

# 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,  $e^+$ ,  $e^-$ ,  $\alpha$
- 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**

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

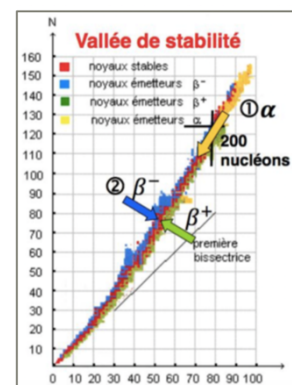
Suite à la découverte des rayons X par **Röntgen** en **1895** :

1896	H. Poincaré et H. Becquerel	Découverte des rayons Uraniques = rayon X
1900	Rutherford et Villard	3 types de radioactivités : $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$
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 <sup>ères</sup> applications de la radioactivité en médecine (thérapeutiques)
1960		Services hospitaliers de médecine nucléaire

## III. CLASSIFICATION

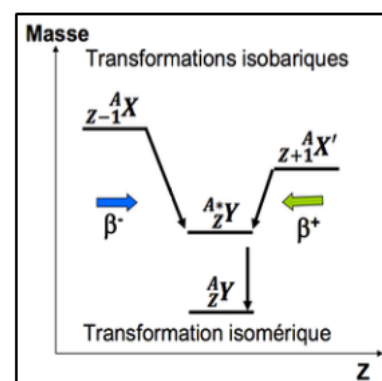
On distingue différentes zones selon le noyau d'origine :

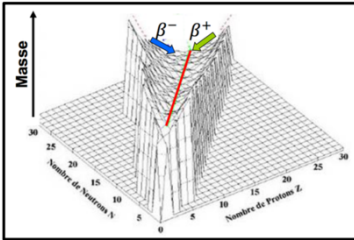
- \* Radioactivité  $\alpha$  : concerne les noyaux lourds avec  $A > 200$
- \* Radioactivité  $\beta$  : excès de neutrons  $\rightarrow \beta^-$   
excès de protons  $\rightarrow \beta^+$
- \* Radioactivité  $\gamma$  : libération d'énergie sans changement de nature du noyau



## IV. ÉVOLUTION 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	$\searrow$	$\nearrow$
$\gamma$	${}^A_ZX^* \rightarrow {}^A_ZX$	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



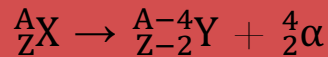
# RADIOACTIVITE ALPHA

## Définition :

Émission d'une particule  $\alpha$  = 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  $\alpha$ .

## 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  $\Delta M$  entre le noyau père (=état initial) et le noyau fils + particule  $\alpha$  (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  $\Delta M$  en u +++

## III. SPECTRE ENERGETIQUE

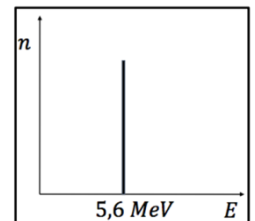
L'énergie disponible libérée par la transformation se répartit en **énergie cinétique** entre le **noyau fils** ( $E_c$  de recul) et la **particule  $\alpha$**

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  $\alpha$  de masse faible

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).



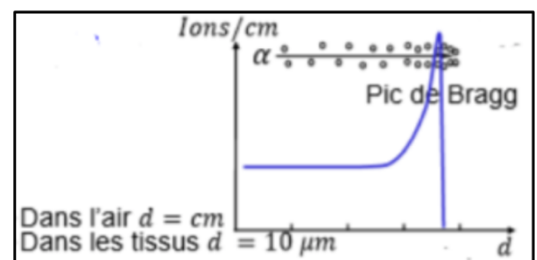
## IV. PARCOURS DANS LA MATIERE

### La particule $\alpha$ :

- 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  $\alpha$  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** 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 :

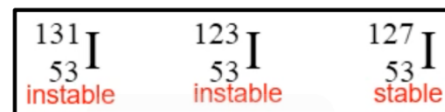
Les particules  $\alpha$  ionisent la matière sur un **trajet court et précis** ce qui est intéressant pour **cibler des cellules cancéreuses** à une certaine profondeur **sans atteindre les cellules saines** +++



# 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.

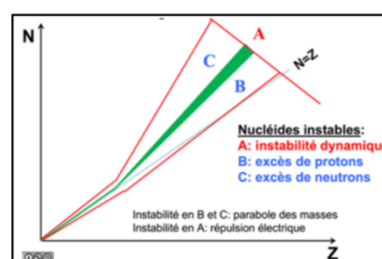


Les transformations radioactives isobariques se produisent **sans changement du nombre de nucléons A** entre **noyau père et fils**, mais Z et N changent.

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

Il existe 3 types de transformation isobariques :

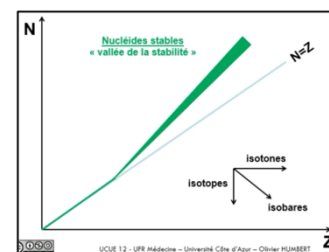
- **Émission  $\beta^-$**  (désintégration  $\beta^-$ ) si **excès de neutrons**
- **Émission  $\beta^+$**  (désintégration  $\beta^+$ ) si **excès de protons**
- **Capture électronique (CE)** si **excès de protons**



⇒ 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  $\alpha$  (noyaux lourds).

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

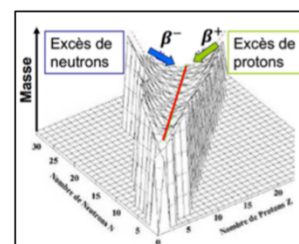
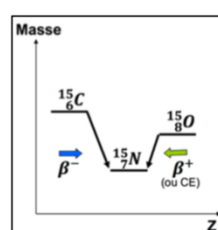
- \* Les noyaux légers : stabilité si  $Z = N$
- \* Les noyaux plus lourds : stabilité si léger excès de neutrons avec compensation des charges répulsives des protons entre eux



→ 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 :

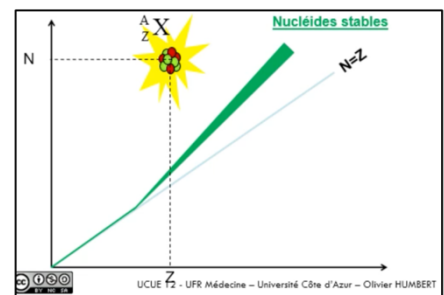
- \* Pas de changement du A
- \* Changement du Z (=proton) et du N (=neutron)
- \* Changement d'élément
- \* Évolution vers une masse minimale
- \*  $E_L$  du noyau fils maximale : stabilité +++
- \* Libération d'énergie
- \* Descente dans la vallée de stabilité



## II. TRANSFORMATION BETA -

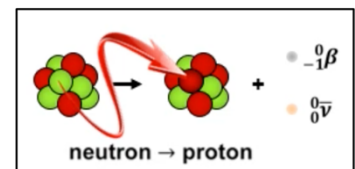
### A. Réaction de désintégration

Les transformations  $\beta^-$  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.



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  $\beta^-$  : 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

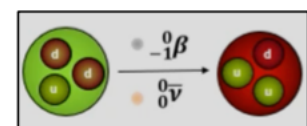
#### Transformation du neutron en proton :

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  $\beta^+$ , 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  $\Delta M$**  entre le système initial et le système final est **convertie sous forme d'énergie**.

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

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

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

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



Pour calculer l'énergie délivrée par cette transformation :

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

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

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

$M$  en u (unité de masse atomique)

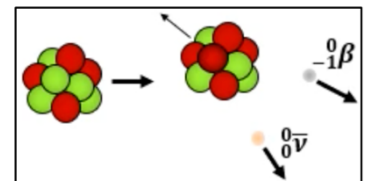
donc  $E_d = [M(A, Z) - M(A, Z + 1)] \times 931,5$

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

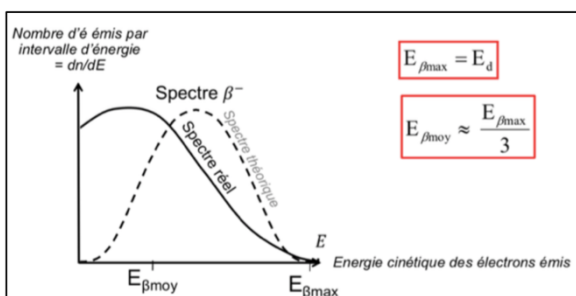
### C. Spectre énergétique

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  $\beta^-$**
- 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** +++



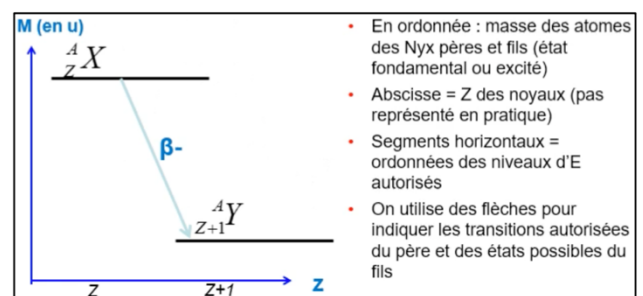
\* Spectre théorique : le spectre électronique continu de la  $\beta^-$  va de 0 (l'antineutrino emporte toute l'énergie) à  $E_{\max}$  (la  $\beta^-$  emporte toute l'énergie).

\* Spectre 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  $E_d$ .

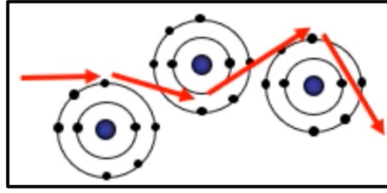




## E. Parcours dans la matière

### 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

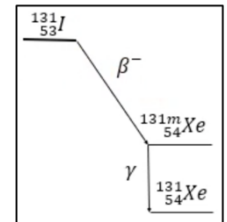
## F. Applications biomédicales

### ⇒ Radiothérapie :

L'**iode 131** se transforme en **Xénon 131 métastable** via une  $\beta^-$  (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).

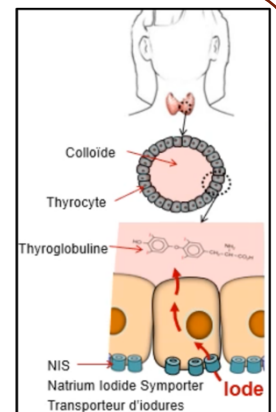
On trouve l'iode 131 à l'état naturel dans l'écorce terrestre et il peut également être produit par fission nucléaire dans les centrales nucléaires.

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 ?

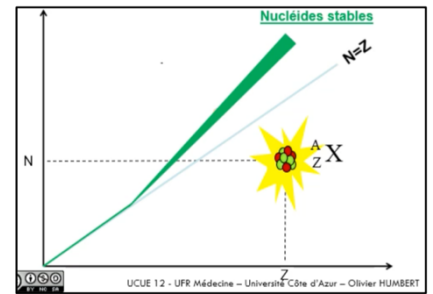
La **thyroïde** est un petit organe endocrine à la base du cou synthétisant les **hormones thyroïdiennes** indispensables à la vie. Son organisation est **folliculaire** avec les thyrocytes en périphérie et la colloïde au centre (lieu de synthèse des hormones). Cette synthèse nécessite de l'**iode** 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  $\beta^-$  vont provoquer des ionisations (lésions de l'ADN des thyrocytes) avec **destruction des cellules thyroïdiennes, qu'elles soient saines ou cancéreuses** +++



### III. TRANSFORMATION BETA +

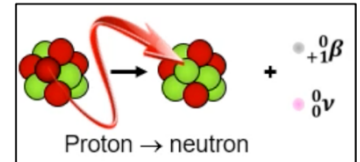
#### A. Réaction de désintégration

Les transformations  $\beta^+$  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** :  ${}_1^1p \rightarrow {}_0^1n + {}_1^0\beta^+ + {}_0^0\nu$

Au niveau du **nucléide** :  ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-1}^AY + {}_1^0\beta^+ + {}_0^0\nu$

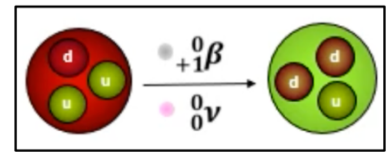


#### Particules émises :

- \* 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

$${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-1}^AY + {}_1^0\beta^+ + {}_0^0\nu$$

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

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

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

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 :

$$E_d > 0$$

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

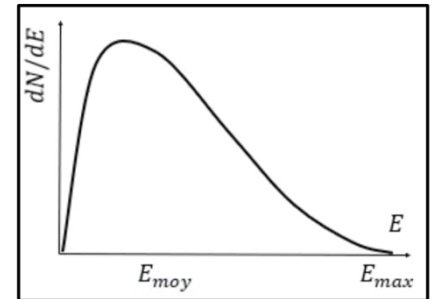
$$\text{or : } 2m_e \times c^2 = 1,022 \text{ MeV}$$

Donc pour que la transformation  $\beta^+$  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



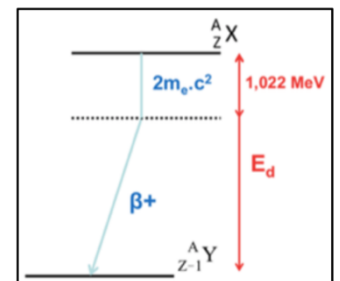
⇒ Au final, l'énergie délivrée se répartit de manière **aléatoire** entre la **particule  $\beta^+$**  et le **neutrino** mais **seule la particule  $\beta^+$  est détectable** ce qui donne un **spectre continu** +++

Le spectre énergétique va de 0 (le neutrino emporte toute l'énergie) à  $E_{\max}$  (la particule  $\beta^+$  emporte toute l'énergie). Ici, le spectre n'est pas décalé vers la gauche car il n'y a pas d'interactions coulombiennes entre  $\beta^+$  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.

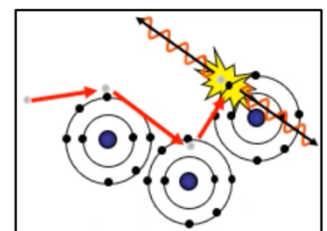
On note le seuil de **1,022MeV** nécessaire pour que la transformation ait lieu.



### 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

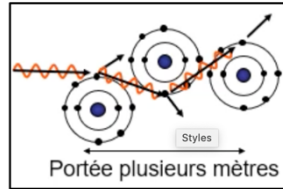


Une fois à l'arrêt (énergie cinétique = 0), la particule  $\beta^+$  va chercher à s'apparier avec un électron de la matière : c'est la **réaction d'annihilation**. La masse des 2 électrons va se convertir en énergie lumineuse sous forme de **2 photons  $\gamma$  de 511keV** chacun émis en coïncidence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



### 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



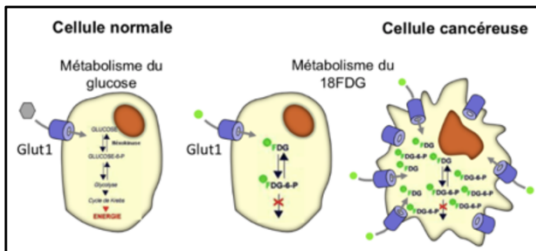
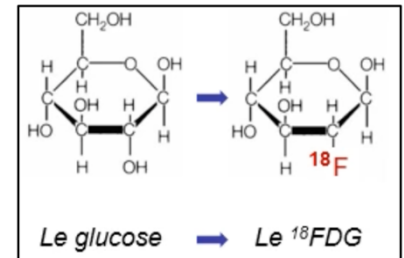
### Le neutrino :

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

## F. Applications biomédicales

### Le 18 Fluoro-déoxy-glucose $^{18}\text{FDG}$ :

Le Fluor 18 est un atome radioactif en surcharge de protons se désintégrant par  $\beta^+$  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  $^{18}\text{FDG}$ , molécule analogue au glucose et radioactive émettant indirectement des photons  $\gamma$  détectable à l'imagerie.

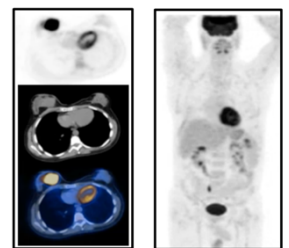


En raison de leur prolifération accrue, les cellules tumorales consomment énormément de glucose : c'est l'**effet Warburg**. Dans ces cellules, le  $^{18}\text{FDG}$  rentre par le transporteur GLUT comme une molécule de glucose normale et subit la 1<sup>ère</sup> phosphorylation de la glycolyse le transformant 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  $\beta^+$ , il y a émission secondaire de photons  $\gamma$ .

Ces photons  $\gamma$  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.

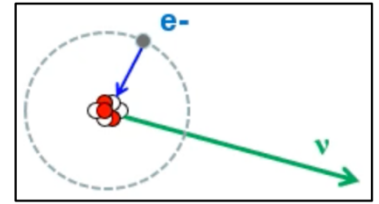
Cette technique est très intéressante dans le domaine de la cancérologie.



## IV. CAPTURE ELECTRONIQUE

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

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**.

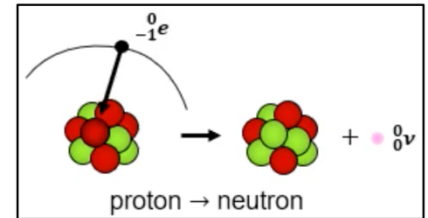


### A. Réaction de désintégration

Au niveau du **noyau** :

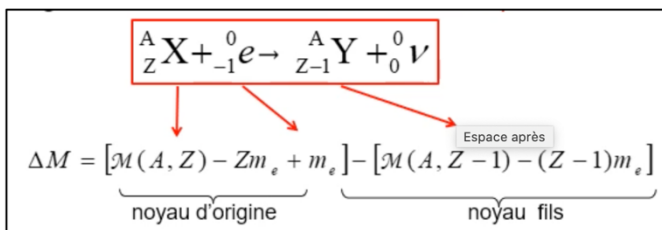
$${}_1^1p + {}_{-1}^0e \rightarrow {}_0^1n + {}_0^0\nu$$

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



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

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  $\Delta M$  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 :

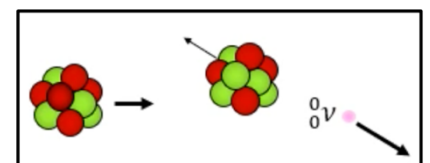
- En dessous du seuil énergétique de 1,022MeV : seule la CE est possible
- Au-dessus du seuil énergétique de 1,022MeV : compétition entre CE et  $\beta^+$

### 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 : 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 +++

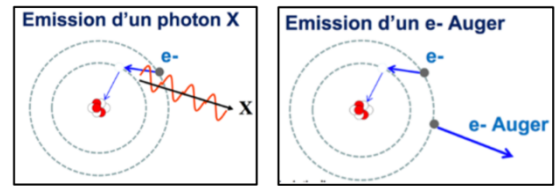
Explication : Après la CE, un électron manque au niveau d'une couche profonde du cortège de l'atome entraînant une **instabilité électronique** (et non plus nucléaire). Pour revenir à la stabilité, un électron d'une couche plus périphérique va venir combler la case vacante profonde libérant de l'énergie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

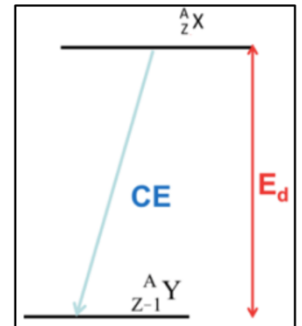


⇒ Ici pour les calculs d'énergie des photons de fluorescence et électrons Auger il faut utiliser les énergies de liaison de l'atome FILS

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'O<sub>2</sub>, en cas d'infarctus par exemple où un caillot bouche une coronaire*).

