

# Transformations isomériques

## Photon gamma et conversion interne

### I. Généralités sur les transformations isomériques

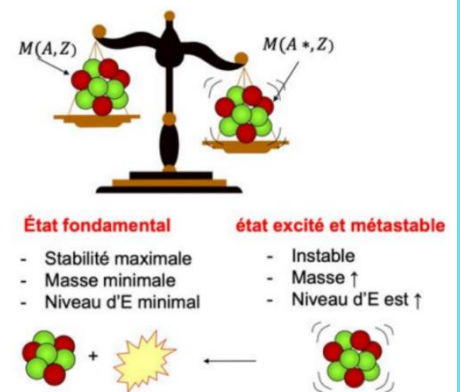
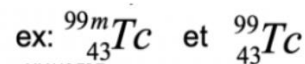
**Def : Isomères** : nucléides avec le **même A et le même Z** (même élément chimique) mais sous différents états correspondants à différents niveaux d'énergie du noyau.

**Il existe 3 états isomériques différents :**

→ État fondamental  ${}^A_ZX$  : présente une **stabilité maximale** (forte énergie de liaison des nucléons et masse minimale). Le niveau d'énergie disponible du noyau est minimal.

→ État excité  ${}^{A*}_ZX$  : l'atome est **perturbé et très instable**. Cet état **fait suite à une 1ère transformation radioactive** +++ c'est donc un état transitoire et temporaire. L'énergie disponible du noyau excité est supérieure à celle de l'état fondamental. Le retour à l'état fondamental se fait en  $10^{-12}s$  par transformation isomérique. **La période radioactive est donc très courte.**

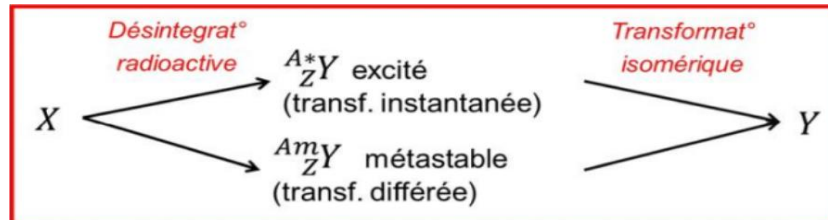
→ État métastable  ${}^{Am}_ZX$  : l'atome est **perturbé et instable**. Cet état **fait suite à une 1ère transformation radioactive** +++ c'est donc un état transitoire et temporaire. Le retour à l'état fondamental se fait en une période supérieure à  $10^{-12}s$ , pouvant atteindre **plusieurs heures** par transformation isomérique.



La différence entre état **excité** et **métastable** est la **rapidité** avec laquelle la transformation isomérique a lieu pour le retour à l'état fondamental.

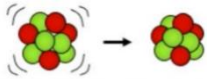
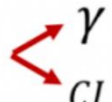
### Processus de transformation isomérique :

Un **noyau père X radioactif** subit une 1ère transformation radioactive (isobarique par exemple) donnant un **noyau fils Y**. On passe d'abord par un **état excité ou un état métastable** en excédent d'énergie avant d'aboutir à un **noyau fils Y stable** par transformation isomérique.



Les transformations isomériques font donc toujours **suite à une 1ère transformation radioactive**. +++

### Ces transformations :

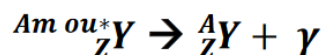
- Se font sans changement de la nature du noyau : composition inchangée des nucléons+++
- Portent sur les niveaux d'énergie des nucléons : ils se réorganisent pour augmenter leur cohérence et leur EL avec **une énergie disponible la plus faible possible** 
- Libèrent l'excès d'énergie de 2 manières : par **émission de photons gamma** ou par **conversion interne (CI)**  $A^m \text{ ou } ^*Y \rightarrow {}^A_Z Y + \begin{matrix} \gamma \\ CI \end{matrix}$  

## II. Emission d'un photon gamma $\gamma$

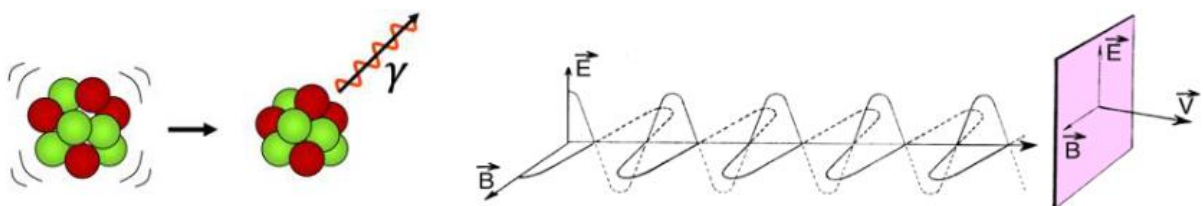
### A. Réaction de désintégration

On utilise préférentiellement le terme de *désexcitation* et non de *transformation* en raison de la conservation de la nature du noyau.

La réaction se note :



Rappel : un photon  $\gamma$  est un **REM** de même nature que les rayons X ; la différence est que les **rayons X** sont d'**origine atomique** (cortège électronique) tandis que les **rayons  $\gamma$**  sont d'**origine nucléaire** +++



## B. Bilan énergétique

$$\begin{array}{c}
 \boxed{{}^A_m\text{ou}^*\text{Y} \rightarrow {}^A_Z\text{Y} + \gamma} \quad \begin{array}{l} M = \text{masse des noyaux} \\ \mathcal{M} = \text{masse des atomes} \end{array} \\
 \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \\
 \Delta M = \underbrace{\mathcal{M}({}^A_m, Z) - Zm_e}_{\text{noyau excité}} - \underbrace{[\mathcal{M}({}^A_Z, Z) - Zm_e]}_{\text{noyau stable}} \\
 \Delta M = \cancel{\mathcal{M}({}^A_m, Z) - Zm_e} - \cancel{\mathcal{M}({}^A_Z, Z) + Zm_e} \\
 \boxed{\Delta M = \mathcal{M}({}^A_m, Z) - \mathcal{M}({}^A_Z, Z)}
 \end{array}$$

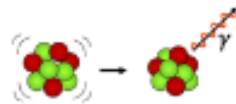
Pour calculer l'énergie délivrée :

$$E_d = \Delta M \times c^2 \quad \text{avec } E \text{ en J ; } M \text{ en kg et } c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$E_d = \Delta M \times 931.5 \quad \text{Avec } E \text{ en MeV ; } M \text{ en u}$$

## C. Spectre énergétique

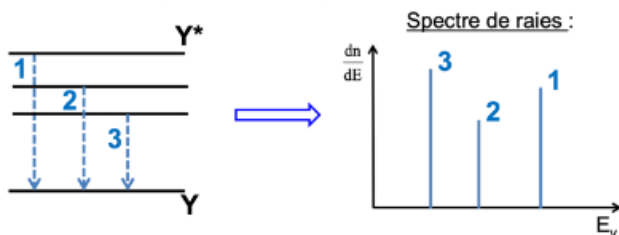
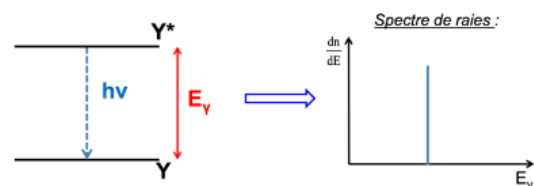
Le **photon  $\gamma$  emporte toute l'énergie** puisque l'énergie cinétique de recul du noyau est **négligeable**.



$$E_\gamma = E_d = \Delta M \times 931.5$$

Le spectre énergétique obtenu est donc un **spectre électromagnétique de raie(s) d'origine nucléaire** +++ car le photon  $\gamma$  a une énergie quantifiée correspondant à la différence d'énergie entre 2 états isomériques d'un noyau.

S'il n'existe qu'un seul niveau d'énergie du nucléide excité, le spectre est composé d'**une unique raie**.



Cependant, dans la plupart des cas, il existe plusieurs niveaux d'énergie pour un nucléide excité : le spectre est donc composé de **plusieurs raies** correspondant à l'émission de **photons  $\gamma$  d'énergies différentes**.

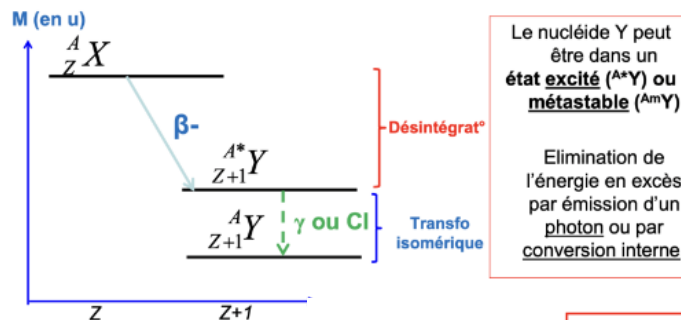
Au plus le niveau d'énergie excité est important, au plus le retour à l'état fondamental libèrera de l'énergie : le **photon  $\gamma$  aura donc une énergie d'autant plus importante**.

## D. Schéma de désintégration

**La transformation isomérique fait toujours suite à une 1ère transformation radioactive**

+++

Ici, la transformation  $\beta^-$  est un exemple :



Exemple : le technétium 99 métastable se désexcite en Technétium 99 par transformation isomérique avec émission d'un photon  $\gamma$  : quelle est son énergie ?

$M({}^{99m}, 43) = 98,90655u$  et

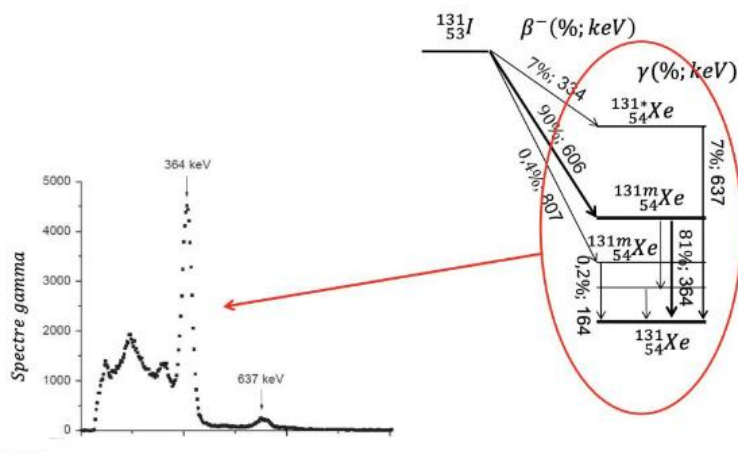
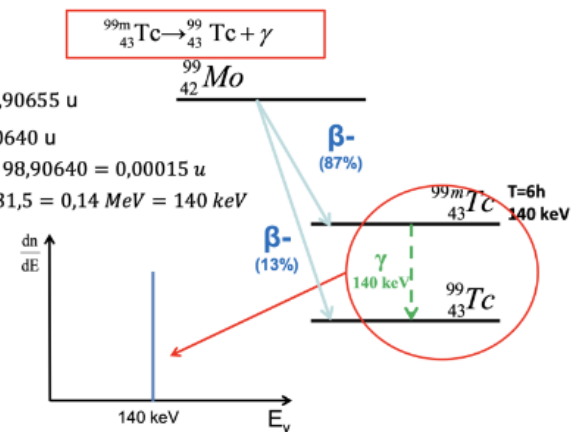
$M({}^{99}, 43) = 98,90640u$ .

$M({}^{99m}, 43) = 98,90655 u$

$M({}^{99}, 43) = 98,90640 u$

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

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



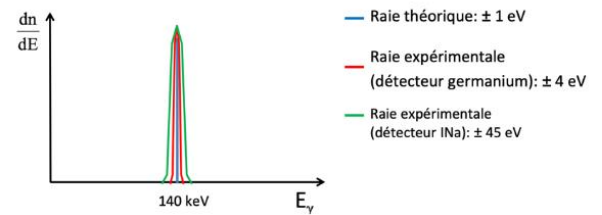
Exemple 2 : Ici l'iode 131 peut se désintégrer par **transformation isobarique  $\beta^-$**  en Xénon aux différents états excités/métastables. Les probabilités de désintégration en Xénon à tel ou tel état excité/métastable sont différentes.

Les transformations isomériques par émission d'un photon  $\gamma$  suivantes permettent la désexcitation du noyau n'ont pas la même probabilité selon l'état d'énergie interne.

Les photons  $\gamma$  émis à partir d'un niveau d'énergie excité important ont une énergie d'autant plus forte.

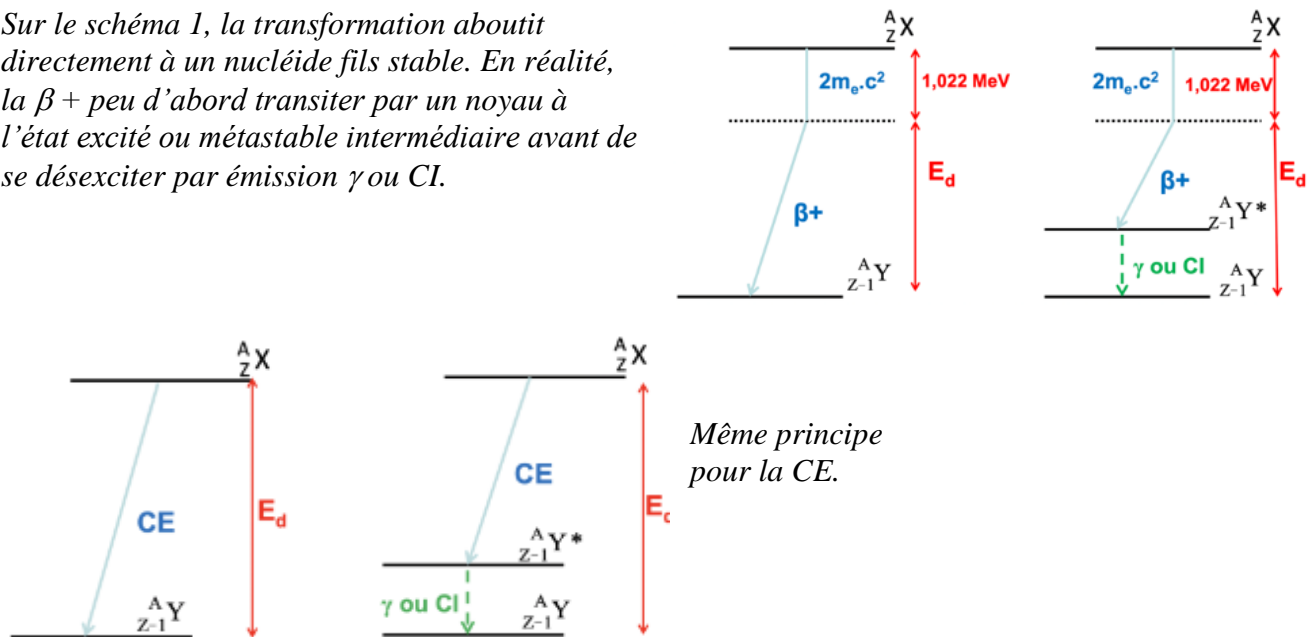
### Pourquoi le spectre de raies a-t-il des raies larges ?

On peut observer des **raies plus larges** en expérimental qu'en théorie car la détection des photons dépend de la qualité des détecteurs : au plus la raie est large, au plus la mesure est imprécise.



Exemple 3 : Le prof reprend le schéma de désintégration  $\beta^+$  abordé dans le dernier cours.

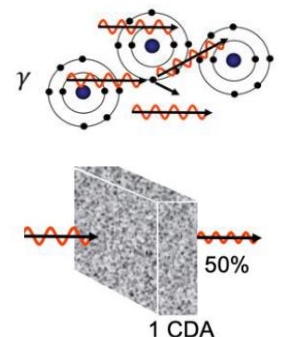
Sur le schéma 1, la transformation aboutit directement à un nucléide fils stable. En réalité, la  $\beta^+$  peut d'abord transiter par un noyau à l'état excité ou métastable intermédiaire avant de se désexciter par émission  $\gamma$  ou CI.



## E. Parcours dans la matière

### Les photons $\gamma$ (normalement c'est des rappels) :

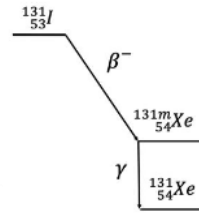
- Interactions **non obligatoires** car non chargées (neutres)
- **Très pénétrants**
- **Ionisations par collision avec les électrons** par effet photoélectrique ou Compton et éventuellement création de paires si rayonnement très énergétiques (seuil de  $1,022 \text{ MeV}$ )
- Atténuation par grandes épaisseurs de **plomb/béton**



## F. Application biomédicales

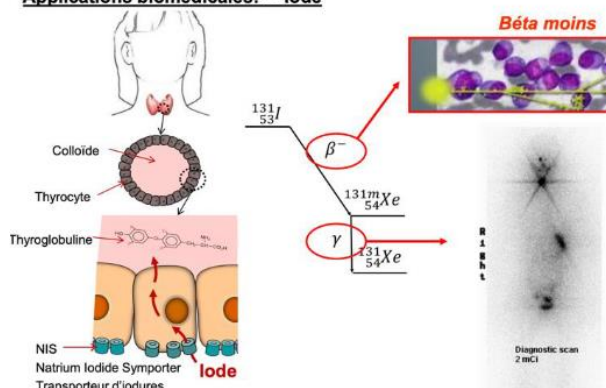
- Iode 131 :

Après **transformation  $\beta^-$  de l'iode 131 en Xénon métastable** dans la thyroïde notamment, ce dernier retourne à l'état fondamental par émission  $\gamma$ . Ces photons sont détectés par une gamma caméra permettant de cartographier la répartition du **Xénon** et donc, **indirectement**, de **l'Iode** dans l'organisme du patient.



$^{131}_{53}\text{I}$  émetteur  $\beta^-$  avec  $E_{\max} = 606 \text{ keV}$  ( $T_{1/2} = 8 \text{ j}$ )  
(isotope radioactif de l'iode stable  $^{127}_{53}\text{I}$ )

### Applications biomédicales: $^{131}\text{I}$



On obtient une image comme ci-contre avec des fixations physiologiques au niveau des glandes salivaires, la paroi de l'estomac, la vessie, mais aussi des fixations pathologiques intenses au niveau de la thyroïde : on a donc une **vérification du diagnostic de cancer de la thyroïde**.

- Technétium 99 métastable :

Issu du Molybdène, il émet un **photon  $\gamma$  par transformation isomérique**.

Le Technétium 99 métastable est beaucoup utilisé en imagerie de scintigraphie afin de former des **traceurs radioactifs** pour visualiser des voies biologiques.

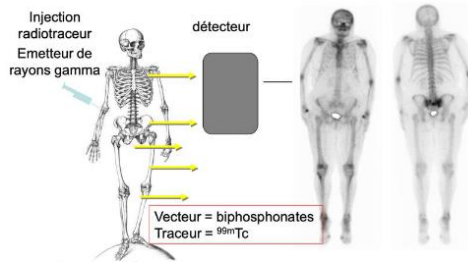
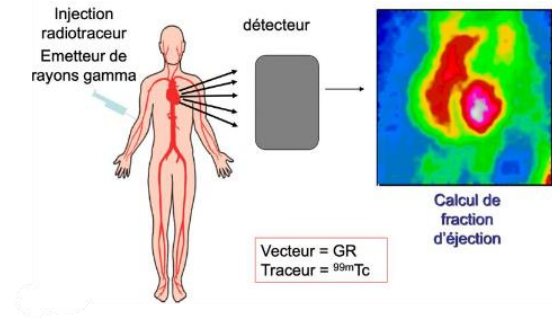
Un radiotraceur est composé :

- **D'un vecteur** : molécule biologique froide (= non radioactive) dont le métabolisme est **spécifique** d'un organe, d'une fonction ou d'une voie biologique d'intérêt
- **D'un marqueur** : atome radioactif (radio isotope), artificiel, **émetteur d'un rayonnement** détectable par les caméras.  
**Ce marqueur est souvent du 99mTc.**



En injectant du  $^{99m}\text{Tc}$  en IV, il va s'associer aux GR et on pourra alors évaluer l'**activité cardiaque** via une image dynamique.

Ici le vecteur est le GR et le marqueur le  $^{99m}\text{Tc}$ .++++



En injectant du  $^{99m}\text{Tc}$  associé aux biphosphonates (molécules ayant une forte affinité pour la matrice osseuse), le couple va se fixer sur les **structures osseuses** du patient.

Cette fixation est hétérogène : plus intense au niveau des zones ayant une forte activité ostéoblastique de remodelage osseux.

Sur la scintigraphie de face, il y a une forte fixation au niveau des articulations, témoin de l'arthrose, mais aussi une fixation intense au niveau du sacrum sur la vue postérieure correspondant à la « cicatrisation » active d'une fracture.

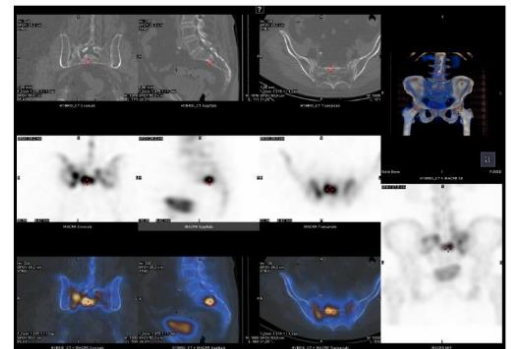
Ici le vecteur est le biphosphonate et le marqueur le  $^{99m}\text{Tc}$ . +++

Ci contre un complément d'imagerie : image scintigraphique en 3D fusionnée avec un scanner.

Scanner seul : 3 images du haut.

Scintigraphie seule : 3 images intermédiaires.

Fusion des 2 : 3 images du bas.

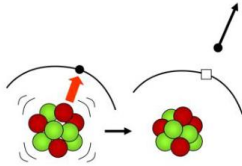
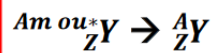


Sur le sacrum il y a une forte fixation du radiotracer correspondant à la fissure de l'os non visible sur le scanner simple car trop fine.

### III. La conversion interne (CI)

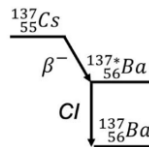
#### A. Réaction de désintégration

La réaction se note :



La particularité de la CI est que l'énergie disponible est transmise à un **électron du cortège** de l'atome qui sera alors **ionisé**, entraînant des réarrangements électroniques par **photon X** et **électrons Auger**.

Exemple : le  $^{137}_{56}\text{Ba}^*$



#### B. Bilan énergétique

$$Am\ ou\ ^*_Z Y \rightarrow ^A_Z Y$$

$M = \text{masse des noyaux}$   
 $\mathcal{M} = \text{masse des atomes}$

$$\Delta M = \underbrace{\mathcal{M}(Am, Z) - Zm_e}_{\text{noyau excité}} - \underbrace{[\mathcal{M}(A, Z) - Zm_e]}_{\text{noyau stable}}$$

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

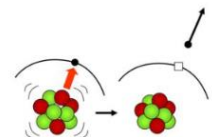
Pour obtenir l'énergie délivrée :

$$E_d = \Delta M \times 931.5$$

Puis pour obtenir l'énergie cinétique de l'électron expulsé :

$$E_c(\text{électron}) = E_d - E_l$$

Energie rendue disponible par la réaction      Energie de liaison



Il ne faut pas oublier de **soustraire l'énergie de liaison de l'électron** expulsé à l'énergie délivrée. Ici on prend l'énergie de liaison au niveau de **l'atome fils**

#### C. Spectre énergétique

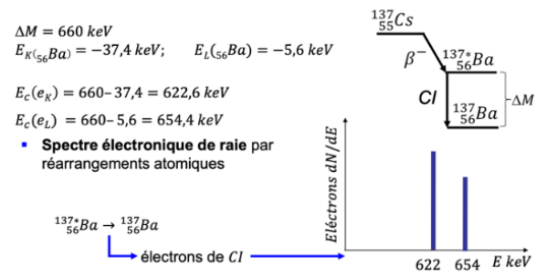
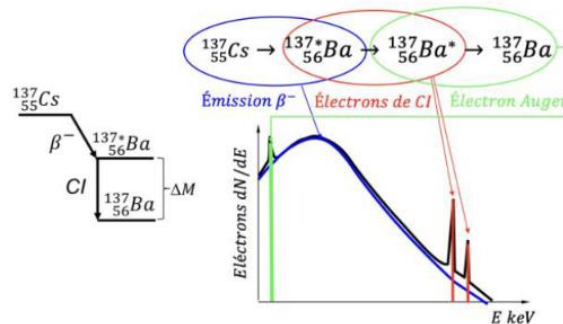
Le spectre énergétique de la **CI** présente plusieurs similitudes avec celui de la **CE** :

- **Absence de spectre d'origine nucléaire** (rien ne provient directement du noyau dans la CI)
- **Spectre d'origine atomique** (= provenant du cortège)
  - Directement : **spectre électronique de raie**, correspondant à l'électron éjecté du cortège et qui emporte tout l'énergie disponible de la CI
  - Indirectement : **spectre de raies électromagnétiques** (réarrangements du cortège par photons X de fluorescence) et/ou électronique (émission d'électrons Auger)



Exemple : Baryum 137 excité

L'énergie délivrée par la CI peut être transférée à un électron de la couche K ou de la couche L de l'atome de Baryum stable : en résultent des électrons aux énergies cinétiques différentes. On obtient un spectre électronique de raies d'origine atomique direct. On aura aussi un spectre de raies électronique et/ou électromagnétique indirect d'origine atomique également.

Spectre électronique complet :D. Parcours dans la matièreL'électron éjecté :

- **Mêmes effets** biologiques que la **particule  $\beta^-$**
- Provoque des ionisations par interaction avec des électrons : **parcours sinueux (non rectiligne)**
- Pénétration de **quelques mm** dans les tissus
- Arrêté par une fine feuille de métal

Dédisssssssss :

- Encore merci à ma mère (je ferai des dédis à ma mère dans chaque fiche pcq'elle le mérite vu ce qu'elle m'a aidée <33333 je t'aime)
- Dédi à mon père et mes frères qui ont été très compréhensifs cette année
- Dédi à mes grands-parents <33333
- Dédi à Sophia, la meilleure personne que j'ai rencontré au lycée (je te l'avais promis celle-là)
- Dédi à JP, tu vas l'avoir cette année, j'en doute pas
- Dédi au tutorat, mes co tut, les tuts et les CT (je vous aime tous) (je liste pas de prénom sinon je sais que je vais en oublier...)
- Dédi à Emilie, trop contente que tu sois ma vielle, t'es la meilleure !
- Dédi à mon chat qui est bcp trop mignonne
- Bien sur dédi à vous cher P1, on sait que cette année est compliquée mais on est là pour vous, vous épauler et vous motiver pour que le jour J, vous puissiez perfect la BIOPHY