Bilan masse-énergie (+++)</b></p>	$\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A, Z + 1)$ <p><b>NB</b> : on néglige la masse de l'antineutrino.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- L'énergie disponible est : <math>E_d [\text{MeV}] = 931,5 \times \Delta M [\text{u}] &gt; 0</math> car <math>\mathcal{M}(A, Z) &gt; \mathcal{M}(A, Z+1)</math>.</li> </ul>
<p><b>Spectre énergétique</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'énergie disponible (<math>E_d</math>) se répartit de manière <b>aléatoire</b> entre les 2 particules, sous forme d' <math>E_c \rightarrow</math> spectre <b>continu</b> avec <math>E_{\text{max}} = E_d</math> (++) .</li> </ul> <p>/!\ Seul β<sup>-</sup> est <b>détectable</b> → on parle du spectre de β<sup>-</sup> seulement !</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le noyau fils étant trop lourd par rapport aux autres particules, son « E<sub>c</sub> de recul » est <b>négligeable</b>.</li> </ul> <div style="display: flex; align-items: flex-start;">  <div style="margin-left: 20px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <u>Spectre théorique</u> : va de 0 (cas où ν-bar emporterait toute l'énergie) à E<sub>max</sub> (cas où β<sup>-</sup> emporterait toute l'énergie).</li> <li>- <u>Spectre réel</u> : décalé vers la <b>gauche</b> du fait de l'attraction coulombienne entre β<sup>-</sup> et le noyau.</li> </ul> </div> </div>

<p><b>Schéma de désintégration</b></p>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le noyau fils formé (Y) est stable car il est dans son état fondamental → désintégration <math>\beta^-</math> pure.</li> </ul>
<p><b>Parcours dans la matière</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\beta^-</math> est une particule <b>chargée</b> : elle provoque donc des ionisations par interaction avec des électrons → parcours <b>court</b> (portée = plusieurs mm) et <b>non rectiligne</b>.</li> <li>- Les particules <math>\beta^-</math> sont arrêtées par une feuille de métal.</li> </ul> 
<p><b>Applications biomédicales</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Iode 131</b> (isotope radioactif de l'iode 127) : on l'utilise dans le traitement du <b>cancer thyroïdien</b> différencié et de ses métastases, en l'injectant au patient.</li> <li>→ C'est de la radiothérapie métabolique</li> </ul>

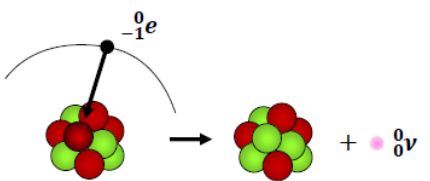
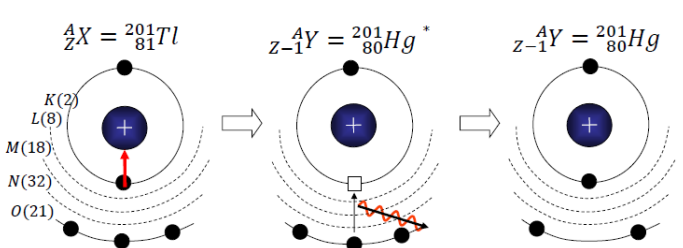
**B. La désintégration  $\beta^+$**

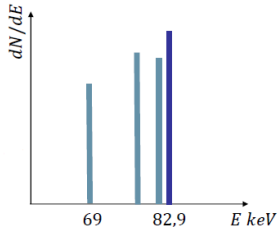
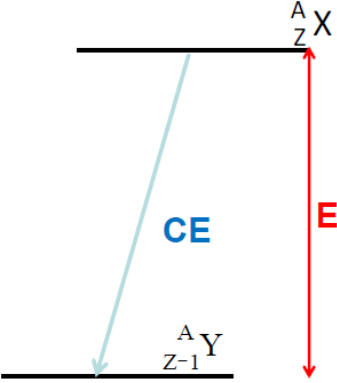
<p><b>Généralités</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Concerne les noyaux ayant un <b>excès de protons</b> : transformation d'1 proton en 1 neutron par inversion d'un quark up en un quark down : <math>n = \underline{u}ud \rightarrow p = \underline{u}dd</math>.</li> </ul> ${}^1_1p \rightarrow {}^1_0n + {}^0_{+1}\beta + {}^0_0\nu$ 
<p><b>Réaction de désintégration</b></p>	${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + {}^0_{+1}\beta + {}^0_0\nu$

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le positon naît de la transformation, il ne <b>préexiste pas</b> dans le noyau. <math>\beta^+</math> est l'antiparticule de l'électron.</li> <li>- <b>Neutrino</b> : charge nulle et masse très faible.</li> </ul>
<p><b>Bilan masse-énergie</b></p>	$\mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A, Z - 1) - 2m_e$ <ul style="list-style-type: none"> <li>- Avec <math>2m_e = 0,0011 \text{ u}</math>.</li> <li>- Énergie disponible : <math>E_d [\text{MeV}] = 931,5 \times \Delta M [\text{u}]</math>.</li> </ul> <p><b>/!\ ATTENTION</b> : La réaction a lieu uniquement si <math>\Delta M &gt; 2m_e</math> soit <math>\Delta M &gt; 0,0011\text{u}</math> ou bien <math>E_d &gt; 1,022 \text{ MeV}</math>. En dessous de ce <b>seuil énergétique</b>, la réaction n'est pas possible ! <b>(QCM +++)</b></p>
<p><b>Spectre énergétique</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'énergie disponible (<math>E_d</math>) se répartit de manière <b>aléatoire</b> entre les particules formées, sous forme d' <math>E_c \rightarrow</math> spectre <b>continu</b> avec <math>E_{\text{max}} = E_d</math>.</li> </ul> <p><b>/!\ Seul <math>\beta^+</math> est détectable</b> <math>\rightarrow</math> on parle du spectre de <math>\beta^+</math> seulement !</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le noyau fils étant trop lourd par rapport aux autres particules, son « <math>E_c</math> de recul » est <b>négligeable</b>.</li> <li>- Le spectre va de 0 (cas où <math>\nu</math> emporterait toute l'énergie) à <math>E_{\text{max}}</math> (cas où <math>\beta^+</math> emporterait toute l'énergie).</li> </ul>  <p><math>\rightarrow</math> <b>Pas</b> de décalage vers la gauche car il n'y a pas d'interaction coulombienne avec le noyau.</p>
<p><b>Schéma de désintégration</b></p>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le noyau fils formé (Y) est dans son <b>état fondamental</b>.</li> </ul>
<p><b>Parcours dans la matière</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La particule <math>\beta^+</math> provoque des <b>ionisations</b> par collision avec les électrons jusqu'à épuisement de l'<math>E_c</math></li> <li>- En fin de parcours (quand <math>E_c \approx 0</math>) : réaction <b>d'annihilation</b> avec un électron libre <math>\rightarrow</math> émission de <b>2 photons <math>\gamma</math> de 511 keV</b>, émis à <b>180°</b> l'un de l'autre.</li> </ul> 

	<p><b>/!\ ATTENTION</b> : les photons <math>\gamma</math> sont ici d'origine <b>indirectement</b> nucléaire (c'est une exception).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Les <b>photons <math>\gamma</math></b> interagissent (interactions non-obligatoires) avec la matière <math>\rightarrow</math> ils ont une portée de plusieurs mètres et sont atténués par du plomb ou du béton</li> </ul>
<p><b>Applications biomédicales</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Radiothérapie</b> : en cancérologie, utilisation du <b>FDG</b> (Fluoro-Deoxy-Glucose) pour détecter les cellules cancéreuses consommant le glucose de manière accrue <math>\rightarrow</math> émission <math>\beta^+</math>, puis détection des photons gamma = TEP (Tomographie par Émission de Positron).</li> </ul>  <p style="text-align: center;"><b>Cellule cancéreuse</b></p>

### C. Capture Électronique (CE)

<p><b>Généralités</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Concerne aussi les noyaux ayant un <b>excès de protons</b> <math>\rightarrow</math> un électron du cortège électronique est capturé par le noyau :</li> </ul> ${}^1_1\text{p} + {}^0_{-1}\text{e} \rightarrow {}^1_0\text{n} + {}^0_0\nu$  <ul style="list-style-type: none"> <li>- L'électron capturé provient d'une <b>couche électronique profonde</b> (souvent de la couche K, car proche du noyau). L'atome père X a alors une vacance électronique <math>\rightarrow</math> <b>réarrangement</b> de l'atome fils Y par des photons de fluorescence et/ou d'électrons Auger (spectre de raies).</li> </ul>  <p><b>/!\ ATTENTION</b> : même finalité que <math>\beta^+</math> (puisque <math>1\text{p} \rightarrow 1\text{n}</math>) mais le moyen est différent !</p>
---------------------------	--

<p><b>Réaction de désintégration</b></p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; display: inline-block;"> <math display="block">{}^A_ZX + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + {}^0_0\nu</math> </div> <ul style="list-style-type: none"> <li>- A constant mais <b>Z change</b> : élément fils Y ≠ du père X.</li> </ul>
<p><b>Bilan masse-énergie</b></p>	$\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A, Z - 1)$ <ul style="list-style-type: none"> <li>- Énergie disponible : <math>E_d [\text{MeV}] = 931,5 \times \Delta M [\text{u}] - E_L</math></li> </ul> <p><b>NB</b> : Il existe un <b>seuil</b> qui correspond à l'énergie de liaison de l'électron capturé mais elle est facilement atteignable (de l'ordre du keV).</p>
<p><b>Spectre énergétique</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Toute l'<math>E_d</math> est emporté par le neutrino → <b>pas</b> de spectre d'origine <b>nucléaire</b> (désintégration discrète) (+++).</li> <li>- Toutefois, il y a un spectre de <b>raies</b> d'origine <b>atomique</b> lié aux réarrangements du noyau fils (+++) → spectre <b>électromagnétique</b> dans le cas d'émission de photons de fluorescence, et spectre <b>électronique</b> suite à l'émission d'électrons Auger.</li> </ul> 
<p><b>Schéma de désintégration</b></p>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le noyau fils formé (Y) est dans son <b>état fondamental</b>.</li> </ul>
<p><b>Parcours dans la matière</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <u>Neutrino</u> : pas d'interaction, indétectable.</li> <li>- <u>Photons de fluorescence</u> émis indirectement → portée de plusieurs mètres ; atténués par du plomb ou du béton par des interactions <b>non-obligatoires</b>.</li> </ul>
<p><b>Applications biomédicales</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Scintigraphie cardiaque</b> au Thallium-201.</li> </ul>

## D. Compétition CE et $\beta^+$ (QCM +++)

Pour les noyaux instables par excès de protons :

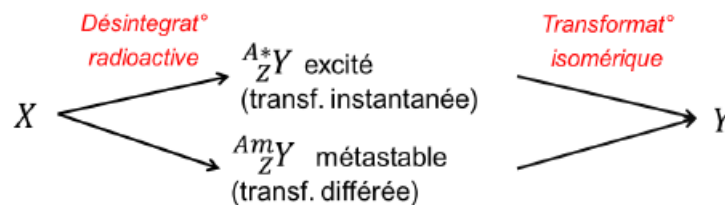
- Si  $E_d < 1,022 \text{ MeV}$  (ou  $\Delta M < 2m_e$ )  $\rightarrow$  **CE seulement.**
- Si  $E_d > 1,022 \text{ MeV}$  (ou  $\Delta M > 2m_e$ )  $\rightarrow$  **CE ou  $\beta^+$  possibles.**

## V. Transformations isomériques

Les **isomères** sont des nucléides ayant le **même Z** et le **même A**, mais sous différents états, qui correspondent à différents niveaux d'énergie du noyau :

- État **fondamental**  ${}^A_ZX$  : niveau d'énergie disponible et masse minimales  $\rightarrow$  **stabilité** maximale.
- État **excité**  ${}^{A*}_ZX$  : noyau très **instable**, retour à l'état fondamental quasi instantanément ( $10^{-12}\text{s}$ )  $\rightarrow$  période radioactive très **courte**.
- État **métastable**  ${}^{Am}_ZX$  : noyau **instable** mais retour à l'état fondamental différé (période radioactive  $> 10^{-12}$  s, elle peut atteindre plusieurs h).

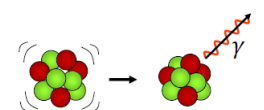
**NB** : La différence entre les états excité et métastable est juste liée à la durée de la période radioactive.

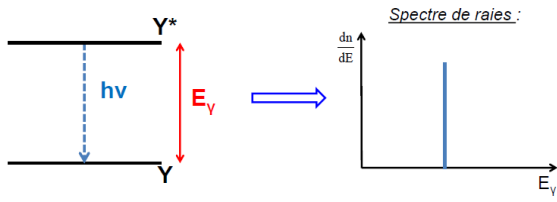
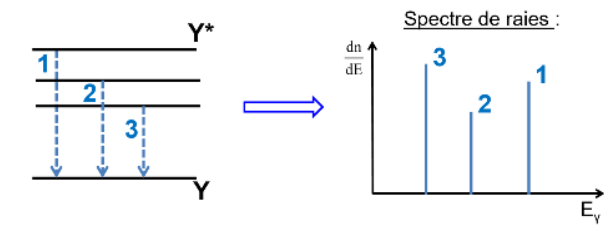
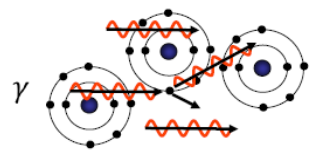


- Les transformations isomériques correspondent à des **changements d'énergie**, sans changement de nature du noyau (car A et Z constants). Elles peuvent succéder à d'autres transformations radioactives ( $\alpha$ ,  $\beta$ , CE) à l'issue desquelles le noyau fils garde un **excédent d'énergie** ( ${}^{Am}$  ou  ${}^{A*}_ZY$ ).
- Il existe **2 transformations isomériques** différentes, permettant de libérer l'excès d'énergie :

### A. La radioactivité $\gamma$

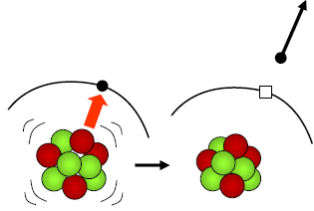
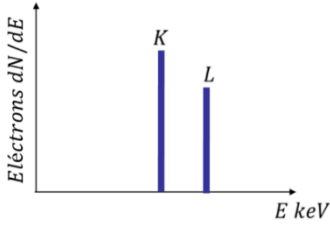
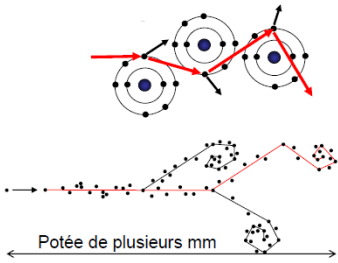
<p><b>Généralités</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le noyau père, excité ou métastable, retourne à l'état fondamental par émission d'un <b>photon <math>\gamma</math></b>.</li> </ul> <p><b>!/ ATTENTION</b> : le photo <math>\gamma</math> est un REM d'origine <b>nucléaire</b> (<math>\neq</math> rayons X qui sont des REM d'origine atomique).</p>
---------------------------	---



<p>Réaction de désintégration</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> <math display="block">A m \text{ ou } {}^*_Z Y \rightarrow \frac{A}{Z} Y + \gamma</math> </div> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Même élément</b> (Y), car Z ne change pas.</li> </ul>
<p>Bilan masse-énergie</p>	$\Delta M = \mathcal{M}(A m, Z) - \mathcal{M}(A, Z)$ <ul style="list-style-type: none"> <li>- Énergie disponible : <math>E_d [\text{MeV}] = 931,5 \times \Delta M [\text{u}] = E_\gamma</math>.</li> </ul>
<p>Spectre énergétique et schéma de désintégration (+++)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Toute l'énergie <math>E_d</math> est emportée par le rayon <math>\gamma</math> (d'où <math>E_d = E_\gamma</math>), car l'énergie de recul du noyau est négligeable → <b>spectre électromagnétique de raie(s) d'origine nucléaire.</b></li> <li>- Il peut y avoir : une seule raie s'il n'existe qu'un seul niveau d'énergie ; ou plusieurs raies si situation complexe avec plusieurs niveaux d'énergie du nucléide excité.</li> </ul> <div style="text-align: center;">  <p>OU</p>  </div>
<p>Parcours dans la matière</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Photons <math>\gamma</math> = <b>non chargés</b> → interaction <b>non-obligatoire</b> avec la matière.</li> <li>- Ils provoquent des <b>ionisations</b> par <b>collisions</b> avec les électrons, entraînant des réarrangements électroniques dans les atomes : effet photo-électrique, diffusion Compton, création de paires.</li> <li>- Les photons <math>\gamma</math> ont un long parcours dans les tissus et sont atténués par une épaisseur de <b>plomb</b> ou de <b>béton</b>.</li> </ul> 
<p>Applications biomédicales</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Radiothérapie métabolique</b> avec l'Iode 131 (cf p.5).</li> <li>- <b>Scintigraphie</b> avec le Technétium 99 métastable, utilisé comme <b>traceur radioactif</b> en médecine nucléaire pour visualiser les voies</li> </ul>

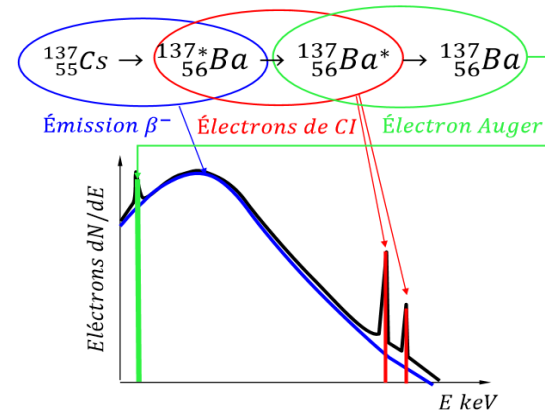
	biologiques du corps humain. → Détection par la <b>gamma caméra</b> .
--	---

## B. La Conversion Interne (CI)

<b>Généralités</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'énergie en excès du noyau excité ou métastable est transmise à un <b>électron</b> de l'atome qui est ionisé.</li> </ul> <p>→ <b>Réarrangements</b> électroniques de l'atome : émission de photons de fluorescence (photons X) et/ou d'électrons Auger.</p> 
<b>Réaction de désintégration</b>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> <math display="block">Am \text{ ou } {}^*_Z Y \rightarrow {}^A_Z Y</math> </div> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Même élément</b> (Y), car Z ne change pas.</li> </ul>
<b>Bilan masse-énergie</b>	$\Delta M = \mathcal{M}(Am, Z) - \mathcal{M}(A, Z)$ <ul style="list-style-type: none"> <li>- Énergie disponible : <math>E_d \text{ [MeV]} = 931,5 \times \Delta M \text{ [u]}</math>.</li> <li>- Énergie cinétique de l'électron éjecté : <math>E_c = E_d - E_L</math> (avec <math>E_L =</math> l'énergie de liaison de l'électron à l'atome).</li> </ul>
<b>Spectre énergétique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'énergie disponible (<math>E_d</math>) est emportée par l'électron du cortège</li> </ul> <p>→ <b>Pas</b> de spectre nucléaire. Mais : un spectre <b>électronique</b> (dû aux électrons Auger) et un spectre <b>électromagnétique</b> (dû aux photons de fluorescence) de <b>raies d'origine atomique</b>.</p> 
<b>Parcours dans la matière</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mêmes effets biologiques que <math>\beta^-</math>.</li> <li>- Les électrons provoquent des <b>ionisations</b> par collisions avec d'autres électrons → parcours <b>court</b> (quelques mm) et <b>non rectiligne</b>.</li> <li>- Les électrons sont arrêtés par une feuille de métal.</li> </ul> 

## VI. Exemple : spectre électronique complet

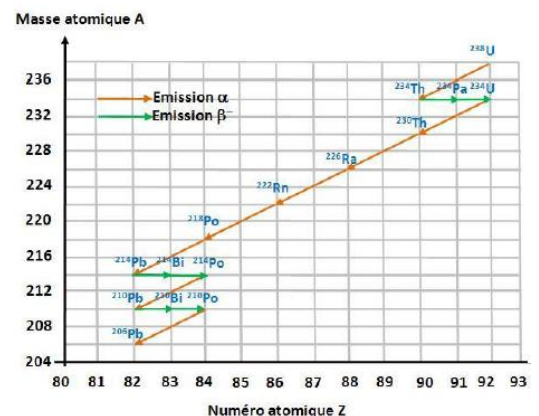
- Souvent dans la réalité, **plusieurs** réactions radioactives s'enchaînent pour que l'élément père retrouve sa **stabilité maximale**, avec passage par des intermédiaires. Le spectre énergétique global qui en résulte est alors une **superposition** des spectres de chaque réaction.
- Exemple de la transformation du Césium 137 en Baryum 137 : le spectre électronique complet est composé d'un spectre **continu** dû à l'émission  $\beta^-$ , associé à un spectre de **raie** pour l'électron de Cl et l'électron Auger.



## VII. Notion de famille radioactive

- Cette notion ne concerne que les éléments **radioactifs naturels** (noyaux lourds).
- Une **famille radioactive** est une suite de nucléides descendant d'un même noyau  $\rightarrow$  on observe une succession de désintégrations avec émission  $\alpha$  et  $\beta^- \pm \gamma$  seulement, jusqu'à atteindre un noyau stable (un des 4 isotopes stables du plomb).
- On distingue **3 familles**, définies par leurs noyaux pères : la famille du  $^{238}\text{U}$ , celle du  $^{235}\text{U}$  et celle de  $^{232}\text{Th}$ .
- La  $\frac{1}{2}$  vie des 3 noyaux pères est de plusieurs milliards d'années, et chaque élément d'une chaîne de désintégration a une durée de vie propre.
- Puisque les désintégrations sont les émissions  $\alpha$  et  $\beta^- \pm \gamma$  uniquement, au sein d'une même famille :
  - **A** baisse de **4 en 4** (dans le cas d'une émission  $\alpha$ ) ou ne **change pas** (cas émission  $\beta^-$ ).
  - **Z** varie de **2** (cas émission  $\alpha$ ) ou de **1** (cas émission  $\beta^-$ ).
- $\rightarrow$  Pour retrouver les éléments d'une même famille on se base sur le nombre de masse A : ils ont donc  $A \pm 4$  (**QCM +++**).

- Exemple descendance de  $^{238}\text{U}$  : 8 émissions  $\alpha$  et 6 émissions  $\beta^-$  pour donner le fils stable  $^{206}\text{Pb}$ . On a bien A qui varie de 4 en 4  $\rightarrow$  leur nombre de masse peut s'écrire sous la forme  $A = 4n + 2$ .
- Exemple du radium 223 : cet élément appartient à la famille de  $^{235}\text{U}$  ( $A = 4n + 3$ ). Analogue du calcium, il est indiqué dans le traitement des métastases osseuses du cancer de la prostate.



Rapide dédi à vous tous, bon courage pour cette année, la team biophy est avec vous !