

# Les transformations isomériques

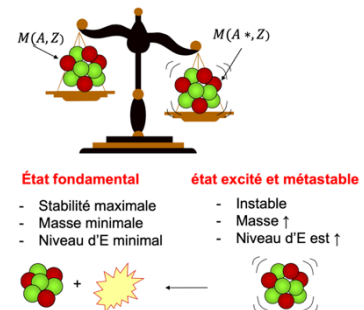
## I - Les différentes formes isomériques d'un même radionucléide



**DEFINITION :** Des isomères sont des nucléides avec un **même nombre A** et **Z** (mêmes éléments chimique) mais sous différents états qui correspondent à **différents niveaux d'énergie** du noyau.

On distingue 3 états isomériques différents ++ :

- L'état **FONDAMENTAL**  $^A\text{X}$  avec une très forte cohésion ( $=E_L$ ) des nucléons entre eux et donc une stabilité maximale, une masse minimale et le niveau d'énergie disponible du noyau est minimal. Il s'agit de l'état que recherche **TOUJOURS** à atteindre un atome.
- L'état **EXCITÉ**  $^{A*}\text{X}$  avec un atome perturbé et très instable. Il s'agit de l'état d'un noyau fils suite à une désintégration radioactive, il est donc transitoire et temporaire. L'énergie disponible du noyau excité est supérieure à celle de l'état fondamental. Le retour à l'état fondamental par une transformation isomérique est **quasiment instantané** ( $\approx 10^{-12}\text{s}$ ), la période radioactive est donc très courte.
- L'état **MÉTASTABLE**  $^{Am}\text{X}$  avec un atome ici aussi perturbé et instable. Il s'agit de l'état d'un noyau fils suite à une désintégration radioactive, il est donc transitoire et temporaire. Le retour à l'état fondamental se fait cette fois ci avec une période radioactive **dépassant les  $10^{-12}\text{s}$** , pouvant même atteindre plusieurs heures.



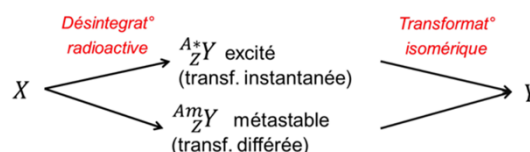
ex:  $^{28}_{14}\text{*Si}$  et  $^{28}_{14}\text{Si}$

ex:  $^{99m}_{43}\text{Tc}$  et  $^{99}_{43}\text{Tc}$

La différence entre un état excité et métastable est seulement la **rapidité avec laquelle il va y avoir une transformation** isomérique afin d'atteindre l'état fondamental ++

L'atome dans un état excité ou métastable va pouvoir subir une transformation isomérique donnant le même élément chimique mais dans son état fondamental avec libération d'énergie.

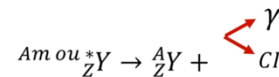
Le processus de la transformation isomérique se traduit comme tel :



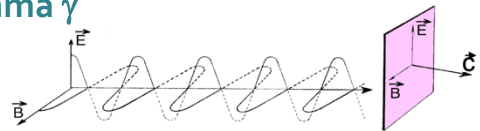
Le noyau père X instable subit une première transformation radioactive qui le transformera en noyau fils Y. Dans le cas où le noyau fils est encore instable, il passe par un état excité ou métastable en **excès d'énergie** puis le noyau deviendra stable grâce à une transformation isomérique. La transformation isomérique fait alors **toujours** suite à une première transformation radioactive.

Ces transformations :

- Se font **sans changement de nature** du noyau puisque la composition des nucléons est inchangée
- Portent sur le **niveau d'énergie** des nucléons : ils se **réorganisent** au sein du noyau afin d'augmenter leur cohérence, dans une configuration avec une énergie de liaison supérieure et une énergie disponible inférieure.
- Libèrent l'excès d'énergie grâce à l'émission d'un **photon gamma** ou un phénomène de **conversion interne**.



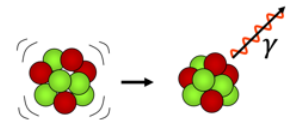
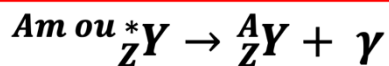
## II - La radioactivité gamma $\gamma$



### A - La réaction de désexcitation

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 :



Un noyau fils Y dans un état excité ou métastable va donner par désexcitation  $\gamma$  un fils Y dans un état fondamental avec l'émission d'un **photon  $\gamma$** .

RAPPEL : Un photon  $\gamma$  est un **rayonnement électromagnétique** de même nature que les rayons X ( $E = h\nu$ ), la seule différence est que les photons  $\gamma$  sont d'origine nucléaire.

### B – Bilan masse-énergie de la réaction

Pour faire le calcul de l'énergie libérée par cette transformation isomérique, on va faire exactement comme avec les transformations isobariques et commencer par calculer la **différence de masse** entre les éléments initiaux et finaux. Le rayon **gamma n'apparaît pas** car il n'a pas de masse.

$$\boxed{{}^A_m\text{ou}^*\text{Y} \rightarrow {}^A_Z\text{Y} + \gamma} \quad \begin{array}{l} M = \text{masse des noyaux} \\ \mathcal{M} = \text{masse des atomes} \end{array}$$

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

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

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

Lors de cette désexcitation, la **différence de masse** des noyaux est égale à la différence de masse des atomes père et fil ++.

Pour l'énergie délivrée, grâce à la loi d'équivalence masse-énergie :

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

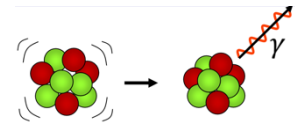
$$E_d = \Delta M \times 931.5 \quad \text{Avec } E \text{ en MeV ; } M \text{ en u}$$

### C – Spectre énergétique

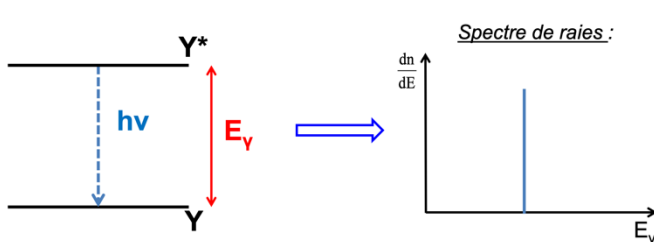
Un **seul photon** est émis au cours de la réaction, le photon  $\gamma$  emporte alors **toute l'énergie** disponible (puisque comme toujours, l'énergie cinétique du noyau fils est négligeable). On peut alors écrire :

$$\boxed{E_\gamma = E_d = \Delta M \times 931.5}$$

(l'énergie de recul du noyau est négligeable)



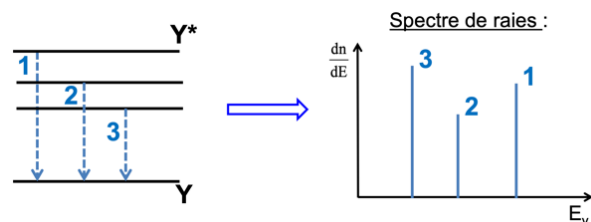
L'énergie de l'émission  $\gamma$  correspond à la différence énergétique entre les deux états isomériques initial et final, le spectre énergétique est alors un spectre **électromagnétique** (puisque les photons  $\gamma$  sont des photons électromagnétiques) de **raie(s)** (puisque on va calculer une énergie quantifiée et bien précise) d'origine **nucléaire** (puisque les photons proviennent du noyau).



Dans ce cas là, on remarque sur le schéma de désexcitation que l'atome père excité  $Y^*$  va revenir à l'état fondamental  $Y$  grâce à une transformation isomérique avec l'émission d'un photon gamma et qu'il ne possède **qu'un seul niveau énergétique**. Ce photon

emporte toute l'énergie  $E$  qui pourra alors être observée sur un **spectre de raie(s)** composé d'une **unique raie**.

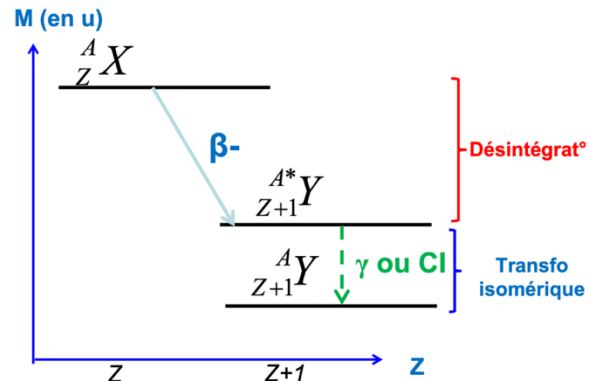
Le plus souvent, il existe **plusieurs niveaux** d'énergie du nucléide excité et donc plusieurs niveaux d'émissions  $\gamma$  possibles. Au plus l'atome est excité (donc au plus il a de l'énergie disponible), au plus il libérera de l'énergie dans le photon  $\gamma$  lors du retour à l'état fondamental.



## D – Schéma de désintégration

Ne pas oublier que les transformations isomériques font **toujours** suite à une première transformation radioactive. C'est ce qui est montré sur ce schéma :

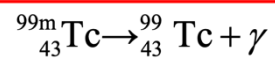
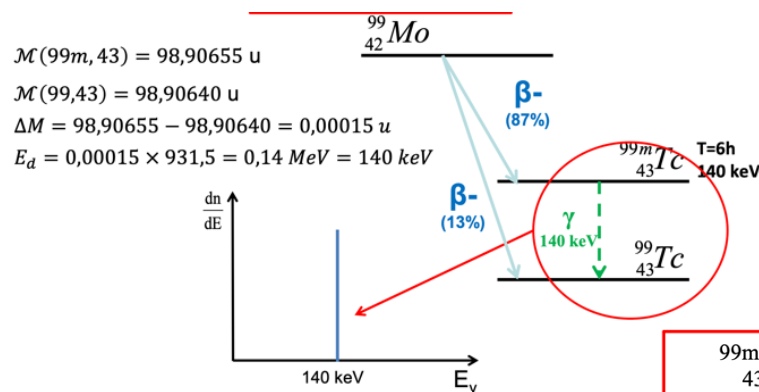
- Une première transformation où un noyau père radioactif X subit une première désintégration radioactive (ici une transformation  $\beta^-$ ) qui va donner un noyau fils Y sous forme soit métastable soit excité. Le niveau d'énergie de ce noyau fils est **supérieur** à celui du noyau à l'état fondamental.
- Ce noyau fils excité retourne rapidement à son état fondamental grâce à une transformation isomérique. On remarque encore une fois que la **masse** de Y dans son état **fondamental** est minimale (la différence entre les segments horizontaux correspond à la perte de masse).



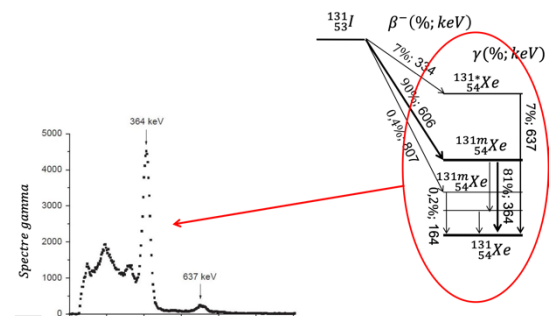
Le nucléide Y peut être dans un **état excité** ( ${}^{A*}Y$ ) ou **métastable** ( ${}^{Am}Y$ )

Elimination de l'énergie en excès par émission d'un **photon** ou par **conversion interne**.

*Exemple : Le Molybdène 99 se désintègre en Technétium avec deux possibilités : soit sa forme stable directement soit son état métastable. Dans la majorité des cas, cela aboutit au Technétium 99m qui se désexcite en Technétium stable par transformation isomérique avec émission d'un photon  $\gamma$  : quelle est son énergie ?  $M(99m, 43) = 98,90655u$  et  $M(99, 43) = 98,90640u$ .*

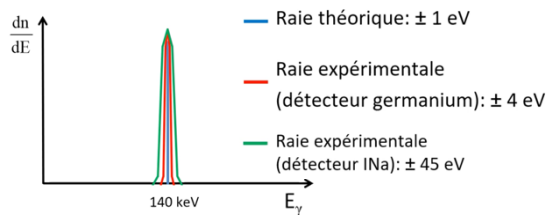


*Exemple bis : Ici l'iode-131 peut se désintégrer par transformation isobarique  $\beta^-$  en Xénon avec différents isomères possibles en fonction des états excités /métastables. Chacun correspond à une énergie possible du  $Xm$  et à chaque niveau d'énergie correspondra une transformation isomérique qui entrainera une libération d'un photon avec une énergie bien particulière et quantifiable. Les probabilités de désintégration à tel ou tel état sont différents. 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. Le pic le plus intense se situe à 364 keV.

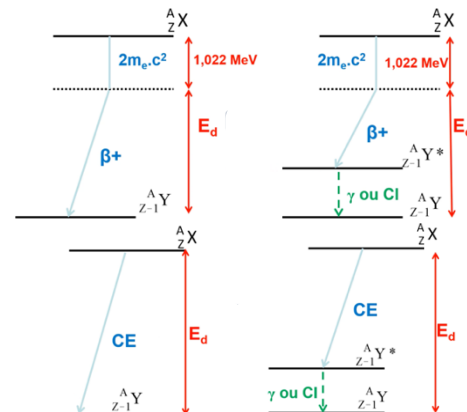
Pourquoi le spectre de raies a-t-il des raies larges ?



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

Encore un exemple du cours précédent :

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

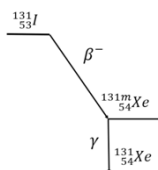
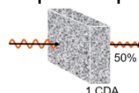
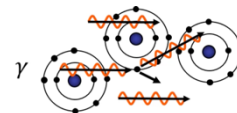


Même principe pour la CE :

## E – Parcours dans la matière

Les photons  $\gamma$  ont/sont :

- Des interactions **non obligatoires** (car non chargées)
- Des rayonnements **très pénétrants**
- Provoquent des **ionisations** par collision avec des électrons (effet photo-électrique, effet Compton et éventuellement création de paires pour des rayonnements très énergétiques)
- Atténués par du plomb ou du béton

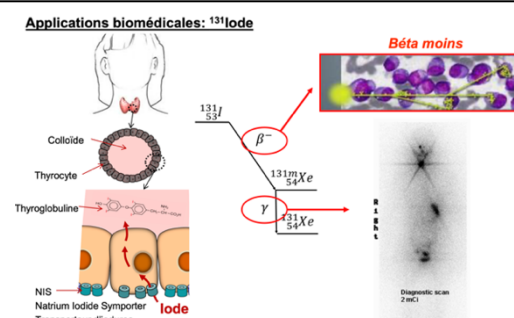


## F – Applications biomédicales

L'iode 131 : (suite de l'exemple dans les transformations  $\beta^-$ ) :

Après transformation 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.

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

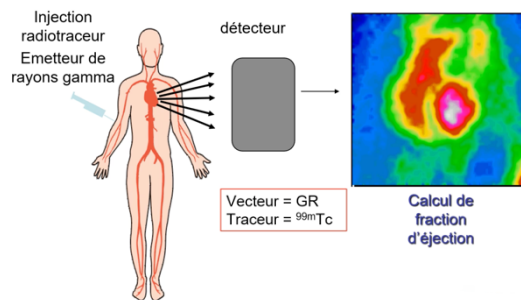


On obtient une image comme ci-contre avec des **fixations physiologiques** au niveau des glandes salivaires, la paroi de l'estomac, la vessie, mais aussi des fixations **pathologiques** intenses au niveau de la **thyroïde** : on a donc une vérification du diagnostic de cancer de la thyroïde.

### Le 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 :

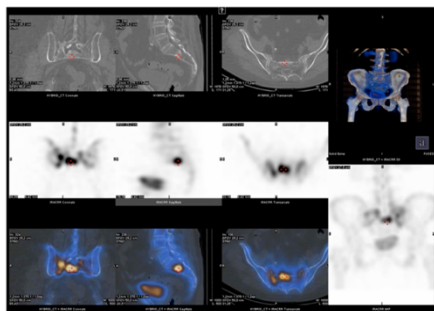
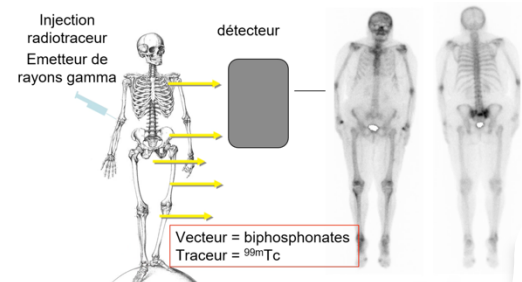


- D'un **vecteur**, qui est une **molécule biologique froide** (=non radioactive) dont le métabolisme est spécifique d'un organe, d'une fonction ou d'une voie biologique d'intérêt
- D'un **marqueur** : atome **radioactif** (radio isotope), artificiel, émetteur d'un rayonnement détectable par les caméras.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

En injectant du 99mTc 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 99mTc. Sur le sacrum il y a une forte fixation du radiotraceur correspondant à la **fissure** de l'os non visible sur le scanner simple car trop fine.



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

Scanner seul : 3 images du haut

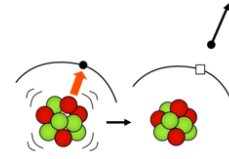
Scintigraphie seule : images intermédiaires

Fusion des deux : 3 images du bas

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

### III - Conversion interne

#### A – Réaction de désintégration



Ici encore, il s'agit plutôt d'une désexcitation que d'une réelle transformation du noyau puisqu'il n'y a pas de modification de sa nature mais seulement un changement de son état d'énergie.

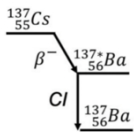
L'élément initial est le noyau père Y dans un état métastable ou excité qui, par **conversion interne**,



va donner un noyau fils stable, c'est-à-dire dans son état fondamental sans émission de photon ou de particule. La particularité de la conversion interne est que l'excès d'énergie

(=énergie disponible) va être transmise à un **électron** contenu dans le cortège électronique.

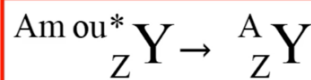
L'énergie lui sera transmise et il sera alors **expulsé du cortège électronique** de l'atome. On aboutit à un **atome ionisé**. Suite à cette ionisation, un vide (=une case vacante) est laissé sur une couche électronique, on va lors avoir un **réarrangement** du cortège électronique par photons X ou électron Auger.



Exemple : Le Baryum est issu d'une première transformation radioactive  $\beta^-$ . Ensuite, la conversion interne va permettre un retour du baryum à son état fondamental.

#### B – Bilan masse-énergie

Pour faire le calcul de l'énergie rendue disponible au cours d'une conversion interne, on commence encore une fois par calculer la différence de masse des noyaux :



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

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

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

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

Puisque tout l'énergie est transférée à l'électron expulsé sous forme d'énergie cinétique, afin de la calculer il faut :

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

$$E_c(\text{électron}) = E_d - E_l$$

Energie rendue disponible par la réaction
Energie de liaison

Pour expulser l'électron, il faut d'abord casser l'énergie de liaison de l'électron sur sa couche. On soustrait alors  $E_l$  afin de connaître l'énergie cinétique de l'électron.

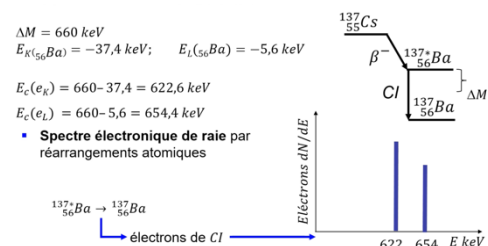
El correspond à l'énergie de liaison de l'électron en fonction de la couche sur laquelle il était.

## C – Spectre

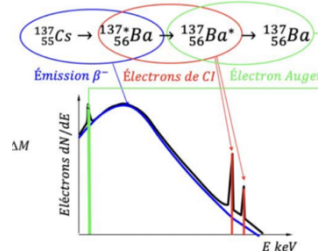
Il va y avoir plusieurs similitudes avec la capture électronique. Il y a une **absence** de spectre d'origine **nucléaire** (rien ne provient du noyau) mais il possède un spectre d'origine **atomique** (provenant du cortège) pouvant être :

- **Direct** avec un spectre **électronique de raie**, correspondant à l'électron éjecté du cortège emportant toute l'énergie de la transformation
- **Indirect** lié au **réarrangement secondaire** du cortège électronique. Il y a soit un spectre de raies électromagnétiques avec l'émission de photons X de fluorescence, soit un spectre de raies électroniques avec l'émission d'un électron d'Auger

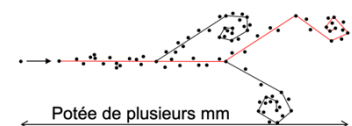
*Exemple : le Baryum 137 excité est issu d'une première transformation radioactive du Césium 137. Lors de la deuxième transformation isomérique, l'énergie rendue disponible par la conversion interne peut être transférée à un électron de la couche K ou de la couche L de l'atome de Baryum stable : en résultent des électrons aux énergies cinétiques différentes. On obtient un spectre électronique de raies direct d'origine atomique. On aura aussi un spectre de raies électronique et/ou électromagnétique indirect d'origine atomique également.*



Le spectre électronique complet :



## D – Parcours dans la matière



Le parcours dans la matière de l'électron éjecté du cortège électronique par la conversion interne a/est :

- Les mêmes effets biologiques qu'une **émission  $\beta$ -**
- Provoquent des **ionisations** par interaction avec des électrons : parcours **non rectiligne et sinueux**
- Pénétration de quelques mm dans les tissus
- Arrêté par une feuille de métal

