

LES

TRANSFORMATIONS

ISOBARIALES

START

# QUELQUES NOTIONS

**A**=nombre de masse=nombre de nucléons

**Z**=nombre de protons=nombre d'électrons



$$N = A - Z$$

- Le **proton** est chargé et correspond à un électron positif
- Le **neutron** n'est pas chargé

# LES TRANSFORMATIONS RADIOACTIVES

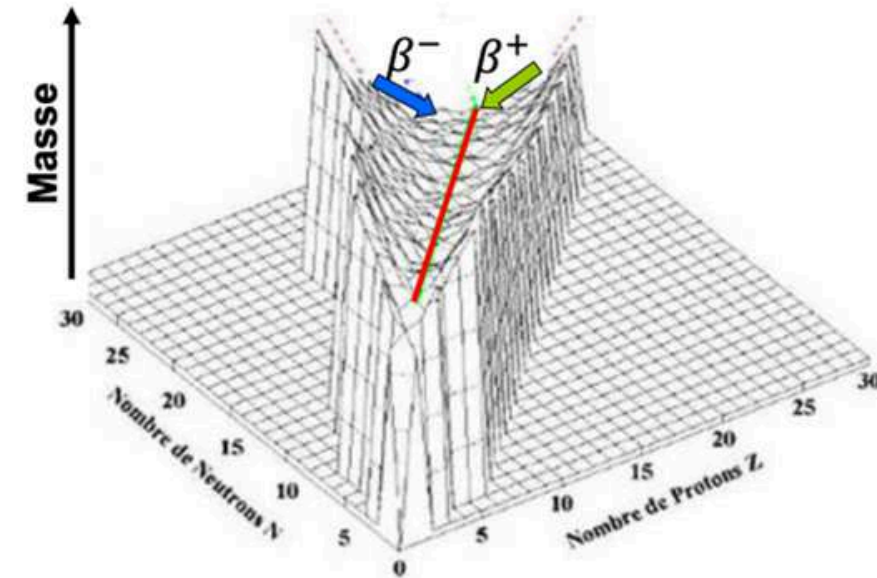
**Définition:** Une transformation radioactive est une **mutation**, une désintégration spontanée d'un noyau atomique.



**Lors de la transformation, entre le noyau père et fils on retrouve :**

- Une perte de masse
- Un gain en énergie de liaison
- Une libération d'énergie sous forme soit d'une particule soit d'un photon : c'est la **radioactivité** !

**Selon les noyaux d'origine, on distingue :**



**Radioactivité  $\alpha$**

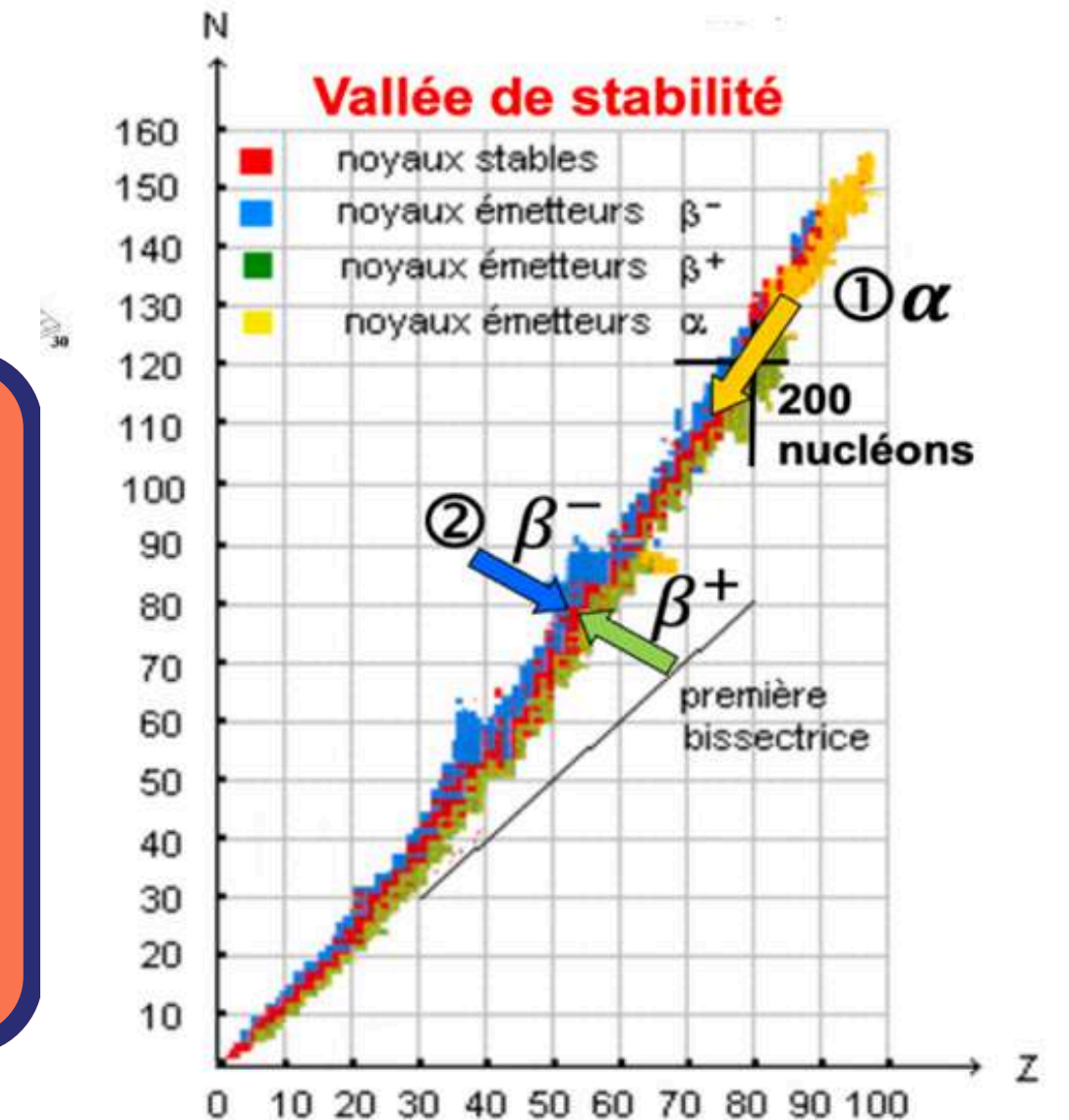
**Pour les noyaux  
lourds ( $A > 200$ )**

**Transformations  
isobariques**

**Pour les noyaux  
avec un excès de  
neutrons :  $\beta^-$   
Pour les noyaux  
avec un excès de  
protons :  $\beta^+$**

**Transformations  
isomériques**

**Libération  
d'énergie sans  
changement de  
nature du noyau**



## LOI DE CONSERVATION

Les transformations nucléaires répondent à des **lois de conservations** toujours appliquées :

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** (la masse du père n'est pas égale à la masse du fils et des particules cumulées)



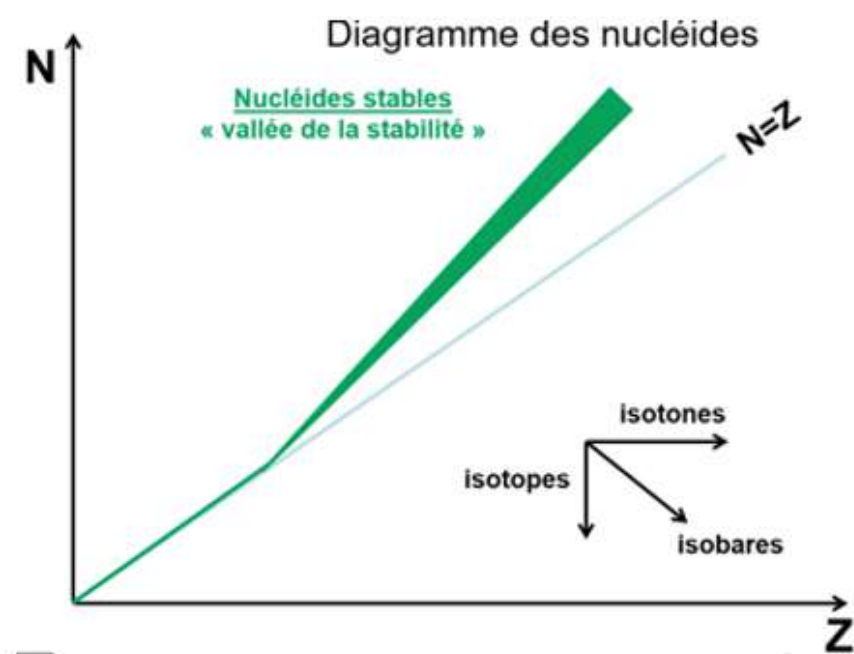
# CARACTÉRISTIQUES DES TRANSFORMATIONS ISOBARIQUES

Pas de changement du nombre de masse A

Z et N varient (isobares)

${}^{14}_6\text{C}$   
instable

${}^{14}_7\text{N}$   
stable

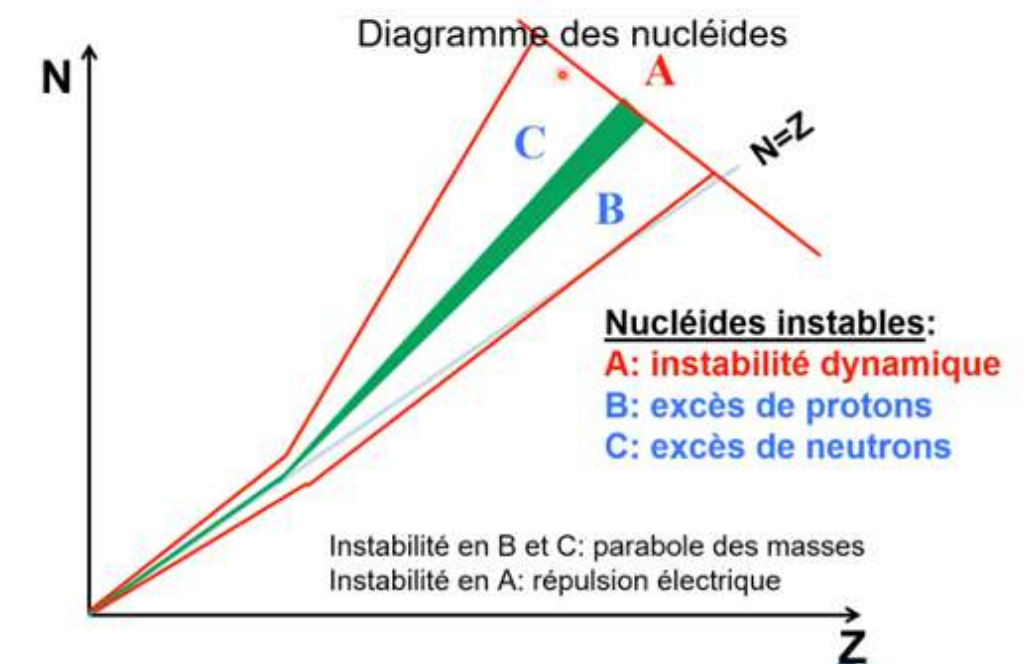


Il existe 2 types de régions particulières pour les noyaux **STABLES**. Les noyaux **légers** sur la première bissectrice sont stables si **N=Z**. Les éléments **lourds** qui sont sur la deuxième bissectrice doivent avoir **plus de neutrons** afin d'être stables.

Il existe 3 types de transformations isobariques pour les noyaux

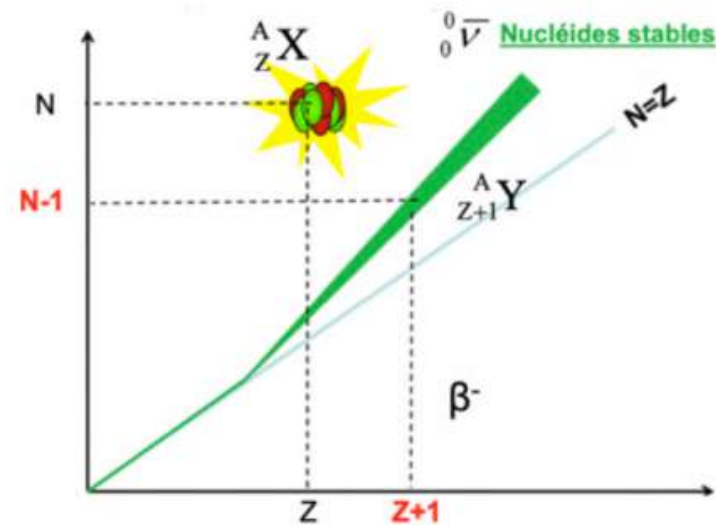
## INSTABLES:

- L'émission (ou désintégration)  $\beta^-$  si excès de **neutrons (C)**
- L'émission (ou désintégration)  $\beta^+$  si excès de **protons (B)**
- La **capture électronique** si excès de **protons (B)**

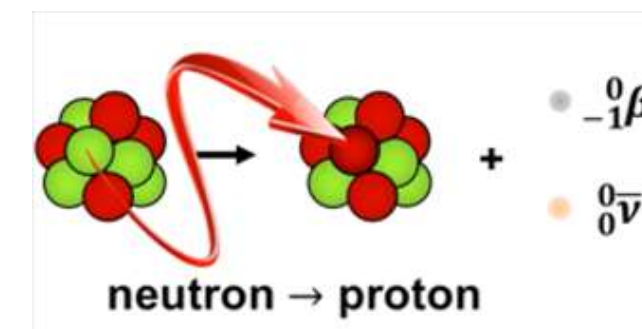
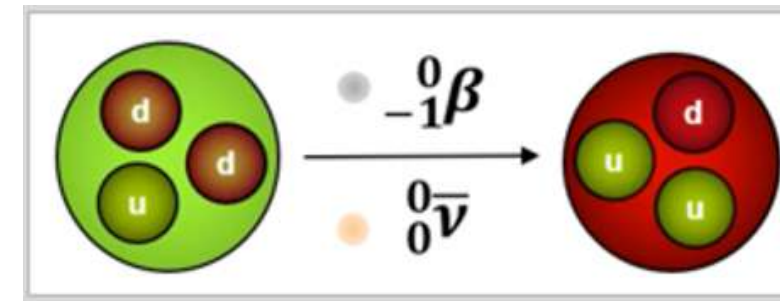


# LA TRANSFORMATION $\beta^-$

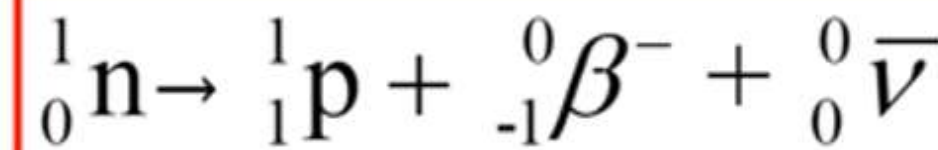
## A) La réaction de désintégration



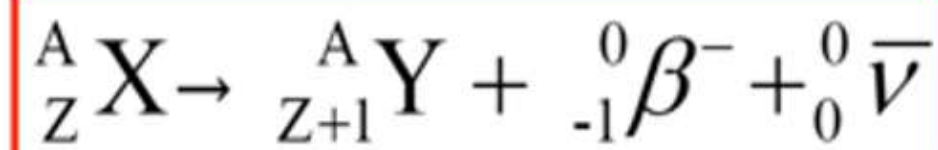
Cette transformation se produit lorsque le noyau père est en **excès de neutrons**. Il va alors perdre un neutron qui se transformera en **proton**. Cela est rendu possible grâce à l'**inversion d'un quark**.



Dans le noyau ---->



Dans le nucléide ---->



La **particule  $\beta^-$**  correspond à un **électron** créé par la transformation. L'**antineutrino**, lui, est un postulat afin d'expliquer le spectre énergétique de la transformation. Il a comme caractéristiques de posséder : une **charge nulle**, une **masse négligeable**, d'être **pénétrant sans être ionisant** et de ne **pas être un**

**REM !!**

# LA TRANSFORMATION $\beta^-$

## B) Le bilan masse-énergie

Pour cette transformation, on se rend compte que la différence de masse des atomes est **égale à la différence de masse des noyaux**.

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

D'après la formule de Einstein :

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

donc

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



**Attention aux unités**



Pour simplifier, on modifie les unités et on obtient **cette formule ++** :

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

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

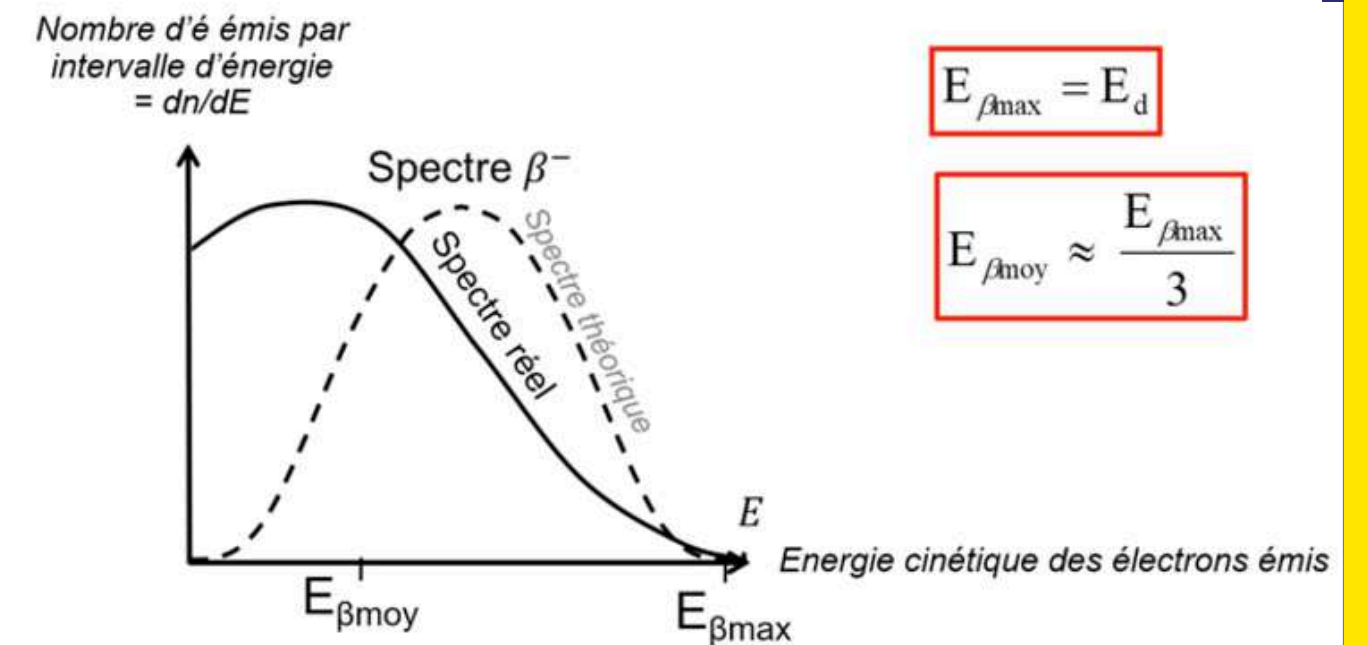
$$\text{donc } E_d = [\mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A, Z + 1)] \times 931,5$$

# LA TRANSFORMATION $\beta^-$

## c) Spectre et schéma

L'énergie se partage entre le **noyau fils**, la **particule  $\beta^-$**  et l'**antineutrino**.

Finalement, l'énergie cinétique se répartit aléatoirement entre la **particule  $\beta^-$**  et l'**antineutrino**. Seule la particule  $\beta^-$  est détectable, elle est alors à l'origine du spectre continu de la transformation

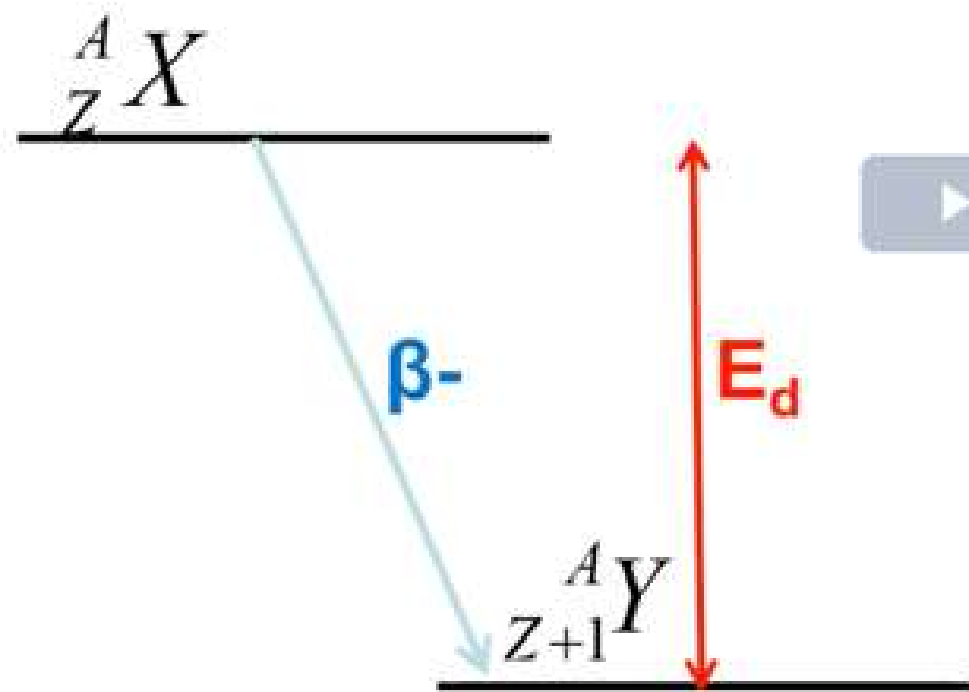


- **Spectre théorique** : Le spectre continu est expliqué par le fait que l'antineutrino emporte une part variable et complémentaire de l'énergie de cette réaction.
- **Spectre réel** : Il est décalé vers la gauche en raison des forces électriques coulombiennes entre la particule  $\beta^-$  et les protons du noyau. Ces forces s'opposent à l'émission de particules  $\beta^-$  de faible énergie.

# LA TRANSFORMATION $\beta^-$

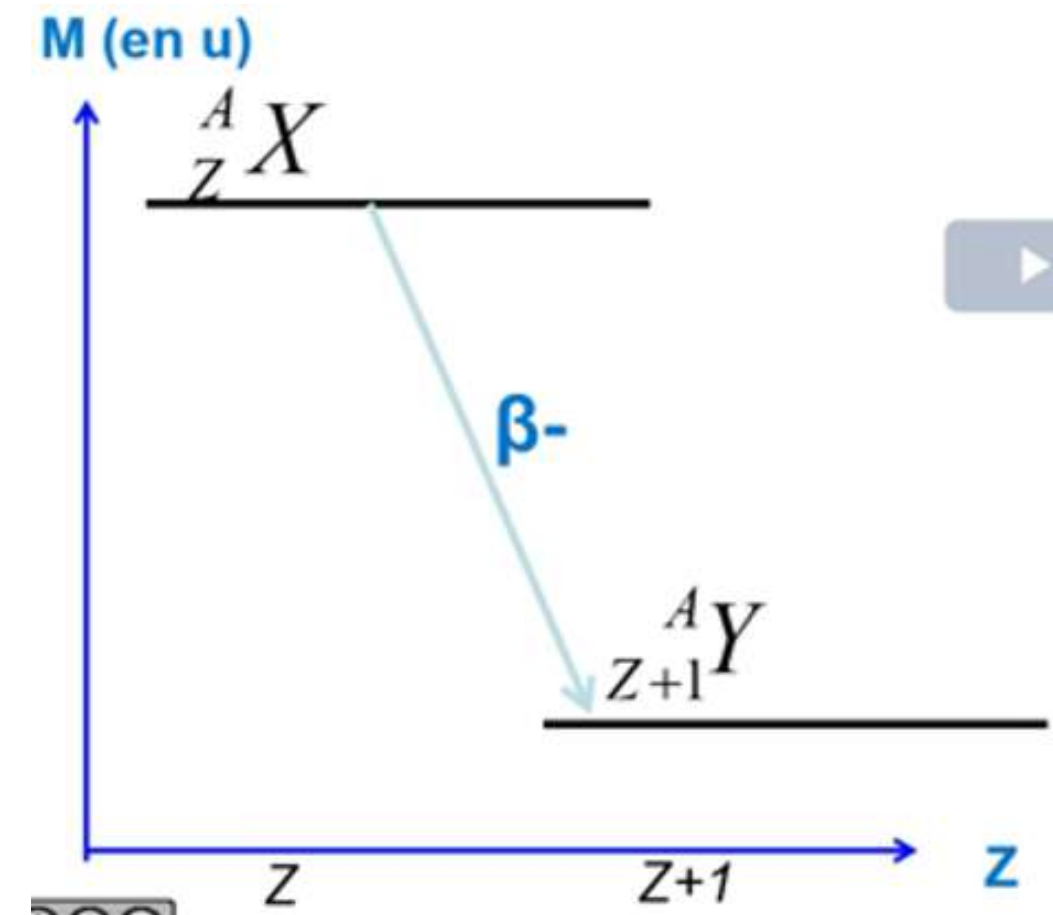
Il s'agit d'une représentation graphique regroupant les **principales caractéristiques** d'une désintégration radioactive :

- En ordonnée se trouve la **masse des atomes** père et fils (les segments horizontaux correspondent aux différents niveaux d'énergies autorisés pour le noyau).
- En abscisse se trouve le **numéro atomique Z**.



Des flèches sont utilisées pour indiquer les **transitions autorisées** du père et des états possibles du fils. Dans ce cas, il y a une **perte de masse** et une **augmentation du nombre de protons** dans le noyau.

La différence entre les deux segments correspond certes à leur **différence de masse**, mais elle correspond aussi à l'**énergie délivrée** lors de la transformation.

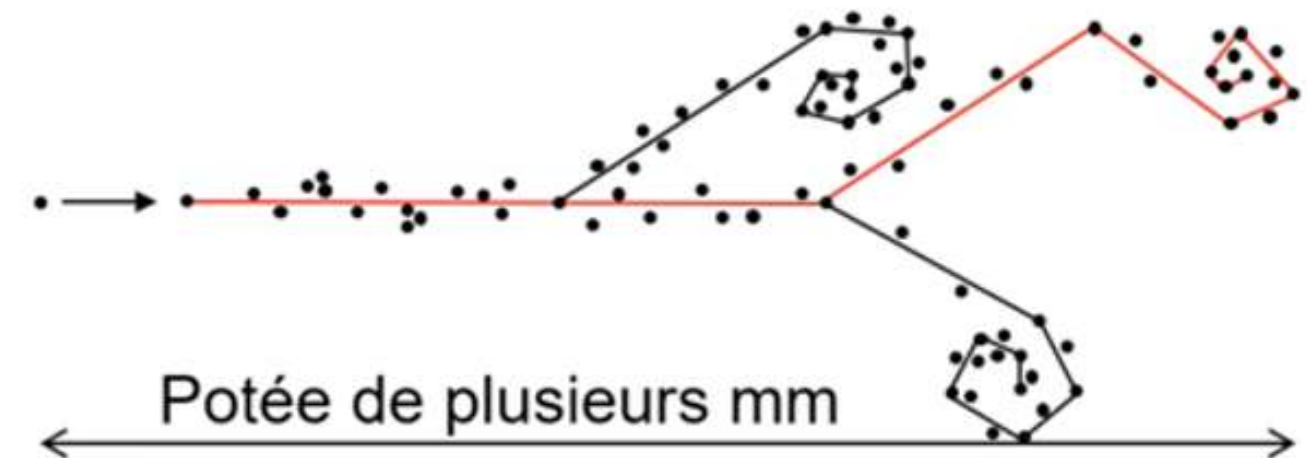
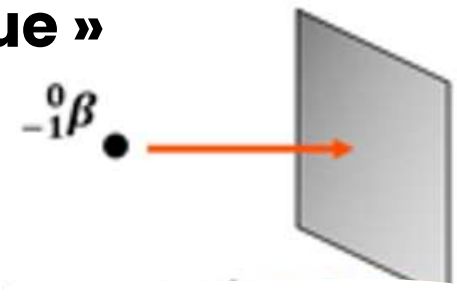


# LA TRANSFORMATION $\beta^-$

## D) Parcours dans la matière

La particule  $\beta^-$  :

- Est chargée **négativement** (puisque c'est un électron)
- Trajectoire **non rectiligne** avec des interactions avec les électrons environnants, parcours « **chaotique** »
- Profondeur de pénétration **courte**
- Arrêtée par une fine feuille de métal



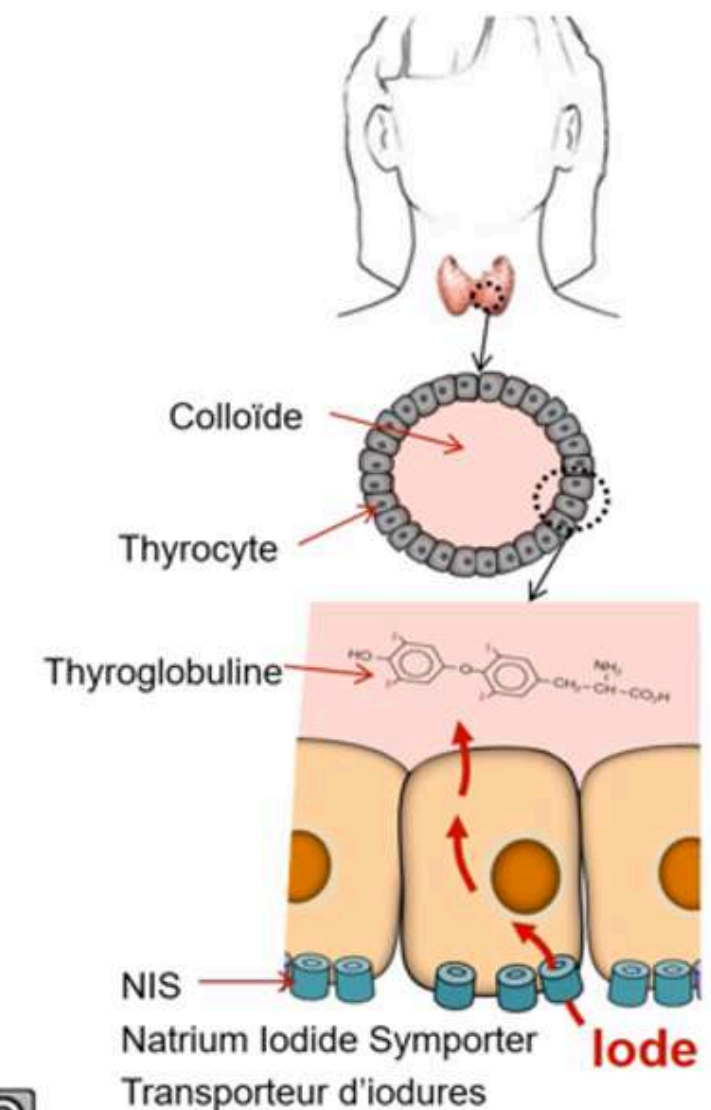
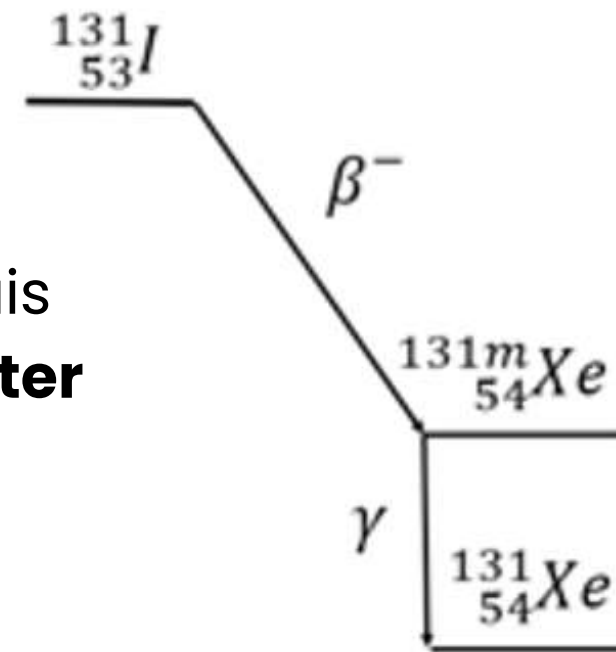
L'antineutrino va être **très pénétrant**, sans interactions avec la matière et **indélectable**.

# LA TRANSFORMATION $\beta^-$

## E) Applications biomédicales

Radiothérapie : L'**iode-131** est un un **émetteur  $\beta^-$** . Après la désintégration  $\beta^-$ , il se transforme en Xénon-131 métastable puis stable. En médecine, on l'utilise en injection dans le but de **traiter ou guérir le cancer thyroïdien** qu'il soit local ou métastatique. Cette application est appelée la **radiothérapie métabolique**.

La thyroïde est un petit organe à la base du cou synthétisant les hormones thyroïdiennes. 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.



# QCM !!

**QCM 1 : A propos de la transformation  $\beta^-$ , indiquez la (les) proposition(s) exacte(s) :**

- A) L'antineutrino est détectable
- B) Le spectre théorique est décalé vers la gauche
- C) La particule  $\beta^-$  a une profondeur de pénétration longue
- D) La différence de masse des atomes est égale à la différence de masse des noyaux
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses

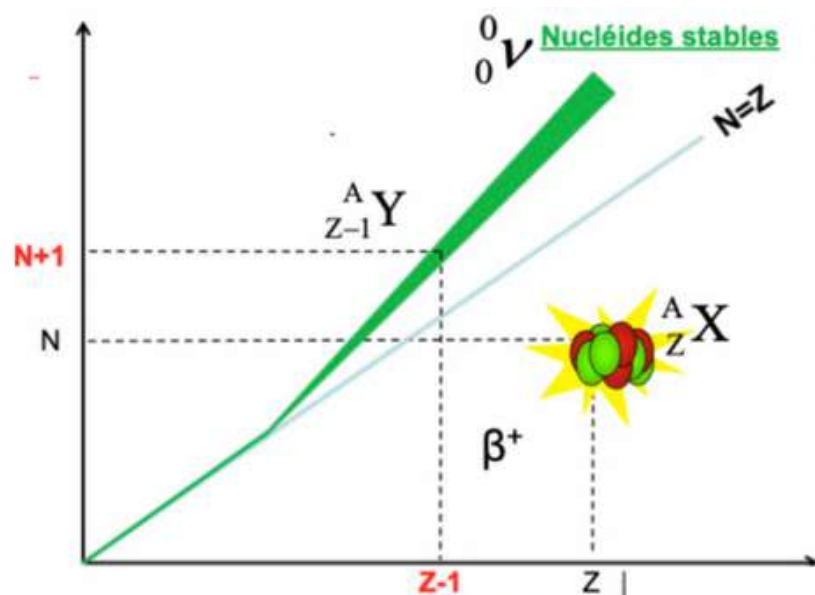
# QCM !!

**QCM 1 : A propos de la transformation  $\beta^-$ , indiquez la (les) proposition(s) exacte(s) :**

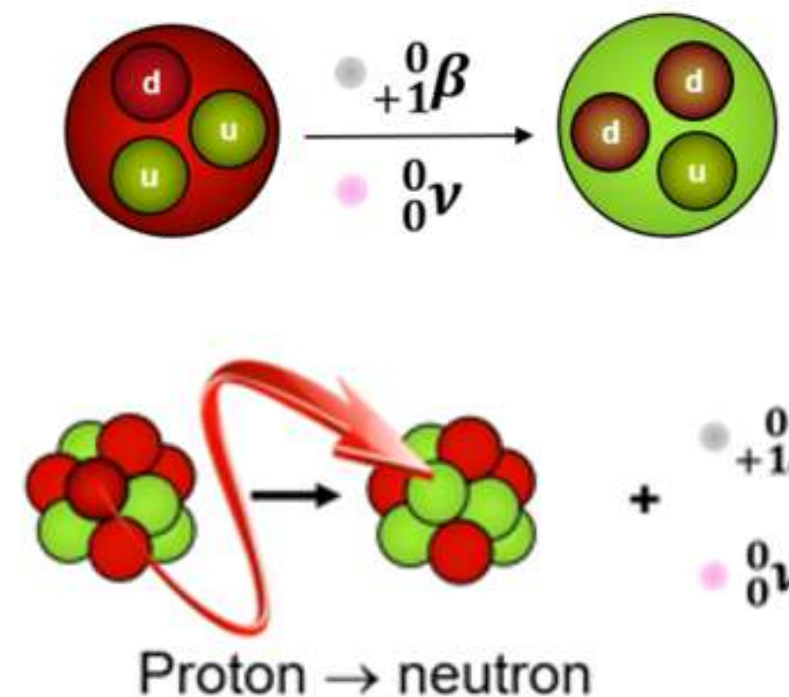
- A) L'antineutrino est détectable
- B) Le spectre théorique est décalé vers la gauche
- C) La particule  $\beta^-$  a une profondeur de pénétration longue
- D) La différence de masse des atomes est égale à la différence de masse des noyaux
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses

# LA TRANSFORMATION $\beta^+$

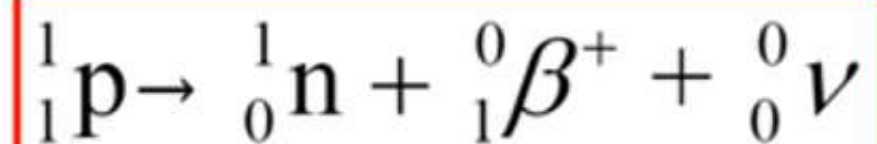
## A) La réaction de désintégration



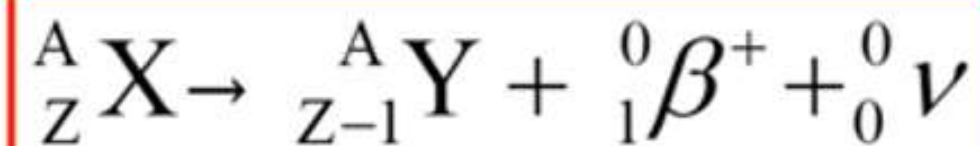
Cette transformation se produit lorsque le noyau père est en **excès de protons**. Il va alors perdre un proton qui se transformera en **neutron**. Cela est rendu possible grâce à l'**inversion d'un quark**.



Dans le noyau ---->



Dans le nucléide ---->



La **particule  $\beta^+$**  correspond à un **électron** avec une **charge positive** créé par la transformation. Le **neutrino** possède les mêmes caractéristiques que l'antineutrino : une **charge nulle**, une **masse négligeable**, d'être **pénétrant sans être ionisant** et de ne **pas être un REM !!**

# LA TRANSFORMATION $\beta^+$

## B) Le bilan masse-énergie

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

Pour calculer l'énergie disponible :

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

Afin que la désintégration  $\beta^+$  soit énergétiquement possible, il faut que :

- L'énergie délivrée par la transformation soit **supérieure à 0**
- Après avoir basculé l'équation, on peut alors écrire :

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

- Or, on sait que :

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

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**

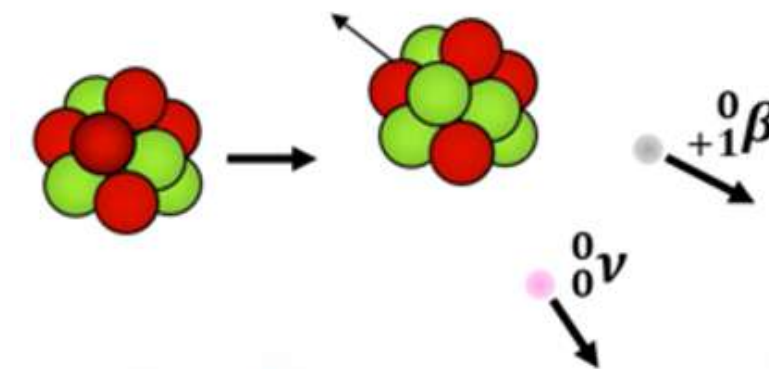
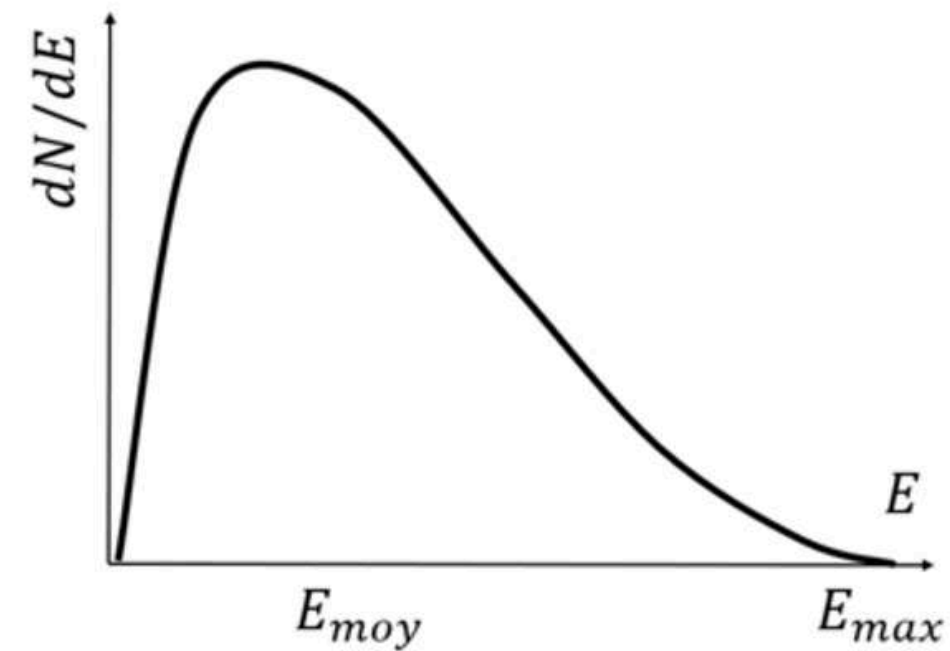
# LA TRANSFORMATION $\beta^+$

## C) Spectre et schéma

L'énergie se partage entre le **noyau fils**, la **particule  $\beta^+$**  et le **neutrino**.

Finalement, l'énergie cinétique se répartit aléatoirement entre la **particule  $\beta^+$**  et le **neutrino**. Seule la particule  $\beta^+$  est détectable, elle est alors à l'origine du **spectre continu** de la transformation.

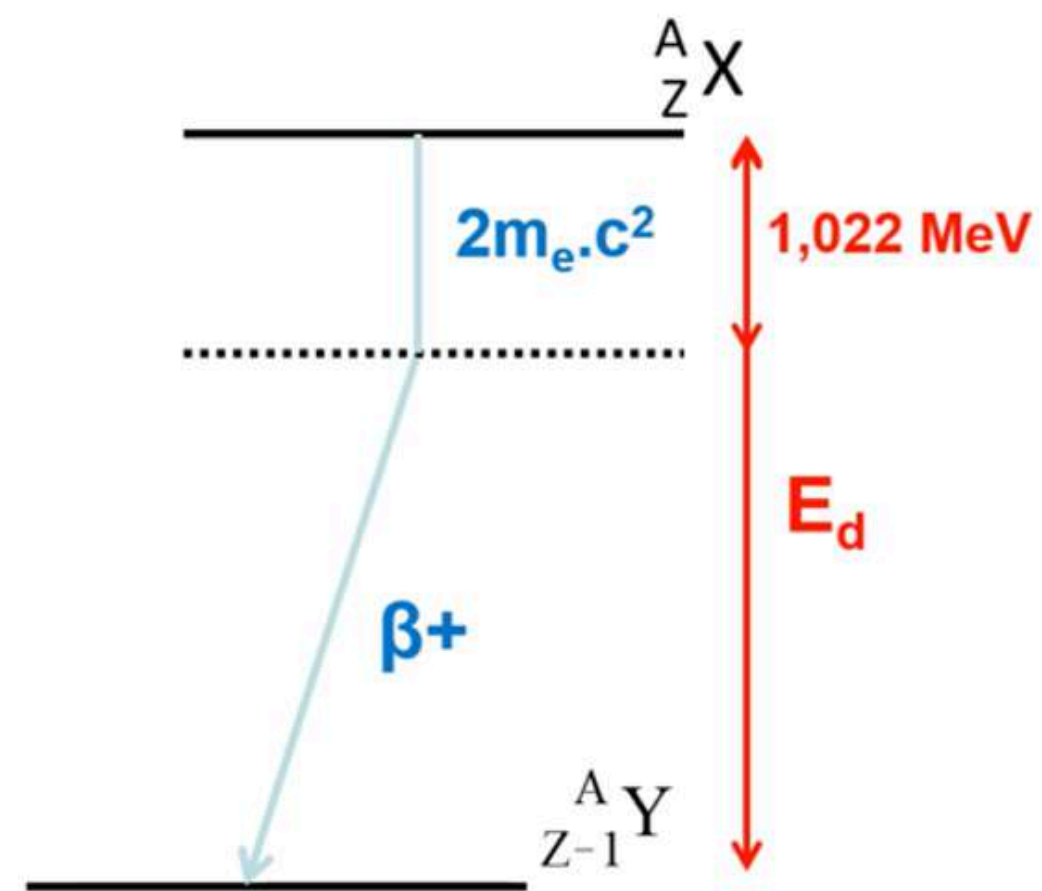
Ici, il n'y a **pas** de décalage vers la gauche du spectre puisque la particule possède une charge **positive** qui n'est donc pas attirée par le noyau (il en est même repoussé).



# LA TRANSFORMATION $\beta^+$

Il s'agit d'une représentation graphique regroupant les **principales caractéristiques** d'une désintégration radioactive :

- En ordonnée se trouve la **masse des atomes** père et fils (les segments horizontaux correspondent aux différents niveaux d'énergies autorisés pour le noyau).
- En abscisse se trouve le **numéro atomique Z**.



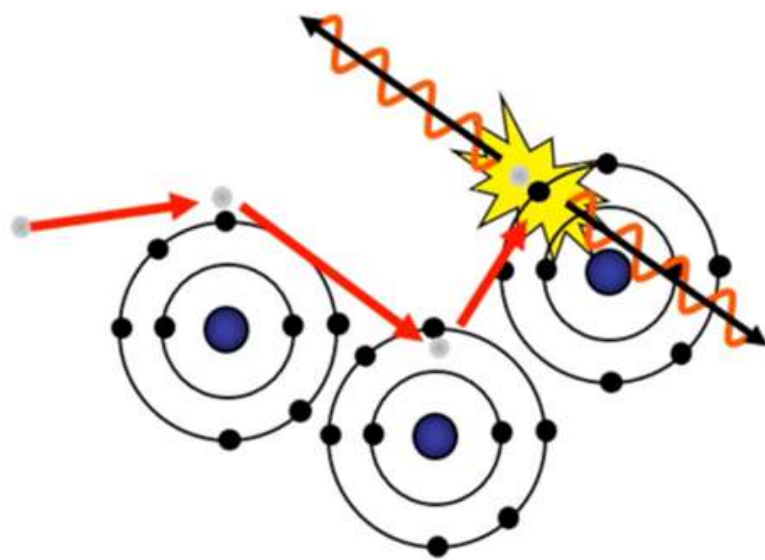
On peut observer le noyau père X à **Z protons** et le noyau fils Y à **Z-1 protons**. Il y a donc le **gain d'un neutron et une perte de masse du noyau** au cours de la transformation. Au niveau des flèches, on fait apparaître le **seuil énergétique** nécessaire à la transformation  $\beta^+$  (ce seuil agit comme une « taxe en énergie »).

# LA TRANSFORMATION $\beta^+$

## D) Parcours dans la matière

### La particule $\beta^+$ :

- Est chargée **positivement**
- Trajectoire **non rectiligne** avec des interactions avec les électrons environnants
- Profondeur de pénétration **courte**
- Interactions avec les  $e^-$  jusqu'à épuisement de l'énergie cinétique



### Les photons $\gamma$ :

- D'origine **indirectement nucléaire**
- Interactions **non obligatoires** avec la matière
- Atténués par une couche importante de plomb ou de béton

Une fois arrêté, le positon ne s'arrête pas là et cherche **immédiatement** à s'**appareiller à un électron libre** dans une réaction nommée **l'annihilation**. Cette réaction est la conversion de l'énergie : **masse en énergie lumineuse** avec l'émission de **deux photons  $\gamma$  de 511 keV**.

# LA TRANSFORMATION $\beta^+$

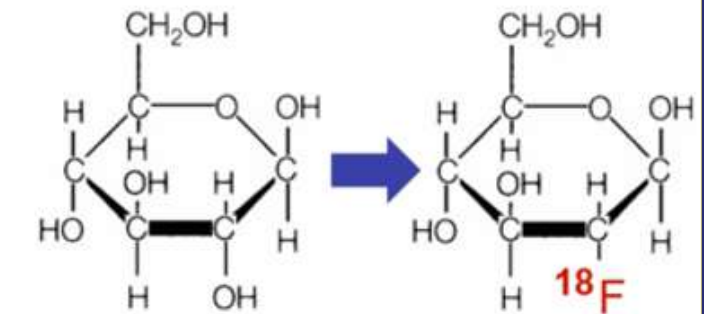
## E) Applications biomédicales

### Cancérologie :

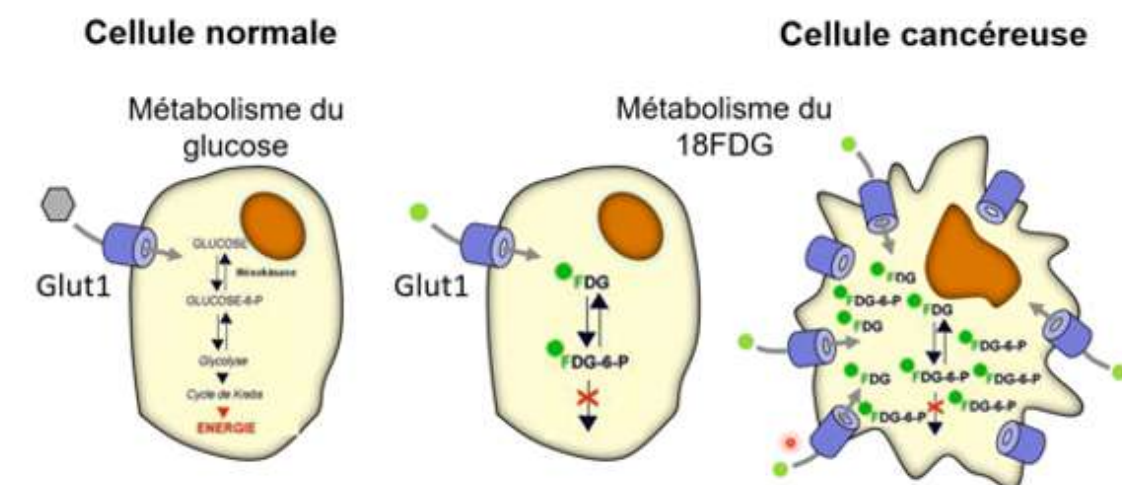
Le Fluor, radioactif, va pouvoir être greffé par une liaison covalente à une molécule de **glucose**, nous permettant d'obtenir le  **$^{18}\text{Fluoro-désoxy-glucose}$**  ( $^{18}\text{FDG}$ ), et qui va avoir comme particularité d'être radioactif.

En raison de leur prolifération accrue, les **cellules tumorales** hyper consomment du glucose : c'est **l'effet Warburg**. Le glucose radioactif s'accumule dans les cellules tumorales et, **par émission  $\beta^+$** , il y a émission secondaire de **photons  $\gamma$** .

Ces photons sont ensuite détectés par une technique d'imagerie, **la tomographie par émission de positons**.



Le glucose  $\rightarrow$  Le  $^{18}\text{FDG}$



# QCM !!

**QCM 2 : A propos des transformations  $\beta^+$  , indiquez la (les) proposition(s) exacte(s) :**

- A) Un positon qui s'appareille à un électron s'appelle une annulation
- B) Le seuil énergétique est de 1,022 eV
- C) Un quark up se transforme en quark down
- D) Le neutrino a une charge nulle
- E) Les propositions A,B,C et D sont fausses

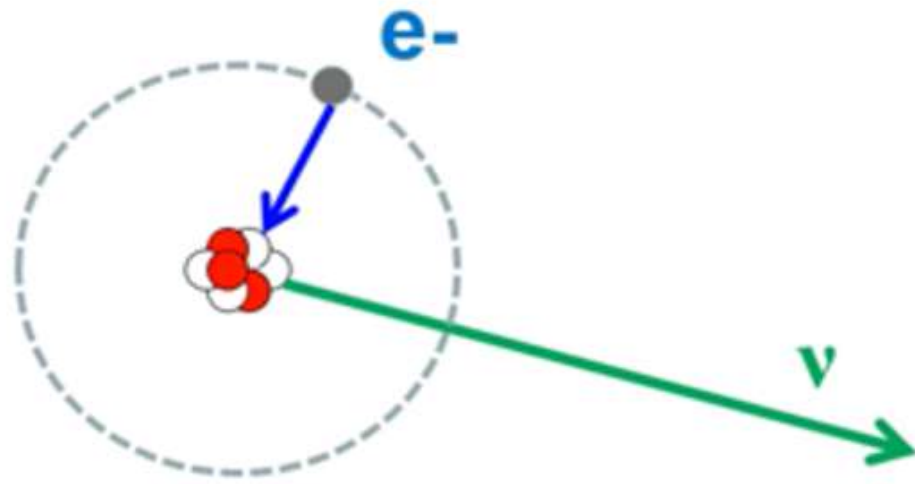
# QCM !!

**QCM 2 : A propos des transformations  $\beta^+$  , indiquez la (les) proposition(s) exacte(s) :**

- A) Un positon qui s'appareille à un électron s'appelle une annulation
- B) Le seuil énergétique est de 1,022 eV
- C) Un quark up se transforme en quark down
- D) Le neutrino a une charge nulle
- E) Les propositions A,B,C et D sont fausses

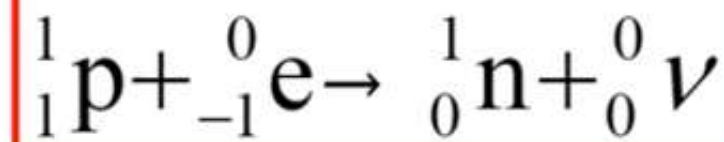
# LA CAPTURE ÉLECTRONIQUE

## A) La réaction de désintégration

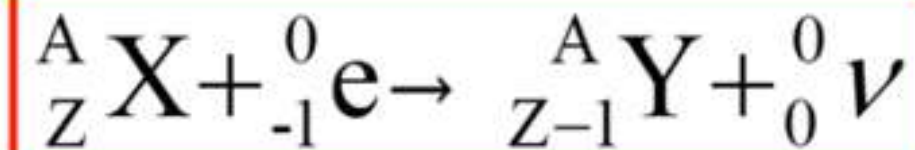


Cette transformation se produit lorsque le noyau père est en **excès de protons** (comme la transformation  $\beta^+$ ). Cela consiste en la **capture d'un électron** d'une couche électronique profonde par le noyau. Cet électron se **combine à un proton** pour donner un **neutron**.

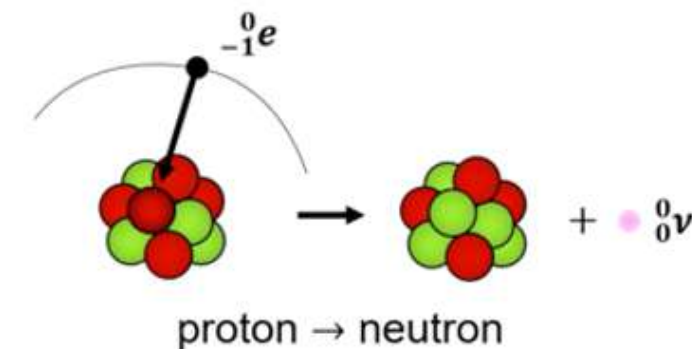
Dans le noyau ---->



Dans le nucléide ---->



Une seule particule est émise : le **neutrino** ayant une **charge nulle** et une masse considérée comme **négligeable**. Il s'agit alors d'une désintégration **très discrète**.



# LA CAPTURE ÉLECTRONIQUE

## B) Le bilan masse-énergie

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

Pour que la réaction ait lieu, elle exige une **énergie seuil** qui correspond à l'**énergie de liaison** ( $E_l$ ) de l'électron capturé (donc il faut que  $\Delta M > E_l$ ).

Pour calculer l'énergie disponible :

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

Energie de liaison  
de l'e- capturé

Au final, pour les noyaux **INSTABLES** dans la zone B (en excès de protons), il y a deux possibilités pour redevenir stable :

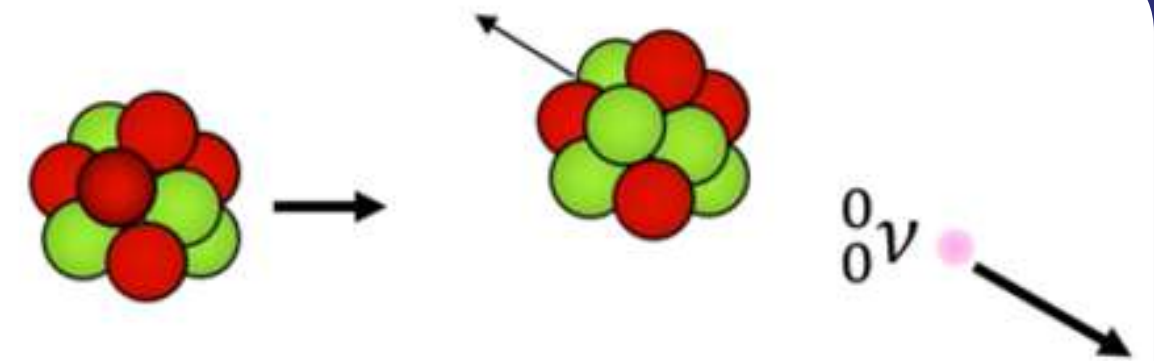
- Au dessous de  $\Delta M = 1,022 \text{ MeV}$  → **capture électronique**
- Au dessus de  $\Delta M = 1,022 \text{ MeV}$  → **concurrence**

# LA CAPTURE ÉLECTRONIQUE

## C) Spectre et schéma

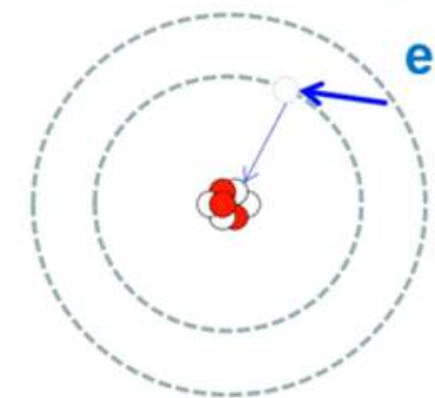
L'énergie disponible se partage entre le **noyau fils** et le **neutrino**.

Finalement, toute l'énergie cinétique est emportée par le neutrino. Cette particule n'est **pas détectable**, il n'y a alors **pas de spectre réel** de la transformation.

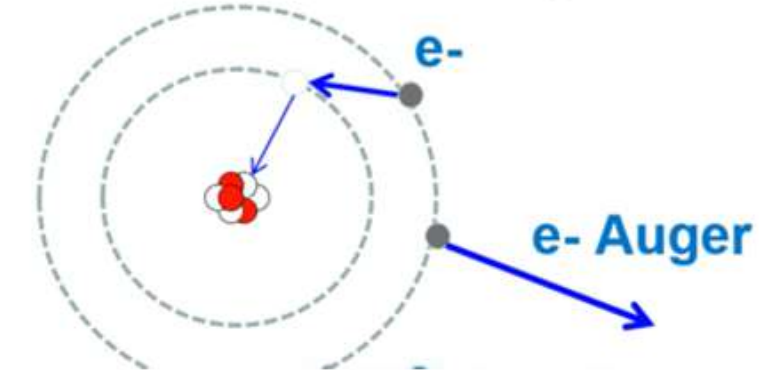


Il existe cependant un **spectre indirect** lié au **réarrangement** électronique secondaire du cortège de l'atome.

Emission d'un photon X



Emission d'un e- Auger

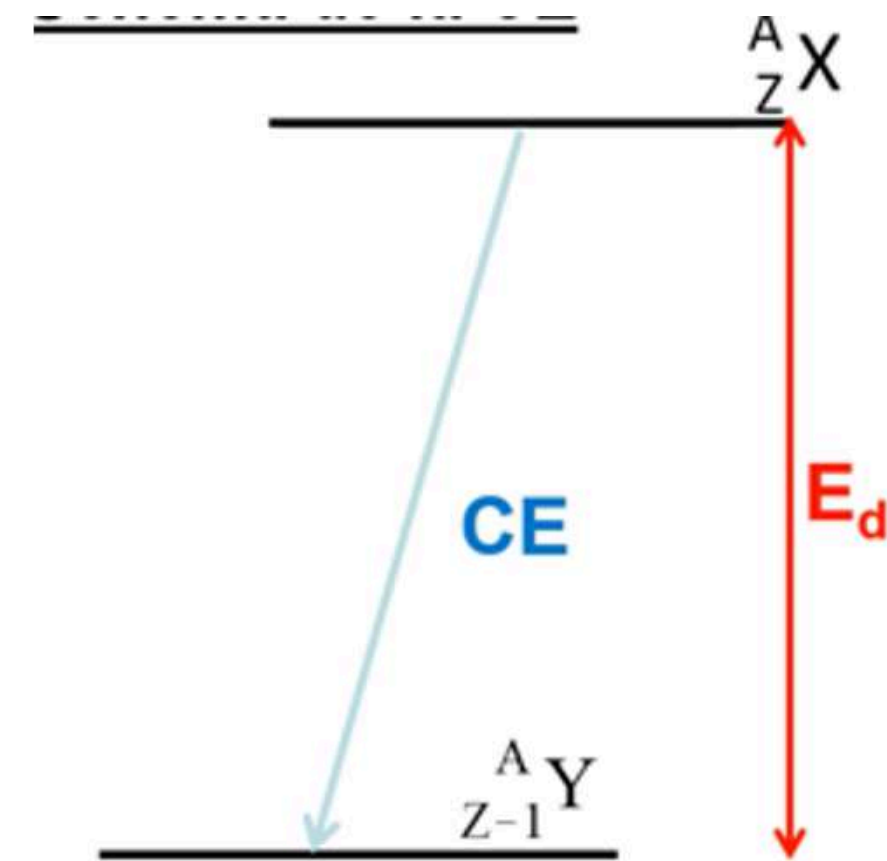


Le spectre en énergie détecté sera alors un **spectre de raies électromagnétique** (photons X) ou **électronique** (électrons Auger) avec des valeurs précises qui seront définies par les couches d'où proviennent les électrons. L'origine des spectres est atomique.

# LA CAPTURE ÉLECTRONIQUE

Il s'agit d'une représentation graphique regroupant les **principales caractéristiques** d'une désintégration radioactive :

- En ordonnée se trouve la **masse des atomes** père et fils (les segments horizontaux correspondent aux différents niveaux d'énergies autorisés pour le noyau).
- En abscisse se trouve le **numéro atomique Z**.



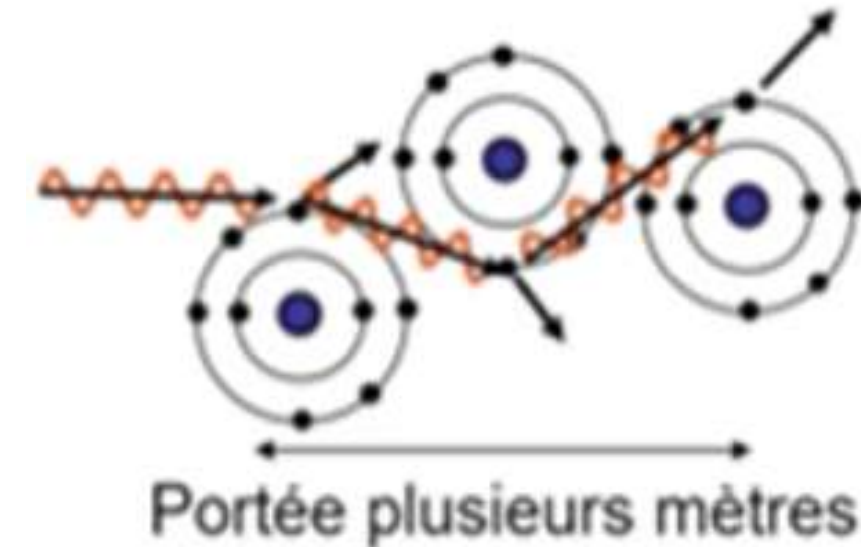
Le nucléide Y est dans son état fondamental

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 comparé à l'énergie délivrée** mais n'est **PAS NÉGLIGEABLE**.

# LA CAPTURE ÉLECTRONIQUE

## D) Parcours dans la matière

Les **photons** émis indirectement vont interagir via **effets photo-électrique et effet Compton** sur une portée de plusieurs mètres en raison de leurs interactions non obligatoires. Les photons sont atténués par du **plomb ou du béton**.



Le neutrino (comme l'antineutrino) est **indétectable** et n'a **pas d'interaction** avec la matière.

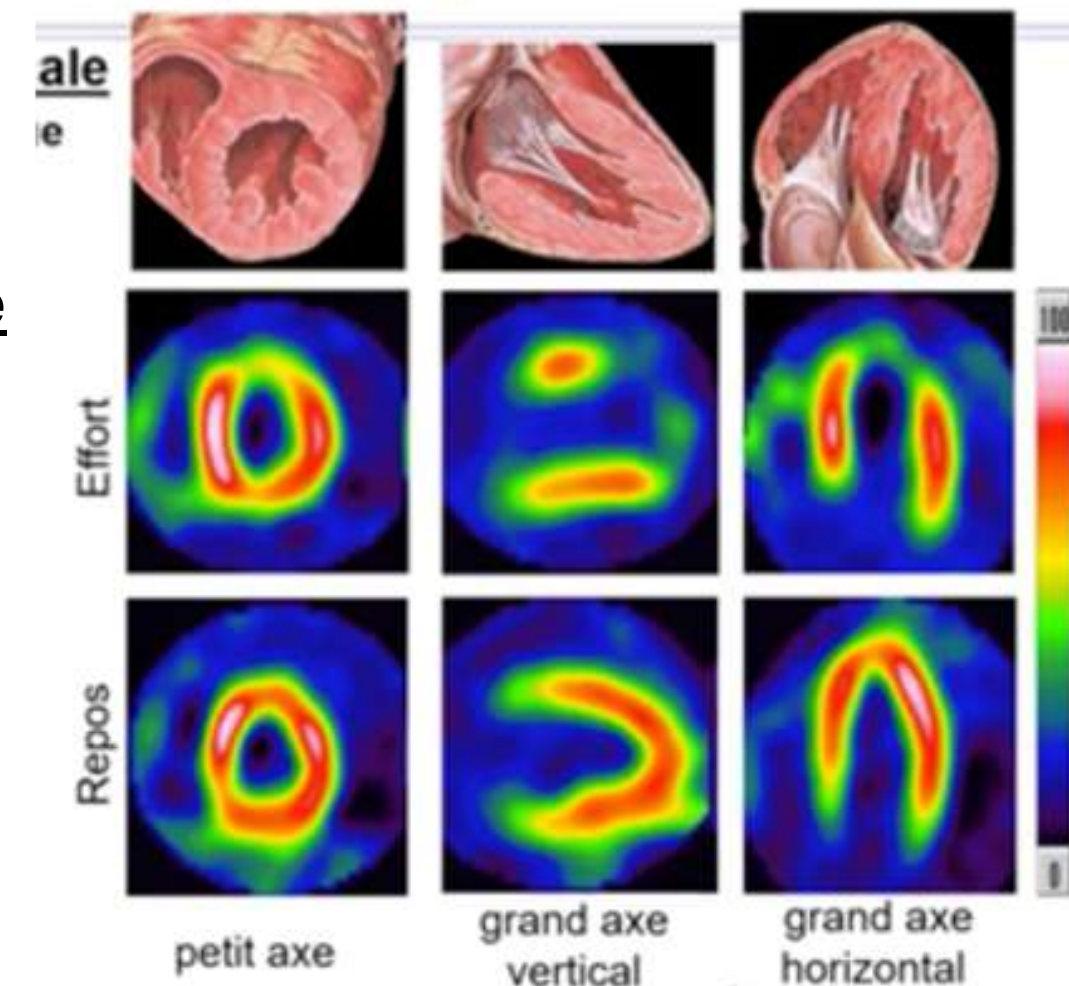
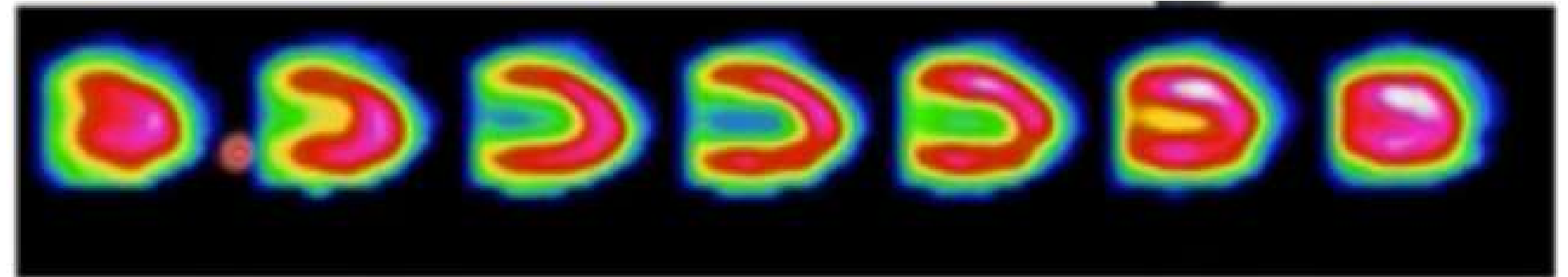
# LA CAPTURE ÉLECTRONIQUE

## E) Applications biomédicales

Imagerie :

Le **Thallium 201** se désintègre en **Mercure 201** via une capture électronique. Cette désintégration va pouvoir être utilisée en imagerie au travers de **scintigraphies cardiaques**. Le Thallium va venir se fixer de manière intense au niveau du **myocarde** en fonction du débit sanguin coronaire.

Les zones les plus perfusées sont marquées par une émission indirecte de photons de fluorescence du Mercure et cela permet donc de déduire celles qui le sont le moins, traduisant une **ischémie myocardique**.



# QCM !!

**QCM 3** : Le  $Ca_{20}^{35}$  se transforme en  $K_{19}^{35}$ . Indiquez la (les) proposition(s) exacte(s) :

**Données** : masses atomiques en u :  $M(35,20) = 35,00494$  et  $M(19,35) = 34,988010$

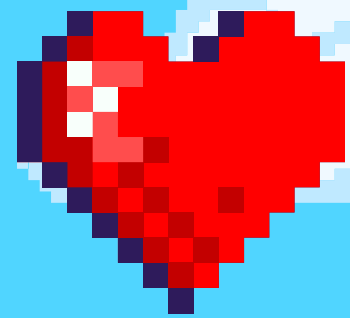
- A) Une transformation  $\beta^+$  est possible
- B) Une capture électronique est possible
- C) Il peut y avoir une émission d'un photon  $\gamma$  de 511 keV
- D) Il peut y avoir une raie d'énergie
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses

# QCM !!

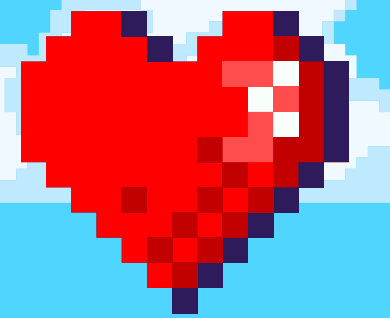
**QCM 3** : Le  $Ca_{20}^{35}$  se transforme en  $K_{19}^{35}$ . Indiquez la (les) proposition(s) exacte(s) :

**Données** : masses atomiques en u :  $M(35,20) = 35,00494$  et  $M(19,35) = 34,988010$

- A) Une transformation  $\beta^+$  est possible.  $35,00494 - 34,98801 = 0,017$ . Et  $0,017 \cdot 931,5 = 15,77 > 1,022$  MeV
- B) Une capture électronique est possible
- C) Il peut y avoir une émission d'un photon  $\gamma$  de 511 keV
- D) Il peut y avoir une raie d'énergie
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses



YEAH! GAME IS OVER!



EMERSON FIDMII

