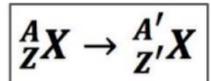
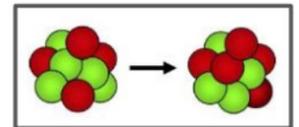


# Transformations radioactives : généralités, radioactivité alpha et transformations isobariques

## I. Généralités sur les transformations radioactives

### A. Introduction

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.

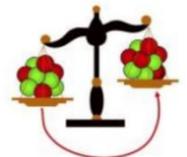


Un noyau père instable se transforme **spontanément** en noyau fils possédant certaines caractéristiques :

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

La transformation radioactive s'écrit de manière générale :  $X \rightarrow Y + \text{particule(s)} + \text{photon}$

Le noyau père (X), obligatoirement **radioactif** se transforme de manière **irréversible** en noyau fils (Y) **radioactif** (dans ce cas-là, il subira à son tour une transformation radioactive) ou **stable**. Les particules émises sont diverses : n, e-, e+, alpha. L'émission de **photon** est inconstante.



Cette transformation radioactive :

- ✓ Change la **nature** ou le **niveau d'énergie** du noyau : processus nucléaire
  - ➔ Modification de nature : le nombre de **protons** et de **neutrons** varie entre père et fils
  - ➔ Modification du niveau d'énergie : même nombre de nucléons.

✓ 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.

✓ Est naturelle ou artificielle

On retrouve :

✓ Des **noyaux naturels** : 274 stables et 51 radioactifs instables (ces derniers ont une  $T_{1/2}$  extrêmement importante, au moins égale à l'âge de la Terre, ils ont une origine magmatique solaire où se crée un phénomène de fusion nucléaire)

✓ 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

	Bq/kg
Eau douce	0,1
Eau de mer	12
Corps humain*	130

Avec 1 Bq =  
1 désintégration/seconde  
\* 9000Bq pour 70kg

## B. Historique

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

✓ 1896 : **Henri Poincaré** et **Henri Becquerel** cherchent un lien entre la **fluorescence des minerais** et celle **des rayons X**. Becquerel obtiendra avec Pierre et Marie Curie le Prix Nobel de physique en 1903.

❖ Expérience : Les sels d'uranium exposés au soleil émettent une fluorescence qui impressionnent les plaques photosensibles de platine au cyanure comme le font les rayons X. Un 2e essai sans exposer les sels à la lumière montre que les plaques sont également impressionnées.

❖ Conclusion : Un rayonnement non lié à la fluorescence, donc différent des rayons X est émis : les « Rayons U (uraniques) ».

✓ 1898 : **Pierre et Marie Curie** observent ce phénomène avec d'autres minerais comme le **radium** et le **polonium** : ce phénomène n'est donc pas spécifique à l'uranium. C'est la « radioactivité » et P&M Curie obtiennent par la suite le Prix Nobel de Chimie en 1911.

✓ 1900 : **Rutherford** et **Villard** isolent 3 types de rayonnements issus de **l'uranium** et du radium :  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ .

✓ 1934 : **Frédéric Joliot** et **Irène Joliot Curie** découvrent la **radioactivité artificielle** et obtiennent le Prix Nobel de Chimie en 1935.

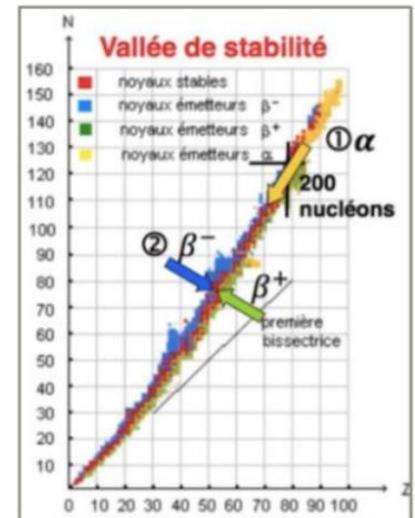
✓ 1940 : Premières applications de la radioactivité en médecine, d'abord dans un but thérapeutique, avec le **phosphore  $^{32}\text{P}$**  (contre les leucémies, plus utilisé à l'heure actuelle) et **l'iode  $^{131}\text{I}$**  (contre les cancers de la thyroïde, toujours utilisé).

✓ 1960 : Les services hospitaliers de médecine nucléaire apparaissent avec l'utilisation de la radioactivité pour le traitement et surtout pour le diagnostic.

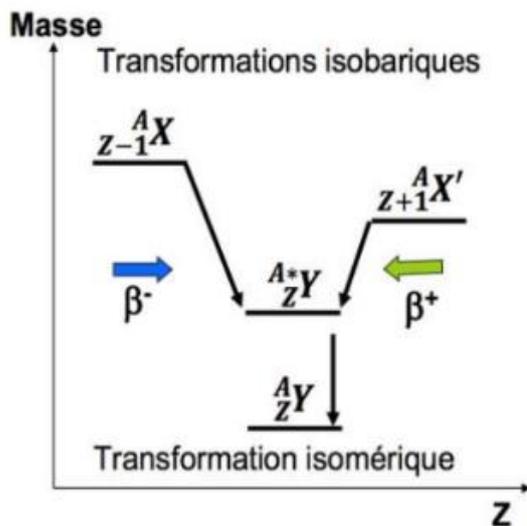
## C. Classification

Selon le noyau d'origine on distingue :

1. Si  $A > 200$  nucléons (noyaux lourds) : **radioactivité alpha**
2. Si excès de neutrons : **émission  $\beta^-$**   
Si excès de protons : **émission  $\beta^+$**  } Transformation isobarique avec A identique
3. Si excès d'énergie interne : **transformation isomérique**



## D. Evolution vers une masse inférieure

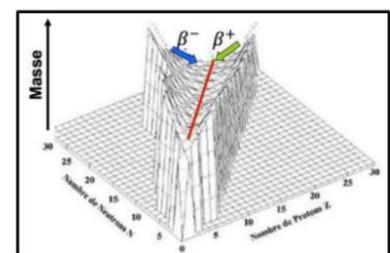


➤ Le noyau père  ${}_{Z-1}^A X$ , en excès de neutrons se désintègre par transformation **isobarique  $\beta^-$**  en noyau fils instable  ${}_{Z}^A Y$  : transformation d'un **neutron en proton**, changement d'élément (car Z change) et diminution de la masse.

➤ Le noyau père  ${}_{Z+1}^A X'$ , en excès de protons se désintègre par transformation **isobarique  $\beta^+$**  en noyau fils instable  ${}_{Z}^A Y$  : transformation d'un **proton en neutron**, changement d'élément (car Z change) et diminution de la masse.

➤ Le noyau père  ${}_{Z}^A Y^*$  en excès d'énergie interne se désintègre par transformation **isomérique** en noyau fils  ${}_{Z}^A Y$ , stable : **non modification du nombre de protons et de neutrons** et diminution de la masse.

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**.



Au final, on a une évolution vers :

- ✓ Une **masse minimale**
- ✓ Une **énergie de liaison EL maximale**
- ✓ Une **stabilité maximale** des nucléons entre eux
- ✓ Une libération d'énergie sous forme de **rayonnement radioactif**

## E. Lois de conservation

Il existe des lois de conservation toujours appliquées lors des transformations **radioactives** :  
+++



✓ **Conservation** du nombre de **nucléons A** et du **nombre de charges** (cette conservation a lieu entre le système initial : ensemble des éléments/particules avant la transformation & le système final : ensemble des éléments/particules après la transformation)

$$A = A1 + A2 \text{ et } Z = Z1 + Z2 \text{ sur la transformation ci-dessus}$$

✓ **Conservation** de l'énergie totale (énergie cinétique + potentielle + rayonnante)

✓ **Conservation** de la quantité de mouvement

**La masse totale ne se conserve pas** : la masse du noyau père n'est pas égale à la masse du noyau fils + la masse de la particule

*Instant culture G du professeur : Lao Tseu, un sage chinois du 6<sup>e</sup> siècle disait « Si d'un noyau tu confonds le nombre de masse et sa masse, alors tu es à la masse » (fin de l'instant culture G fort instructif).*

## II. Radioactivité alpha

La radioactivité alpha correspond à l'émission d'une **particule  $\alpha$** , noyau de l'atome d'Hélium  ${}^4_2\text{He}$ , lors de la transformation d'un noyau lourd ( $A > 200$ ) en un noyau plus léger et plus stable. La particule  $\alpha$ , formée de 2 protons et 2 neutrons, peut être notée de plusieurs manières (particule  $\alpha$ , noyau d'He,  ${}^4_2\text{He}$ ,  $\text{He}^{++}$ ,  $\alpha^{++}$ ).

Le noyau d'Hélium possède :

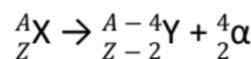
✓ Un noyau à nombre magique (2 et 2) : particule **très stable** avec  $EL/A = 7 \text{ MeV}$

✓ Le seul noyau complexe émis spontanément lors de transformations radioactives

On observe souvent plusieurs émissions  $\alpha$  à la suite le plus souvent.

### A. Réaction de désintégration

✓ La réaction de désintégration se note :



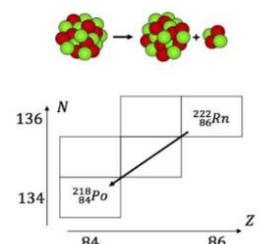
✓ **Conservation du A**

✓ **Conservation de la charge**

✓ **Changement d'élément**

✓ Noyau fils plus léger

✓ On se décale de 2 cases vers le bas et de 2 cases vers la gauche



## B. Bilan masse énergie

Le bilan des masses nucléaires de la transformation  $\alpha$  se calcule en faisant : **état initial - état final** soit la différence de masse  $\Delta M$  entre le noyau père d'une part et le noyau fils et la particule  $\alpha$  d'autre part.

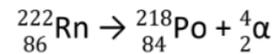
$$\Delta M = \underbrace{\mathcal{M}(A, Z) - Zm_e}_{\text{noyau d'origine}} - [\underbrace{\mathcal{M}(A - 4, Z - 2) - (Z - 2)m_e}_{\text{noyau fils}} + \underbrace{\mathcal{M}(4, 2) - 2m_e}_{\alpha}]$$

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

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

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 ++

Exemple : Calculez l'énergie délivrée par cette transformation :



$$M(222, 86) = 222,0176 ; M(218, 84) = 218,009 ; M(4, 2) = 4,0026$$

$$\Delta M = 222,0176 - 218,009 - 4,0026 = 6.10^{-3} \text{ u}$$

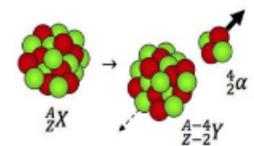
$$\text{Énergie disponible : } E_d = 6.10^{-3} \times 931,5 = 5,6 \text{ MeV}$$

## C. 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  $\alpha$** .

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

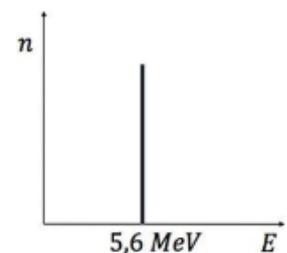


On considère que le **noyau fils** emporte une partie négligeable de l'énergie cinétique tandis que la **particule  $\alpha$**  en emporte la quasi-totalité :

$$\text{soit } E_{c \text{ particule } \alpha} = E_d \text{ +++}$$

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).

Si on reprend l'exemple du radon (vu juste avant), on obtient le spectre ci-contre.



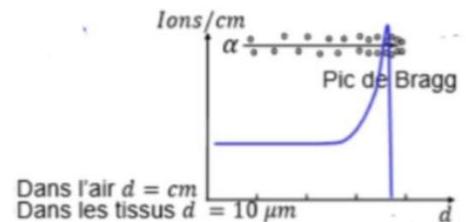
## D. Parcours dans la matière

### La particule $\alpha$ :

- ✓ Relativement **lourde** du fait de ses 4 nucléons (*juste avant, 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 Braag +++ et arrêtée par une feuille de papier

### Le pic de Braag 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 Braag.

Le pouvoir d'arrêt se note :

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

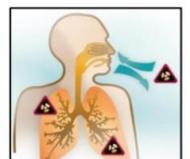
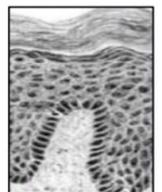
## E. Applications biomédicales

### ➤ 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** 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

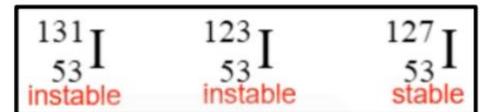
Les particules  $\alpha$  ionisent la matière sur un trajet court et précis ce qui est intéressant pour cibler des **cellules cancéreuses** à une certaine profondeur **sans atteindre les cellules saines**+++

## III. Principe physique des transformations isobariques

### Rappels et définitions :

On symbolise un nucléide en utilisant son symbole chimique (X), son numéro atomique (Z) et son nombre de masse (A).

Isotopes : 2 nucléides avec le **même Z** mais des A différents. Ils sont indiscernables chimiquement car **même élément chimique**, ils diffèrent uniquement par leur nombre de neutrons (*Iode*).



Isobares : 2 nucléides avec le **même A** mais des Z différents (pas le même élément chimique) donc un nombre de neutrons différent (*carbone 14 et azote 14*).

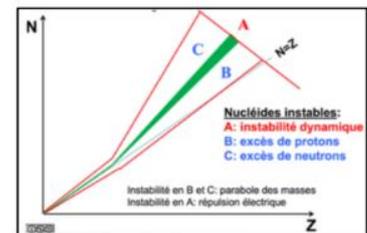


Les **transformations radioactives isobariques** se produisent **sans changement du nombre de nucléons A** entre noyau père et fils, mais Z et N changent.

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

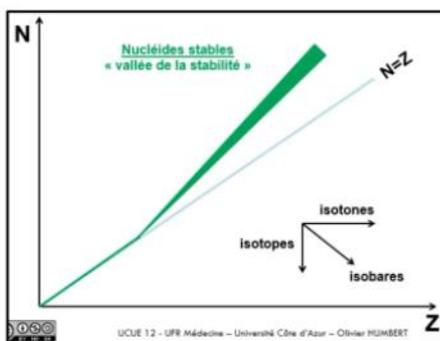
Il existe **3 types de transformation isobariques** :

- ✓ 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).



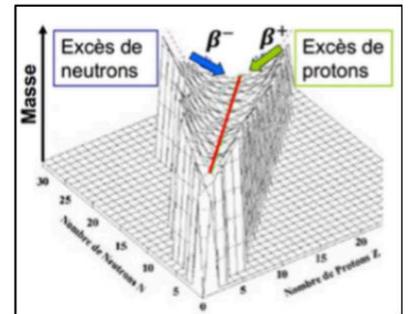
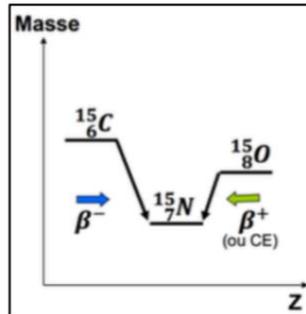
Sur le diagramme de Segré, aussi appelé diagramme des nucléides, on distingue :

- ✓ 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 et du N
- ✓ **Changement d'élément**
- ✓ Évolution vers une **masse minimale**
- ✓ El du noyau fils maximale : **stabilité** +++
- ✓ Libération d'énergie
- ✓ Descente dans la vallée de stabilité



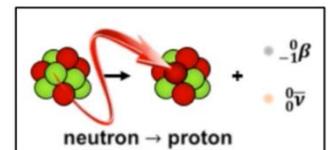
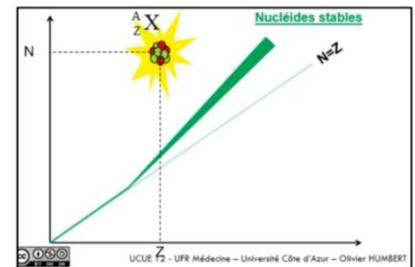
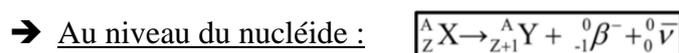
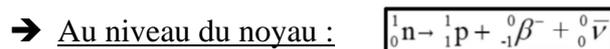
## IV. Transformations $\beta$ -

### A. Réaction de désintégration

Les **transformations  $\beta^-$**  se produisent lorsque le noyau père est en excès de **neutrons**. Par conséquent, il :

- perd un neutron
- gagne un proton

Le nombre de masse (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

Transformation du neutron en proton :

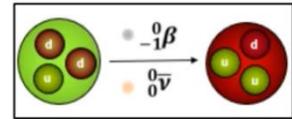
Les neutrons et les protons ne sont pas les particules les plus élémentaires de la matière car composés de quarks. Il en existe 2 types :

- up de charge +2/3
- 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

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.

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

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

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

$$\boxed{\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A, Z+1) = \text{différence de masse nucléaire}}$$

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

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

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

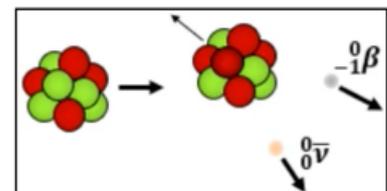
donc  $\boxed{E_d = [\mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A, Z+1)] \times 931,5}$

La 2e méthode est préférentiellement utilisée car plus pratique mais attention aux unités !

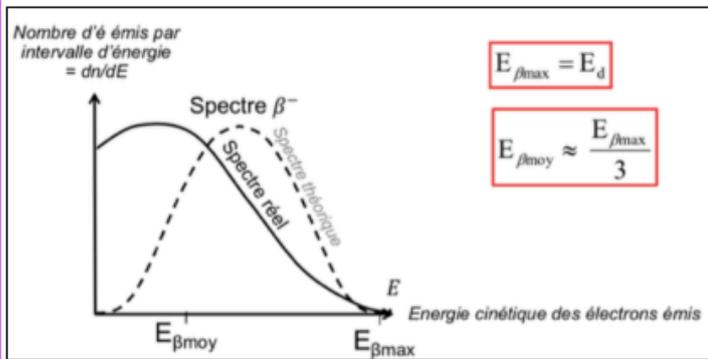
## C. Spectre énergétique

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** +++



Z

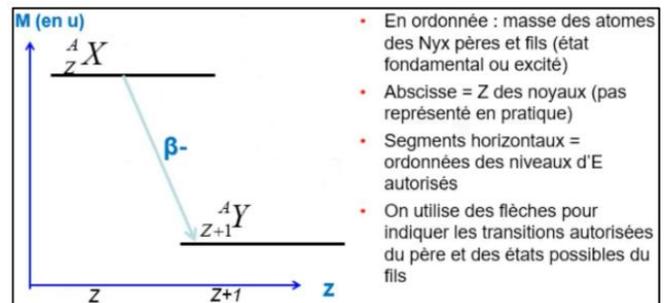
Spectre théorique : le spectre électronique continu de la  $\beta^-$  va de 0 (l'antineutrino emporte toute l'énergie) à  $E_{\max}$  (la  $\beta^-$  emporte toute l'énergie).

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  $E_d$ .



Exemple : Le carbone 14 se transforme en azote 14 par transformation  $\beta^-$ . Quelle est l'énergie maximale de la particule  $\beta^-$  sachant que  $M(14,6) = 14,003241u$  et  $M(14,7) = 14,003073u$ .

Réponse :

$$E_d = [M(14,6) - M(14,7)] \times 931,5$$

$$E_d = [14,003241 - 14,003073] \times 931,5$$

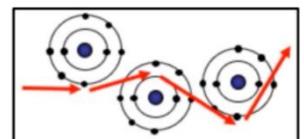
$$E_d = 0,156 \text{ MeV} = 156 \text{ keV}$$

## 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



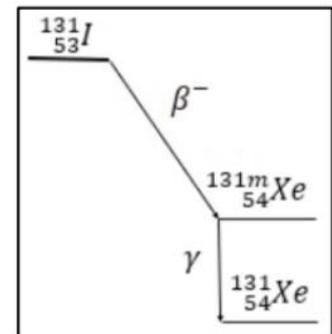
## F. Applications biomédicales

### ➤ Radiothérapie

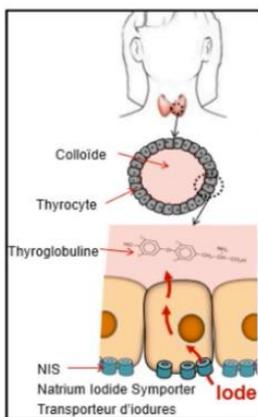
L'iode 131 se transforme en **Xénon 131 métastable** via une  $\beta^-$ .

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 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).

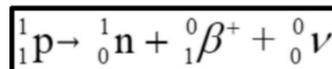
Cette synthèse nécessite de l'iode capté par des transporteurs NIS situés sur les thyrocytes puis transporté jusque dans la colloïde. En temps normal, l'iode capté est stable. Après injection d'iode 131 instable capté par la thyroïde, les émissions  $\beta^-$  vont provoquer des ionisations (lésions de l'ADN des thyrocytes) avec destruction des cellules thyroïdiennes, qu'elles soient saines ou cancéreuses +++

## IV. Transformations $\beta^+$

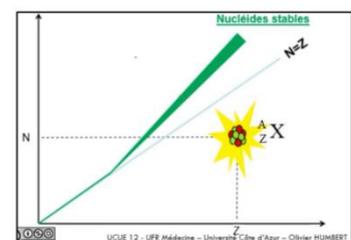
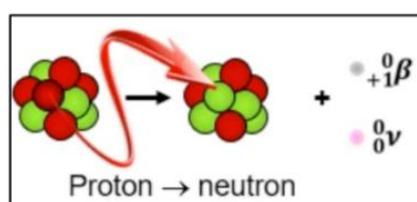
### A. Réaction de désintégration

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 :

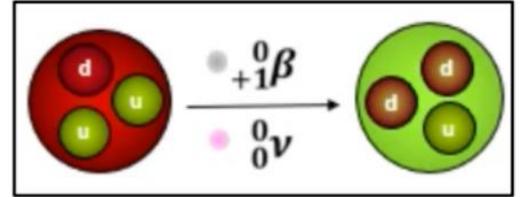


➔ Au niveau du nucléide :



Particules émises :

- Particule  $\beta^+$  : électron positif (positon), ne pré existe pas dans le noyau mais naît de la transformation
- Neutrino  $\bar{\nu}$  : même caractéristiques que l'antineutrino



Cette fois-ci, un quark up se transforme en quark down.

B. Bilan énergétique

$$\begin{array}{c} \boxed{{}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_1 \beta^+ + {}^0_0 \bar{\nu}} \\ \downarrow \qquad \qquad \qquad \searrow \qquad \qquad \qquad \searrow \\ \Delta M = \underbrace{\mathcal{M}(A, Z) - Zm_e}_{\text{noyau d'origine}} - \left[ \underbrace{\mathcal{M}(A, Z-1) - (Z-1)m_e}_{\text{noyau fils}} + \underbrace{m_e}_{\beta^+} \right] \\ \Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \cancel{Zm_e} - \mathcal{M}(A, Z-1) + \cancel{(Z-1)m_e} - m_e \\ \boxed{\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A, Z-1) - 2m_e} \end{array}$$

Pour calculer l'énergie délivrée :

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

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

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 :

$$\begin{array}{l} E_d > 0 \\ \text{donc : } [\mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A, Z-1)] \times c^2 > 2m_e \times c^2 \\ \text{or : } 2m_e \times c^2 = 1,022 \text{ MeV} \end{array}$$

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 +++

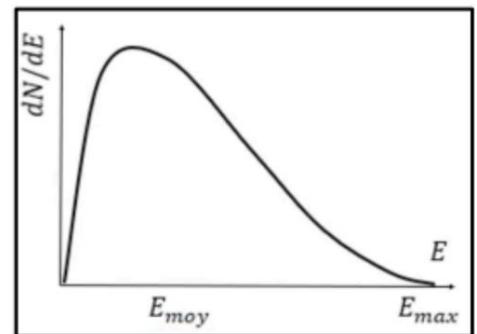
## C. Spectre énergétique

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 la  $\beta^+$  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.

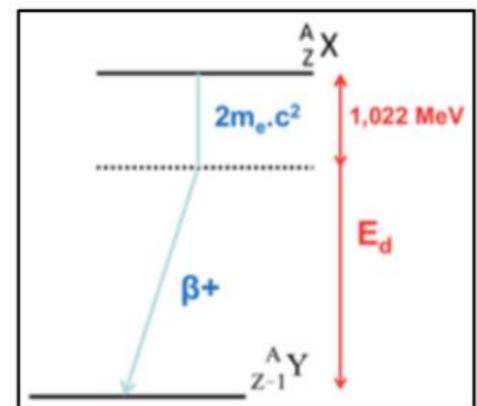
Exemple : Le fluor 18 se transforme en oxygène 18 via une  $\beta^+$ . Quelle est l'énergie maximale de la particule  $\beta^+$  sachant que  $M(18,9) = 18,0009380u$  et  $M(18,8) = 17,9991610u$ .

Réponse :

$$E_d = [18,000938 - 17,9991607] \times 931,5 - 2 \times 5,486 \cdot 10^{-4} \times 931,5$$

$$E_d = [0,001777] \times 931,5 - 1,022$$

$$E_d = 0,633 \text{ MeV} = 633 \text{ keV}$$

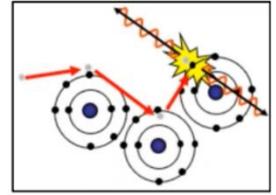


## E. Parcours dans la matière

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 g de 511keV chacun émis en coïncidence (à  $180^\circ$  l'un de l'autre).



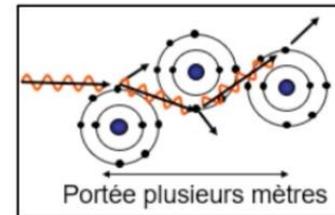
Démonstration : masse électron = masse positon = 0,0005486u

Chaque photon g a une énergie  $E = 0,000548 \times 931,5 = 0,511\text{MeV} = 511\text{keV}$

Le neutrino : très pénétrant, interagit peu avec la matière, indétectable (comme l'antineutrino)

Les photons g :

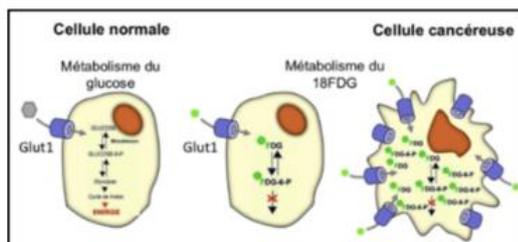
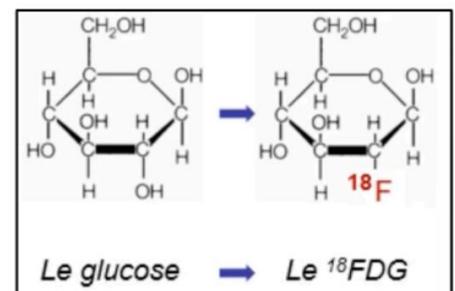
- ✓ Origine indirectement nucléaire
- ✓ Interactions non obligatoires avec la matière via des effets photo-électriques et Compton
- ✓ Atténuation par épaisseurs importantes de plomb et/ou de béton



## F. Applications biomédicales

Le 18 Fluoro-déoxy-glucose :

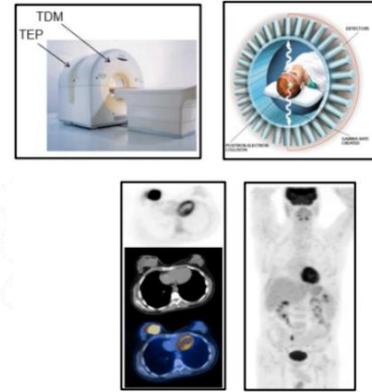
Le Fluor 18 est un atome radioactif en surcharge de **protons** se **désintégrant par  $\beta^+$**  en Oxygène 18. Le Fluor 18 ayant une  $1/2$  vie de 110min, au bout de ce laps de temps la moitié des atomes se seront désintégrés. En le fixant à une **molécule de glucose** à la place d'un groupement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



En raison de leur prolifération accrue, les cellules tumorales hyper consomment du 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 1ère phosphorylation de la glycolyse le transformant en FDG-G6P ne pouvant pas subir la suite de la glycolyse en raison de l'atome de Fluor. Le FDG-G6P s'accumule donc dans les cellules tumorales et, par émission  $\beta^+$ , il y a émission secondaire de photons g.

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.

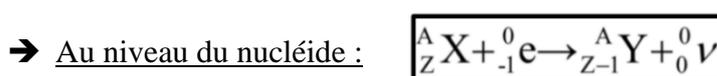
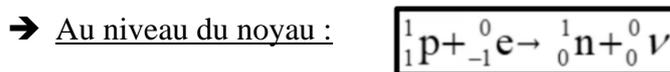
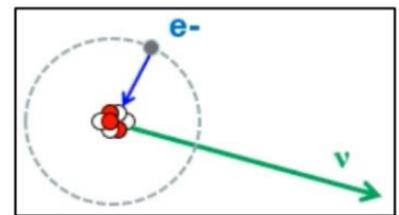


## V. Capture électronique (CE)

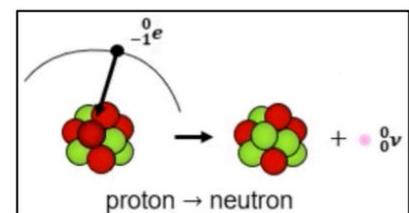
### A. Réaction de désintégration

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

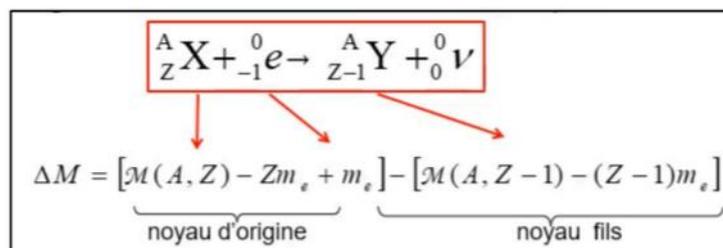
Elle consiste en la **capture d'un électron** d'une couche électronique profonde (couche K le plus souvent) par le noyau au sein duquel il se **combine à un proton** pour **donner un neutron** : A reste identique et le noyau fils descend dans la vallée de stabilité. Une seule particule est émise : le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



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



### B. Bilan énergétique



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

Pour calculer l'énergie délivrée lors de la transformation :

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

Energie 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 :

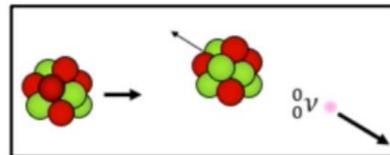
✓ En dessous du seuil énergétique de 1,022MeV : seule la **CE est possible** +++

✓ 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** : indétectable



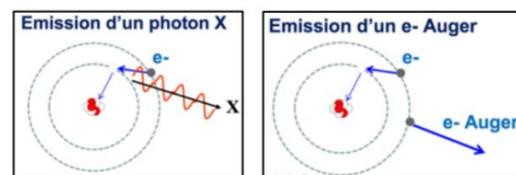
✓ Il n'y a donc **pas de spectre nucléaire direct** +++

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

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  $E = E_k - E_l - E_l$   
 $E_l$  = toujours dans le même exemple

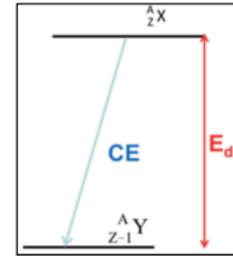


- ➔ Ici pour les calculs d'énergie des photons de fluorescence et électrons Auger il faut utiliser les **énergies de liaison de l'atome FILS**

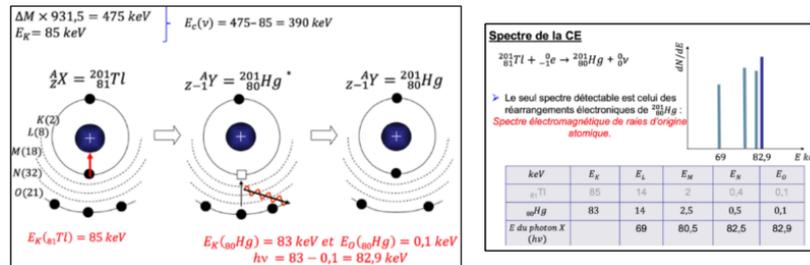
On obtient donc un **spectre de raies électromagnétique** (si photons X) et/ou **électronique** d'origine atomique +++

## 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.



Exemple : Le Thallium 201



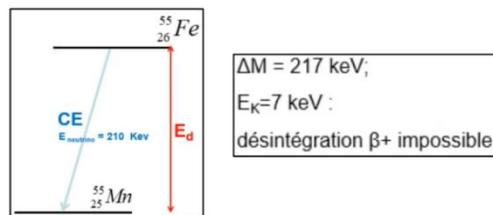
Le Thallium 201 se désintègre par CE en Mercure 201. Ici, l'énergie délivrée est  $< 1,022\text{MeV}$  donc la transformation  $\beta^+$  est impossible.

Lorsque l'on calcule l'énergie cinétique du neutrino libéré, il ne faut pas oublier de soustraire l'énergie de liaison de l'électron capturé à l'énergie délivrée. Le neutrino est bien indétectable.

Ici, un électron de la couche O vient combler la case vacante laissée par l'électron capturé au niveau de la couche K. Le photon de fluorescence libéré suite à la désexcitation a donc une énergie  $E = E_K - E_O$  (on prend bien les énergies de liaison du MERCURE, le prof insiste +++ là-dessus).

Au niveau du spectre de la CE, on retrouve les énergies des photons de fluorescence et électrons Auger : on a bien un spectre de raies électromagnétique et électronique d'origine atomique. Ce spectre correspond aux réarrangements électroniques de l'atome fils.

Exemple n°2 :



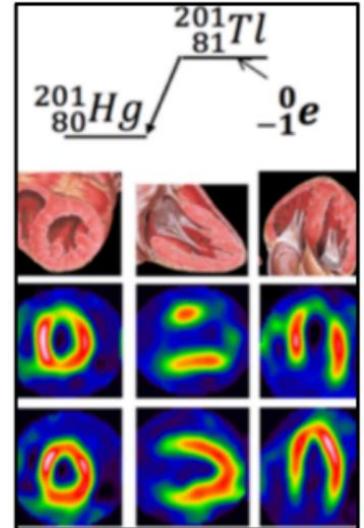
## E. Parcours dans la matière

- ➔ Le **neutrino** : indétectable
- ➔ Les **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' $O_2$ , en cas d'infarctus par exemple où un caillot bouche une coronaire).



Petit instant dédié :

- Toute ma famille <3
- La biophysique la meilleure des matières
- La dynastie Biophysique (et aussi la physio, on va quand même pas les oublier)
- Les LAS 2 que je connais
- Les LAS 1 (fillots officiels et officieux)
- A toi qui lis cette fiche
- Courage à vous tous, ne lâchez rien