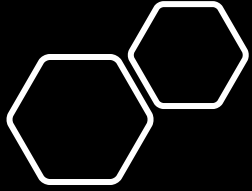


# BIOPHYSIQUE

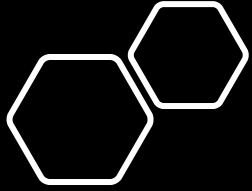
## Radioactivité



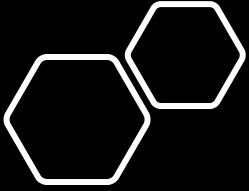


# Plan

- ✓ Généralités
- ✓ Radioactivité alpha
- ✓ Radioactivité isobarique
  - ✓ Béta<sup>-</sup>
  - ✓ Béta<sup>+</sup>
  - ✓ Capture électronique
- ✓ Radioactivité isomérique
  - ✓ Gamma
  - ✓ Conversion interne



# Généralités sur les transformations radioactives



# I. Introduction

## Définition :

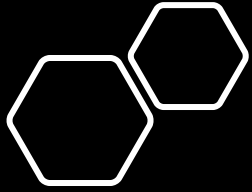
Une transformation radioactive est une **mutation**, une **désintégration spontanée** d'un **noyau** atomique.

La transformation radioactive s'écrit de manière générale :

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

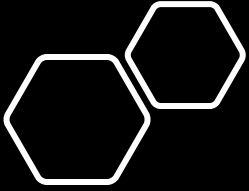
Cette transformation radioactive :

- \* 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  $\lambda$ , elle-même indépendante des conditions physico-chimiques et de l'âge de l'atome
- \* Peut-être **naturelle** ou **artificielle**



## II. Historique

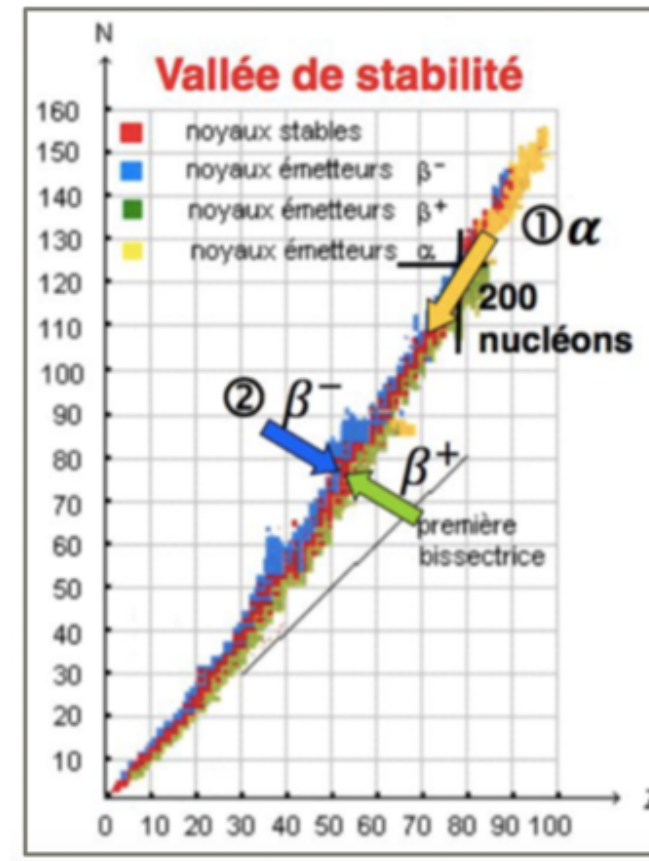
<b>1896</b>	<b>H. Poincaré et H. Becquerel</b>	<b>Découverte des rayons Uraniques = rayon X</b>
<b>1900</b>	Rutherford et Villard	3 types de radioactivités : $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$
<b>1903</b>	P. + M. Curie et Becquerel	Les rayons U ne sont pas spécifiques à l'uranium et sont renommés « radioactivités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

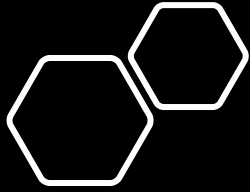


# III. Classification

On distingue différentes zones selon le noyau d'origine :

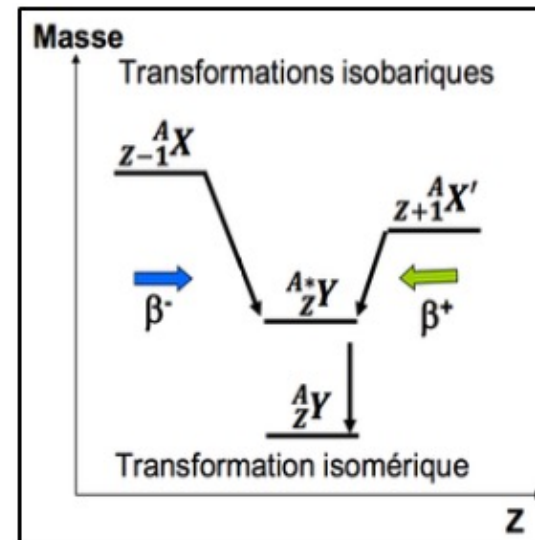
- \* Radioactivité  $\alpha$  : concerne les noyaux lourds avec  $A > 200$
- \* Radioactivité  $\beta$  : excès de neutrons  $\rightarrow \beta^-$   
excès de protons  $\rightarrow \beta^+$
- \* Radioactivité  $\gamma$  : libération d'énergie sans changement de nature du noyau





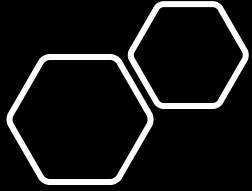
# IV. Evolution vers une masse inférieure

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



## Conclusion :

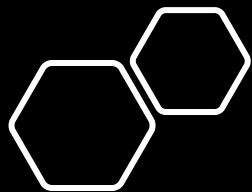
- Évolution vers une **masse minimale**
- Évolution vers une **énergie de liaison  $EL$  maximale** : stabilité maximale
- Libération d'énergie sous forme de **rayonnement radioactif**



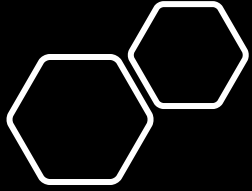
# V. Lois de conservation



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



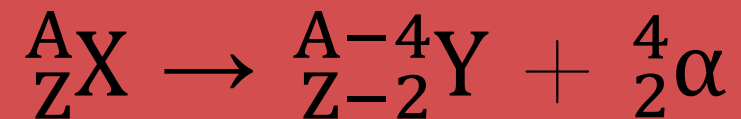
# Radioactivité $\alpha$



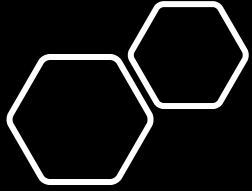
# I. Réaction de désintégration

## Définition :

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



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



## II. Bilan masse-énergie

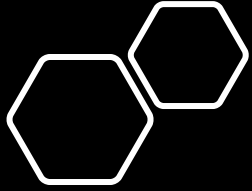
$$\Delta M = \underbrace{\mathcal{M}(A, Z) - Zm_e}_{\text{noyau d'origine}} - \underbrace{[\mathcal{M}(A - 4, Z - 2) - (Z - 2)m_e]}_{\text{noyau fils}} + \underbrace{\mathcal{M}(4, 2) - 2m_e}_{\alpha}$$

$$\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \cancel{Zm_e} - \mathcal{M}(A - 4, Z - 2) + \cancel{(Z - 2)m_e} - \mathcal{M}(4, 2) + \cancel{2m_e}$$

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

Pour l'équivalence masse-énergie on utilise la formule

$$E_d = \Delta M \times 931,5 \text{ avec } E_d \text{ en MeV et } \Delta M \text{ en u} \text{ +++}$$

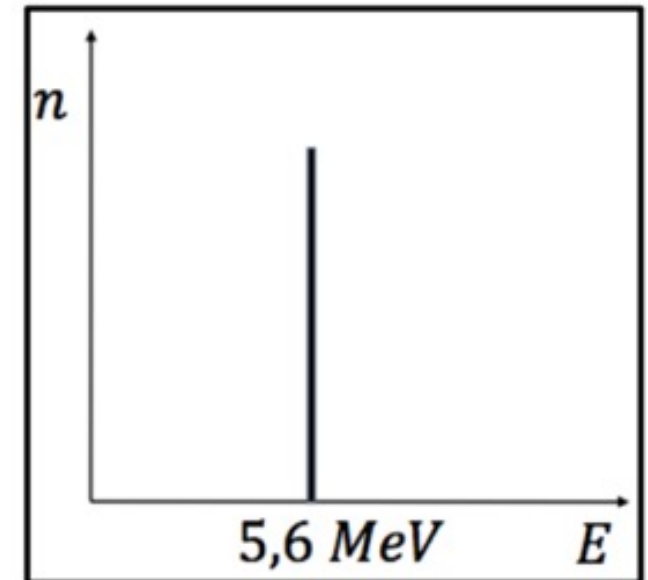


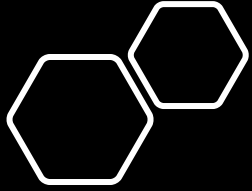
# III. Spectre énergétique

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

On considère que le noyau fils emporte une partie négligeable de l'énergie cinétique tandis que la particule  $\alpha$  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 10MeV).





# IV. Parcours dans la matière

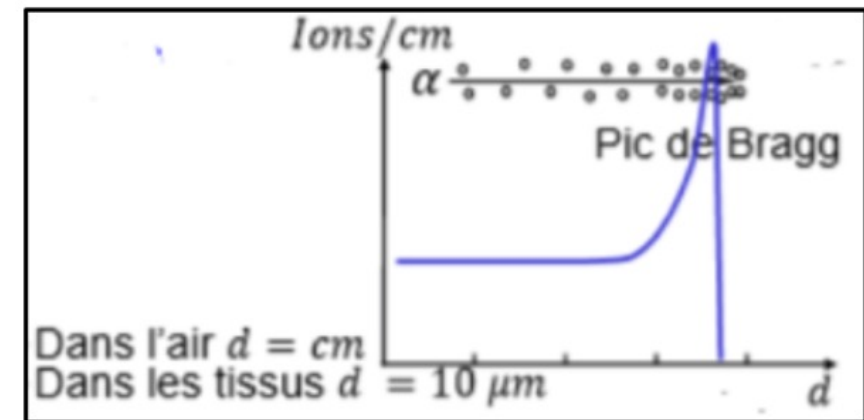
## La particule $\alpha$ :

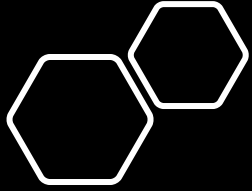
- Relativement **lourde** du fait de ses 4 nucléons
- **Vitesse faible**
- **Chargée positivement** (2 protons) : interactions coulombiennes avec la matière
- **Trajectoire rectiligne** (masse) et **trajet court** (charge)
- **Directement ionisante** par interactions obligatoires
- Ionisations selon 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





# V. Applications biomédicales

## Radioprotection :

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

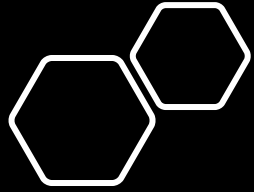
→ Si la source est interne (absorption, inhalation) : **dangereux** car possibles ionisations importantes des tissus proches avec **effets biologiques non négligeables**

*Exemple : Le radon 222*

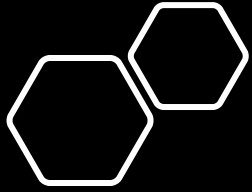
## Thérapeutique :

Les particules  $\alpha$  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** +++





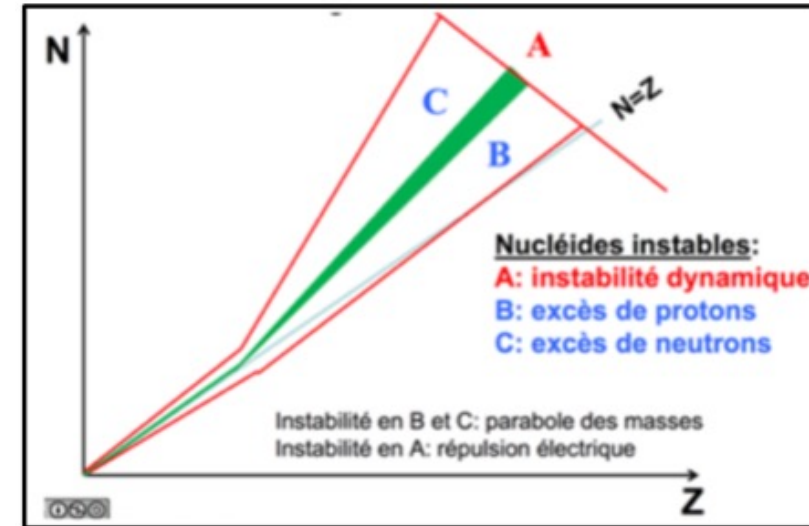
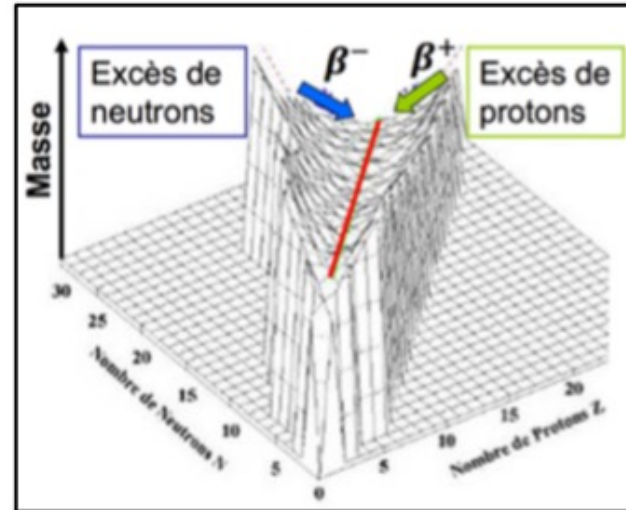
# Radioactivité isobarique



# I. Principes physiques des transformations isobariques

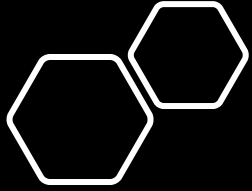
Il existe 3 types de transformation isobariques :

- Émission  $\beta^-$  (désintégration  $\beta^-$ ) si excès de neutrons
- Émission  $\beta^+$  (désintégration  $\beta^+$ ) si excès de protons
- Capture électronique (CE) si excès de protons

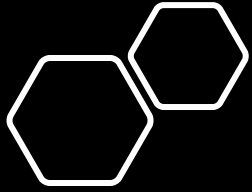


Lors de ces transformations :

- 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

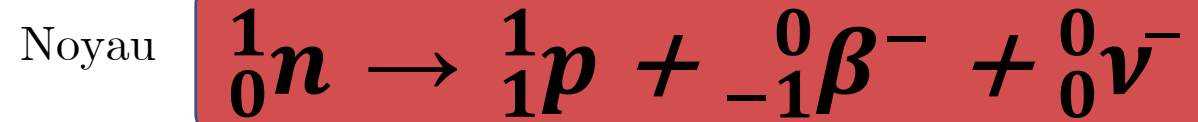


# II. Transformation $\beta^-$



# A. Réaction de désintégration

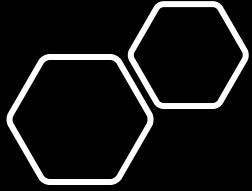
Les transformations  $\beta^-$  se produisent lorsque le noyau père est en excès de neutrons : il **perd un neutron et gagne un proton**, A reste identique et le noyau fils descend dans la vallée de stabilité.



## Particules émises :

- Particule  $\beta^-$  : 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





## B. Bilan énergétique

$$\boxed{{}_Z^A X \rightarrow {}_{Z+1}^A Y + {}_{-1}^0 \beta^- + {}_0^0 \bar{\nu}}$$

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

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

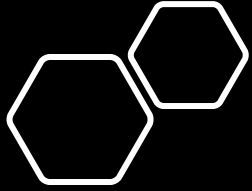
$$\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A, Z + 1)$$

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

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

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

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



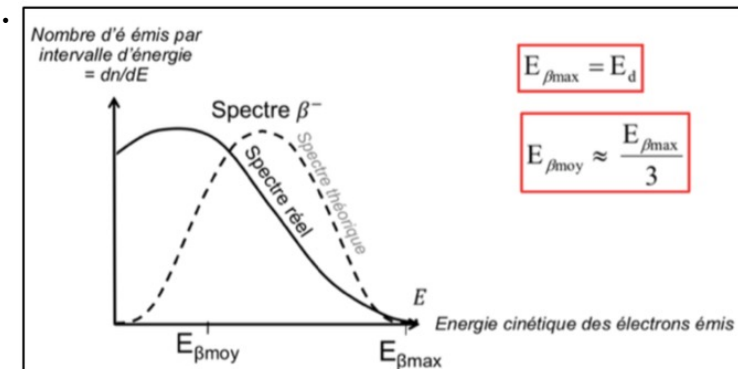
# C. Spectre énergétique

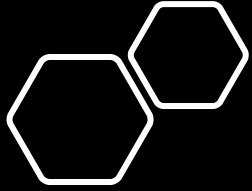
L'énergie délivrée lors de la transformation correspond à une énergie cinétique répartie entre :

- Le noyau fils
- La particule  $\beta^-$
- L'antineutrino

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

- \* Théorie : le spectre électronique continu de la  $\beta^-$  va de 0 (l'antineutrino emporte toute l'énergie) à  $E_{\max}$  (la  $\beta^-$  emporte toute l'énergie).
- \* Réel : décalé vers la gauche en raison des interactions coulombiennes entre les  $\beta^-$  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.

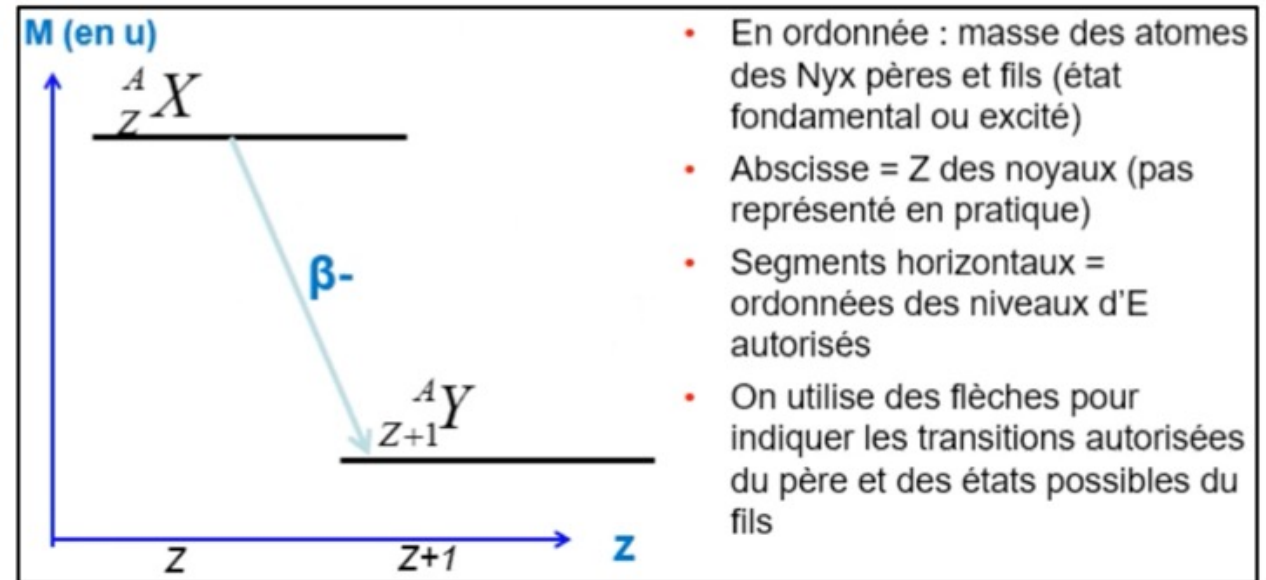


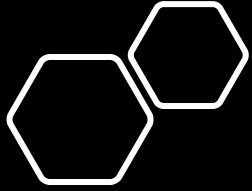


# D. Schéma de désintégration

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

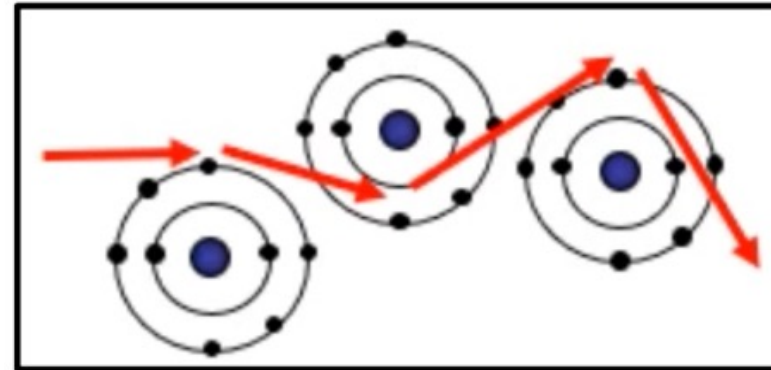
La particule  $\beta^-$  :

→ Chargée **négativement** & **ionisante** par

Interaction avec les électrons de la matière

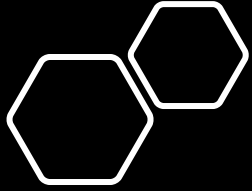
→ Parcours **non rectiligne** et **court**

→ Arrêtées par une **feuille de métal** très fine



L'antineutrino :

→ Très pénétrant, interagit peu avec la matière, indétectable



# F. Applications biomédicales

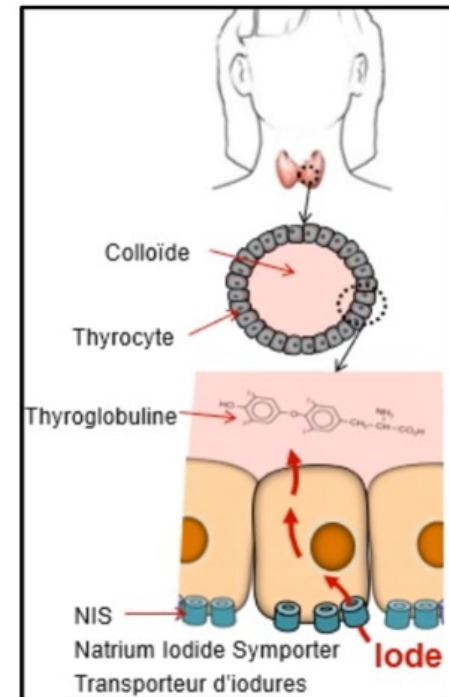
⇒ Radiothérapie :

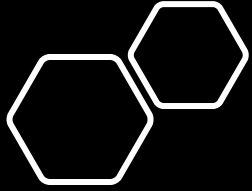
L'iode 131 se transforme en **Xénon 131 métastable** via une  $\beta^-$ . On trouve l'iode 131 à l'état naturel dans l'écorce terrestre et il peut également être produit par fission nucléaire dans les centrales nucléaires.

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** synthétise les **hormones thyroïdiennes** indispensables à la vie. Cette synthèse nécessite de l'**iode**. En temps normal, l'iode capté est stable. Après injection d'iode 131 instable capté par la thyroïde, les émissions  $\beta^-$  vont provoquer des ionisations avec **destruction des cellules thyroïdiennes, qu'elles soient saines ou cancéreuses** +++

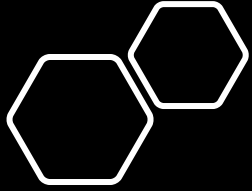




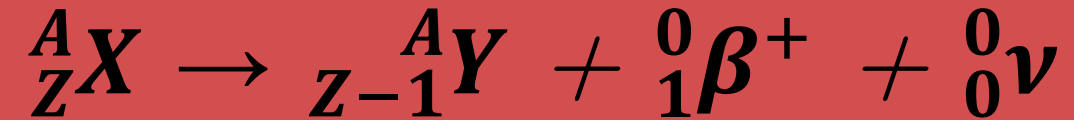
# III.

# Transformation

# $\beta^+$



# A. Réaction de désintégration



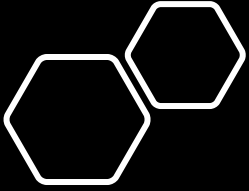
## Particules émises :

Particule  $\beta^+$  : électron positif (positon), ne pré existe pas dans le noyau mais naît de la transformation

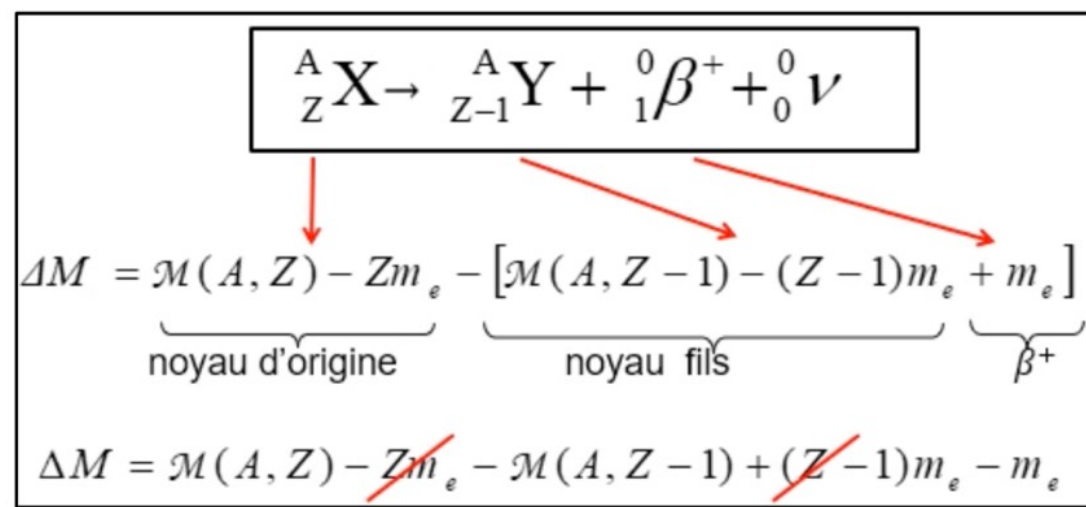
Neutrino  $\nu$  : même caractéristique que l'antineutrino

## Transformation du proton en neutron :

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



## B. Bilan énergétique



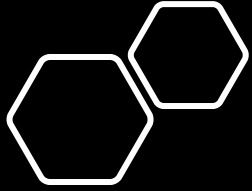
$$\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A, Z-1) - 2m_e$$

$$E_d > 0$$

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

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

Donc pour que la transformation  $\beta^+$  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 1,022MeV** +++

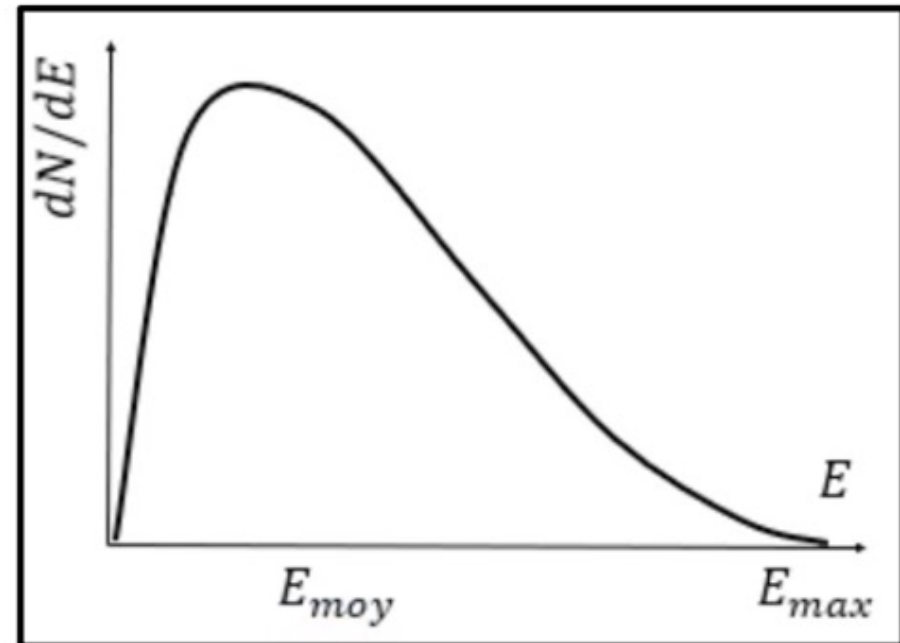


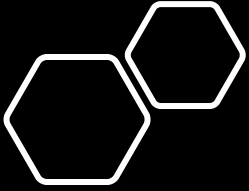
## C. Spectre énergétique

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  $\beta^+$
- Le neutrino

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

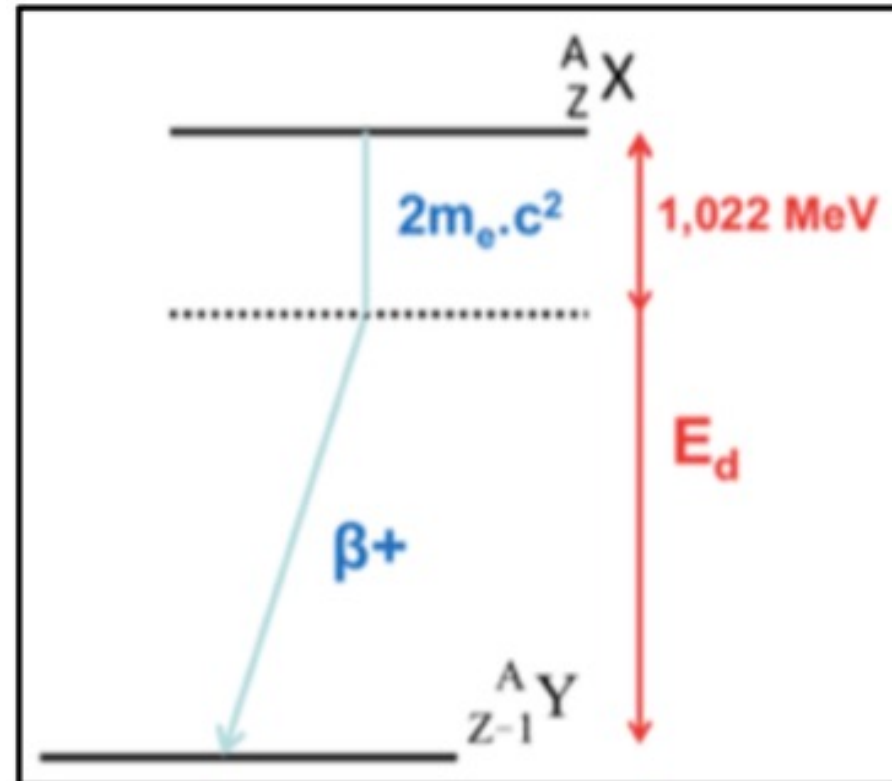


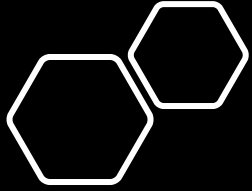


# D. Schéma de désintégration

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

On note le seuil de  $1,022\text{MeV}$  nécessaire pour que la transformation ait lieu.





# E. Parcours dans la matière

## La particule $\beta^+$ :

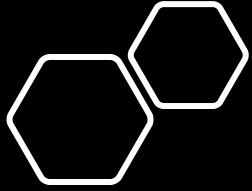
- Chargée positivement et ionisante
- Collisions avec les électrons jusqu'à épuisement de l'énergie cinétique
- Parcours non rectiligne et court
- Réaction d'annihilation : 2 photons  $\gamma$  de 511 keV

## Les photons $\gamma$ :

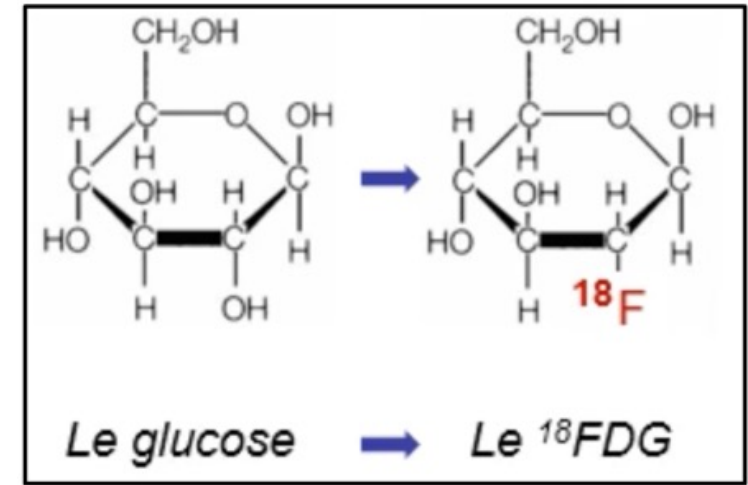
- Origine indirectement nucléaire
- Interactions non obligatoires avec la matière via des effets photo-électriques et Compton
- Atténuation par épaisseurs importantes de plomb et/ou de béton

## Le neutrino :

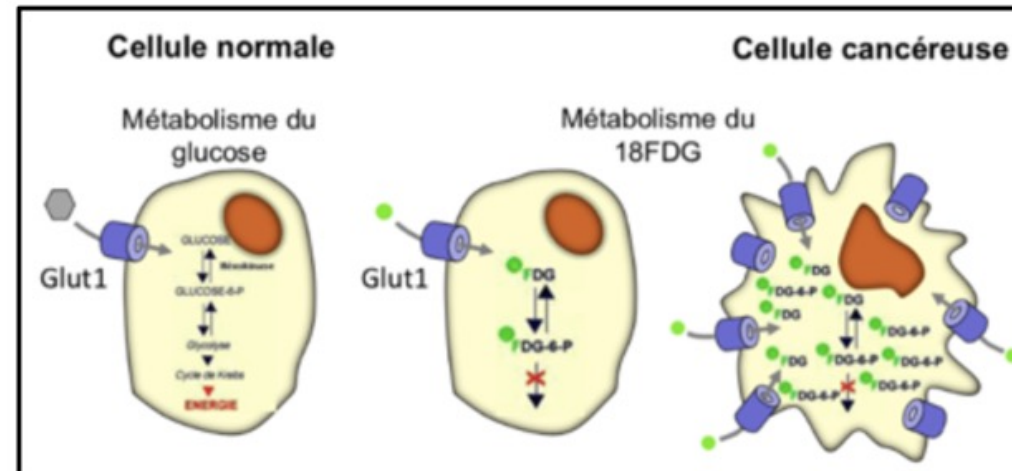
- très pénétrant, interagit peu avec la matière, indétectable (comme l'antineutrino)

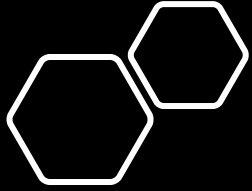


# F. Applications biomédicales

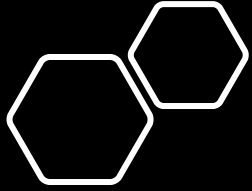


## L'effet Warburg





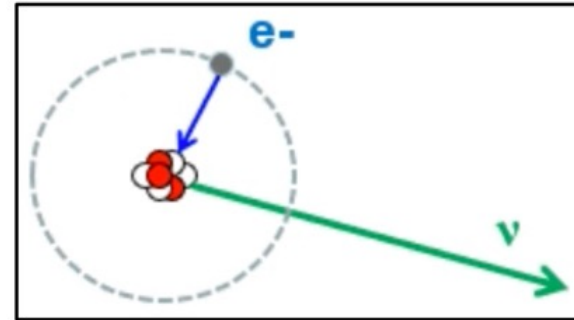
# IV. Capture électronique



# A. Réaction de désintégration

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

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**.

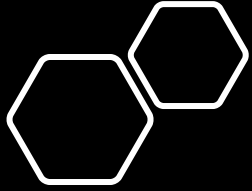


Noyau

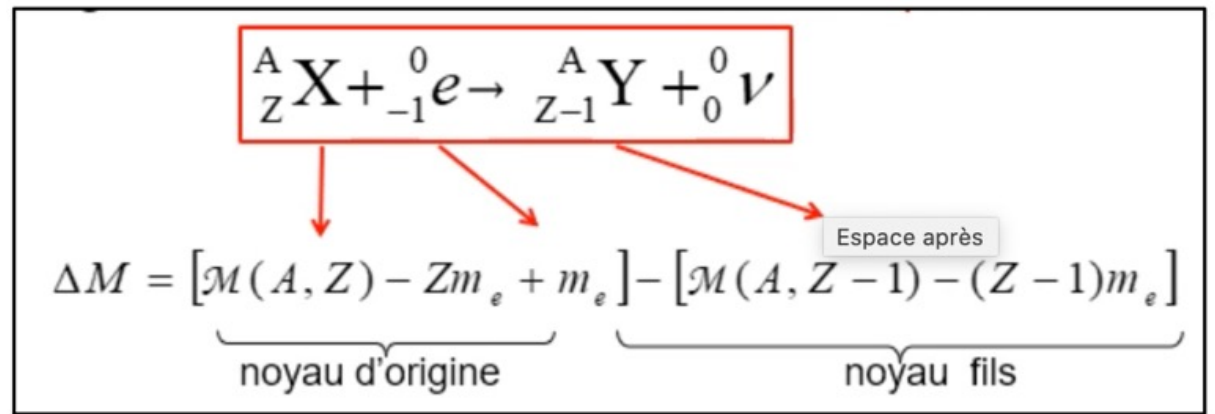


Nucléide





# B. Bilan énergétique



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

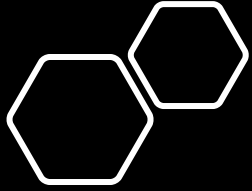
$E_L$  : Énergie de liaison de l'e<sup>-</sup> capturé

$$/!\ \Delta M > E_L \ /!\$$

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  $\beta^+$



# C. Spectre énergétique

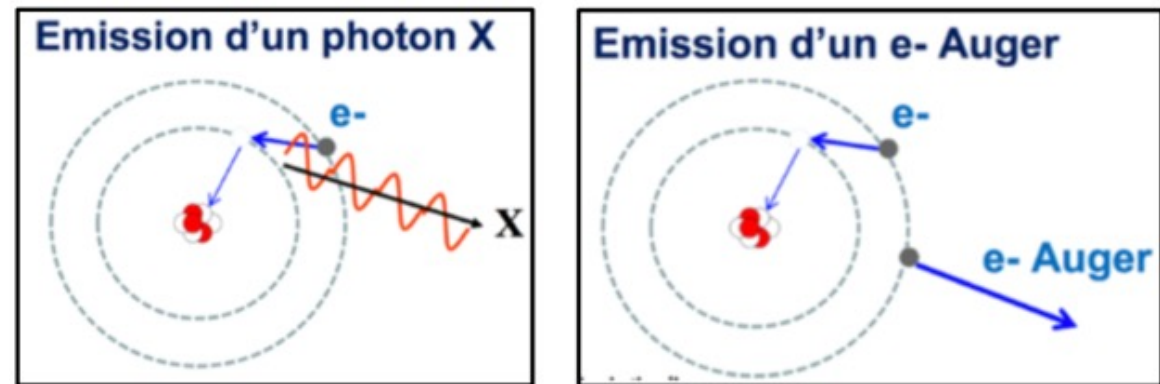
L'énergie délivrée par la transformation correspond à une énergie cinétique se répartissant entre :

→ Le noyau fils : énergie cinétique de recul négligeable encore une fois

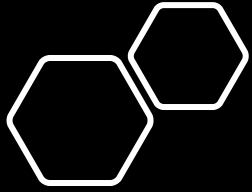
→ Le neutrino : indétectable

⇒ 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 +++

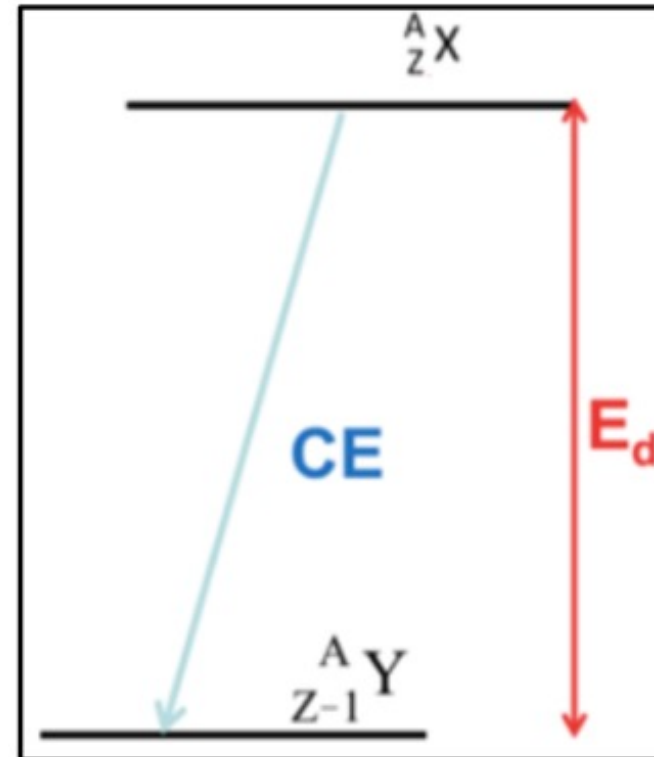


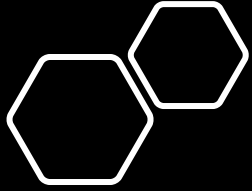
On obtient donc un spectre de raies électromagnétique (si photons X) et/ou électronique d'origine atomique +++



## 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

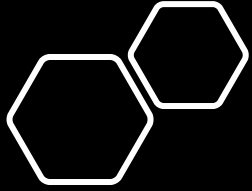
## Le neutrino :

→ indétectable

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

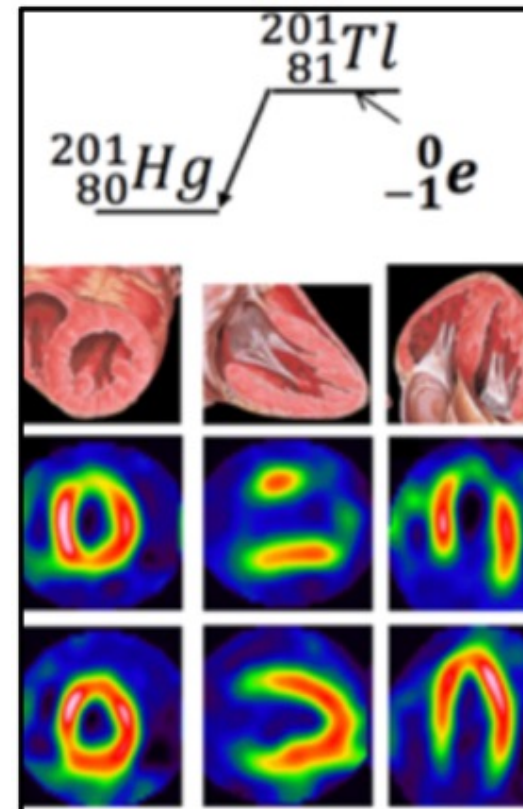
## Photons X :

→ 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





Merci à tous !