

# Fiche : Les transformations radioactives

## I- Généralités

Une transformation radioactive est une **mutation ou une désintégration spontanée** d'un noyau. Un noyau père instable se désintègre en noyau fils stable ou instable. Il y a alors une **augmentation de l'énergie de liaison des nucléons et une perte de masse**. L'énergie libérée est emportée par une particule ou un photon.

La radioactivité est un phénomène réel et naturel mais aussi artificiel car nous arrivons aujourd'hui à fabriquer des noyaux radioactifs.

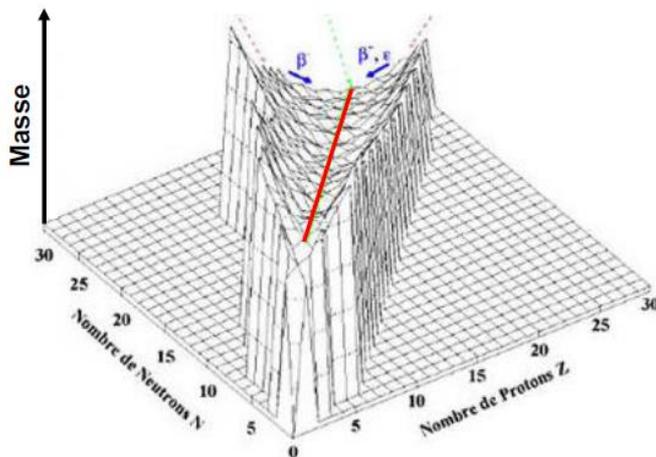
### 1) La classification

Pour classer les transformations radioactives on utilise la **table des nuclides**. On retrouve les noyaux stables sur la ligne rouge, tous les autres sont radioactifs. La ligne rouge ne suit pas exactement la diagonale car pour les noyaux légers ils sont stables s'ils ont autant de protons que de neutrons (sur la diagonale) alors que les noyaux lourds ont besoin de plus de neutrons pour contrer les forces répulsives des neutrons (c'est pour ça qu'ils s'éloignent de la diagonale).

Il y a 3 types de radioactivités :

- **Radioactivité  $\alpha$**  : Pour les **noyaux lourds** (donc plus de 200 nucléons), qui ont un surplus de masse et sont donc instables.
- **Transformations isobariques** (le nombre de nucléon/ de masse est conservé) :
  - à gauche **l'émission  $\beta^-$**  : pour les noyaux avec un excès de neutrons
  - à droite **l'émission  $\beta^+$**  : pour ceux avec un excès de protons
- **Les transformations isomériques** (conservent la nature du noyau) : modifient l'énergie du noyau par désexcitation

## 2) Évolution vers une masse inférieure



La radioactivité s'appuie toujours sur l'évolution vers une masse inférieure et donc l'augmentation de la stabilité. Le terme de vallée se comprend lorsque l'on rajoute une 3<sup>o</sup> dimension : la masse. Les noyaux stables se situent dans le creux de la vallée, ce sont les plus légers.

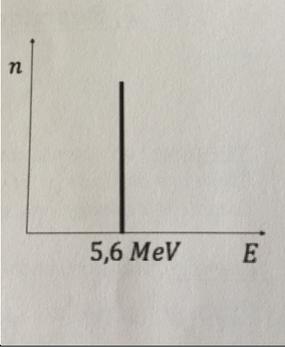
## 3) Les lois de conservations (+++)

Lors d'une transformation radioactive, il y a plusieurs paramètres qui se conservent obligatoirement :

- 1) Le nombre de nucléons et le nombre de charge
- 2) L'énergie totale du système
- 3) La quantité de mouvement (important pour comprendre le spectre énergétique et les applications médicales)

## II- La radioactivité α

<p><b>La radioactivité α</b></p>	<p>Les noyaux pères qui sont <b>lourds</b> (<math>A &gt; 200</math>) se désintègrent en noyaux fils plus stables en émettant une <b>particule α</b></p> <p><u>Particule α</u> = <math>{}^4_2\text{He} = \text{He}^{++} = \alpha = \alpha^{++}</math> = noyau d'hélium</p> <p><u>Rmq</u> : le noyau d'hélium est très stable, il a un pic à 7meV/nucléon c'est le seul qui soit émis spontanément.</p> <p>Les émissions alpha se font souvent en cascade.</p>
<p><b>Réaction de désintégration</b></p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; text-align: center;"> <math display="block">{}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + {}^4_2\alpha</math> </div> <p><b>ATTENTION</b> le noyau père et le noyau fils ne sont pas le même élément (le Z n'est pas le même) !!</p>
<p><b>Bilan masse-énergie</b></p>	<p>Le bilan énergétique ce sera toujours la différence des masses des noyaux entre l'état initial et l'état final. Pour la calculer on utilisera toujours la masse des <b>atomes</b> (car on arrive difficilement à mesurer celle des noyaux)</p> <p><u>Défaut de masse</u> :</p> $\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A - 4, Z - 2) - \mathcal{M}(4, 2)$

	<p><u>Énergie disponible</u> : <math>E_d[MeV] = \Delta M[u] \times 931,5</math></p>
<p><b>Spectre énergétique</b></p>	<p>Comme la quantité de mouvement se conserve, c'est la particule <math>\alpha</math> qui emporte la majorité de l'énergie car le noyau fils a une masse élevée donc il en emporte une partie négligeable.</p> <p>On a donc un spectre de raie. La raie correspond à l'énergie de la particule alpha et donc à l'énergie disponible de la réaction.</p> 
<p><b>Parcours dans la matière</b></p>	<p>Particule <math>\alpha</math> = charge positive <math>\rightarrow</math> interaction <b>avec les électrons</b></p> <p>Elle est <b>directement ionisante</b> donc elle fait de <b>nombreuses interactions obligatoires</b> avec la matière, effets biologiques importants</p> <p>Elle a un parcours <b>très court</b> et une trajectoire <b>rectiligne</b> (car elle est lourde).</p> <p>Elle fait un maximum d'ionisations en fin de parcours : <b>pic de Bragg</b></p>
<p><b>Applications biomédicales</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <u>Radioprotection</u> : en source <b>externe</b>, <b>aucun danger</b> car les particules <math>\alpha</math> sont arrêtées par la <b>couche cornée de la peau</b>. Si exposition <b>interne</b> : <b>effet radiobiologique important</b> au contact des tissus (ionisations).</li> <li><math>\rightarrow</math> <b>Exemple</b> : l'inhalation du Radon-222, principale source d'irradiation naturelle, expose les poumons à la radioactivité <math>\alpha</math>.</li> <li>- <u>Radiothérapie métabolique</u> : effet ionisant à courte distance, permettant la destruction locale des cellules cancéreuses.</li> </ul>

→ Exemple : l'Actinium-225 dans le traitement des cancers de la prostate métastatiques.

### III- Les transformations isobariques

Ces transformations conservent le nombre de masse A mais jouent sur le réarrangement entre les neutrons et protons.

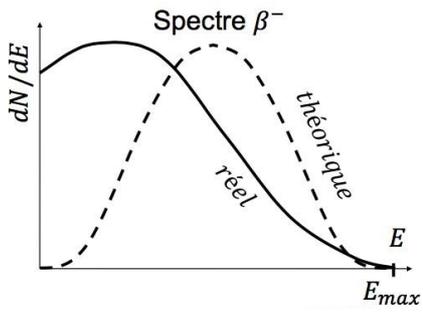
ATTENTION le noyau fils et le noyau père ne sont pas le même élément

#### 1) La désintégration $\beta^-$

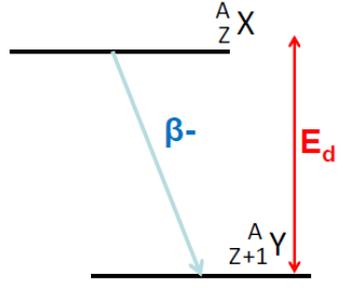
<p>La désintégration <math>\beta^-</math></p>	<p>Elles interviennent lorsqu'il y a un excès de neutrons dans le noyau. Transformation d'1 neutron en 1 proton par inversion d'un quark down en un quark up : neutron = udd <math>\rightarrow</math> proton = uud.</p> 
<p>Réaction de désintégration</p>	<p><u>Dans le noyau</u> :</p> ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e + {}^0_0\bar{\nu}$ <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> <math display="block">{}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}\beta + {}^0_0\bar{\nu}</math> </div> <p><u>Au niveau du nucléide</u> :</p> <p><u>Rmq</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- La particule <math>\beta^-</math> est un électron <b>d'origine NUCLEAIRE</b>, il ne préexiste pas dans le noyau.</li> <li>- L'<b>antineutrino <math>\bar{\nu}</math></b> a une charge et une masse quasi nulles, très pénétrant mais non ionisant, ce n'est pas un REM.</li> </ul>
<p>Bilan masse-énergie</p>	<p><u>Défaut de masse</u> :</p> $\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A, Z + 1)$ <p><u>Énergie disponible</u> :</p> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> <math display="block">E_d[MeV] = \Delta M[u] \times 931,5</math> </div>

**Spectre énergétique**

L'énergie se répartit de manière aléatoire entre l'énergie cinétique de  $\beta^-$  et de l'antineutrino. Or, l'antineutrino est indétectable donc on a un spectre **continu**. En théorie : il va de 0 (cas où l'antineutrino prend toute l'énergie) à  $E_{max}$  (cas où  $\beta^-$  emporte tout). En réalité le spectre est décalé vers la gauche à cause des forces coulombiennes qui maintiennent les  $\beta^-$  peu énergétiques dans le noyau (car noyau positif et négatif).



**Schéma de désintégration**

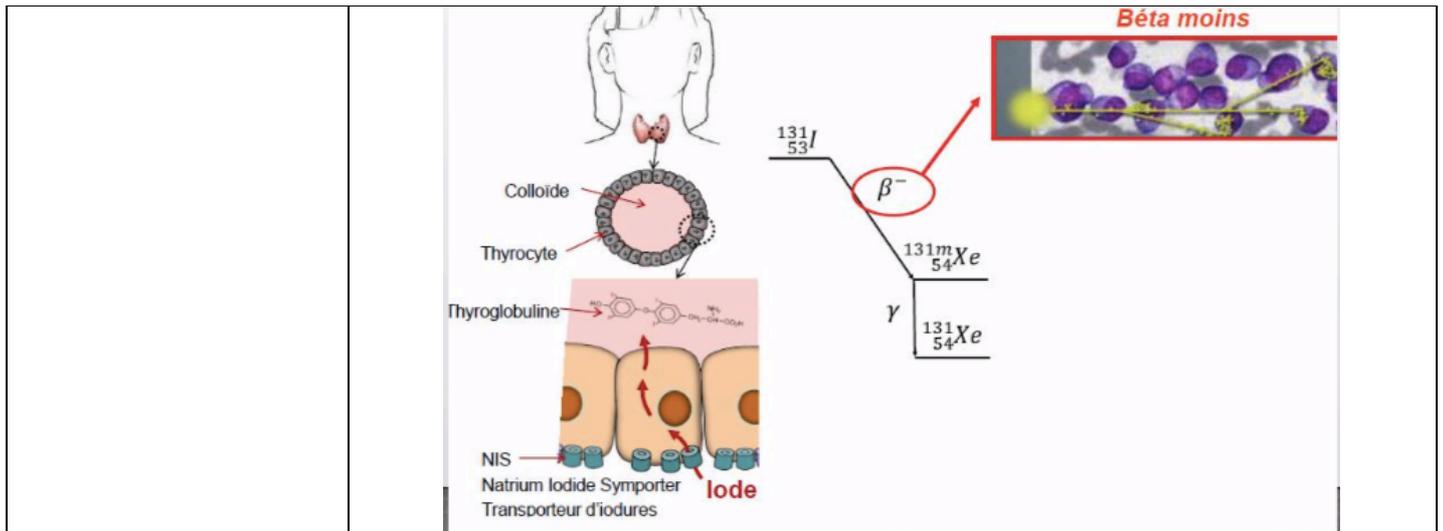


**Parcours dans la matière**

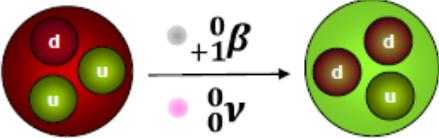
- $\beta^-$  Est une particule chargée  $\rightarrow$  interactions nombreuses avec les électrons
- Provoque de nombreuses ionisations
- Parcours court et irrégulier
- Transfert d'énergie très rapide
- Arrêtés par une feuille de métal

**Applications biomédicales**

On utilise l'iode-131 dans les cancers de la thyroïde en radiothérapie métabolique/vectorisée. Les cellules thyroïdiennes captent l'iode pour synthétiser les hormones thyroïdiennes dans la colloïde. Dans un cas de cancer les cellules sont anormales mais elles continuent de capter l'iode. En injectant l'iode radioactive (iode-131), celle-ci vas se désintégrer selon une transformation de type  $\beta^-$  ce qui provoquera beaucoup d'ionisations et la production de radicaux libres, toxiques pour la cellule cancéreuse.



## 2) La désintégration $\beta^+$

<p>La désintégration <math>\beta^+</math></p>	<p>Elles interviennent lorsqu'il y a un excès de protons dans le noyau. Transformation d'1 proton en 1 neutron par inversion d'un quark up en un quark down : neutron = uud <math>\rightarrow</math> proton = udd</p> 
<p>Réaction de désintégration</p>	<p>Dans le noyau :</p> ${}_1^1p \rightarrow {}_0^1n + {}_{+1}^0\beta + {}_0^0\nu$ <p>Au niveau du nucléide :</p> ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-1}^AY + {}_{+1}^0\beta + {}_0^0\nu$ <p><u>Rmq :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le positon <math>\beta^+</math> est un électron positif qui naît de la transformation radioactive. Il ne préexiste pas dans le noyau. C'est l'antiparticule de l'électron</li> <li>- Le neutrino a une charge et une masse négligeables</li> </ul>
<p>Bilan masse-énergie</p>	<p>Défaut de masse :</p> $M(A, Z) - M(A, Z - 1) - 2m_e$ <p>Énergie disponible :</p> $2m_e = 2 \times 0,00055 = 0,0011u$

Comme on doit soustraire la masse des 2 électrons, l'énergie disponible n'est plus directement proportionnelle au défaut de masse. La transformation radioactive est exoénergétique donc :

$$E_d > 0$$

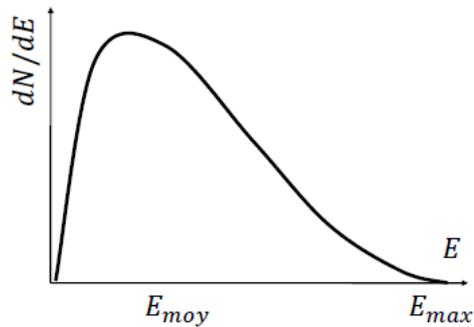
$$\text{donc : } [\mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A, Z - 1)] \times c^2 > 2m_e \times c^2$$

$$\text{or : } 2m_e \times c^2 = 1,022 \text{ MeV}$$

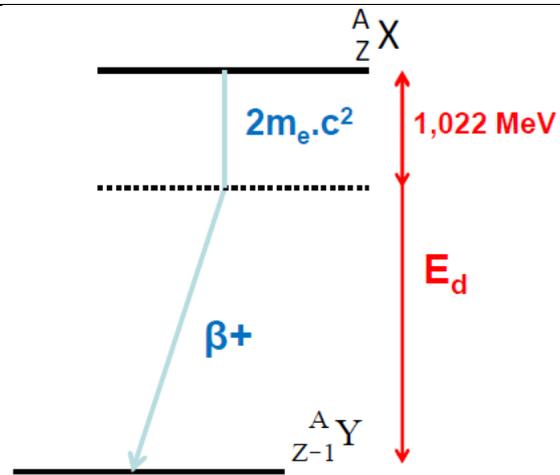
Donc on a un **seuil énergétique de 1,022 MeV ou 1022 keV**.

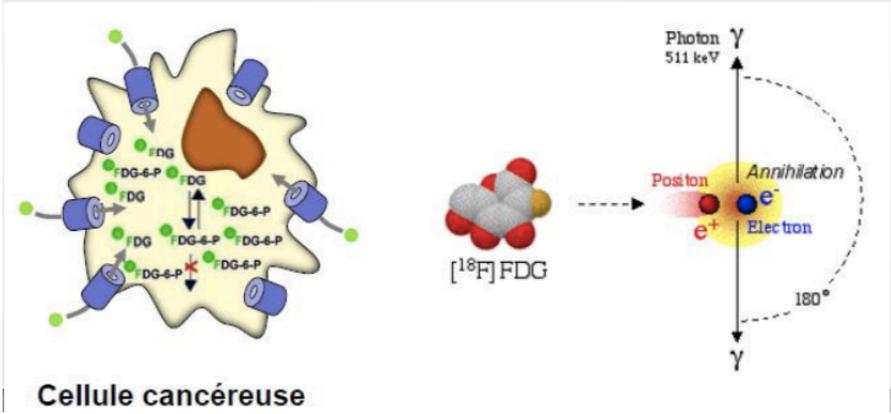
**Spectre énergétique**

L'énergie se répartit de manière aléatoire entre l'énergie cinétique de  $\beta^+$  et du neutrino. Or, le neutrino est indétectable donc on a un spectre **continu**. Il va de 0 (cas où le neutrino prend toute l'énergie) à  $E_{max}$  (cas où  $\beta^+$  emporte tout). **ATTENTION le spectre n'est plus décalé vers la gauche.**



**Schéma de désintégration**

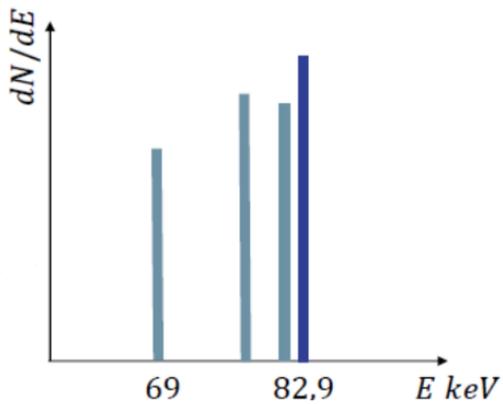
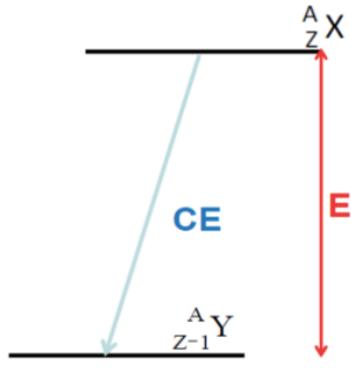


<p>Parcours dans la matière</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le positon est chargé → nombreuses interactions coulombiennes, nombreuses ionisations</li> <li>• Parcours court et sinueux</li> <li>• A l'arrêt le positon va s'annihiler avec un électron négatif. Cela va former 2 photons gamma d'énergie 511 keV chacun émis à 180°</li> </ul> <p><u>Rmq :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- C'est la réaction inverse de la création de paire</li> <li>- Si on additionne l'énergie des deux photons on retrouve le seuil énergétique</li> </ul>
<p>Applications biomédicales</p>	<p><u>Radiothérapie</u> : On utilise le FDG (le fluoro-deoxy-glucose) qui va permettre de détecter les cellules cancéreuses qui détournent le métabolisme énergétique. Il va émettre des <math>\beta^+</math> qui en s'annihilant émettent des photons gamma détectables par TEP (Tomographie par émission de Positron). (pour détecter les cancers)</p>  <p><b>Cellule cancéreuse</b></p>

### 3) Capture électronique CE

<p>La capture électronique</p>	<p>Elle intervient s'il y a un <b>excès de protons</b>. Elle consiste en une capture d'un électron d'une couche profonde du cortège électronique qui va se combiner avec un proton du noyau pour donner un neutron avec émission d'un neutrino. Le noyau fils, ayant une vacance électronique sur sa couche profonde va se réarranger grâce à des émissions de photons de fluorescence ou d'électrons de Auger.</p>
--------------------------------	---

<p>Réaction de désintégration</p>	<p>Dans le noyau :</p> ${}^1_1\text{p} + {}^0_{-1}\text{e} \rightarrow {}^1_0\text{n} + {}^0_0\nu$ <p>Au niveau du nucléide :</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> <math display="block">{}^A_Z\text{X} + {}^0_{-1}\text{e} \rightarrow {}^A_{Z-1}\text{Y} + {}^0_0\nu</math> </div>
<p>Bilan masse-énergie</p>	<p>Défaut de masse :</p> $\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A, Z - 1)$ <p>Énergie disponible :</p> $E_d[\text{MeV}] = \Delta M[\text{u}] \times 931,5 - E_L$ <p>Seuil énergétique de la CE = énergie de liaison de la couche k <math>\approx</math> keV <math>\rightarrow</math> seuil très faible, facilement atteignable</p> <p>La CE et la transformation <math>\beta^+</math> sont <b>en concurrence</b> mais:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- en dessous du seuil de 1022keV, seule CE possible</li> <li>- Au-dessus, concurrence entre les deux</li> <li>- Plus l'énergie est élevée au-dessus du seuil, plus il est probable d'avoir une transformation <math>\beta^+</math></li> </ul>
<p>Spectre énergétique</p>	<p>La CE donne un noyau fils et un neutrino. Toute l'énergie disponible est emportée par le neutrino qui est indétectable donc il n'y a <b>AUCUN spectre nucléaire</b>. Il y a cependant un <b>spectre électronique/ atomique</b> dû aux réarrangements du cortège électronique (photon de fluorescence, électron de Auger). C'est un <b>spectre de raie</b></p> <p>Spectre de raie <b>électromagnétique</b> <math>\rightarrow</math> photon X</p> <p>Spectre de raie <b>électronique</b> <math>\rightarrow</math> Auger</p>

	 <p>A spectrogram showing the differential number of counts per energy interval, <math>dN/dE</math>, on the y-axis, versus energy <math>E</math> in keV on the x-axis. There are four distinct peaks. The first peak is at <math>E = 69</math> keV. The second peak is at <math>E = 82.9</math> keV. The third peak is slightly higher than the second. The fourth peak is the tallest and is located at a higher energy value than the others.</p>
Schéma de désintégration	 <p>An energy level diagram showing two horizontal lines representing energy states. The upper line is labeled <math>{}^A_Z X</math> and the lower line is labeled <math>{}^A_{Z-1} Y</math>. A blue arrow labeled 'CE' points from the upper state to the lower state. A red vertical arrow labeled 'E' indicates the energy difference between the two states.</p>
Application biomédicale	<p>Le thallium 201 se colle sur les cellules myocardiques (=du cœur) et permet de voir s'il le cœur est bien perfusé. Dans un cas pathologique où il y a des plaques d'athérome dans les coronaires, le cœur ne sera pas bien perfusé à l'effort. Le thallium émettant indirectement( par CE) des photons X, permet (grâce une caméra détectant les photons X) s'il y a une bonne perfusion du cœur. Pour cela on même le patient dans une situation d'effort, puis de repos et on compare.</p>

## IV-les transformations isomériques

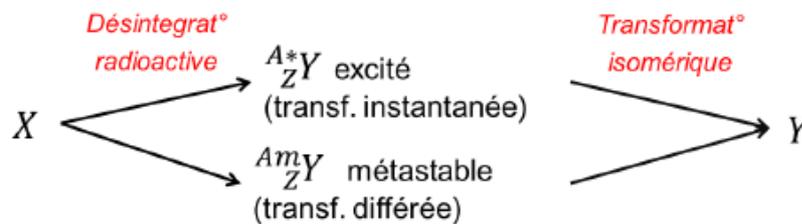
Les isomères sont des nucléides ayant le même Z et le même A, mais sous différents états, qui correspondent à différents niveaux d'énergie du noyau :

- **État fondamental  ${}^A_X$**  : énergie de liaison des nucléons maximale → stabilité maximale ,niveau d'énergie disponible et masse minimales.

- **État excité  $A^*X$**  : énergie disponible supérieure à celle de l'état fondamental. Noyau très instable, retourne à l'état fondamental par une transformation isomérique quasi instantanément → période radioactive très courte  $\approx 10^{-12}$  s période radioactive très courte.
- **État métastable  $A^mX$**  : noyau instable mais retour à l'état fondamental différé (période radioactive plus lente  $> 10^{-12}$  s, elle peut atteindre plusieurs h).

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

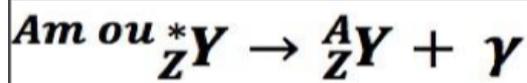
Les transformations isomériques correspondent à des **changements d'énergie, sans changement de nature du noyau** (car A et Z constants). Elles peuvent succéder à d'autres transformations radioactives ( $\alpha$ ,  $\beta$ , CE) à l'issue desquelles le noyau fils est instable (métastable ou excité).



### 1) La radioactivité $\gamma$

<p>La Radioactivité <math>\gamma</math></p>	<p>Le noyau père, excité ou métastable, retourne à l'état fondamental par émission d'un photon <math>\gamma</math>. <b>ATTENTION</b> le photo <math>\gamma</math> est un REM d'origine nucléaire (<math>\neq</math> rayons X d'origine atomique)</p>
---	--

Réaction de désintégration + bilan masse-énergie



Défaut de masse :

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

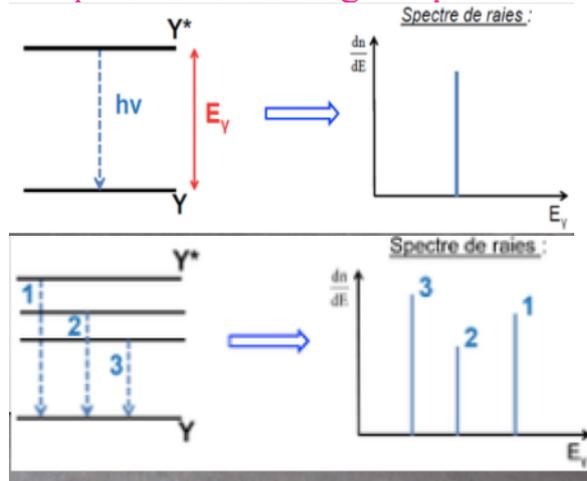
Énergie disponible :

$$E_d [MeV] = \Delta M [u] \times 931,5 = E_\gamma$$

Spectre énergétique + schéma de désintégration

Toute l'énergie est emportée par le gamma (cette énergie correspond à la différence d'énergie entre 2 états isomériques du noyau)

→ Spectre électromagnétique de raies d'origine nucléaire



Il peut y avoir plusieurs raies car il y a plusieurs niveaux d'émissions  $\gamma$  possibles pour un même nucléide excité.

Parcours dans la matière

Photons  $\gamma$  = non chargés → interactions non-obligatoires avec la matière. Ils provoquent des ionisations par collisions avec les électrons, entraînant des réarrangements électroniques dans les atomes : effet photo-électrique, diffusion Compton, création de paires. Les photons  $\gamma$  ont un long parcours dans les tissus et sont atténués par une épaisseur de plomb ou de béton.

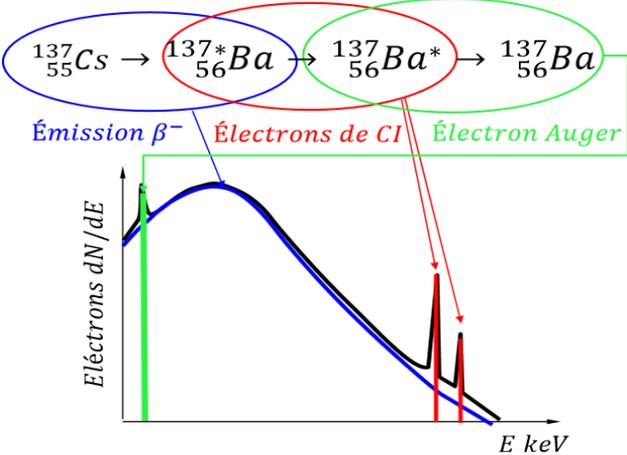
<p>Applications biomédicales</p>	<p>REM utilisés en imagerie scintigraphique permettent de faire une cartographie de la répartition de la radioactivité dans l'organisme:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>Tc^{99m}</math> + globules rouges → image du pouls sanguin avec une gammacamera</li> <li>- <math>Tc^{99m}</math>+ biphosphonate → vision de la synthèse osseuse</li> </ul>
----------------------------------	--

## 2) [La conversion interne CI](#)

<p>La conversion interne</p>	<p>Elle correspond au transfert de l'énergie du noyau à un électron du cortège électronique. Celui-ci est alors expulsé et on retrouve les réarrangements habituels à savoir photons de fluo+ électron Auger</p>
<p>Réaction de désintégration + Bilan masse-énergie</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> <math display="block">A_m \text{ ou } {}^*_Z Y \rightarrow {}^A_Z Y</math> </div> <p>Défaut de masse :</p> $\Delta M = \mathcal{M}(A_m, Z) - \mathcal{M}(A, Z)$ <p>Énergie disponible :</p> $E_d [MeV] = \Delta M [u] \times 931,5$ $E_c = E_d - E_L$
<p>Spectre énergétique</p>	<p>Je vous remets le même schéma que sur le diapo parce que je pense que c'est plus clair comme ça</p> <p>On ne détecte <b>rien d'origine nucléaire</b> puisque rien n'est émis</p>

	<p style="text-align: center;"><b>Spectre d'origine ATOMIQUE</b> (= provenant du cortège électronique)</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p><u>Direct:</u></p> <p>Si on détecte l'électron expulsé: <b>spectre électronique de raie</b></p> <p>⚠️ selon la couche d'où est expulsé l'électron, on a plusieurs raies possibles</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p><u>Indirect:</u></p> <p>Au moment des réarrangements électroniques</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Émission photon de fluorescence: <b>Spectre électromagnétique de raies</b></p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Emission électron de Auger: <b>Spectre électronique de raies</b></p> </div> </div> </div> </div>
<p><b>Parcours dans la matière</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parcours non rectiligne car provoque des ionisations</li> <li>• Parcours court</li> <li>• Mêmes effets biologiques que <math>\beta^-</math></li> </ul>

Un petit exemple du 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.

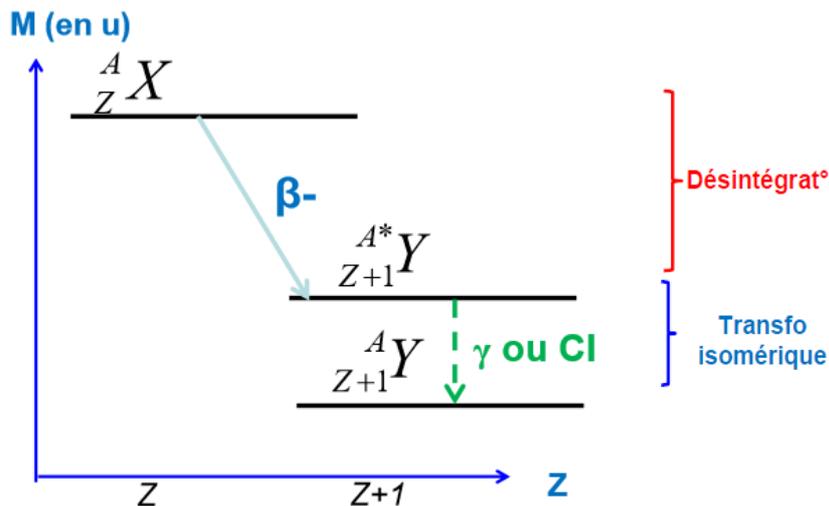
- 1) On a la transformation  $\beta^- \rightarrow$  spectre continu
- 2) On a ensuite la CI avec des pics différents selon la couche où l'électron est expulsé
- 3) Et enfin le spectre de raies électronique pour l'électron de Auger lors des réarrangements électroniques.

Points astuces et méthodo :

- 1) Pour ceux qui n'ont pas compris comment fonctionnait un schéma de désintégration  $\rightarrow$  légende :

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



- 2) ATTENTION aux unités dans les formules de l'énergie disponible, je rappelle :

$$E_d [MeV] = \Delta M [u] \times 931,5 \qquad E_d [J] = \Delta M [kg] \times c^2$$

- 3) Pour retenir que le M calligraphié correspond à la masse des atomes et non pas des noyaux je me disais que l'atome c'est Sa Majesté

donc M calligraphié alors que le noyau c'est un plus petit truc qui se trouve à l'intérieur (je ne sais pas si ça va vous aider ☺)

Petit mot de la fin :

Je n'ai pas mis tous les détails ou toutes les démonstrations/ explications que j'ai pu donner à la TTR parce que je voulais vous faire une fiche pas trop longue... donc essayez de vous rappeler de ce que je vous ai dit ☺ puis si vous avez des questions → forum [Mérylstrips](#). Je sais qu'à la fin de ce cours vous êtes un peu claqués alors j'ai essayé de bien résumer sans rien oublier (même si ça reste long...). J'ai repris la configuration en tableau des années précédentes car je trouvais que c'était bien pour l'apprentissage.

Des bisouuuus de la team Biophyyy