

GENERALITES SUR LES TRANSFORMATIONS RADIOACTIVES

I. INTRODUCTION

Définition :

Une transformation radioactive est une **mutation**, une **désintégration spontanée** d'un **noyau** atomique.

Contrairement à la réaction chimique où les modifications ont lieu au niveau du cortège électronique, la réaction nucléaire entraîne une modification du noyau de l'atome avec changement de sa nature et transformation d'un élément en un autre.

Un **noyau père instable** se transforme **spontanément** en **noyau fils** possédant certaines caractéristiques :

- * Perte de masse
- * Augmentation de l'énergie de liaison des nucléons
- * Libération d'énergie sous forme de particule ou de rayonnement radioactif

La transformation radioactive s'écrit de manière générale :



- Noyau père X obligatoirement radioactif donnant un noyau fils Y radioactif ou stable
- Particules émises diverses : n , e^+ , e^- , α
- Photon émis inconstant

Cette transformation radioactive :

- * Change la **nature** (nombre proton/neutron différent entre père et fils) ou le **niveau d'énergie** du noyau (même nombre proton/neutron) : processus nucléaire
- * Concerne uniquement les **noyaux instables avec excès d'énergie**
- * Est un phénomène **probabiliste** : la probabilité qu'un noyau se désintègre pendant un temps dt dépend de la constante radioactive λ , elle-même indépendante des conditions physico-chimiques et de l'âge de l'atome
- * Peut-être **naturelle** ou **artificielle**

On retrouve :

- * Des noyaux **naturels** :
274 stables et 51 radioactifs instables
- * Des noyaux **artificiels** :
plus de 2500 noyaux possibles

La radioactivité naturelle est omniprésente :

- * Rayonnements **cosmiques**
- * Radioactivité **tellurique** (sol) :
uranium, thorium, potassium
- * Le **radon-222** ++ ($T_{1/2} = 3,8j$) : gaz naturel radioactif
- * Les eaux et les aliments



II. HISTORIQUE

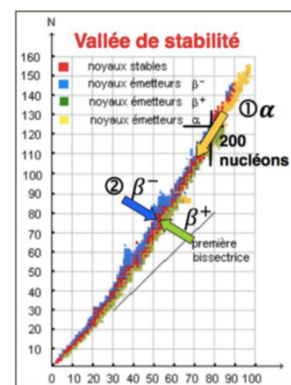
Suite à la découverte des rayons X par **Röntgen** en **1895** :

1896	H. Poincaré et H. Becquerel	Découverte des rayons Uraniques = rayon X
1900	Rutherford et Villard	3 types de radioactivités : α , β , γ
1903	P. + M. Curie et Becquerel	Les rayons U ne sont pas spécifiques à l'uranium et sont renommés « radioactivités » → Prix Nobel de physique
1934	F. Joliot et I. Joliot Curie	Radioactivité artificielle → Prix Nobel de Chimie
1940		1 ^{ères} applications de la radioactivité en médecine (thérapeutiques)
1960		Services hospitaliers de médecine nucléaire

III. CLASSIFICATION

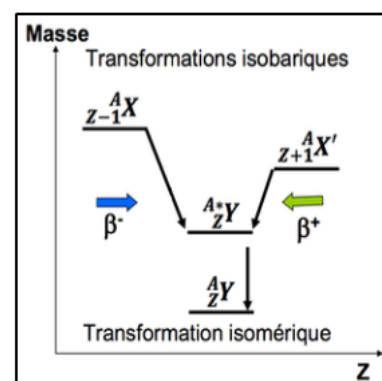
On distingue différentes zones selon le noyau d'origine :

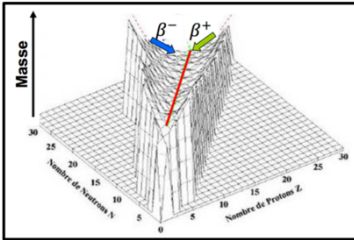
- * Radioactivité α : concerne les noyaux lourds avec $A > 200$
- * Radioactivité β : excès de neutrons $\rightarrow \beta^-$
excès de protons $\rightarrow \beta^+$
- * Radioactivité γ : libération d'énergie sans changement de nature du noyau



IV. ÉVOLUTION VERS UNE MASSE INFÉRIEURE

Type	$X \rightarrow Y$	Changement	Masse	Stabilité
α	${}_{Z+2}^{A+4}X \rightarrow {}_Z^AY$	Perte de 4 nucléons : 2 protons et 2 neutrons	\searrow	\nearrow
β^-	${}_{Z-1}^AX \rightarrow {}_Z^AY$	Neutron \rightarrow proton	\searrow	\nearrow
β^+	${}_{Z+1}^AX \rightarrow {}_Z^AY$	Proton \rightarrow neutron	\searrow	\nearrow
γ	${}^A_ZX \rightarrow {}^A_ZY$	Proton et neutron identique	\searrow	\nearrow





En ajoutant la masse sur la hauteur du graphe de la vallée de stabilité, on observe que lors des transformations radioactives, les éléments se rapprochent du fond de la vallée de stabilité correspondant aux éléments les plus légers.

Conclusion :

- Évolution vers une **masse minimale**
- Évolution vers une **énergie de liaison E_L maximale : stabilité maximale**
- **Libération d'énergie** sous forme de **rayonnement radioactif**

V. LOIS DE CONSERVATION

Les lois de conservation sont **toujours** appliquées lors des transformations radioactives !



- * Conservation du nombre de nucléons A et du nombre de charge Z
- * Conservation de l'énergie totale
- * Conservation de la quantité de mouvement

⚠ La masse totale ne se conserve pas



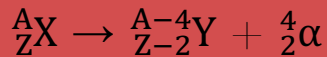
RADIOACTIVITE ALPHA

Définition :

Émission d'une particule α = noyau d'Hélium ${}^4_2\text{He} = \text{He}^{++} = \alpha^{++}$, concerne les noyaux lourds ($A > 200$)

A noter : le noyau d'hélium est particulièrement stable (noyau à nombre magique), est le seul noyau complexe émis spontanément et se manifeste le plus souvent par une suite de plusieurs émissions α .

I. REACTION DE DESINTEGRATION



- * Conservation de A et Z
- * Changement d'élément
- * Noyau fils + léger

II. BILAN MASSE-ENERGIE

Calcul : *État initial* – *État final*, soit la différence de masse ΔM entre le noyau père (=état initial) et le noyau fils + particule α (état final).

$$\begin{array}{l} \Delta M = \underbrace{\mathcal{M}(A, Z)}_{\text{noyau d'origine}} - \underbrace{Zm_e}_{\text{noyau fils}} - [\underbrace{\mathcal{M}(A-4, Z-2)}_{\text{noyau fils}} - \underbrace{(Z-2)m_e}_{\alpha}] + \underbrace{\mathcal{M}(4, 2) - 2m_e}_{\alpha} \\ \Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \cancel{Zm_e} - \mathcal{M}(A-4, Z-2) + \cancel{(Z-2)m_e} - \mathcal{M}(4, 2) + \cancel{2m_e} \end{array}$$

$$\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - [\mathcal{M}(A-4, Z-2) + \mathcal{M}(4, 2)]$$

Pour l'équivalence masse-énergie on utilise la formule $E_d = \Delta M \times 931,5$ avec E_d en MeV et ΔM en u +++

III. SPECTRE ENERGETIQUE

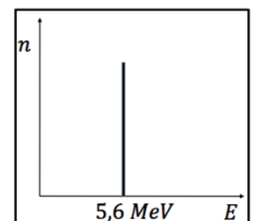
L'énergie disponible libérée par la transformation se répartit en **énergie cinétique** entre le **noyau fils** (E_c de recul) et la **particule α**

Du fait de la conservation de la quantité de mouvement ($p=mv$) on obtient :

- Vitesse faible pour le noyau fils de masse élevée
- Vitesse importante pour la particule α de masse faible

On considère que le noyau fils emporte une partie négligeable de l'énergie cinétique tandis que la particule α en emporte la quasi-totalité : soit E_c particule $\alpha = E_d$ +++

Cette énergie disponible est représentée sous la forme d'un **spectre de raie** dont la valeur correspond à l'énergie cinétique de la particule alpha (qui varie entre 4 et 10 MeV).



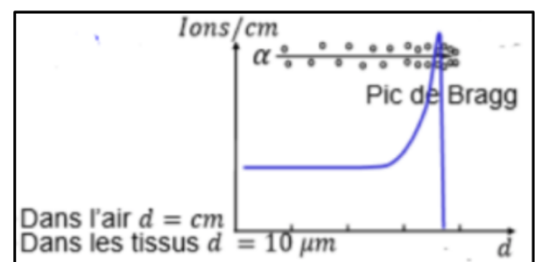
IV. PARCOURS DANS LA MATIERE

La particule α :

- Relativement **lourde** du fait de ses 4 nucléons (*dans le paragraphe précédent on disait que la particule était légère, mais c'est parce qu'on la comparait au noyau fils : ici on la prend de manière générale*)
- **Vitesse faible** (*car masse importante : conservation de la quantité de mouvement*)
- **Chargée positivement** car constituée de 2 protons : interactions coulombiennes avec la matière
- **Trajectoire rectiligne** en raison de sa masse et **trajet court** en raison de sa charge
- **Directement ionisante** par interactions obligatoires avec la matière
- Ionisations selon le **pic de Bragg** +++
- Arrêtée par une **feuille de papier**

Le pic de Bragg des particules chargées + :

- * Peu d'ionisations en début de parcours
- * Puis les ionisations atteignent un **maximum en fin de parcours** : pouvoir d'arrêt très élevé à cette distance
- * **Arrêt brutal** de la particule



→ Les ionisations sont **concentrées à une profondeur bien déterminée** correspondant au pic de Bragg

Le pouvoir d'arrêt se note :

$$S(T) = - \frac{dT}{dx} = k \frac{Z^2}{v^2}$$

V. APPLICATIONS BIOMEDICALES

Radioprotection :

→ Si la source est externe au corps : **aucun danger**, les particules α sont absorbées par la couche cornée de la peau

→ Si la source est interne (absorption, inhalation) : **dangereux** car possibles ionisations importantes des tissus proches avec **effets biologiques non négligeables**

*Exemple : Le **radon 222** est un émetteur alpha naturel **gazeux** donc dangereux car inhalation possible avec possibilité d'effets biologiques sur nos alvéoles pulmonaires voire cancers du poumon. Le radon 222 est présent partout mais de répartition inégale : trouvé notamment dans les régions granitiques (Bretagne). Il est responsable de notre irradiation naturelle.*

Thérapeutique :

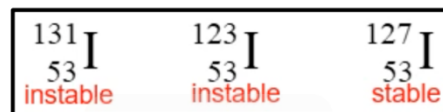
Les particules α ionisent la matière sur un **trajet court et précis** ce qui est intéressant pour **cibler des cellules cancéreuses** à une certaine profondeur **sans atteindre les cellules saines** +++



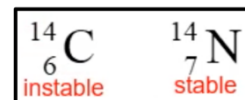
RADIOACTIVITE ISOBARIQUE

I. PRINCIPES PHYSIQUES DES TRANSFORMATIONS ISOBARIQUES

Isotopes : 2 nucléides avec le **même Z** mais des A différents.
Indiscernables chimiquement car **même élément chimique**,
ils diffèrent uniquement par leur nombre de neutrons



Isobares : 2 nucléides avec le **même A** mais des **Z différents**
(pas le même élément chimique) donc un nombre de neutrons différent.

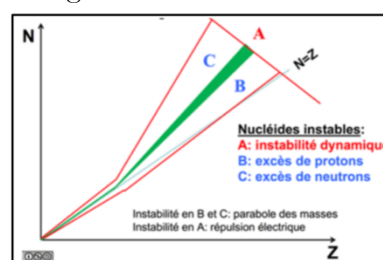


Les transformations radioactives isobariques se produisent **sans changement du nombre de nucléons A** entre **noyau père et fils**, mais Z et N changent.

Les lois de conservations vues dans le cours précédent s'appliquent également lors de ces transformations.

Il existe 3 types de transformation isobariques :

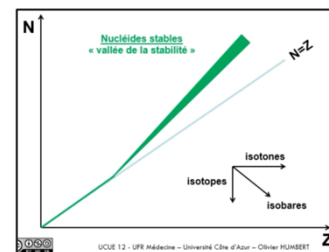
- **Émission β^-** (désintégration β^-) si **excès de neutrons**
- **Émission β^+** (désintégration β^+) si **excès de protons**
- **Capture électronique (CE)** si **excès de protons**



⇒ Ces transformations ont lieu pour les noyaux se situant de part et d'autre de la vallée de stabilité, en excès de protons (zone B) ou de neutrons (zone C). La zone A quant à elle n'est pas concernée par les transformations isobariques mais plutôt par la radioactivité α (noyaux lourds).

Sur le diagramme de Segré, aussi appelé diagramme des nuclides :

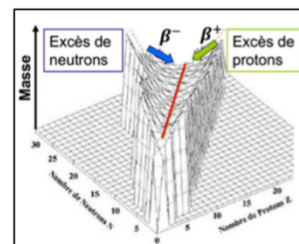
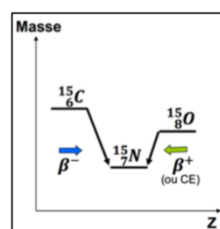
- * Les noyaux légers : stabilité si $Z = N$
- * Les noyaux plus lourds : stabilité si léger excès de neutrons avec compensation des charges répulsives des protons entre eux



→ Au final, les noyaux stables se situent sur 2 droites différentes : les noyaux légers sont sur la 1ère bissectrice tandis que les noyaux plus lourds se placent sur une droite s'éloignant progressivement de la 1ère bissectrice

Lors de ces transformations :

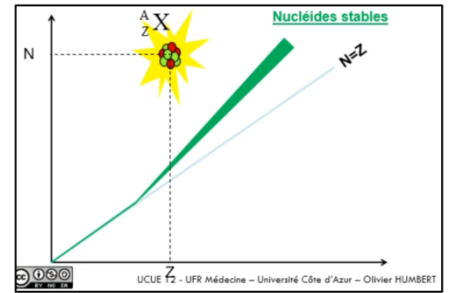
- * Pas de changement du A
- * Changement du Z (=proton) et du N (=neutron)
- * Changement d'élément
- * Évolution vers une masse minimale
- * E_L du noyau fils maximale : stabilité +++
- * Libération d'énergie
- * Descente dans la vallée de stabilité



II. TRANSFORMATION BETA -

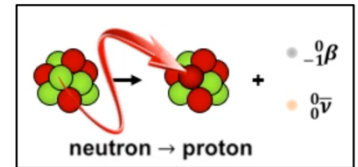
A. Réaction de désintégration

Les transformations β^- se produisent lorsque le noyau père est en **excès de neutrons** : il **perd un neutron et gagne un proton**, A reste identique et le noyau fils descend dans la vallée de stabilité.



Au niveau du **noyau** : ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0\beta^- + {}_0^0\bar{\nu}$

Au niveau du **nucléide** : ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + {}_{-1}^0\beta^- + {}_0^0\bar{\nu}$



Particules émises :

- * Particule β^- : électron d'origine nucléaire et non du cortège électronique
- * Antineutrino $\bar{\nu}$:
 - Charge nulle
 - Masse très faible, négligeable
 - Non ionisant donc très pénétrant avec peu d'interactions avec la matière
 - Pas un REM

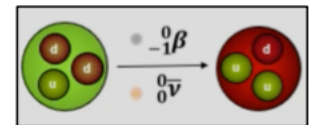
Transformation du neutron en proton :

Les neutrons et les protons ne sont pas les particules les plus élémentaires de la matière car composés de quarks. Il en existe 2 types : **up de charge +2/3** et **down de charge -1/3**.

Protons : **2 quarks up** et **1 quark down** (d'où la charge +1 du proton)

Neutrons : **1 quark up** et **2 quarks down** (d'où l'absence de charge du neutron)

Dans le cas de l'émission β^+ , un **quark down** se transforme en **quark up** grâce à l'interaction faible (cours sur le noyau).



B. Bilan énergétique

La masse du noyau père est plus importante que la somme des masses du noyau fils et des particules émises. Cette **différence de masse ΔM** entre le système initial et le système final est **convertie sous forme d'énergie**.

$${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + {}_{-1}^0\beta^- + {}_0^0\bar{\nu}$$

$$\Delta M = \underbrace{\mathcal{M}(A, Z)}_{\text{noyau père}} - \underbrace{[\mathcal{M}(A, Z+1) + (Z+1)m_e]}_{\text{noyau fils}} + m_e$$

$$\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \cancel{Zm_e} - \mathcal{M}(A, Z+1) + \cancel{Zm_e} + \cancel{m_e} - \cancel{m_e}$$

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



Pour calculer l'énergie délivrée par cette transformation :

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

donc $E_d = [\mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A, Z+1)] \times c^2$

$$E_d = \Delta M \times 931,5 \quad \text{Avec } E \text{ en MeV ;}$$

\mathcal{M} en u (unité de masse atomique)

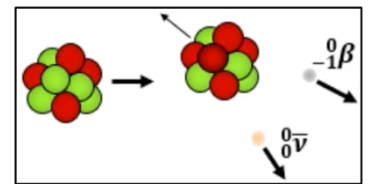
donc $E_d = [\mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A, Z+1)] \times 931,5$

La 2e méthode (cadre de droite) est préférentiellement utilisée car plus pratique mais attention aux unités !

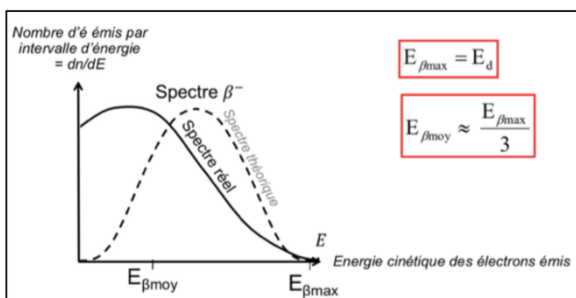
C. Spectre énergétique

L'énergie délivrée lors de la transformation correspond à une énergie cinétique répartie entre :

- Le **noyau fils** : son énergie cinétique de recul est considérée comme négligeable en raison de sa masse
- La **particule β^-**
- L'**antineutrino**



⇒ Au final, l'énergie délivrée se répartit de manière aléatoire entre la particule β^- et l'antineutrino mais seule la particule β^- est détectable ce qui donne un spectre continu +++



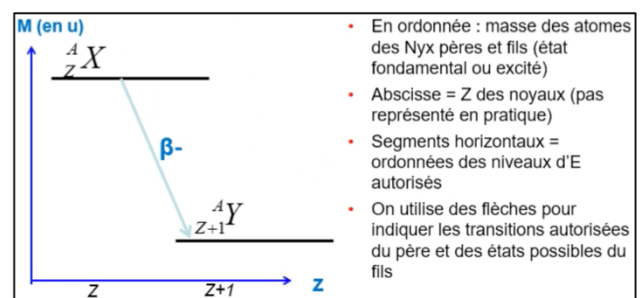
* Spectre théorique : le spectre électronique continu de la β^- va de 0 (l'antineutrino emporte toute l'énergie) à E_{\max} (la β^- emporte toute l'énergie).

* Spectre réel : décalé vers la gauche en raison des interactions coulombiennes entre les β^- et les protons du noyau. Si la particule a une énergie cinétique trop faible elle ne peut pas s'extraire du noyau et n'est donc pas détectée.

D. Schéma de désintégration

Suite à la transformation, l'atome X devient Y avec une augmentation du nombre de protons (décalage sur la droite) et libère une certaine quantité d'énergie E_d par perte de masse.

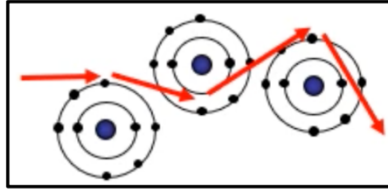
La différence entre les 2 segments horizontaux correspond à la **différence de masse des 2 atomes**, proportionnelle à l'énergie délivrée E_d .



E. Parcours dans la matière

La particule β^- :

- Chargée **négativement** & **ionisante** par Interaction avec les électrons de la matière
- Parcours **non rectiligne** et **court**
- Arrêtées par une **feuille de métal** très fine



L'antineutrino :

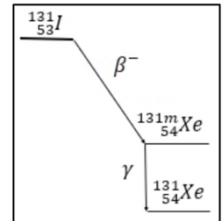
- Très pénétrant, interagit peu avec la matière, indétectable

F. Applications biomédicales

⇒ Radiothérapie :

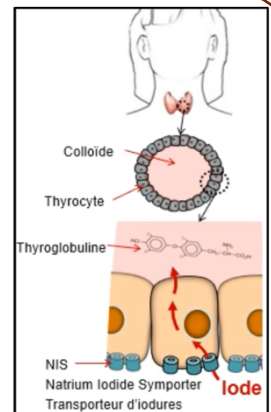
L'**iode 131** se transforme en **Xénon 131 métastable** via une β^- (la notion de métastable est revue à la fin du cours, mais en gros il y a un excès d'énergie interne aboutissant à une transformation isomérique).

On trouve l'iode 131 à l'état naturel dans l'écorce terrestre et il peut également être produit par fission nucléaire dans les centrales nucléaires. En médecine, l'injection d'iode 131 permet de traiter et de guérir le **cancer de la thyroïde**, qu'il soit **local ou métastatique** : on appelle ça la **radiothérapie métabolique**.



⇒ Pourquoi injecter de l'iode radioactif pour ce type de cancer ?

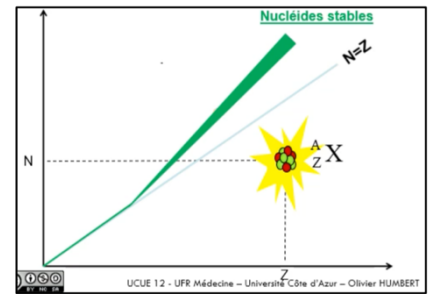
La **thyroïde** est un petit organe endocrine à la base du cou synthétisant les **hormones thyroïdiennes** indispensables à la vie. Son organisation est **folliculaire** avec les thyrocytes en périphérie et la colloïde au centre (lieu de synthèse des hormones). Cette synthèse nécessite de l'**iode** capté par des transporteurs NIS situés sur les thyrocytes puis transporté jusque dans la colloïde. En temps normal, l'iode capté est stable. Après injection d'iode 131 instable capté par la thyroïde, les émissions β^- vont provoquer des ionisations (lésions de l'ADN des thyrocytes) avec **destruction des cellules thyroïdiennes, qu'elles soient saines ou cancéreuses** +++



III. TRANSFORMATION BETA +

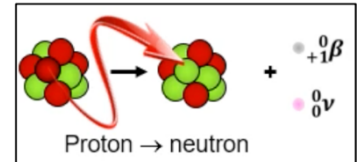
A. Réaction de désintégration

Les transformations β^+ se produisent lorsque le noyau père est en excès de protons : il **perd un proton et gagne un neutron**, A reste identique et le noyau fils descend dans la vallée de stabilité.



Au niveau du **noyau** : $\frac{1}{1}p \rightarrow \frac{1}{0}n + \frac{0}{1}\beta^+ + \frac{0}{0}\nu$

Au niveau du **nucléide** : $\frac{A}{Z}X \rightarrow \frac{A}{Z-1}Y + \frac{0}{1}\beta^+ + \frac{0}{0}\nu$

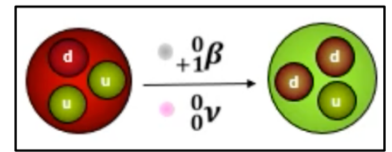


Particules émises :

- * Particule β^+ : électron positif (positon), ne pré existe pas dans le noyau mais naît de la transformation
- * Neutrino ν : même caractéristique que l'antineutrino

Transformation du proton en neutron :

Dans le cas de l'émission β^+ , un **quark up** se transforme en **quark down**



B. Bilan énergétique

$$\frac{A}{Z}X \rightarrow \frac{A}{Z-1}Y + \frac{0}{1}\beta^+ + \frac{0}{0}\nu$$

$$\Delta M = \underbrace{\mathcal{M}(A, Z)}_{\text{noyau d'origine}} - Zm_e - \left[\underbrace{\mathcal{M}(A, Z-1)}_{\text{noyau fils}} - (Z-1)m_e + \underbrace{m_e}_{\beta^+} \right]$$

$$\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \cancel{Zm_e} - \mathcal{M}(A, Z-1) + \cancel{(Z-1)m_e} - m_e$$

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

Pour calculer l'énergie délivrée :

$$E_d = [\mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A, Z-1)] \times c^2 - 2m_e \times c^2$$

Avec E en J, M en kg et $c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

On peut aussi remplacer c^2 par 931,5 avec E en MeV et M en u pour plus de simplicité.



Ici, l'énergie délivrée n'est pas directement proportionnelle à la différence de masse des atomes car il faut tenir compte de la masse des 2 électrons +++

Pour que la désintégration ait lieu, l'énergie délivrée doit être > 0 donc on a :

$$E_d > 0$$

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

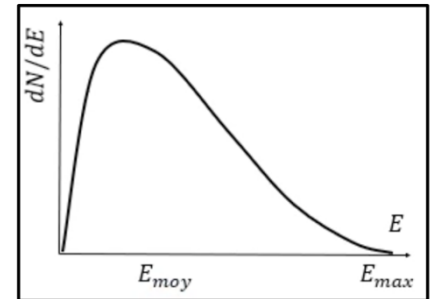
$$\text{or : } 2m_e \times c^2 = 1,022 \text{ MeV}$$

Donc pour que la transformation β^+ soit possible, l'équivalent en énergie de la différence de masse des atomes père et fils doit être **au moins égal à l'énergie seuil de 1,022 MeV** +++

C. Spectre énergétique

L'énergie délivrée lors de la transformation correspond à une énergie cinétique se répartissant entre :

- Le noyau fils : énergie cinétique de recul négligeable
- La particule β^+
- Le neutrino



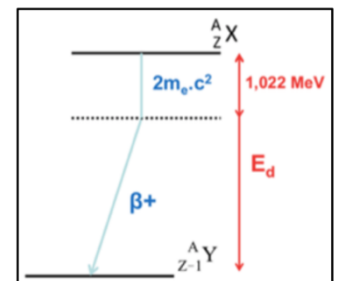
⇒ Au final, l'énergie délivrée se répartit de manière **aléatoire** entre la **particule β^+** et le **neutrino** mais **seule la particule β^+ est détectable** ce qui donne un **spectre continu** +++

Le spectre énergétique va de 0 (le neutrino emporte toute l'énergie) à E_{\max} (la particule β^+ emporte toute l'énergie). Ici, le spectre n'est pas décalé vers la gauche car il n'y a pas d'interactions coulombiennes entre β^+ et le noyau : les charges positives se repoussent.

D. Schéma de désintégration

Suite à la transformation, X devient Y avec une diminution du nombre de protons et libération d'énergie.

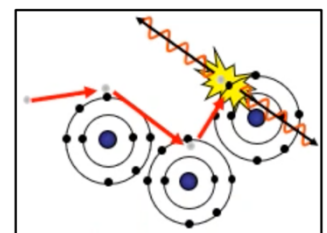
On note le seuil de **1,022 MeV** nécessaire pour que la transformation ait lieu.



E. Parcours dans la matière

La particule β^+ :

- Chargée positivement et ionisante
- Collisions avec les électrons jusqu'à épuisement de l'énergie cinétique
- Parcours non rectiligne et court

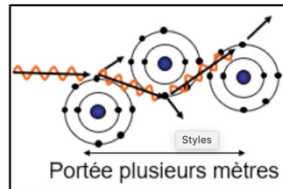


Une fois à l'arrêt (énergie cinétique = 0), la particule β^+ va chercher à s'apparier avec un électron de la matière : c'est la **réaction d'annihilation**. La masse des 2 électrons va se convertir en énergie lumineuse sous forme de **2 photons γ de 511 keV** chacun émis en coïncidence (à 180° l'un de l'autre).



Les photons γ :

- Origine indirectement nucléaire
- Interactions non obligatoires avec la matière via des effets photo-électriques et Compton
- Atténuation par épaisseurs importantes de plomb et/ou de béton



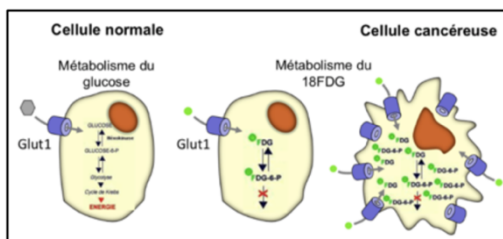
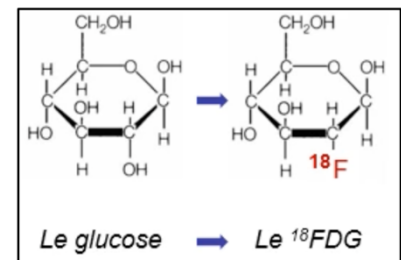
Le neutrino :

- très pénétrant, interagit peu avec la matière, indétectable (comme l'antineutrino)

F. Applications biomédicales

Le 18 Fluoro-déoxy-glucose ^{18}FDG :

Le Fluor 18 est un atome radioactif en surcharge de protons se désintégrant par β^+ en Oxygène 18. Le Fluor 18 ayant une $\frac{1}{2}$ vie de 110min, au bout de ce laps de temps la moitié des atomes se seront désintégrés. En le fixant à une molécule de glucose à la place d'un groupement -OH, on obtient du ^{18}FDG , molécule analogue au glucose et radioactive émettant indirectement des photons γ détectable à l'imagerie.

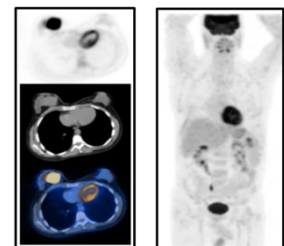


En raison de leur prolifération accrue, les cellules tumorales consomment énormément de glucose : c'est l'**effet Warburg**. Dans ces cellules, le ^{18}FDG rentre par le transporteur GLUT comme une molécule de glucose normale et subit la 1^{ère} phosphorylation de la glycolyse le transformant en $^{18}\text{FDG-G6P}$ ne pouvant pas subir la suite de la glycolyse en raison de l'atome de Fluor. Le $^{18}\text{FDG-G6P}$ s'accumule donc dans les cellules tumorales et, par émission β^+ , il y a émission secondaire de photons γ .

Ces photons γ sont ensuite détectés par une technique d'imagerie, la tomographie par émission de positons couplée à un scanner : le TEP scan.

On obtient une image 3D avec des fixations physiologiques au niveau du cerveau, du cœur, du foie et des voies urinaires (élimination). Ce qui nous intéresse ici c'est la masse en hypersignal bien visible en imagerie en coupe, correspondant à un cancer du sein chez cette patiente.

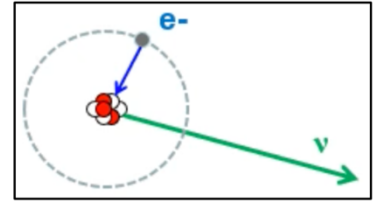
Cette technique est très intéressante dans le domaine de la cancérologie.



IV. CAPTURE ELECTRONIQUE

La CE se produit lorsque le noyau est en **excès de protons**, comme pour la β^+ .

Elle consiste en la **capture d'un électron d'une couche électronique profonde** (couche K le plus souvent) **par le noyau au sein duquel il se combine à un proton pour donner un neutron** : A reste identique et le noyau fils descend dans la vallée de stabilité. Une seule particule est émise : le **neutrino**.

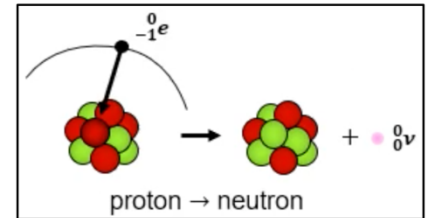


A. Réaction de désintégration

Au niveau du **noyau** :

$${}_1^1p + {}_{-1}^0e \rightarrow {}_0^1n + {}_0^0\nu$$

Au niveau du **nucléide** :

$${}_Z^AX + {}_{-1}^0e \rightarrow {}_{Z-1}^AY + {}_0^0\nu$$


La CE est un mode de désintégration **discret** car le neutrino emportant toute l'énergie est **indélectable**.

B. Bilan énergétique

$${}_Z^AX + {}_{-1}^0e \rightarrow {}_{Z-1}^AY + {}_0^0\nu$$

$$\Delta M = [\underbrace{\mathcal{M}(A, Z) - Zm_e + m_e}_{\text{noyau d'origine}}] - [\underbrace{\mathcal{M}(A, Z-1) - (Z-1)m_e}_{\text{noyau fils}}]$$

Espace après

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

Pour calculer l'énergie délivrée lors de la transformation :

$$E_d = [\mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A, Z-1)] \times c^2 - E_L$$

E_L : Énergie de liaison de l' e^- capturé

Pour que la réaction ait lieu, il faut que l'équivalent en énergie de ΔM soit $> E_L$ +++ : cette énergie de liaison correspond à l'énergie seuil de la réaction. Non-dit mais ici l'énergie de liaison qu'il faut prendre pour les calculs est celle de l'atome PÈRE !!

Au final, 2 possibilités pour les noyaux en excès de protons de revenir à la stabilité :

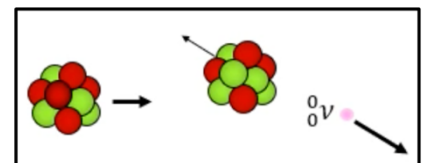
- En dessous du seuil énergétique de 1,022MeV : seule la CE est possible +++
- Au-dessus du seuil énergétique de 1,022MeV : compétition entre CE et β^+

C. Spectre énergétique

L'énergie délivrée par la transformation correspond à une énergie cinétique se répartissant entre :

- Le noyau fils : énergie cinétique de recul négligeable encore une fois
- Le neutrino : indélectable

⇒ Il n'y a donc pas de spectre nucléaire direct +++



Mais il peut y avoir un **spectre indirect d'origine atomique** et non nucléaire lié aux **réarrangements** électroniques secondaires du cortège de l'atome +++

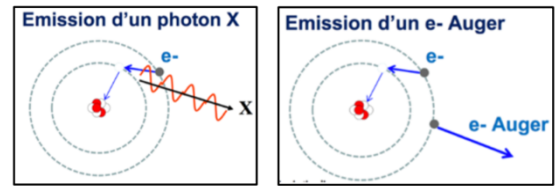
Explication : Après la CE, un électron manque au niveau d'une couche profonde du cortège de l'atome entraînant une **instabilité électronique** (et non plus nucléaire). Pour revenir à la stabilité, un électron d'une couche plus périphérique va venir combler la case vacante profonde libérant de l'énergie sous forme de :

→ Photon de fluorescence X d'énergie $E = E_K - E_L$ dans

l'exemple ci-contre

→ Électron Auger d'énergie cinétique $E = E_K - E_L - E_L$

toujours dans le même exemple

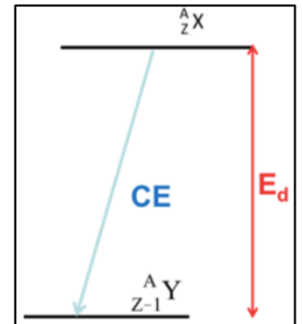


⇒ Ici pour les calculs d'énergie des photons de fluorescence et électrons Auger il faut utiliser les énergies de liaison de l'atome FILS

On obtient donc un **spectre de raies électromagnétique** (si photons X) et/ou **électronique d'origine atomique** +++

D. Schéma de désintégration

Suite à une CE, X devient Y si l'énergie seuil est atteinte, avec une diminution de nombre de protons et libération d'énergie emportée par le neutrino uniquement. Le seuil correspondant à l'énergie de liaison de l'électron capturé n'est pas schématisé car faible (de l'ordre de l'eV) comparée à l'énergie délivrée mais n'est PAS NÉGLIGEABLE.



E. Parcours dans la matière

Le neutrino :

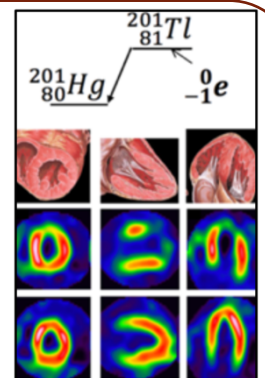
- indétectable
- très pénétrant, interagit peu avec la matière, indétectable (comme l'antineutrino)

Photons X :

- émis indirectement, vont interagir via effets photo-électrique et Compton et ont une portée de plusieurs mètres en raison de leurs interactions non obligatoires, une couche importante de plomb/béton les atténue.

F. Applications biomédicales

Le Thallium 201, analogue du Potassium K^+ , se désintègre en Mercure 201 via une CE et va se fixer de manière intense au niveau du myocarde en fonction du débit sanguin coronaire (les coronaires sont les artères irriguant le myocarde). Son utilisation permet de voir les zones cardiaques les plus perfusées (fixation du Thallium 201 ++++) avec une émission indirecte de photons et donc de déduire celles qui le sont le moins, traduisant une ischémie myocardique (*une ischémie correspond à une souffrance tissulaire due à un manque d'O₂, en cas d'infarctus par exemple où un caillot bouche une coronaire*).



TRANSFORMATIONS ISOMERIQUES

I. GENERALITES SUR LES TRANSFORMATIONS ISOMERIQUES

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 :

- * Stabilité maximale : forte énergie de liaison des nucléons et masse minimale
- * Niveau d'énergie disponible du noyau minimal

→ **État excité** ${}^{A*}_ZX$: atome perturbé, très instable

- * État **faisant suite à une 1ère transformation radioactive** +++ : transitoire & temporaire
- * Énergie disponible > à celle de l'état fondamental
- * Retour à l'état fondamental quasi instantanément par transformation isomérique en environ 10^{-12} s : période radioactive très courte

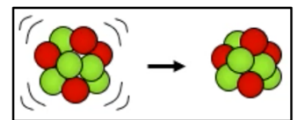
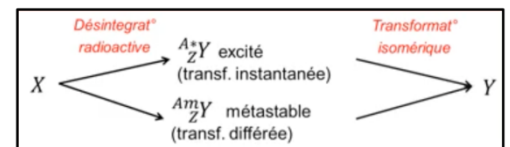
→ **État métastable** ${}^{Am}_ZX$: atome perturbé, instable

- * État **faisant suite à une 1ère transformation radioactive** : transitoire & temporaire
- * Retour à l'état fondamental par transformation isomérique > 10^{-12} s et pouvant atteindre plusieurs heures

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

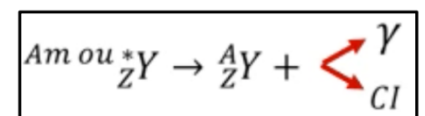
Processus de transformation isomérique :

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 E_L avec une énergie disponible la plus faible possible
- * Libèrent de l'énergie de 2 manières : par émission de photons γ ou par conversion interne (CI)



II. EMISSION D'UN PHOTON GAMMA

A. Réaction de désexcitation



Rappel : Un photon γ 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 γ** sont d'origine **nucléaire** +++

B. Bilan énergétique

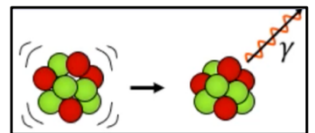
$$^A_{Zm} \text{ou} ^A_{Z*} Y \rightarrow ^A_Z Y + \gamma$$

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

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

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

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

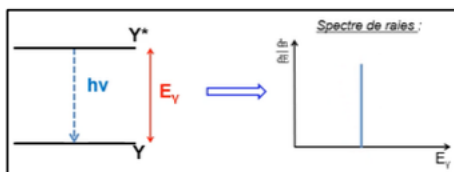


C. Spectre énergétique

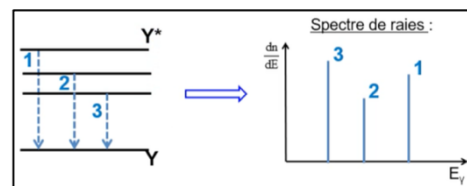
Le photon γ emporte toute l'énergie puisque l'énergie cinétique de recul du noyau est négligeable.

Le spectre énergétique obtenu est donc un **spectre électromagnétique de raie(s) d'origine nucléaire** +++ car le photon γ 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.

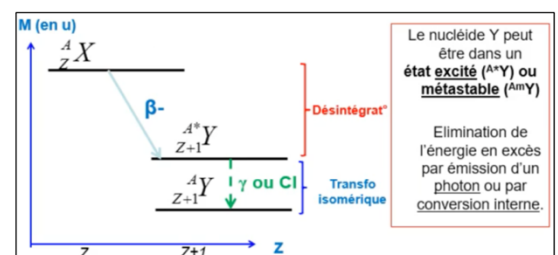


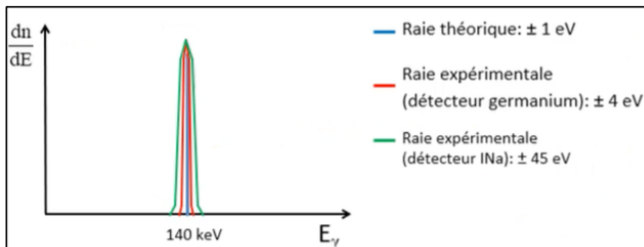
Cependant, dans la plupart des cas, il existe plusieurs niveaux d'énergie pour un nucléide excité : le spectre est donc composé de plusieurs raies correspondant à l'émission de photons γ d'énergies différentes. Au plus le niveau d'énergie excité est important, au plus le retour à l'état fondamental libèrera de l'énergie : le photon γ aura donc une énergie d'autant plus importante.



D. Schéma de désexcitation

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





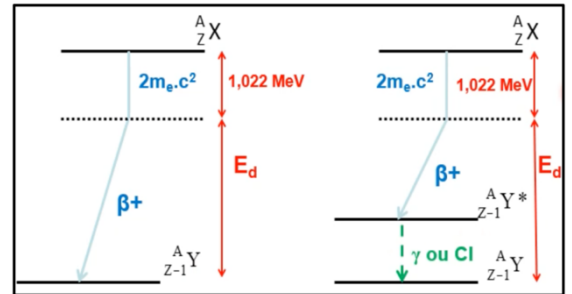
Pourquoi le spectre de raies a-t-il des raies larges ?

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 : sur la base d'une β^+

Sur le 1^{er} schéma, on observe bien notre β^+ et son seuil de 1,022 MeV. La transformation aboutit directement à un nucléide fils stable.

Sur le 2nd schéma, la β^+ transite d'abord par un noyau à l'état excité ou métastable intermédiaire avant de se désexciter par émission γ ou conversion interne (CI)



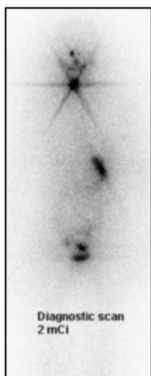
E. Parcours dans la matière

Le photon γ :

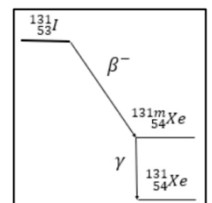
- Interactions **non obligatoires** car **non chargés** (neutre)
- Très **pénétrant**
- **Ionisations** par **collision** avec les électrons par effet **photoélectrique** ou **Compton** et éventuellement **création de paires** si rayonnement très énergétique (seuil de 1,022 MeV)
- Atténuation par de grandes épaisseurs de **plomb/béton**

F. Applications biomédicales

L'iode-131 :



Après transformation β^- l'Iode 131 en Xénon métastable dans la thyroïde notamment, ce dernier retourne à l'état fondamental par émission γ . 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.



On obtient une image comme à gauche 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.



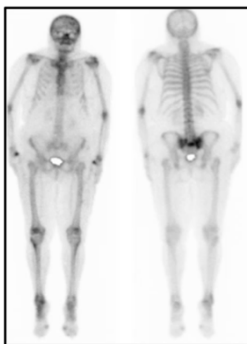
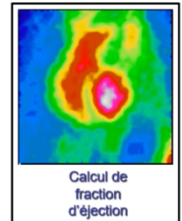
Le Technétium 99 métastable :

Issu du Molybdène, il émet un photon γ 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 :

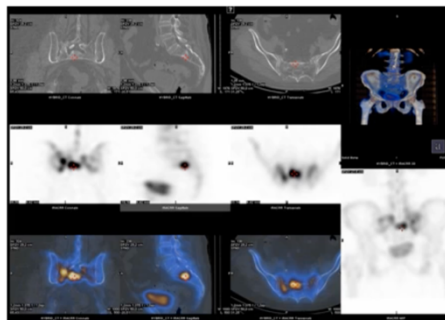
- * **D'un vecteur** : molécule biologique froide (= non radioactive) dont le métabolisme est spécifique d'un organe, d'une fonction ou d'une voie biologique d'intérêt
- * **D'un marqueur** : atome radioactif (radio isotope), artificiel, émetteur d'un rayonnement détectable par les caméras. Ce marqueur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

En injectant du ^{99m}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}Tc



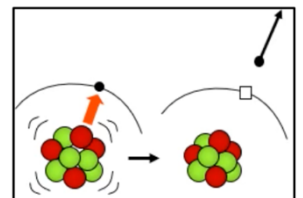
En injectant du ^{99m}Tc associé aux **biphosphonates** (molécules ayant une forte affinité pour la matrice osseuse), le couple va se fixer sur les structures osseuses du patient. Cette fixation est **hétérogène** : plus intense au niveau des zones ayant une **forte activité ostéoblastique** de remodelage osseux. Sur la scintigraphie de face ci-contre 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}Tc .

Exemple : image scintigraphique en 3D fusionnée avec un scanner



III. LA CONVERSION INTERNE

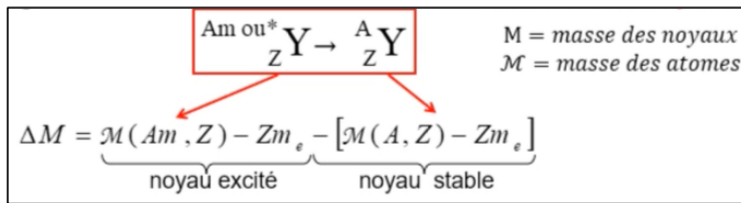
A. Réaction de désexcitation



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.



B. Bilan énergétique



$$\Delta M = \mathcal{M}({}^A_{Z}\text{Y}) - \mathcal{M}({}^A_{Z}\text{Y})$$

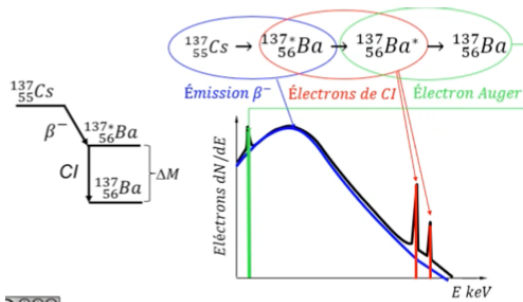
Puis pour obtenir l'énergie cinétique E_c de l'électron expulsé :

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 (maxi piège +++)

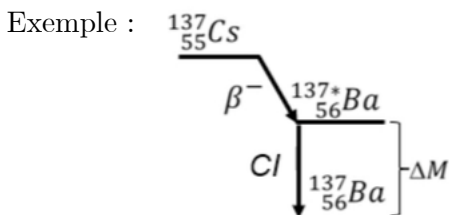
C. Spectre énergétique

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



- * Absence de spectre d'origine nucléaire
- * Spectre d'origine atomique
 - Directement : spectre électronique de raie, correspond à l'électron éjecté
 - Indirectement : spectre de raies électromagnétique (réarrangements du cortège par photons X) et/ou électronique (émission d'électrons Auger)

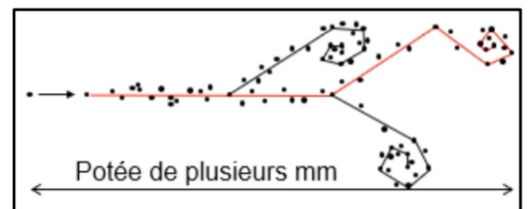
D. Schéma de désexcitation



E. Parcours dans la matière

L'électron éjecté :

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



C'est la fin de cette fiche pas mal longue car elle reprend plusieurs ronéos. Je voulais vous donner une vision d'ensemble des transformations radioactives d'où mon choix de tout rassembler ici. N'hésitez pas à la couper lors de vos révisions ça peut faire beaucoup au début :D. Cette fiche est complète j'ai juste enlevé certains exemples pour la raccourcir (ça reste une fiche donc elle est + synthétique vous voyez le genre) donc allez les checker dans la ronéo.

Bossez bien les calculs et les applications biomédicales. Je vous sortirai un récap de toutes les désintégrations pour que vous puissiez y voir plus clair <3

Dédi à mon cotut (le meilleur), au bungal 157 et à tous les P1, vous êtes incroyables

