

# BIOPHYSIQUE I

Pr N BEN RAIS AOUAD  
Chef de service de médecine nucléaire  
Centre hospitalier IBN SINA  
Directeur de l'équipe de recherche en oncologie  
nucléaire

# CH2 STABILITE ET INSTABILITE NUCLEAIRES

## I. Généralités:

- 1) Stabilité
- 2) Instabilité

## II. Transformations radioactives:

### A. Transformations Isobariques:

- 1) Emission  $\beta^-$
- 2) Emission  $\beta^+$
- 3) Capture électronique

# STABILITE ET INSTABILITE NUCLEAIRES

## B. Transformations par partition:

- 1) Emission alpha
- 2) Fission spontanée

## C. Désexcitation électromagnétique du noyau:

- 1) Emission gamma
- 2) Conversion interne
- 3) Emission de paire interne: matérialisation

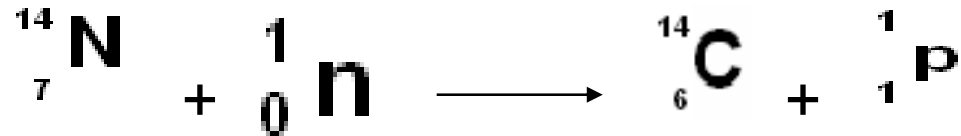
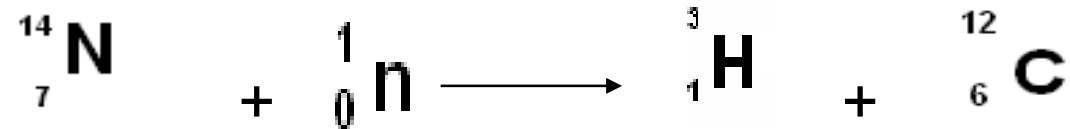
# STABILITE ET INSTABILITE NUCLEAIRES

## I/GENERALITES:

- Il existe dans la nature des éléments **stables** et instables .Les éléments **instables** sont appelés **radioéléments**.
- Les noyaux de ces éléments instables se transforment naturellement, ils constituent les radioéléments naturels.
- Ces transformations peuvent être obtenues à partir de noyaux produits dans les centres atomiques appelés radioéléments artificiels.

## 2) Instabilité :

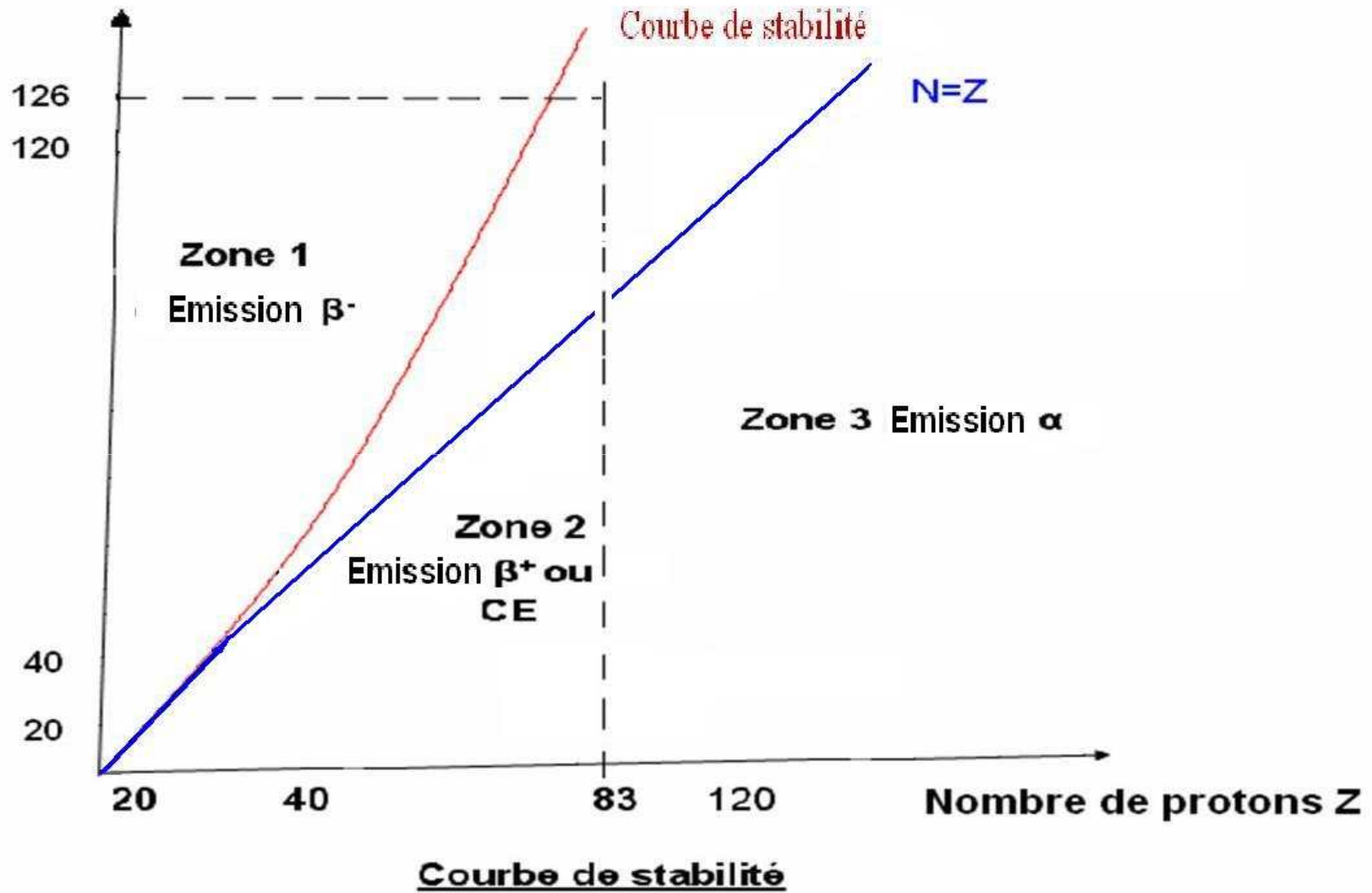
- Il existe 51 radioéléments naturels :  
43 ont un Z situé entre 83 et 92 :  $83 < Z < 92$ .
- 8 se trouvent dans la zone des Z stables.
- ${}^3_1\text{H}$  et  ${}^{14}_6\text{C}$  formés par les neutrons des rayons cosmiques agissant sur l'azote :



## 1) stabilité :

- Il existe 90 éléments naturels, sur ces 90 éléments 81 sont stables. Si on ajoute à ces 81 éléments stables leurs isotopes stables, on trouve dans la nature 274 nucléides stables (51 instables).
- Si l'on porte ces nucléides stables sur un diagramme, comportant en abscisses le nombre de protons  $Z$  et en ordonnées le nombre de neutrons  $N$ .
- On constate que les nucléides se répartissent sur une courbe confondue avec la droite  $N=Z$  pour les noyaux légers.

Nombre de neutrons N



- Les radioéléments pour lesquels  $Z : 92 < Z < 105$  sont appelés **transuraniens**.
- La courbe de stabilité définit **3 zones** ; les noyaux situés dans chacune de ces trois zones vont se transformer de façon à revenir sur la **courbe de stabilité**.
- Ces **3 zones** correspondent à **3 types** **d'instabilité nucléaire**.

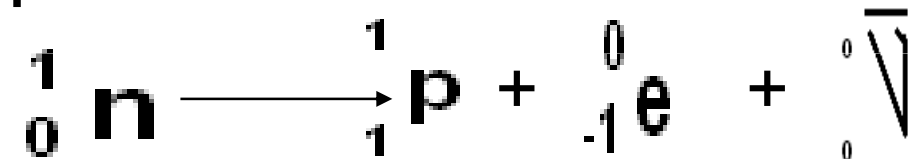


## II/ TRANSFORMATIONS RADIOACTIVES :

### A) transformations isobariques : (A = cte)

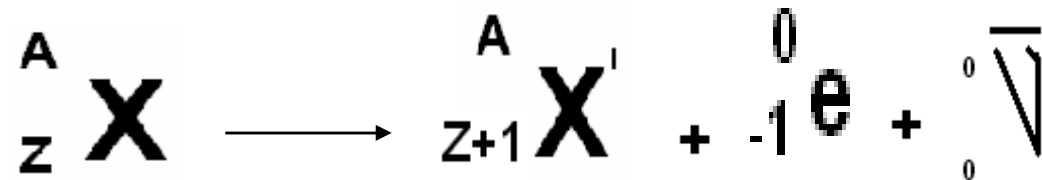
#### 1) Emission $\beta^-$ :

- Excès de neutrons : un noyau de la zone 1 présente un excès de neutrons. Pour retrouver la stabilité ,il va transformer ses neutrons en protons suivant la réaction :



- Il y'a émission d'un rayonnement  $\beta^-$  ( $e^-$ ) et d'un antineutrino  $\bar{\nu}$ .le nombre de masse A reste constant.

- **Condition énergétique** : l'énergie maximale libérée au cours de la réaction nucléaire  $\beta^-$  est  $E_{\max} = Q_{\beta^-}$ , l'équation nucléaire correspondante à l'émission  $\beta^-$  est :

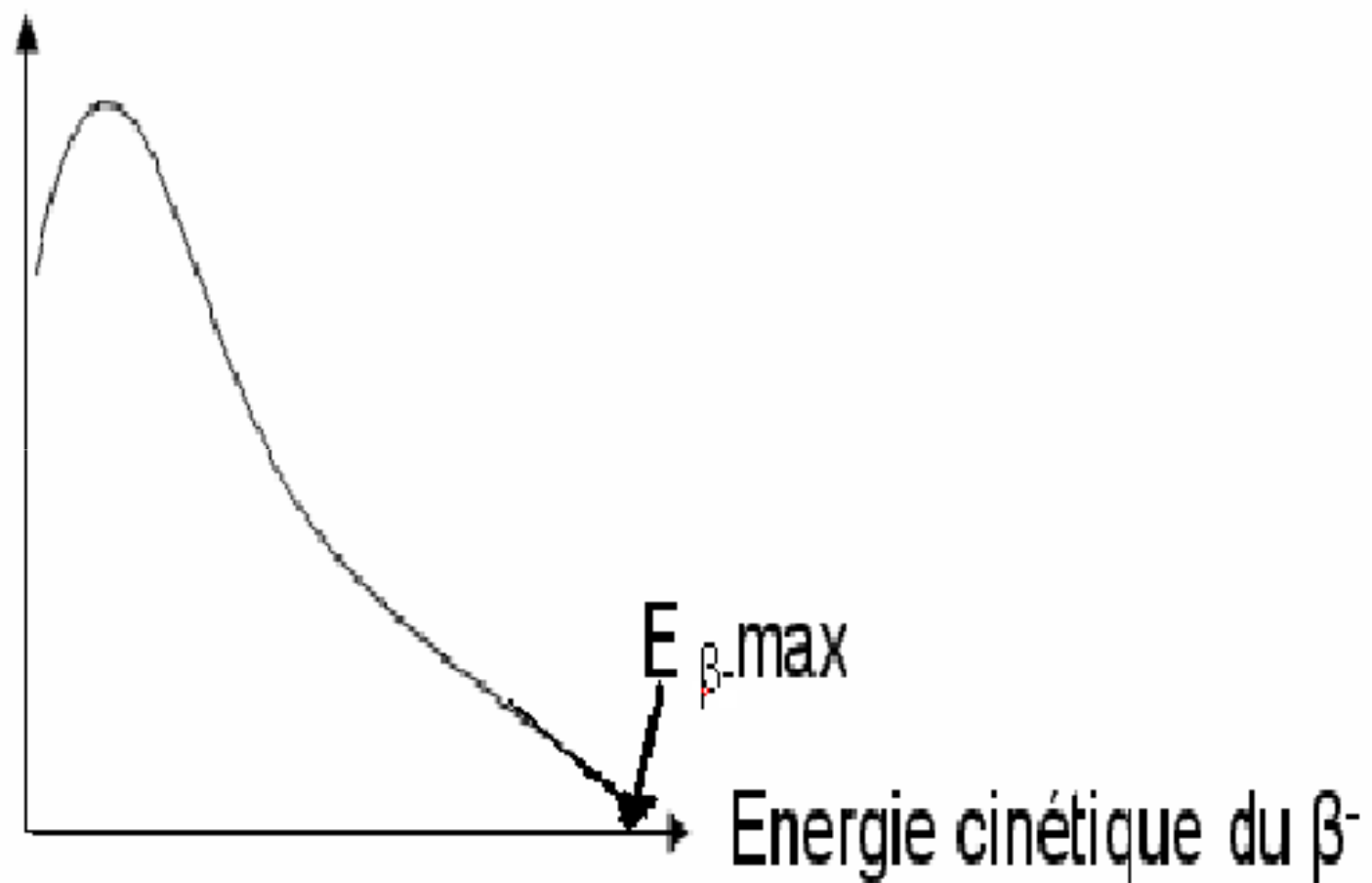


- $Q_{\beta^-} = E_{\max} = E_i - E_f$
- $Q_{\beta^-} = \{M(A, Z) - [M(A, Z+1) + m_{e^-} + m_{\bar{\nu}}]\} \cdot C^2$
- $M(A, Z) = \mathcal{M}(A, Z) - Zm_{e^-}$
- $M(A, Z+1) = \mathcal{M}(A, Z+1) - (Z+1)m_{e^-}$
- $m_{\bar{\nu}} = 0$
- $Q_{\beta^-} = \{\mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A, Z+1)\} \cdot C^2 > 0$
- Emission  $\beta^-$  possible :  $Q_{\beta^-} > 0 \quad \Delta \mathcal{M} > 0$
- $Q_{\beta^-}$  une fois libérée se trouve partagée entre l' $e^-$  et l' $\bar{\nu}$

Si celui-ci n'emporte pas d'énergie, c'est la particule  $\beta^-$  ( $e^-$ ) qui emporte toute l'énergie :  $E_{\beta^- \text{-max}} = \Delta \mathcal{M} C^2$

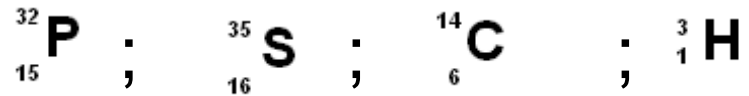
- Spectre énergétique des particules  $\beta^-$  est un spectre continu.

# Intensité du rayt $\beta^-$

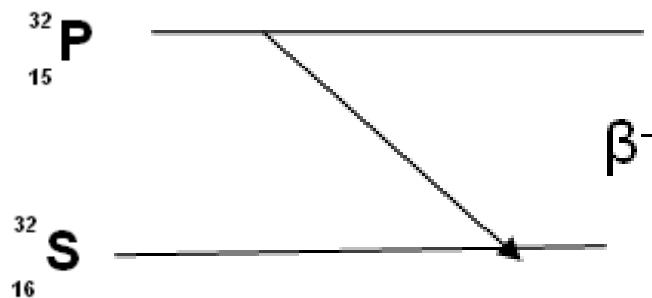


## Exemples :

- Des émetteurs  $\beta^-$  purs =



- Le schéma de la transformation radioactive :



$$T = 14,3 \text{ j}$$

(traitement de la polyglobulie)

$E_{\beta\text{-max}} = 1,70 \text{ MeV}$

•  $\mathcal{M} \quad {}_{15}^{32}\text{P} = 31,98403 \text{ uma}$

•  $\mathcal{M} \quad {}_{16}^{32}\text{S} = 31,98220 \text{ uma}$

$\Delta \mathcal{M} = 0,00183 \text{ uma} = 1,70 \text{ MeV}$

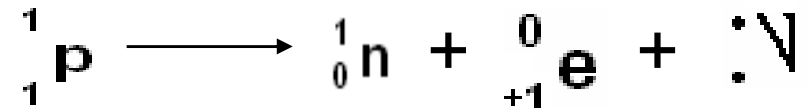
$Q_{\beta^-} = E_{\beta\text{-max}} = \Delta \mathcal{M} \cdot c^2 > 0$

donc l'émission  $\beta^-$  est possible

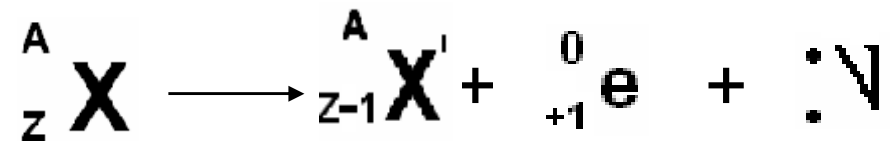
Utilité: thérapie en médecine nucléaire

## 2) Emission $\beta^+$ :

- Excès de protons : un noyau situé dans la zone 2 présente un excès de protons. Pour retrouver la stabilité, il va transformer ses protons en neutrons suivant la réaction :



L'équation nucléaire correspondante :



- Il y'a émission :  
D'un rayonnement  $\beta^+(e^+)$   
D'un neutrino :  $\nu$

- **Condition énergétique :**

$$Q_{\beta^+} = E_i - E_f$$

$$Q_{\beta^+} = \{M(A,Z) - [M(A, Z-1) + m_{e^+} + m_{\nu}]\} \cdot C^2$$

$$M(A,Z) = \mathcal{M}(A,Z) - Zm_{e^-}$$

$$M(A,Z-1) = \mathcal{M}(A,Z-1) - (Z-1)m_{e^-}$$

$$m_{e^-} = m_{e^+}$$

$$m_{\nu} = 0$$

$$Q_{\beta^+} = \{ \mathcal{M}(A,Z) - \mathcal{M}(A,Z-1) - 2m_{e^-} \} \cdot C^2$$

- $m_{e^-} = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

- $m_{e^-} \cdot C^2 = 9,109 \cdot 10^{-31} \times (3 \cdot 10^8)^2 / 1,6 \cdot 10^{-19} = 0,511 \text{ MeV}$



- $2 \cdot m_e \cdot c^2 = 1,022 \text{ MeV}$
- $Q_{\beta^+} = \Delta \mathcal{M} \cdot c^2 - 1,022 \text{ MeV}$
- **Pour que l'émission  $\beta^+$  soit possible il faut que :**

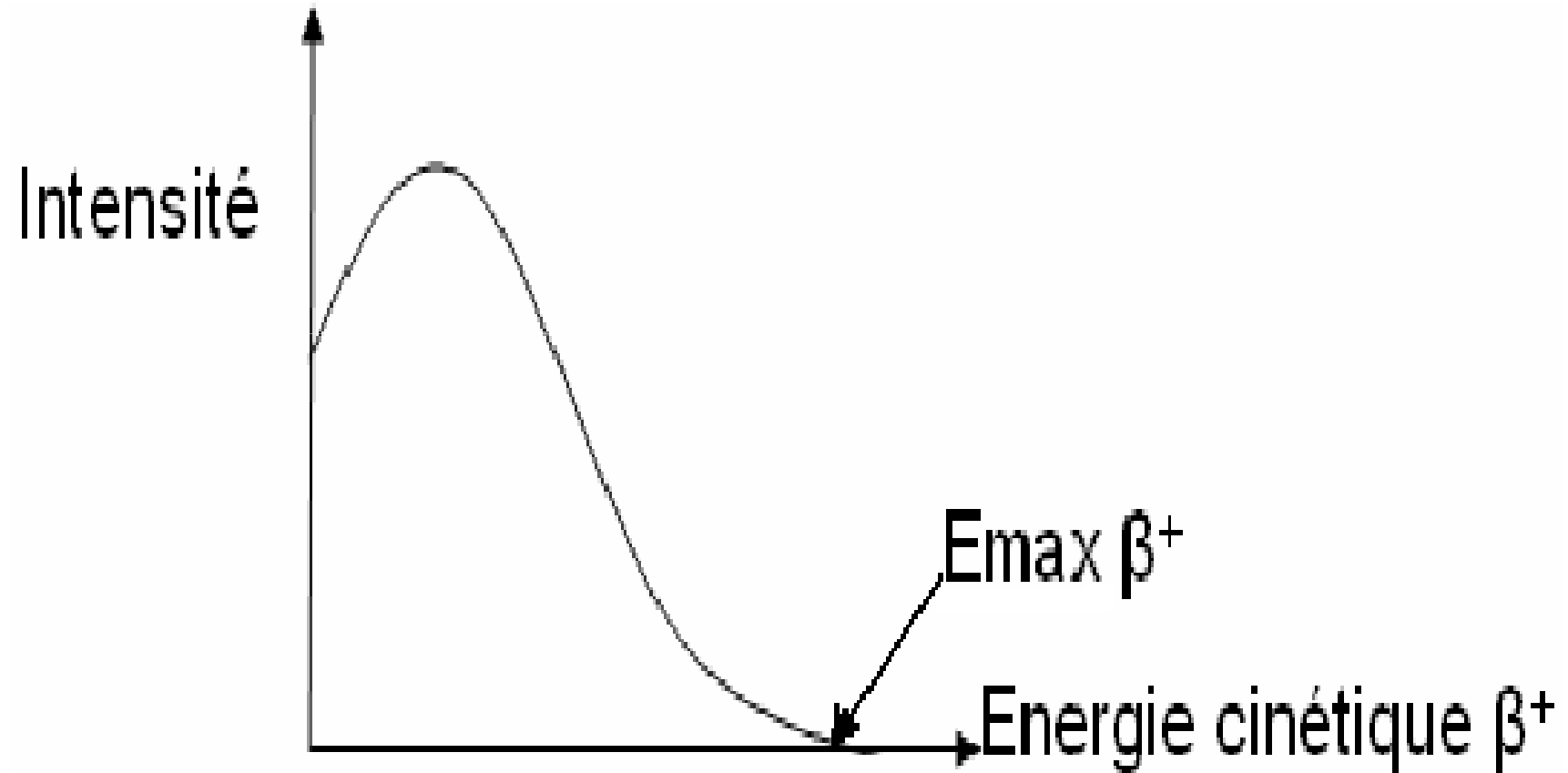
$$Q_{\beta^+} > 0 \text{ c.à.d } \Delta \mathcal{M} \cdot c^2 > 1,022 \text{ MeV}$$

- L'énergie maximale de la particule  $\beta^+$  :

$$E_{\beta^+ \text{ max}} = \Delta \mathcal{M} \cdot c^2 - 1,022 \text{ MeV}$$

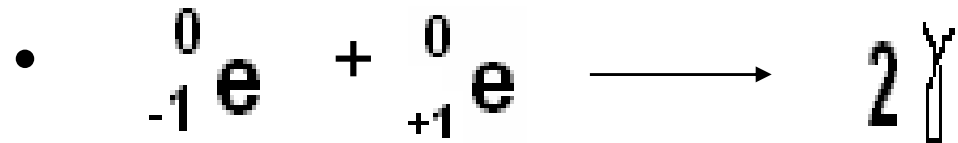
- Spectre énergétique des particules  $\beta^+$  :

- Spectre énergétique des particules  $\beta^+$  :

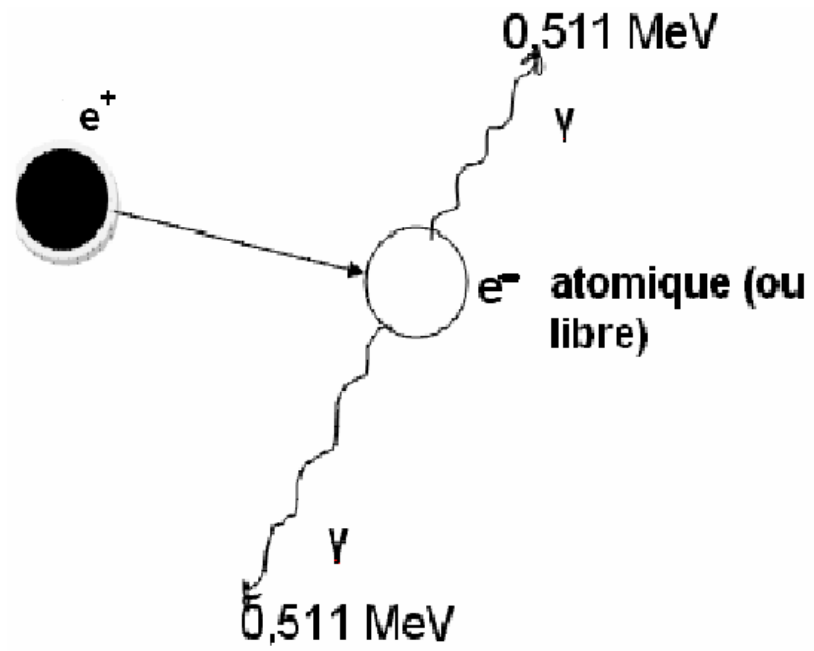


Effets secondaires : ces positrons  ${}_{+1}^0\text{e}$  se propagent dans la matière en perdant leur énergie.

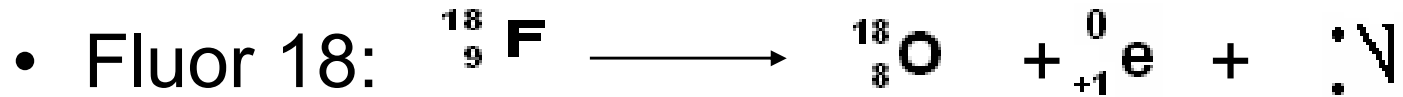
Instables, lorsqu'ils sont au repos, ils rencontrent les électrons  ${}_{-1}^0\text{e}$ , il y'a **annihilation** « disparition » :



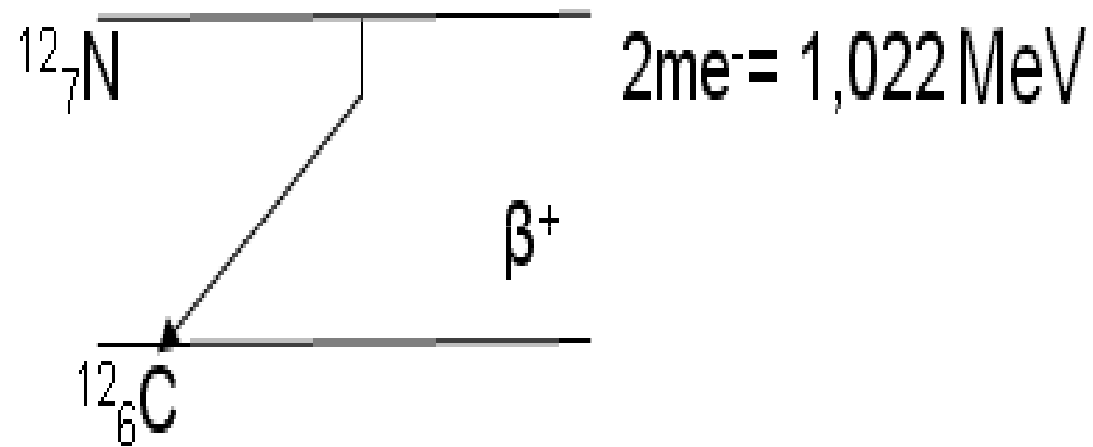
- Il y'a émission de deux photons gamma:  $2\gamma$  de même énergie  $h\nu = 0,511 \text{ MeV}$  émis dans des directions opposées :



Exemples :



- Azote 12:



- ${}^{12}_7\text{N} = 12.02278 \text{ u.m.a}$
- ${}^{12}_6\text{C} = 12.003803 \text{ u.m.a}$

- $\Delta \mathcal{M} = 0,018977 \text{ uma}$

$$E_{\beta^+} = \Delta \mathcal{M} \cdot C^2 - 1,022 \text{ MeV}$$

$$E_{\beta^+} = (0,018977 \times 931) - 1,022 \text{ MeV} > 0$$

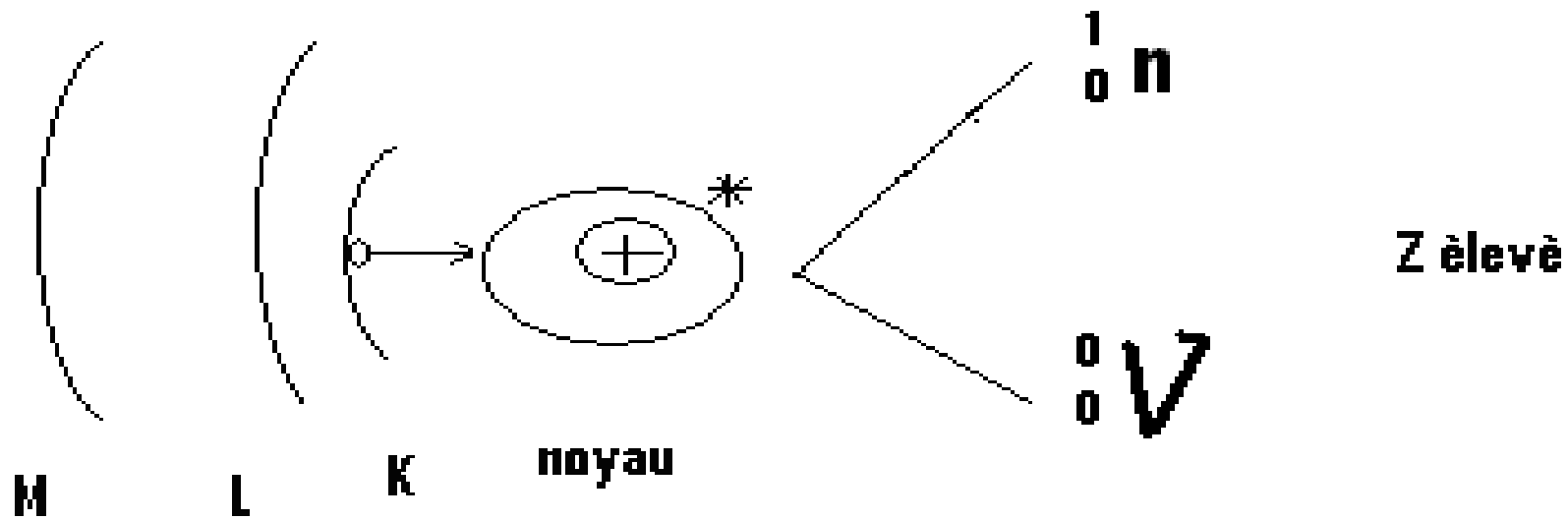
Donc l'émission  $\beta^+$  est possible

$$E_{\beta^+} = 17,667 - 1,022 = 16,645 \text{ MeV}$$

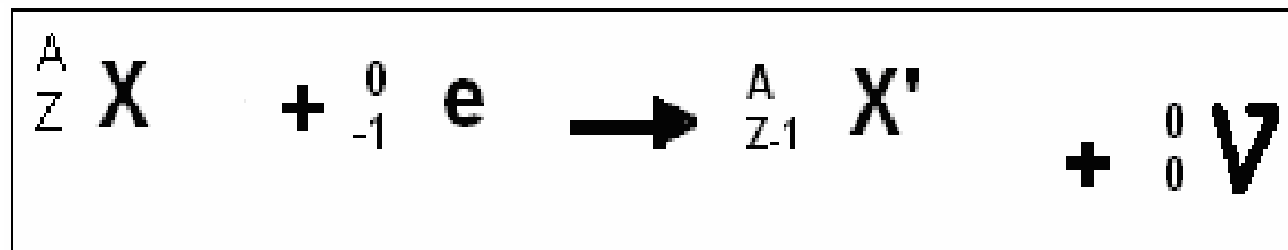
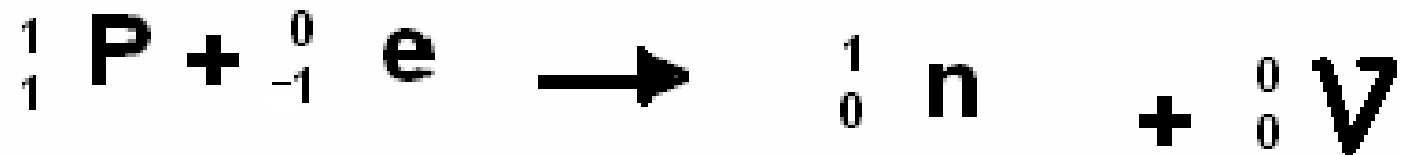
### 3) Capture électronique : (si $Z \uparrow \uparrow$ )

Excès de protons.

Les noyaux ayant un excès de protons peuvent se transformer par capture d'un  $e^-$  en général de la couche K la plus centrale (sinon et à moindre degré la couche L.....).



La réaction nucléaire s'écrit :

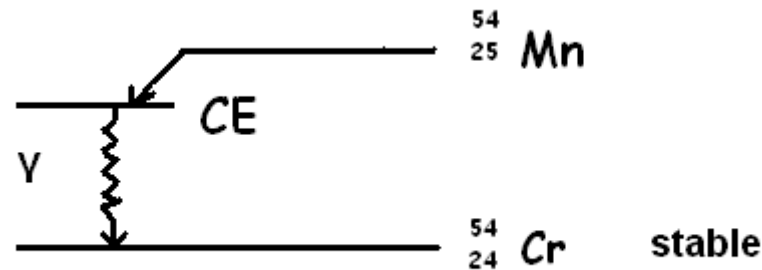


## Condition énergétique :

- $Q_{CE} = \{M(A,Z) + m_{e^-} - \{M(A, Z-1) + m_{\nu}\}\}C^2 - E_{\ell}$
- $M(A,Z) = \mathcal{M}(A,Z) - Zm_{e^-}$
- $M(A,Z-1) = \mathcal{M}(A,Z-1) - (Z-1)m_{e^-}$
- $m_{\nu} = 0$
- $Q_{CE} = \{ \mathcal{M}(A,Z) - \mathcal{M}(A,Z-1) \}C^2 - E_{\ell}$
- Pour que cette transformation puisse se produire, il est nécessaire que la différence des énergies entre l'état initial et final soit supérieure à l'énergie de liaison  $E_{\ell}$  de l'électron sur sa couche soit  $\Delta \mathcal{M} C^2 > E_{\ell}$
- Donc  $Q_{CE} = \{ \mathcal{M}(A,Z) - \mathcal{M}(A,Z-1) \}C^2 - E_{\ell}$
- $\Delta \mathcal{M} C^2 > E_{\ell} \rightarrow$  capture électronique possible+++
- $E_{\ell} = E_{K+++}, E_{L++}, E_{M+} \dots$



- Exemple :

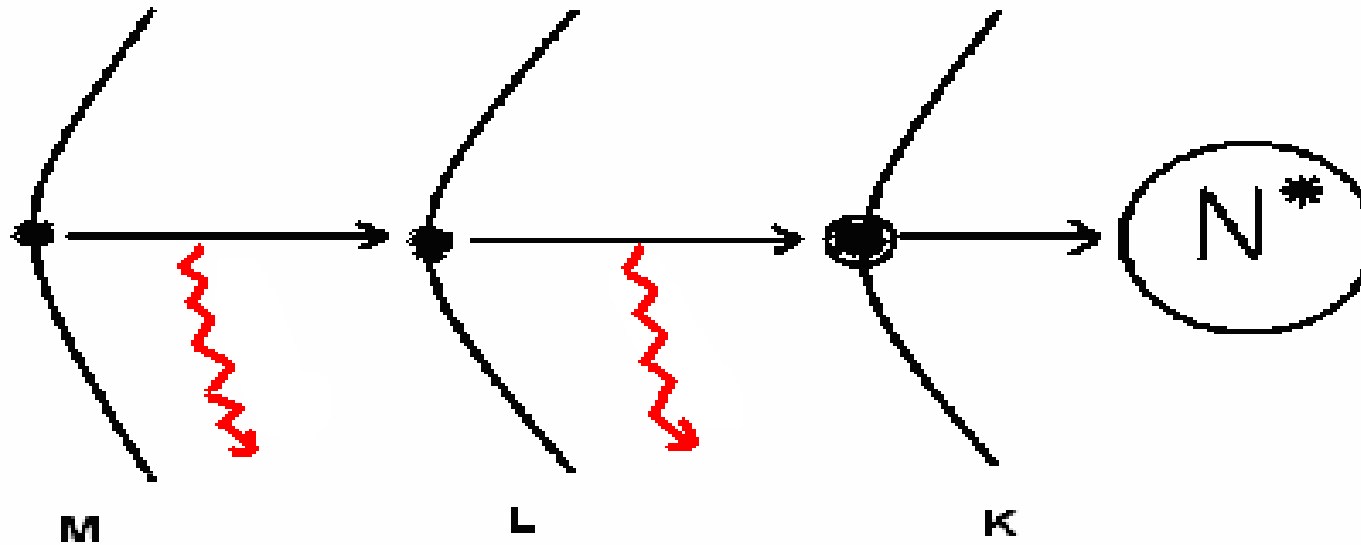


- *Phénomènes secondaires de la capture électronique :*

Après capture de l'e- atomique par le noyau, l'atome se trouve dans un état « excité » puisqu'il a perdu un e-.

Sa désexcitation va s'effectuer selon deux modes compétitifs.

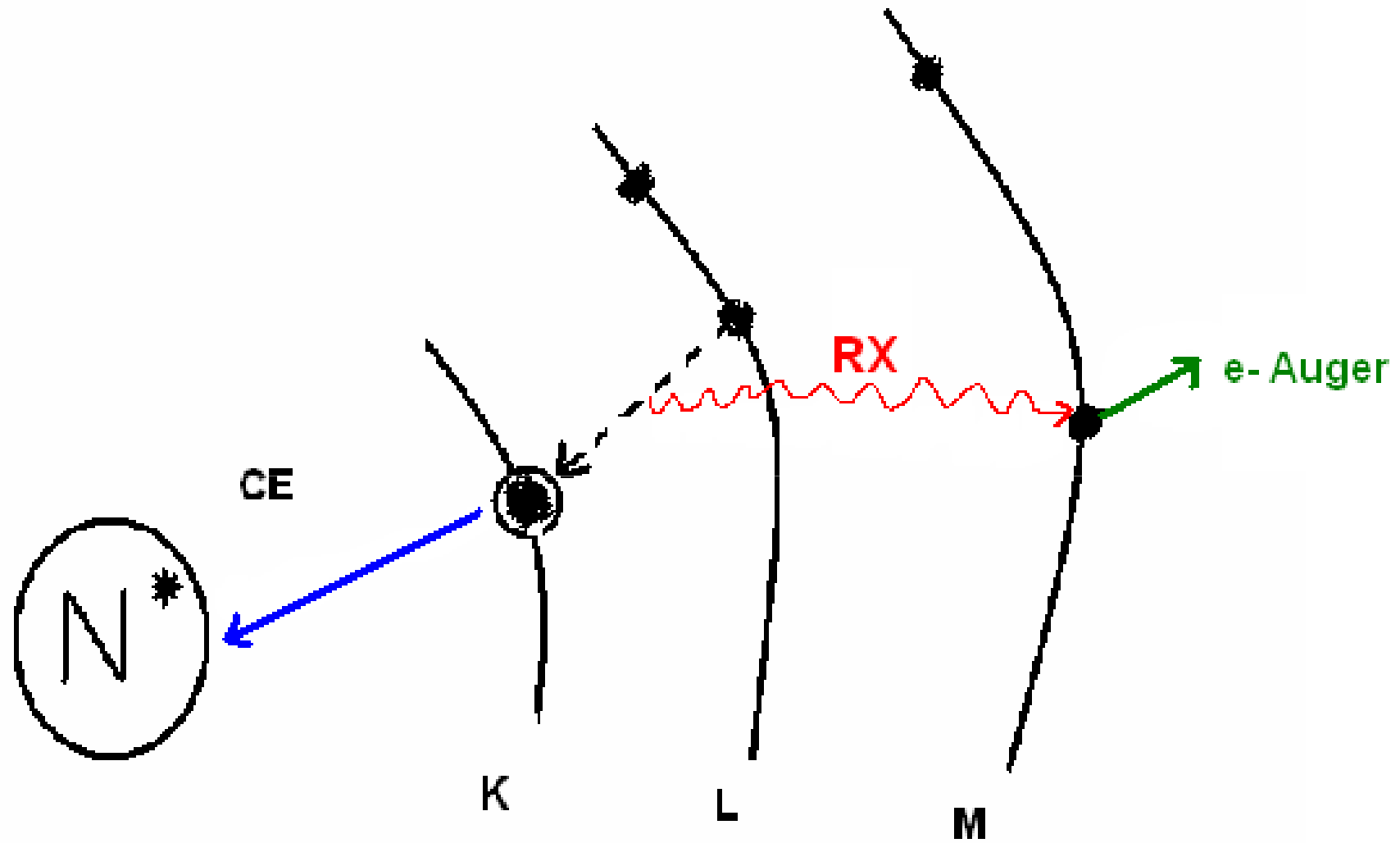
a/ Emission d'un rayonnement X : Z ↑↑↑



- Dans ce schéma c'est la couche K qui a perdu un e-.
- La couche K comporte une vacance= un trou qui sera comblé par un e- des couches supérieures, c'est le réarrangement électronique. Celui-ci aboutit à une émission de **RX** caractéristique du noyau final, l'énergie de ce photon X émis est :
- $E_x = E_K - E_L$  (e- transite de L vers K)

b/ l'électron Auger :

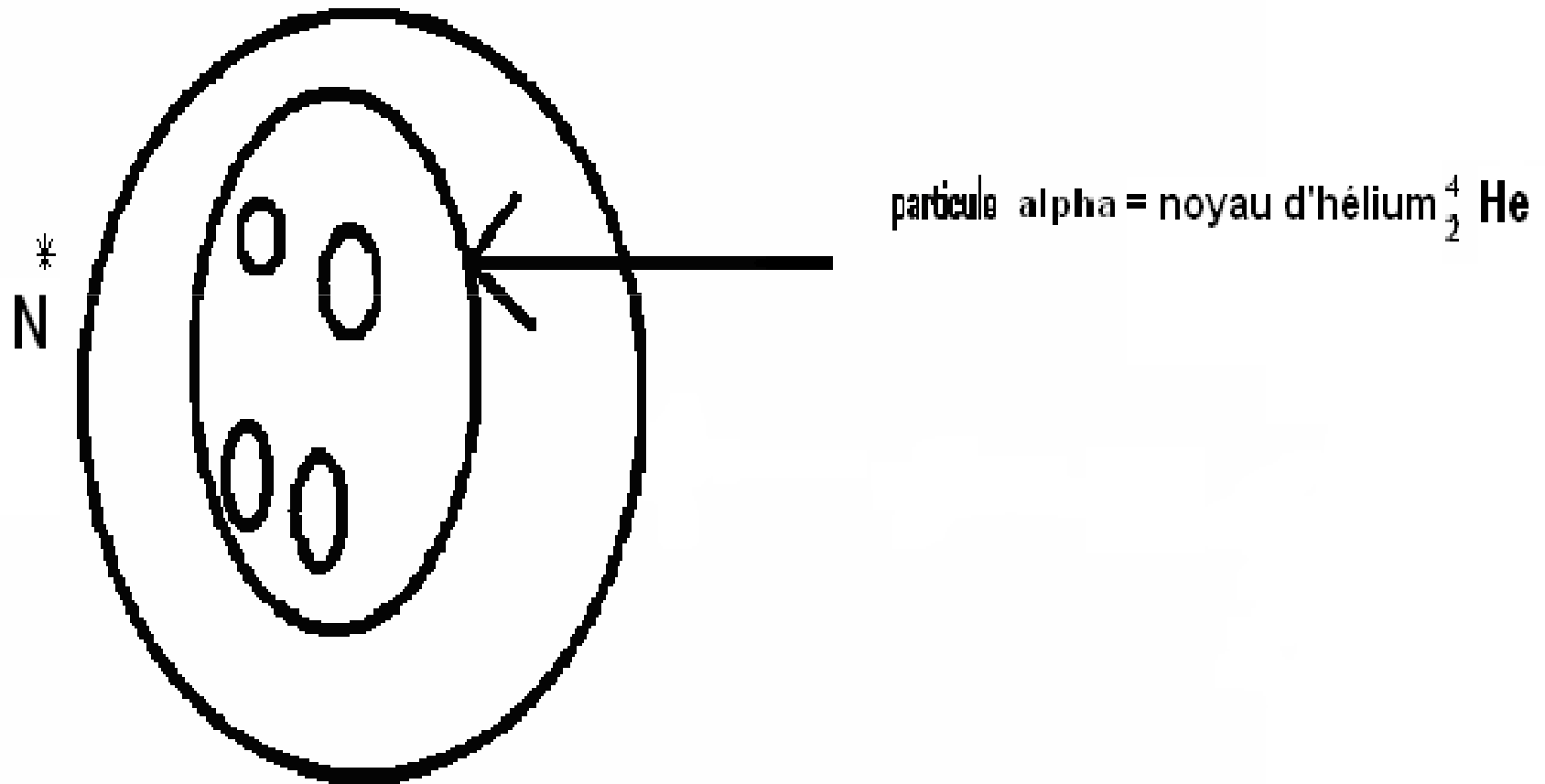
- L'énergie de transition X peut à son tour, interagir avec un e- périphérique qui se trouve ainsi libéré : e- Auger
- Compétition entre  $\beta^+$  et CE:  
CE est favorisée si :  $E_{\text{seuil}} < 1,022 \text{ MeV}$   
et Pour les noyaux lourds (z élevé).



## B/ Transformations par partition :

### 1/ Excès de protons et de neutrons = Emission alpha $\alpha$

- Les noyaux qui ont un  $Z > 83$  (zone 3) vont essayer d'évoluer vers la zone de stabilité et en particulier vers  $Z=83$ .
- **2 neutrons et 2 protons** se réunissent à l'intérieur du noyau pour former **un noyau d'hélium** qui est émis **spontanément** par des noyaux lourds instables suivant la réaction :



## 2/ Fission spontanée:

Cause: instabilité des noyaux lourds.

Mécanisme :  $A, Z^* \rightarrow F1 + F2 \quad F1 \neq F2$

## C/ Désexcitation électromagnétique des noyaux :

$\alpha, \beta^-, \beta^+, CE$

↓ ↓ ↓ ↓

Noyau excité

↓

Désexcitation par :  $\gamma, CI, (e^+, e^-)$

↓

Noyau stable

## 1/ Emission gamma $\gamma$ :

- Elle peut accompagner tous les types d'émission que nous venons de voir.
- Lorsqu'un noyau, après une transformation a été laissé dans un état excité, il va revenir à l'état fondamental en émettant un rayonnement gamma.  
Un ou plusieurs gamma sont émis, ils sont caractéristiques de la transformation. L'émission gamma peut être instantanée et suivre la première transformation à quelques fractions de microsecondes, mais elle peut être retardée (plus d'une seconde) dans ce cas on a isométrie.

$E_i \rightarrow E_f$  : émission de photon  $\gamma$  d'énergie:

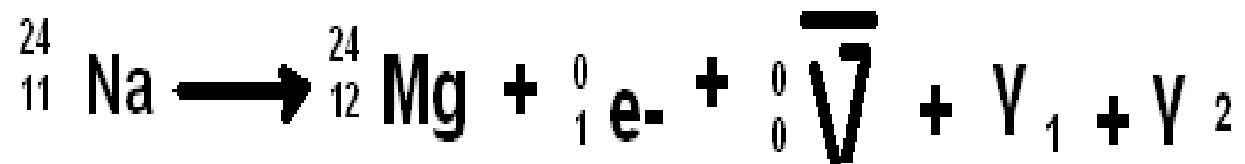
$$E_\gamma = h\nu$$

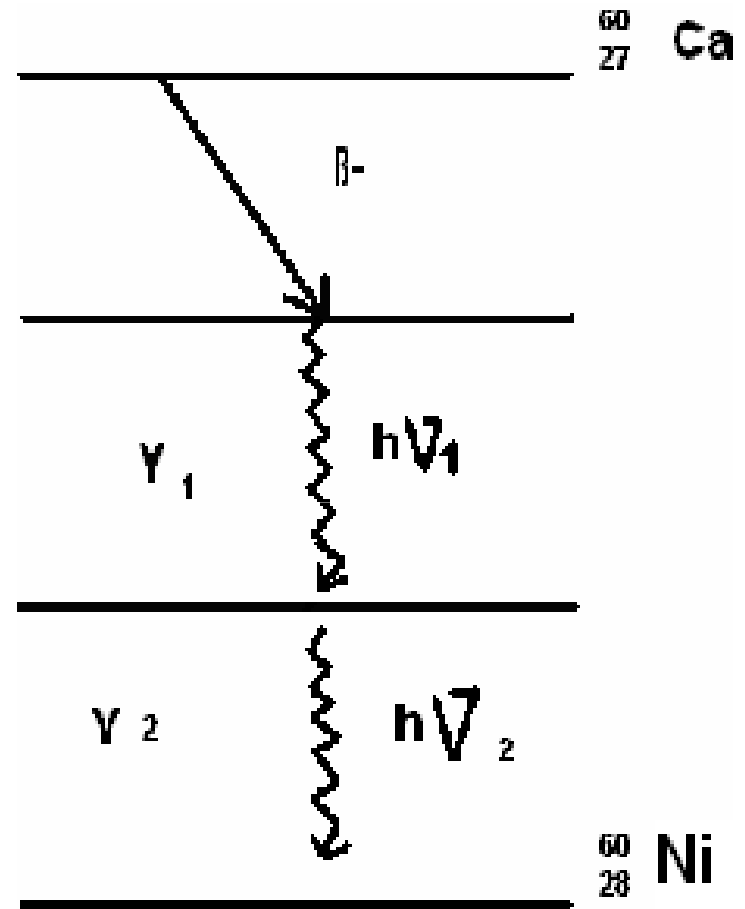
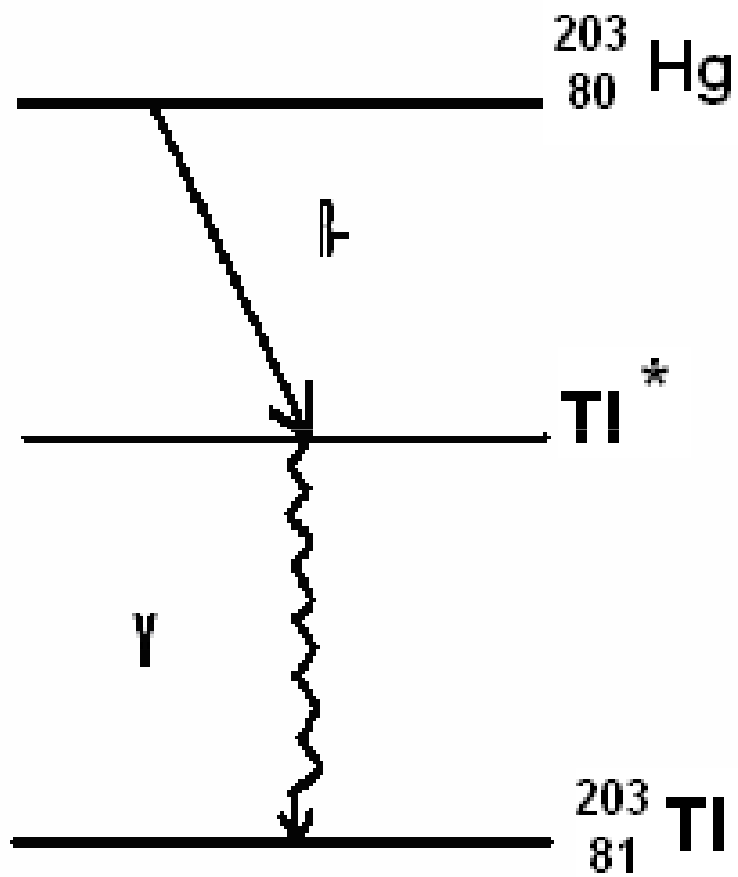


- **Exemples :**

${}_{11}^{24}\text{Na}$  se transforme par émission  $\beta^-$ .

A chaque particule  $\beta^-$  émise ayant une énergie maximale de 1,39 MeV succède l'émission de 2 photons gamma ayant des énergies respectives de 1,37 et 2,57 MeV.

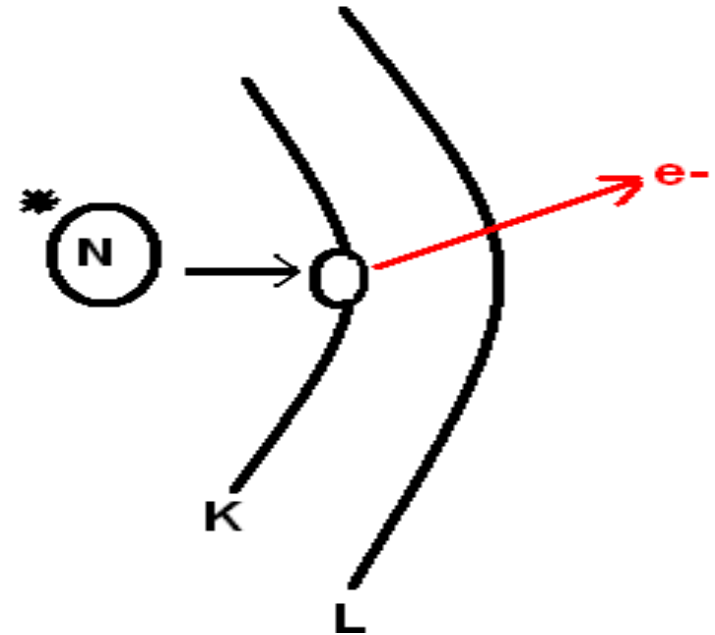




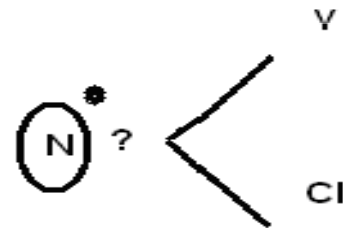
## 2/ Conversion interne :

- C'est le processus de désexcitation du noyau (Zélevé) qui entre en compétition avec l'émission gamma : un noyau excité dans un état d'énergie  $E_i$  qui se désexcite vers un état d'énergie  $E_f$  en transmettant directement l'énergie  $E_i - E_f$  à un e- du cortège atomique. Cet e- est ainsi libéré de sa couche ( $n=k+++$ )
- si l'énergie  $E_i - E_f$  est supérieure à l'énergie de liaison de l'e-, l'e- emporte alors une énergie cinétique  **$E_c : E_c = (E_i - E_f) - E_l$** .

- Phénomènes secondaires :  
 Z élevé : Emission RX.  
 Emission e- Auger



- Compétition gamma et CI:

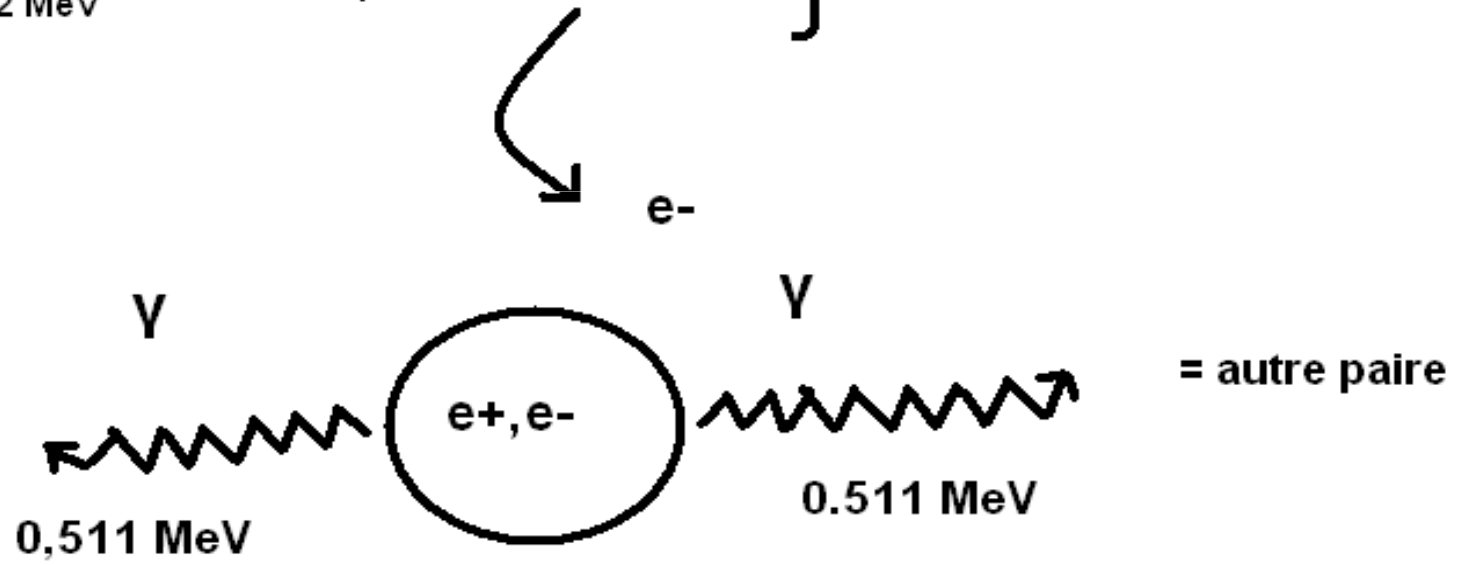
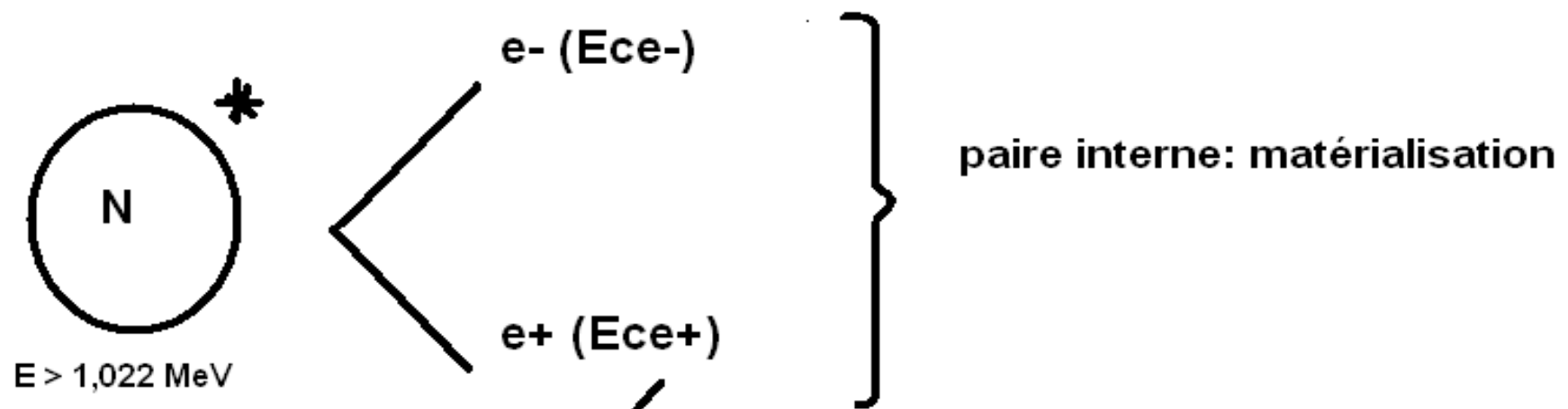


Emission Gamma : favorisée si noyau excité de **grande énergie**.

CI : si noyau lourd (Z élevé) faiblement excité.

### 3/ Emission de paire interne (e+, e-) :

- Le noyau excité se désexcite par **matérialisation** : création d'une paire (e-, e+) = 1,022 MeV
- Condition:Energie **E** du **noyau**: **$E > 1,022\text{MeV}$**   
Noyau\* (E) —> désexcitation (e+, e-)
- L'énergie emportée par la paire (e-, e+) est:  
 **$E - 1,022\text{ MeV}$**
- **$E_{e-} + E_{e+} = E - 1,022\text{ MeV}$**
- Phénomènes secondaires : Annihilation du positron émis avec un autre e et émission deux photons **gamma** de **511 KeV**



annihilation