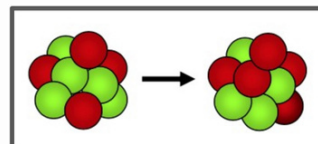


# Les transformations radioactives:

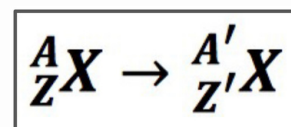
## I) Généralités, radioactivité alpha et transformations isobariques

### A) INTRODUCTION

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

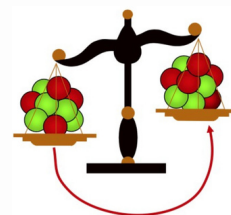


La réaction nucléaire entraîne une **modification du noyau** de l'atome avec un changement de sa nature et transformation d'un élément (**père**) en un autre élément (**fil**).



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 (irréversible) s'écrit de manière générale:



Le noyau père (X) est **obligatoirement radioactif** et le noyau fils (Y) peut être soit **radioactif** (et il subira à son tour une transformation radioactive) soit il peut être **directement stable**.

Les particules émises sont diverses: **n**, **e<sup>-</sup>**, **e<sup>+</sup>**, **α**. 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 (revu plus tard).
- 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 λ, elle-même indépendante des conditions physico-chimiques et de l'âge de l'atome.
- Est **naturelle ou artificielle**

On va retrouver sur Terre:

- Des **noyaux naturels**: 274 stables et 51 radioactifs instables (ces derniers ont une demie vie extrêmement important, au moins égale 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:

- Rayons cosmiques
- Radioactivité tellurique (sol): uranium, thorium, potassium
- Le radon-222 ( $T_{1/2} = 3,8j$ ): gaz naturel radioactif
- Les eaux et les aliments

C'est hyper important de se rappeler que c'est le radon 222 (il fait des pièges dessus) Enfaite tous ce qui est dit sur le radon 222, il faut le savoir.

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

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

**B) HISTORIQUE**

Partie un peu nulle et qui tombe jamais mais apprenez la quand même mdr

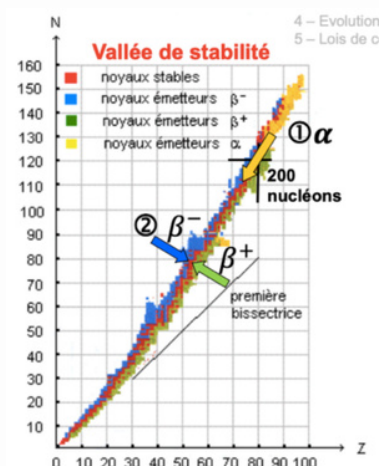
- **1896**: Henri Poincaré et Henri Becquerel cherchent un lien entre la fluorescence des minerais et celle des rayons X. Becquerel obtiendra avec Pierre et Marie Curie le Prix Nobel de physique en 1903.
  - Expérience : Les sels d'uranium exposés au soleil émettent une fluorescence qui impressionnent 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  $^{32}P$  (contre les leucémies, plus utilisé à l'heure actuelle) et l'iode  $^{131}I$  (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:

- Si  $A > 200$  nucléons (**noyaux lourds**): radioactivité alpha
- Si **excès de neutrons** : émission  $\beta^-$   
Si **excès de protons** : émission  $\beta^+$  } Transformations isobariques (avec A identique)
- Si **excès d'énergie interne**: transformation isométrique

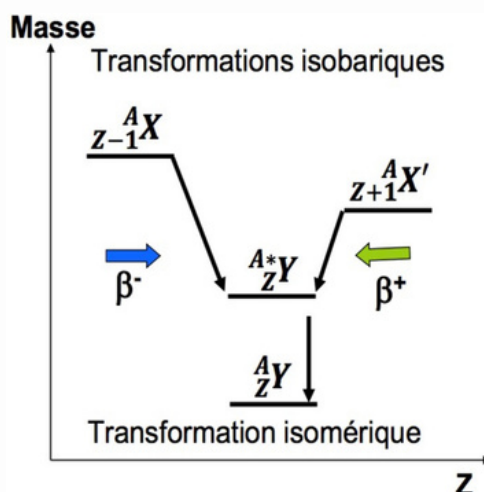
Petit mnémo:

$\beta^-$  -> négatif - Négatif -> excès de neutrons



## D) ÉVOLUTION 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.

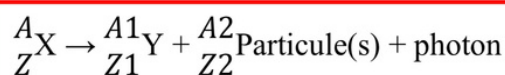
Au final, on a une évolution vers :

- 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

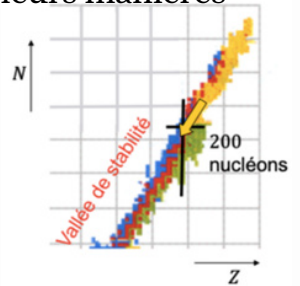
## II) La Radioactivité alpha:

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  ${}^4_2$  protons et 2 neutrons, peut être notée de plusieurs manières (particule  $\alpha$ , noyau d'He, He, He $^{++}$ ,  $\alpha^{++}$ ).

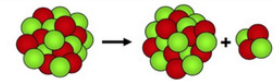
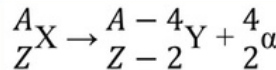
Le noyau d'Hélium possède :

- **Un noyau à nombre magique** (2 et 2) : particule très stable avec  $EL/A = 7 \text{ MeV}$  à lire « Énergie de liaison par nucléon »
- **Le seul noyau complexe émis spontanément** lors de transformations radioactives

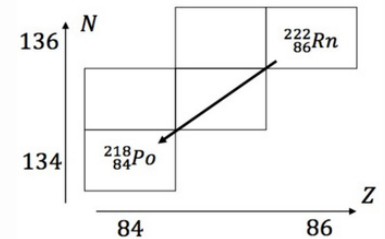


On observe souvent plusieurs émissions  $\alpha$  à la suite. La radioactivité alpha concerne les noyaux lourds.

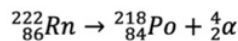
### A) RÉACTION DE DÉSINTÉGRATION:



- 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



Exemple: radon  $\rightarrow$  polonium



### 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.

Retournez  $\surd$

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

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

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

Pour l'équivalence masse-énergie on utilise la formule  $Ed = \Delta M \times 931,5$  avec  $Ed$  en MeV et  $\Delta M$  en u

Exemple : Calculez l'énergie délivrée par cette transformation :



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

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

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

Je vous mets un petit qcm sur ça pour que vous compreniez bien parce que perso en P1 j'avais rien compris:

**QCM 9** : Soit la transformation suivante :  ${}^{247}_{97}\text{Bk} \rightarrow {}^{243}_{95}\text{Am} + {}^4_2\alpha$ . Quelle est l'énergie libérée durant cette transformation ?

**Données** :  $M(247 ; 97) = 247,0703 \text{ u}$  ;  $M(243 ; 95) = 243,0614 \text{ u}$  ;  $M(4;2) = 4,0026 \text{ u}$

- A) 5,87 MeV
- B) 6,30 MeV
- C) 8,24 MeV
- D) 7,63 MeV
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses

Pour répondre à cette question, on doit calculer la différence de masse entre le noyau père et le noyau fils + particule alpha, qu'on appelle "**défaut de masse**": (ici la question est: « quelle est l'énergie libérée » mais ça aurait pu être « quelle est l'énergie de la particule alpha libérée » C'est vraiment que des soustractions donc c'est vraiment super cool

$$\begin{aligned}\Delta M &= M(247 ; 97) - M(243 ; 95) - M(4, 2) \\ &= 247,0703 - 243,0614 - 4,0026\end{aligned}$$

$$\Delta M = 0,0063 \text{ u} \rightarrow \text{Défaut de masse}$$

Maintenant qu'on a notre défaut de masse on va utiliser la formule masse-énergie pour convertir cette masse pour en énergie, on fait donc  $\times 931,5$ :

♥ Équivalence masse/énergie pour 1u :

$$1u = \frac{m_{\text{électron}} \cdot c^2}{1\text{eV en Joule}} = \frac{0,166 \times 10^{-26} \times (2,9979 \cdot 10^8)^2}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$$

$$0,0063 \times 931,5 = 5,87 \text{ MeV}$$

*petit rappel des multiplications posées :*

$$\begin{array}{r} 931,5 \\ \times 0,0063 \\ \hline 27945 \\ 55890 \\ \hline 5,86845 \end{array}$$

Ces résultats résultats là sont toujours en MeV donc si un item propose 5,...keV c'est faux ou alors c'est 5868 keV.

Donc A);)

**QCM 9 : A**

A) Vrai :  $\Delta M = 247,0703 - 243,0614 - 4,0026 = 0,0063 \text{ u}$

$0,0063 \times 931,5 = 5,87 \text{ MeV}$

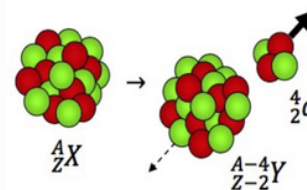
- B) Faux
- C) Faux
- D) Faux
- E) Faux

### 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 :

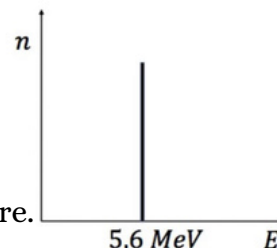
- *Vitesse faible pour le noyau fils de masse élevée*
- *Vitesse importante pour la particule  $\alpha$  de masse faible*



On considère que le noyau fils emporte une partie négligeable de l'énergie cinétique tandis que la **particule  $\alpha$  en emporte la quasi-totalité** : soit  $E_c \text{ particule } \alpha = Ed \text{ +++}$

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 :

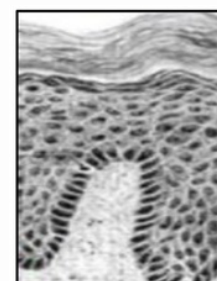
La particule  $\alpha$  :

- **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

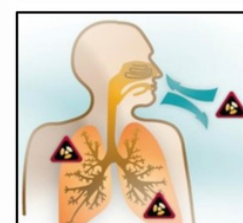


### E. APPLICATIONS BIOMÉDICALES :

- Radioprotection
  - Si la source est **externe** au corps : *aucun danger*, les particules  $\alpha$  sont absorbées par la couche cornée de la peau (sur l'image, la couche la plus en haut)
  - 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.*



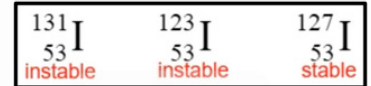
- Thérapeutique

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) Les principes physiques des transformations isobariques:

Rappels et définitions :

- On symbolise un nucléide en utilisant son symbole chimique (X dans l'exemple), son numéro atomique (Z) et son nombre de masse (A)
- **2 isotopes sont 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)
- **2 isobares sont 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)

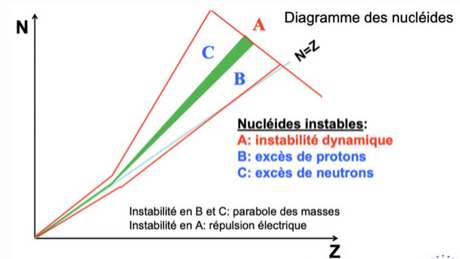


Les **transformations radioactives isobariques** se produisent *sans changement du nombre de nucléons A entre noyau père et fils, mais Z et N changent.*

Les lois de conservations s'appliquent également lors de ces transformations.

Il existe 3 types de transformation isobariques :

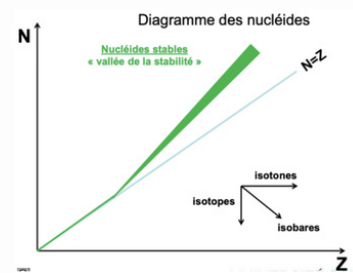
- **Émission  $\beta^-$**  (désintégration  $\beta^-$ ) si excès de neutrons
- **Émission  $\beta^+$**  (désintégration  $\beta^+$ ) si excès de protons
- **Capture électronique (CE)** si excès de protons



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 (diagramme des nucléides), on distingue :

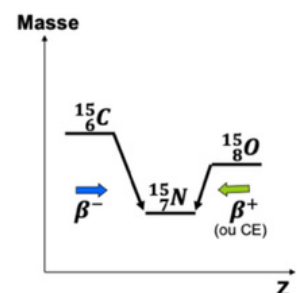
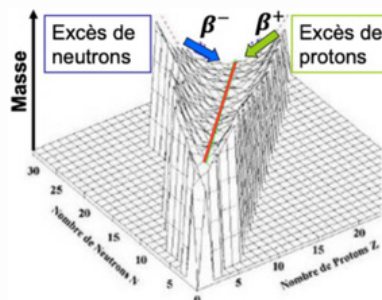
- Les **noyaux légers** : stables si  $Z = N$
- Les **noyaux plus lourds** : stables si excès de neutrons avec compensation des charges répulsives des protons entre eux.



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**

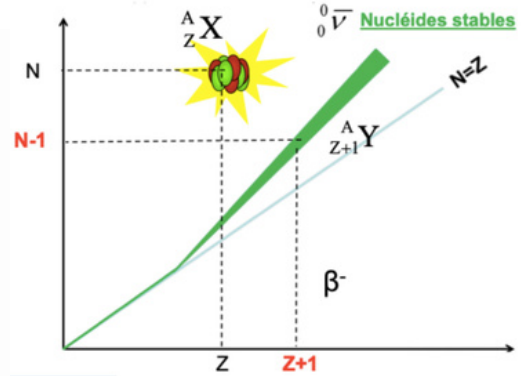
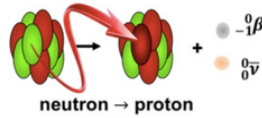


### III) Les transformations $\beta^-$

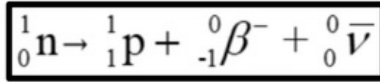
#### A) La réaction de désintégration:

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

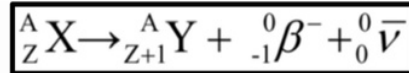
- **Perd un neutron**
- **Gagne un proton**
- Le nombre de masse (A) reste par conséquent identique et le noyau fils descend dans la vallée de stabilité.



Au niveau du noyau :



Au niveau du nucléide :



Particules émises :

- **Particule  $\beta^-$**  : *électron d'origine nucléaire et non du cortège électronique*
- **Antineutrino  $\bar{\nu}$**  : *charge nulle et masse très faible, négligeable. L'antineutrino est non ionisant donc **très pénétrant** avec peu d'interactions avec la matière. Ce n'est pas un REM.*

Transformation du neutron en proton :

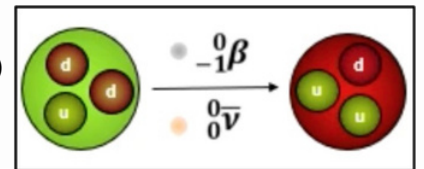
Les neutrons et les protons ne sont pas les particules les plus élémentaires de la matière car composés de **quarks**. Il en existe 2 types :

- **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)

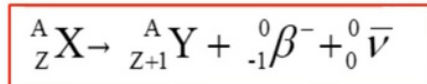
Neutrons : 1 quark up et 2 quarks down (d'où la charge  $\pm 0$  du neutron)

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) Le 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.



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

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

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

Il faut retenir que la *différence de masse nucléaire est égale à la différence de masse des atomes pères et fils pour la transformation  $\beta^-$* .

Pour calculer l'énergie délivrée par cette transformation:

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

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

Pour simplifier, on modifie les unités:

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

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

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

+++ Il faut donc faire très attention aux unités +++

Petite question pour comprendre ce qu'on va nous demander en qcm:

Quelle est l'énergie disponible de la transformation du Ytterbium 70 (180;70) en Ytterbium (180; 71) ?

Ou quelle est l'énergie maximale de la particule  $\beta^-$  émise?

On donne Les masses des noyaux en unités de masse atomique:  $M(180;70) = 179,9523$  ;

$M(180;71) = 179,9499$  ;  $m = 0,00055u$

- Déjà, comment on sait que c'est bien une particule  $\beta^-$  qui est émise et pas une particule  $\beta^+$  ?
  - la réaction se fait du sens de l'Ytterbium 70 vers l'Ytterbium 71
  - l'Ytterbium 70 possède 70 protons et l'Ytterbium 71 possède 71 protons
  - donc au départ on a pas un excès de protons mais un excès de neutrons
  - excès de neutrons  $\rightarrow$  N pour neutron  $\rightarrow$  N pour négative  $\rightarrow$  particule émise négative  $\rightarrow$   $\beta^-$
- On calcule ensuite le défaut de masse:

$$\Delta M = \mathcal{M}(180;70) - \mathcal{M}(180;71)$$

$$= 179,9523 - 179,9499$$

$$\Delta M = 0,0024 u$$

Une fois qu'on a notre défaut de masse, on utilise l'équivalence masse-énergie donc  $\times 931,5$ :

$$0,0024 \times 931,5 = 2,23560 \text{ MeV}$$

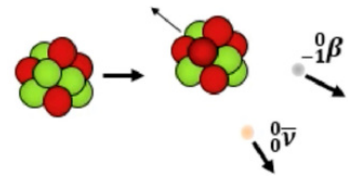
L'énergie disponible de cette transformation est donc de 2,23 MeV et c'est aussi l'énergie maximale de la particule  $\beta^-$ .

Voilà c'est à ce genre de questions que vous allez devoir répondre, vous voyez c'est pas compliqué!

### C) La réaction de désintégration:

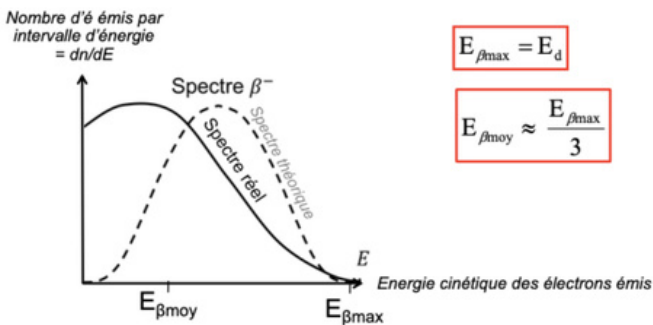
L'énergie délivrée lors de la transformation correspond à une énergie cinétique répartie entre :

- 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 en énergie de la particule $\beta^-$



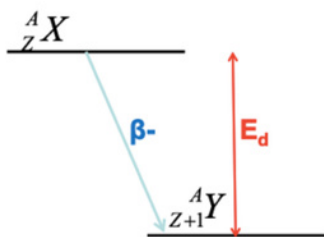
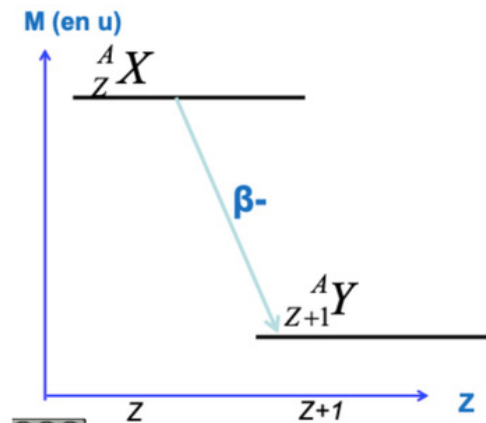
Spectre théorique : le spectre électronique continu de la  $\beta^-$  va de 0 (l'antineutrino emporte toute l'énergie) à  $E_{max}$  (la  $\beta^-$  emporte toute l'énergie).

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) Le schéma de désintégration:

Ce schéma est important à comprendre !

- En ordonnée : la **masse des atomes pères et fils** (état fondamental ou excité)
- En abscisse : le **numéro atomique des atomes**
- Segments horizontaux : **ordonnées des niveaux d'énergie autorisés**
- On utilise des flèches pour indiquer les transitions autorisées du père et des états possibles du fils



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  $M(14,7) = 14,003073u$ .

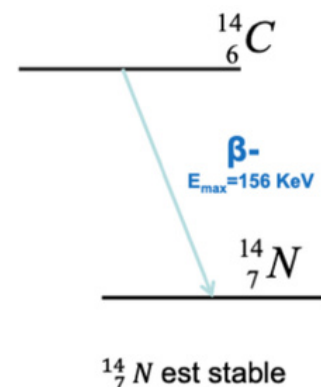
#### Réponse :

$$E_d = [M(14,6) - M(14,7)] \times c^2$$

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

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

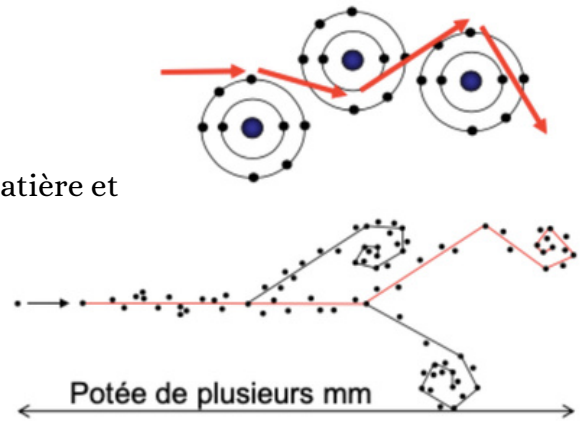
$$E_d \approx 0,156 \text{ MeV} \approx 156 \text{ KeV}$$



## E) Le parcours dans la matière:

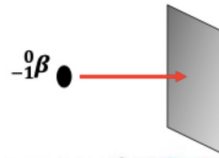
La particule  $\beta^-$  :

- Est émise quand **excès de neutrons**
- Est **chargée négativement**
- Est **ionisante** par interaction avec les électrons de la matière et a donc un parcours non rectiligne et court
- Est **arrêtée par une feuille de métal très fine**



L'antineutrino :

- Est **très pénétrant**
- **Interagit peu avec la matière**
- Est **indétectable**
- **Masse extrêmement faible**
- **Charge nulle**



## F) Les applications biomédicales:

- Radiothérapie

L'iode 131 se transforme en Xénon 131 métastable via une  $\beta^-$  (la notion de métastable est revue dans un cours prochain, mais pour faire simple, il y a un excès d'énergie interne aboutissant à une transformation isomérique).

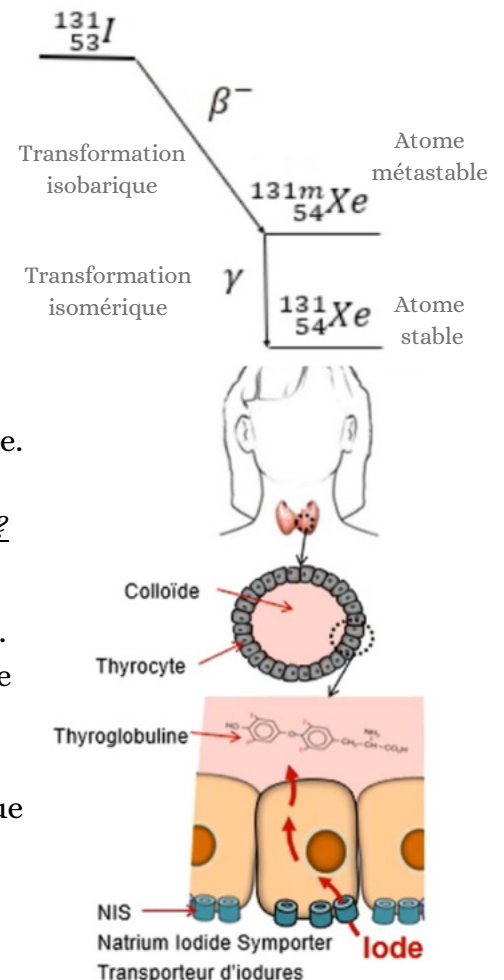
On trouve l'iode 131 à l'état naturel dans l'écorce terrestre et il peut également être produit par fission nucléaire dans les centrales nucléaires.

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 ?

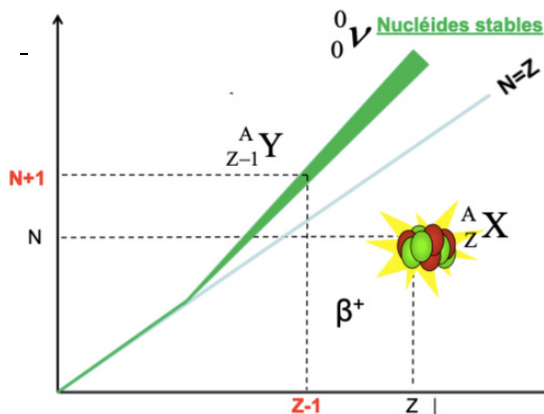
La thyroïde est un petit organe endocrine à la base du cou synthétisant les hormones thyroïdiennes indispensables à la vie. Son organisation est folliculaire avec les thyrocytes en périphérie et le colloïde au centre (lieu de synthèse des hormones). Cette synthèse nécessite de l'iode capté par des transporteurs NIS situés sur les thyrocytes puis transporté jusque dans le 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 +++

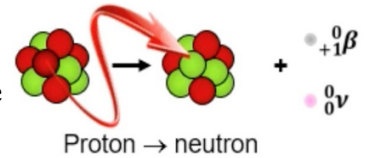


### III) Les transformations $\beta^+$

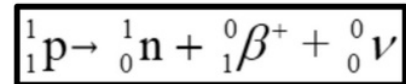
#### A) La réaction de désintégration:



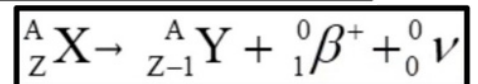
Les transformations  $\beta^+$  se produisent lorsque le noyau père est en **excès de protons** : il perd un proton et gagne un neutron, le noyau fils descend dans la vallée de stabilité.



§ Au niveau du noyau :



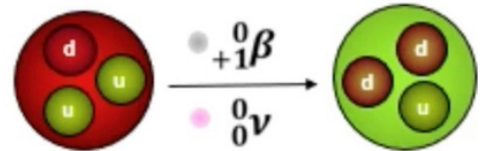
§ Au niveau du nucléide :



§ Particules émises :

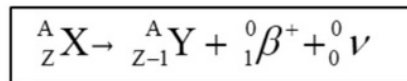
- **Particule  $\beta^+$**  : électron positif (positon), ne préexiste pas dans le noyau mais naît de la transformation
- **Neutrino n** : même caractéristiques que l'antineutrino

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



#### B) Le bilan énergétique:

Pour calculer l'énergie délivrée :



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

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

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

On va multiplier le résultat obtenu pour la différence de masse par  $c^2$ . On obtient :

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

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, on remarque que 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 doit avoir :

$$E_d > 0 \quad \text{Donc : } [M(A, Z) - M(A, Z-1)] \times c^2 > 2m_e \times c^2 \quad \text{Or : } 2m_e \times c^2 = 1,022 \text{ MeV}$$

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 1,022 MeV** +++

Vous vous rappelez, c'est le phénomène de création de paire dans "interactions RI/matière"

Pareiiiiil, petit qcm pour que vous compreniez ce qu'on vous demande en qcm:

**QCM 20** : L'Arsenic-69 ( ${}^{69}_{33}\text{As}$ ) se transforme en Germanium-69 ( ${}^{69}_{32}\text{Ge}$ ). Quelle(s) est (sont) la (les) proposition(s) exacte(s) ?

**Données** :  $M(69,33) = 68,9323\text{u}$  ;  $M(69,32) = 68,9280\text{u}$  ;  $m_e = 0,00055\text{u}$ .

- A) Cette transformation est une  $\beta^-$
- B) Cette transformation est une  $\beta^+$
- C) L'énergie libérée est de 4 MeV
- D) L'énergie libérée est de 4,3 MeV
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses

- Déjà, comment on sait si c'est une transformation  $\beta^+$  ou une  $\beta^-$ ?
  - On voit qu'on part de l'Arsenic (69; 33) qui se transforme en Germanium (69;32)
  - On remarque qu'on a changé d'élément, on est passé de 33 protons à 32 protons, donc on avait un excès de protons au départ -> ça peut donc être une transformation  $\beta^+$
  - Pour en être sûre il faut calculer l'énergie libérée par la réaction pour savoir si ça dépasse le seuil de 1,022 MeV

$$\begin{aligned}\Delta M &= M(69;33) - M(69;32) - 2m_e \\ &= 68,9323 - 68,9280 - 2 \times 0,00055 \\ &= 0,0043 - 0,0011 \\ \Delta M &= 0,0032\text{u}\end{aligned}$$

Maintenant qu'on a le défaut de masse (on a pas oublié la masse des deux électrons), on utilise la formule masse-énergie:

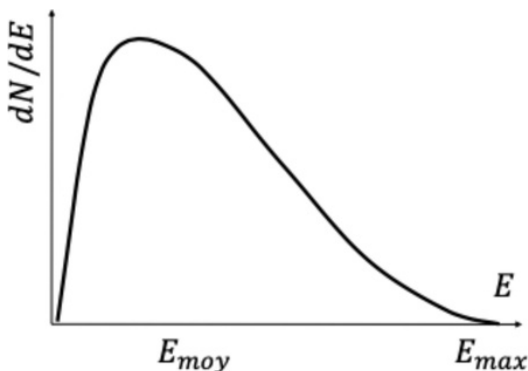
$$0,0032 \times 931,5 = 2,9808\text{ MeV}$$

On voit que l'énergie libérée = 2,98 MeV > 1,022 MeV donc la transformation  $\beta^+$  est possible!

**QCM 20** : B

- A) Faux : on transforme un proton en neutron donc  $\beta^+$
- B) Vrai : pour être sûr n'oubliez pas de vérifier si la valeur seuil est bien atteinte !
- C) Faux :  
 $\Delta M = M(\text{père}) - M(\text{fils}) - 2m_e$   
 $\Delta M = 68,9323 - 68,9280 - 0,0011$   
 $\Delta M = 0,0032\text{u}$   
 $ED = 0,0032 \times 931,5 = 2,98\text{ MeV}$   
 Donc : on n'oublie pas de soustraire la masse des deux électrons pour une  $\beta^+$
- D) Faux
- E) Faux

### C) Le 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 particule  $\beta^+$  et le noyau : les charges positives se repoussent.

### D) Le schéma de désintégration:

Suite à la transformation, X devient Y avec une diminution du nombre de protons et libération d'énergie. **On note le seuil de 1,022 MeV nécessaire pour que la transformation ait lieu.** (on se rappelle création de paire blablabla)

Exemple :

Le fluor 18 se transforme en oxygène 18 via une  $\beta^+$ .

Quelle est l'énergie maximale de la particule  $\beta^+$ ?

Données:  $M(18,9) = 18,0009380u$  et  $M(18,8) = 17,9991610u$ .

Réponse :

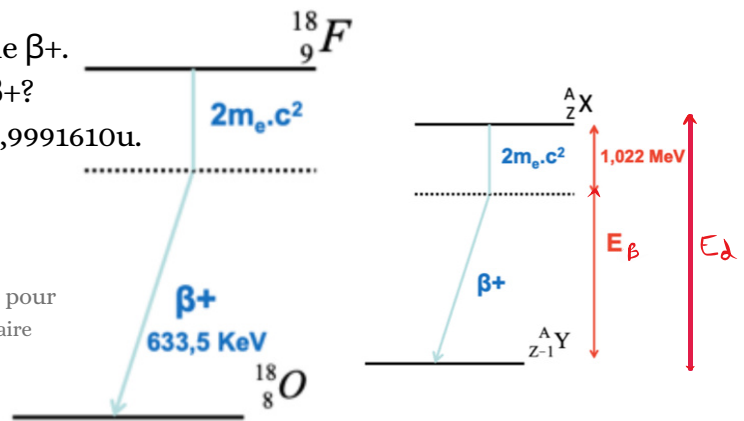
$$E_d = [M(18,9) - M(18,8)] \times 931,5$$

$$E_d = [18,000938 - 17,9991607] \times 931,5$$

Énergie utilisée pour la création de paire

$$E_{\beta^+} = [0,001777] \times 931,5 - 1,022$$

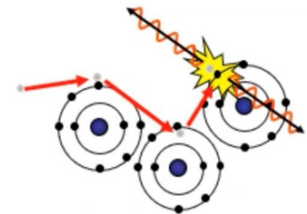
$$E_{\beta^+} \approx 0,633 \text{ MeV} \approx 633 \text{ KeV}$$



### E) Le parcours dans la matière:

La particule  $\beta^+$  :

- Est **chargée positivement et ionisante**
- **Entraîne des collisions avec les électrons jusqu'à épuisement de l'énergie cinétique et a un 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 511 keV chacun émis en coïncidence (à 180° l'un de l'autre).

Démonstration :

- Masse électron = masse positon = 0,0005486u

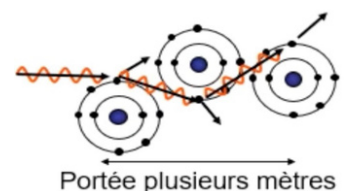
- Chaque photon  $\gamma$  a une énergie  $E = 0,000548 \times 931,5 = 0,511 \text{ MeV} = 511 \text{ keV}$

Le neutrino :

- Est **très pénétrant**
- **Interagit peu avec la matière**
- Est **indétectable** (comme l'antineutrino)

Les photons  $\gamma$  c'est :

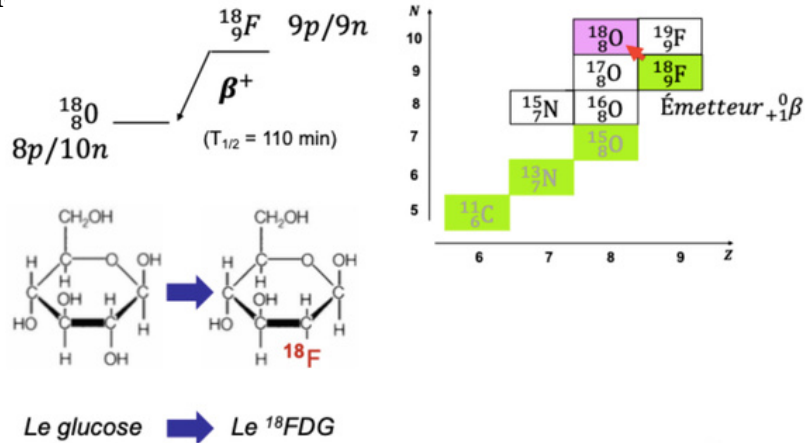
- Une **origine indirectement nucléaire**
- Des **interactions non obligatoires avec la matière via des effets photo-électriques et Compton**
- Une **atténuation par épaisseurs importantes de plomb et/ou de béton**



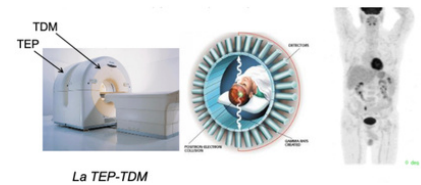
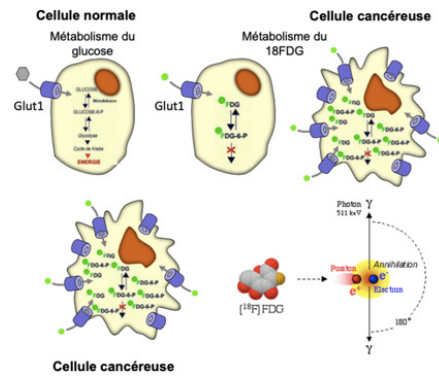
### F) Les applications biomédicales:

#### Le 18 Fluoro-déoxy-glucose 18FDG :

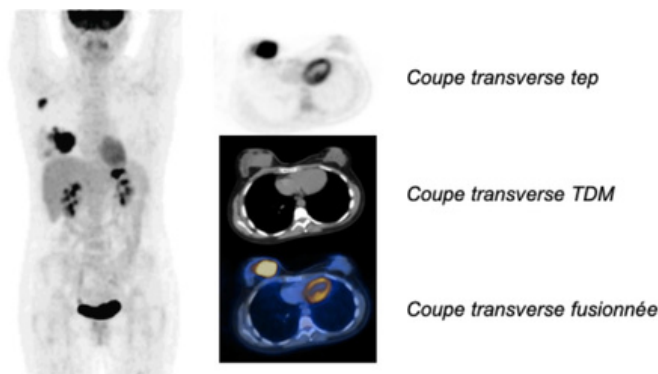
Le Fluor 18 est un atome radioactif en surcharge de protons se désintégrant par  $\beta^+$  en Oxygène 18. Le Fluor 18 ayant une 1/2 vie de 110min, au bout de ce laps de temps la moitié des atomes se seront désintégrés. En le fixant à une molécule de glucose à la place d'un groupement -OH, on obtient du **18FDG**, molécule analogue au glucose et radioactive émettant indirectement des photons  $\gamma$  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 18FDG rentre par le transporteur GLUT comme une molécule de glucose normale et subit la 1ère phosphorylation de la glycolyse le transformant en **18FDG-G6P** ne pouvant pas subir la suite de la glycolyse en raison de l'atome de Fluor. Le 18FDG- 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.

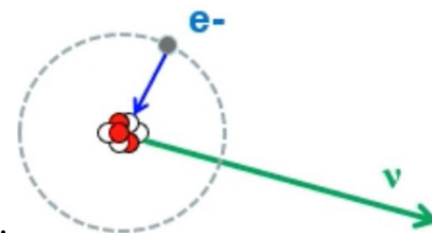


On obtient une image 3D avec des fixations physiologiques au niveau du cerveau, du cœur, du foie et des voies urinaires (élimination). Ce qui nous intéresse ici c'est la masse en hypersignal bien visible en imagerie en coupe, correspondant à un cancer du sein chez cette patiente. Cette technique est très intéressante dans le domaine de la cancérologie.



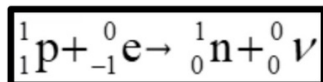
### III) La capture électronique:

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**.

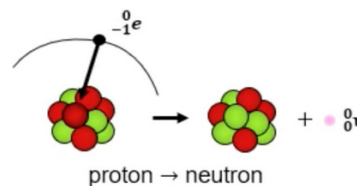
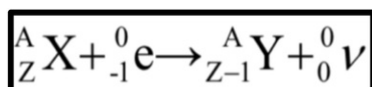


#### A) La réaction de désintégration:

Au niveau du noyau :

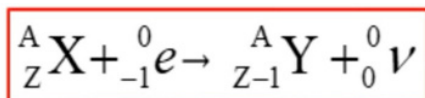


Au niveau du nucléide :



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

#### B) Le bilan énergétique:



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

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

La différence de masse des noyaux au cours d'une capture électronique est égale à la différence entre la masse de l'atome père et la masse de l'atome fils.

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  $> EL$**  +++  
 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 instables en excès de protons afin revenir à la stabilité :

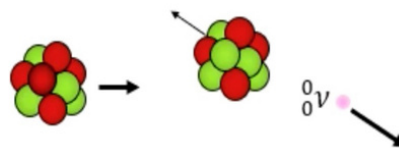
- En dessous du seuil énergétique de 1,022MeV : seule la CE est possible +++
- Au-dessus du seuil énergétique de 1,022MeV : compétition entre CE et  $\beta^+$

### C) Le 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

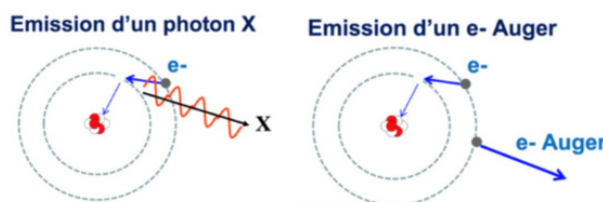
Il n'y a donc **pas de spectre nucléaire direct** +++



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 :

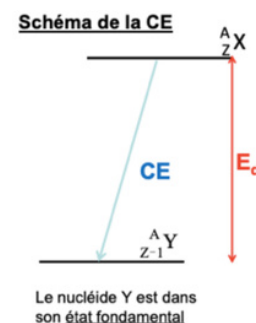
- **Photon de fluorescence X** d'énergie  $E = E_K - E_L$  dans l'exemple ci-contre
- **Électron Auger** d'énergie cinétique  $E = E_K - E_L - E_L$  toujours dans le même exemple



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) Le schéma de désintégration:

Suite à une CE, **X devient Y si l'énergie seuil est atteinte**, avec une *diminution du nombre de protons* et une *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) Le parcours dans la matière:

Le neutrino : **indétectable**, pas d'interaction.

Les photons X: sont **émis indirectement** et 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) Les applications biomédicales:

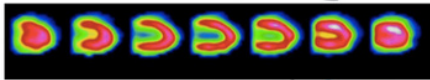
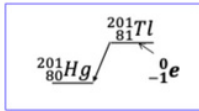
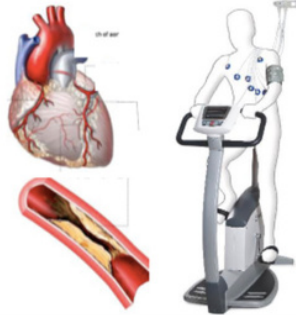
Le Thallium 201, analogue du Potassium  $K^+$ , se désintègre en Mercure 201 via une CE et va se fixer de manière intense au niveau du myocarde en fonction du débit sanguin coronaire (les coronaires sont les artères irriguant le myocarde).

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).

#### Application biomédicale

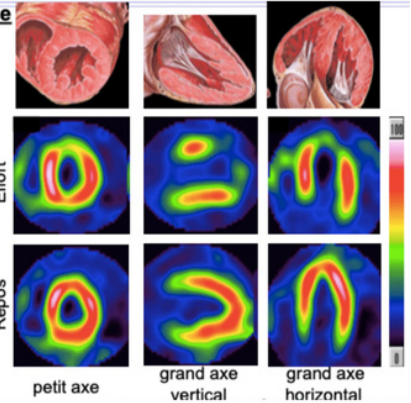
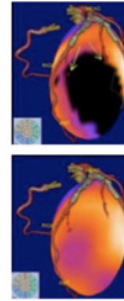
##### ➤ Scintigraphie cardiaque au Thallium-201

- Tl = analogue du K<sup>+</sup> (fixé par les cellules myocardique selon le débit sanguin coronaire)
- Détection des photons de fluorescence du Mercure-201 (scintigraphie cf. plus loin).



#### Application biomédicale

##### ➤ Scintigraphie cardiaque au Thallium-201



THE END !!!

Coucouuu, c'est un cours qui peut paraître compliqué mais je vous jure qu'il est pas si dur que ça, vous allez voir il est vraiment cool! Y a 4 transformations à mémoriser, avec leurs caractéristique et une fois que vous aurez vu le cours 2-3 fois ça sera bon!

Allez voir la version à télé pour les dédis!