



Les transformations isobariques

I - Principe des transformations isobariques



RAPPEL : On symbolise un nucléide en utilisant son symbole chimique (X dans l'exemple), son nombre de masse (A) et son numéro atomique (Z).



DEFINITIONS :

Des **isotopes** sont des nucléides ayant le même nombre de **protons Z** mais des **A différents**. Ils ont la particularité d'avoir les mêmes caractéristiques physico-chimiques et sont donc indiscernables. Seul le nombre de neutrons N varie.



A différencier...

Des **isobares** sont des nucléides ayant le même nombre de **de masse A** mais des **Z différents**. Ici, le nombre de protons et de neutrons va varier.



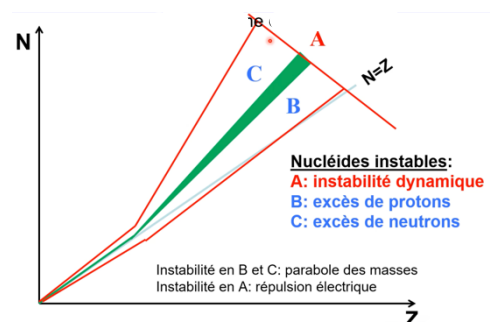
Les transformations isobariques sont particulières puisqu'il n'y a pas de changement du **nombre de masse A** entre le noyau père et le noyau fils. Cependant, Z et N varient. Ce sont alors des **isobares**.

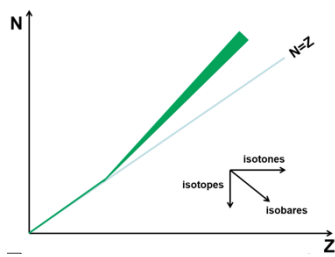
Il existe 3 types de transformations isobariques :

- L'émission (ou désintégration) β^- si excès de **neutrons**
- L'émission (ou désintégration) β^+ si excès de **protons**
- La **capture électronique** si excès de **protons**

Les noyaux **RADIOACTIFS** se répartissent dans 3 grandes zones, leur but étant de descendre dans la **vallée de la stabilité** :

- **A** : Les noyaux présentent un trop grand nombre de nucléons, se crée une **instabilité dynamique** par répulsion des protons entre eux ne pouvant plus être compensée par les neutrons (concerne majoritairement la radioactivité α)
- **B** : excès de **protons**
- **C** : excès de **neutrons**





Sur ce diagramme de Segré on peut représenter et positionner l'ensemble des nucléides. Les 250 noyaux **STABLES** sur les 2000 connus sont localisés dans des régions particulières de ce graphique :

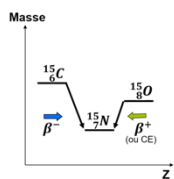
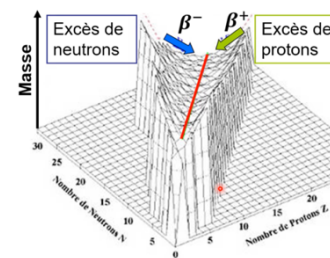
- Les éléments **légers** situés sur la **première bissectrice** sont stables si **N=Z**.

• Les éléments plus **lourds** sont sur la **deuxième bissectrice**, qui s'éloigne progressivement de la première car pour que ces éléments soient stables il est nécessaire qu'ils aient **plus de neutrons** que de protons (afin de compenser la charge positive répulsive entre les protons).

Le prof répète la même chose sur la vallée de la stabilité que dans la fiche sur l'introduction à la radioactivité (s'y référer si besoin). Je vous laisse le plus important :

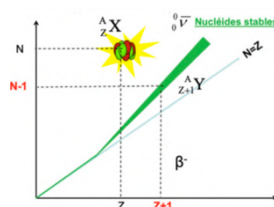
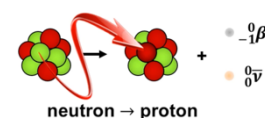
Au final, on a TOUJOURS une évolution vers :

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



Exemple : Ici, il y a trois isobares. Le $^{15}_6\text{C}$ radioactif subit une transformation β^- libérant une énergie exogène. Le noyau fils $^{15}_7\text{N}$ est alors stable et plus léger que son isobare instable. Le même phénomène se produit pour $^{15}_8\text{O}$ mais avec une transformation β^+ ou une capture électronique.

II - La transformation β^-

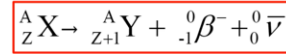
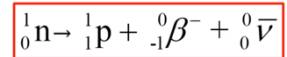


Les transformations β^- se produisent lorsque le noyau père radioactif est en excès de neutrons (zone C). Alors le noyau va perdre un **neutron** qui va se transformer en un **proton**. A ne varie pas, ce qui confirme la configuration d'une transformation isobarique. Le noyau fils Y descend sur la ligne de stabilité.

A – La réaction de désintégration

Au niveau de l'écriture de la désintégration :

- Pour le noyau, un **neutron se transforme en un proton** en émettant une **particule β^-** qui correspond à un électron qui ne préexiste pas dans le noyau et qui naît de la transformation, il peut s'écrire ${}^0_{-1}\beta^-$, β^- ou e^- et un **antineutrino $\bar{\nu}$** . Ici, on peut observer le respect de la loi de conservation de masse ($1=1+0+0$) et de la charge électrique élémentaire ($0=1-1+0$).
- Pour le nucléide, il y a un changement d'élément chimique.



Remarque sur l'**antineutrino** :

Il s'agit d'un postulat émis tardivement afin d'expliquer le spectre énergétique de la transformation β^- . Peu d'informations sont connues sur cette particule puisqu'elle est très difficile à détecter. Ce que l'on sait est qu'il a une **charge nulle** et une **masse négligeable**. Il est alors extrêmement **pénétrant sans être ionisant** (seul 1 antineutrino sur 10 milliards traversants la Terre sera arrêté, sa probabilité d'interaction est de 10^{-10}). Cette antiparticule est extrêmement abondante. Elle n'est pas un rayonnement électromagnétique.

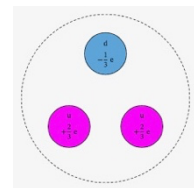
Concernant la transformation au sein du noyau du **neutron en proton** :

Elle est possible puisque les neutrons comme les protons ne sont **pas des particules élémentaires** de la matière car ils sont eux-mêmes composés de **trois** particules plus petites appelées **Quarks**. Il en existe deux types en fonction de leur position énergétique :

- « **up** » avec une charge égale à $+\frac{2}{3}$
- « **down** » avec une charge égale à $-\frac{1}{3}$



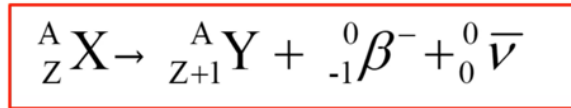
Les **neutrons** sont composés de deux quarks de valence « **down** » et d'un quark « **up** » (d'où leur charge nulle : $+\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$). A l'inverse les **protons** possèdent un seul quark « **down** » et deux quarks « **up** » (d'où leur caractère chargé : $+\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = \frac{3}{3} = 1$). La transformation d'un neutron en proton correspond alors à la **modification d'un quark** : d'une position « **down** » à une position « **up** ».



*Ce n'est pas une image du prof,
c'est simplement pour votre
compréhension*

B – Le bilan énergétique

Il va y avoir une **perte de masse** au cours de la transformation : la masse du noyau père est supérieure à la masse du noyau fils et des particules émises additionnées. Cette différence de masse est **convertie en énergie** (par la loi d'équivalence masse-énergie). Afin de connaître l'énergie libérée par la transformation, voici la perte de masse entre les éléments initiaux et finaux :



Ici, le principe est le même que pour le bilan énergétique de la radioactivité α (avec les particules spécifiques de la transformation β^- bien sûr). Je vous invite à aller voir l'autre fiche si vous voulez plus d'explications.

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

noyau père noyau fils β^-

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

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

Après simplification, on se rend compte que la **différence de masse des noyaux** est égale à la masse de l'atome père moins la masse de l'atome fils ++.

L'énergie délivrée par cette transformation radioactive (formule de Einstein) :

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

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

Attention aux unités utilisées!!

Pour simplifier, on modifie les unités (cette formule ++):

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

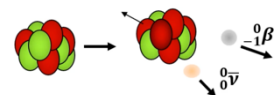
$$\mathcal{M} \text{ en u (unité de masse atomique)}$$

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

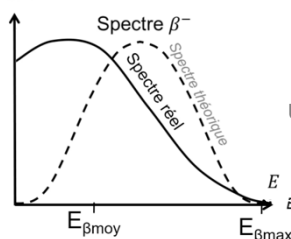
C – Spectre énergétique

L'énergie de la transformation (E_d) est constante et est libérée **exclusivement** sous forme **d'énergie cinétique** qui se partage entre le noyau fils (E_c de recul, négligeable en pratique au vu de sa masse importante) et la particule β^- et l'antineutrino.

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



Nombre d'é émis par intervalle d'énergie = dn/dE



$$E_{\beta_{\max}} = E_d$$

$$E_{\beta_{\text{moy}}} \approx \frac{E_{\beta_{\max}}}{3}$$

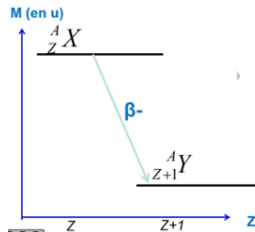
Une formule donnée en plus par le prof à l'aide du graphique

Voici le **spectre électronique** de la particule β^- . En abscisse se trouve l'énergie des β^- et en ordonnée le nombre d'électrons émis par intervalle d'énergie. On peut voir en abscisse que son **énergie** peut aller de **0** (situation où toute l'énergie est prise par l'antineutrino l' E_c de $\beta^- = 0$) au **maximum de l'énergie** de la transformation radioactive (l' $E_{c \max}$ de $\beta^- = E_c$ totale de la transformation).

Il existe un **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.

Ainsi qu'un **spectre réel** : Il est décalé vers la gauche en raison des **forces électriques coulombiennes** entre la particule β^- et les protons du noyau (possédant une charge positive) qui s'attirent. Ces forces s'opposent à l'émission de particules β^- de faible énergie.

D – Schéma de désintégration



A propos du **schéma de désintégration β^-** :

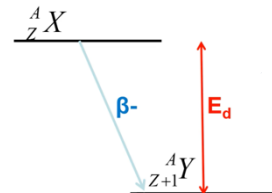
Il s'agit d'une représentation graphique regroupant les **principales caractéristiques** d'une désintégration radioactive, il est important de savoir le lire :

- 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**.

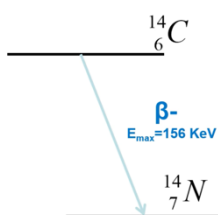
Ici, on voit la désintégration plus en détail : Le noyau père se transforme par désintégration β^- en noyau fils. Des flèches sont utilisées pour indiquer les **transitions autorisées** du père et des états possibles du fils.

Dans ce cas, la flèche est orientée vers le bas car il y a une **perte de masse** et vers la droite car il y a 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, dans le cas de la désintégration β^- , à **l'énergie délivrée** lors de la transformation (proportionnelle à la différence de masse). Ici, le nucléide Y est dans un état fondamental, on qualifie alors cette transformation β^- de « **pure** ».



Exemple : Le Carbone-14 se transforme en Azote-14 par transformation β^- . Quelle est l'énergie maximale de la particule β^- ? Sachant que $M(14,6)=14,003241\text{ u}$ et $M(14,7)=14,003073\text{ u}$.

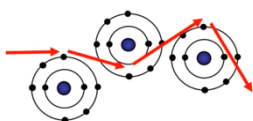
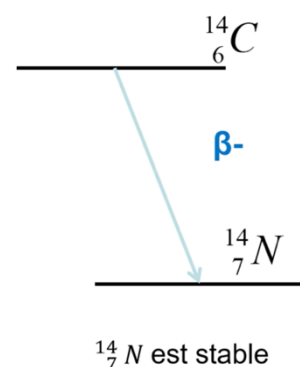


$$E_d = [M(14,6) - M(14,7)] \times c^2$$

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

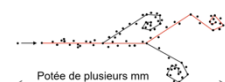
$$E_d = [14,003241 - 14,003073] \times 931,5$$

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



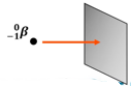
E – Parcours dans la matière

Le β^- est un électron et donc une particule **chargée négativement**. Dans la matière, il aura un parcours qualifié de « chaotique » puisqu'il va provoquer de nombreuses

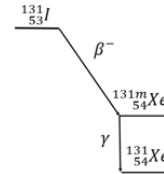


ionisations **par interaction avec des électrons** du milieu traversé : sa trajectoire sera déviée et donc **non rectiligne**.

Sa profondeur de pénétration est de **plusieurs mm** dans les tissus. Les β^- sont arrêtés par une **fine feuille de métal**.



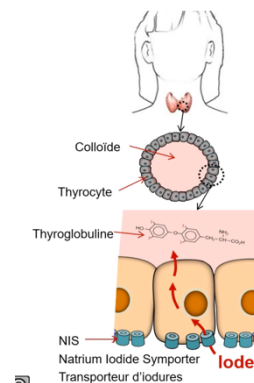
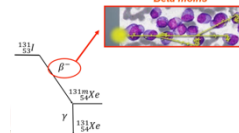
F – Applications biomédicales



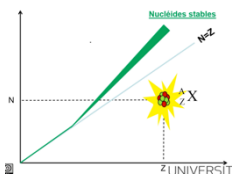
Les transformations β^- sont utilisées en radiothérapie :

L'**Iode-131** est un isotope **radioactif** de l'Iode stable $^{127}_{53}\text{I}$ et un **émetteur β^-** (avec une énergie maximale possible de la particule de 606 keV). Après la désintégration β^- , il se transforme en Xénon-131 métastable (notion qu'on verra plus tard, pour faire simple il est instable et se transforme grâce à une transformation isomérique avec une émission gamma dans ce cas-là) puis stable. L'Iode-131 peut se trouver à l'état naturel dans l'écorce terrestre ou être produit dans les réacteurs nucléaires lors de la fission des atome lourds. 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**.

Explication supplémentaire : 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 la colloïde. En temps normal, l'iode capté est stable. Après injection d'iode 131 instable capté par la thyroïde, les émissions β^- vont provoquer des ionisations (lésions de l'ADN des thyrocytes) avec **destruction des cellules thyroïdiennes**, qu'elles soient saines ou cancéreuses.

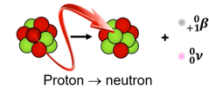


III - La transformation β^+



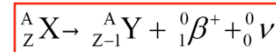
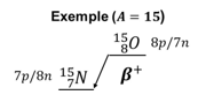
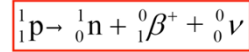
Les transformations β^+ se produisent lorsque le noyau père est en excès de protons (zone B). Alors le noyau va perdre un **proton** qui va se transformer en un **neutron**. A ne varie pas.

A – La réaction de désintégration



Au niveau de l'écriture de la désintégration :

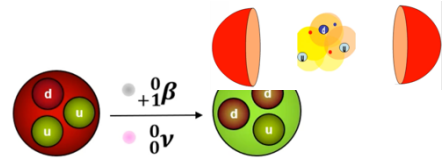
- Pour le noyau, un **proton se transforme en un neutron** en émettant une **particule β^+** (aussi appelée positon, elle correspond à un électron avec une charge positive qui ne préexiste pas dans le noyau et qui nait de la transformation, il peut s'écrire ${}^0_1\beta^-$, β^+ ou e^+) et un **neutrino ν** (possédant les mêmes caractéristiques que l'antineutrino).
- Pour le nucléide, il y a un changement d'élément chimique.



Concernant la transformation au sein du noyau du **proton en neutron** :

RAPPEL :

- « **up** » avec une charge égale à $+2/3$
- « **down** » avec une charge égale à $-1/3$



Les **neutrons** sont composés de deux quarks de valence « **down** » et d'un quark « **up** » (d'où leur charge nulle : $+2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$). A l'inverse les **protons** possèdent un quark « **down** » et deux quarks « **up** » (d'où leur caractère chargé : $+2/3 + 2/3 - 1/3 = 3/3 = 1$). La transformation d'un neutron en proton correspond alors à **la modification d'un quark** : d'une position « **up** » à une position « **down** ».

B – Bilan énergétique

Toujours la même chose adaptée à une transformation β^+ , on commence par calculer la perte de masse:

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

Après simplification, on se rend compte que la **différence de masse des noyaux** est égale à la masse de l'atome père moins la masse de l'atome fil moins la masse de deux électrons ++.

Pour l'énergie disponible :

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

L'énergie rendue disponible n'est **pas directement proportionnelle** à la différence de masse entre les deux isobares puisque **deux électrons** sont pris en compte.

Afin que la désintégration β^+ 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 $2m_e \times c^2 = 1,022 \text{ MeV}$

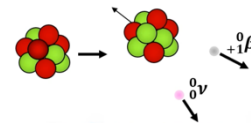
On peut alors conclure que pour que la transformation ait lieu il est nécessaire que l'équivalent en énergie de la **différence de masse des atomes père et fils** soit **au moins égal à 1,022 MeV**. Elle ne peut donc pas se faire pour tous les atomes radioactifs, puisqu'il y a la **condition de ce seuil énergétique**.

Ici aussi on utilise la formule simplifiée pour calculer l'énergie délivrée, cette formule s'écrit :

$$E_d = \Delta M \cdot 931,5 - 2 \cdot m_e \cdot 931,5$$

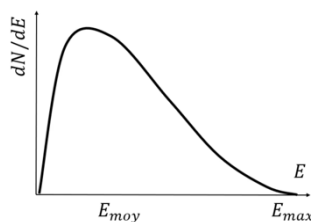
Avec ΔM en u et E_d en MeV, la masse de l'électron sera donnée. Un exemple se situe en bas au niveau du schéma de désintégration.

C – Le spectre énergétique



Pour toute désintégration β^+ , l'énergie de désintégration est constante.

L'énergie délivrée est répartie entre l'énergie cinétique du neutrino, celle de la particule β^+ et l'énergie cinétique de recul du noyau fils. Cette dernière étant considérée comme nulle du fait de sa masse, **l'énergie se partage alors ALEATOIREMENT entre le β^+ et le neutrino**. Seul le β^+ est détectable, le spectre est alors un **spectre continu**.

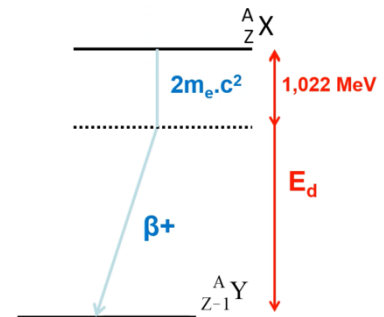


Voici le **spectre électronique** de la particule β^+ . Le spectre énergétique va de **0** (le neutrino emporte toute l'énergie) à **E_{max}** (la particule β^+ emporte toute l'énergie).

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).

D – Schéma de désintégration

Pour le schéma de la désintégration β^+ , on peut observer le **noyau père** X à Z protons et le **noyau fils** Y à $Z-1$ protons (rappel : un proton se transforme en un neutron). Il y a donc le **gain d'un neutron** d'où le décalage vers la **gauche** de la ligne horizontale qui représente les niveaux énergétiques disponibles. Le fils est situé sur un **niveau d'énergie** nettement **inférieur** à celle du père puisqu'il y a 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 β^+ (ce seuil agit comme une « taxe en énergie » que doit fournir le père afin de se transformer en noyau fils stable, donc dans un état fondamental).



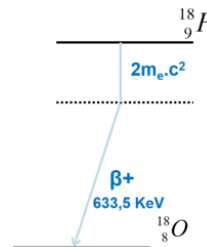
Exemple : Le Fluor-18 se transforme en Oxygène-18 par une transformation isobarique β^+ . Quelle est l'énergie maximale de la particule β^+ ? Sachant que $M(18,9)=18,0009380\text{ u}$ et $M(18,8)=17,9991610\text{ u}$ et $m_e = 5,486 \cdot 10^{-4}\text{ u}$.

$$E_d = [M(18,9) - M(18,8)] \times c^2 - 2m_e \times c^2$$

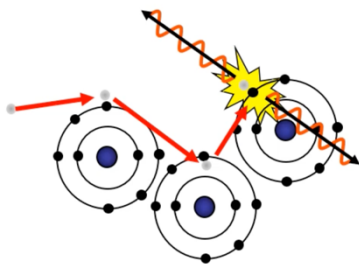
$$E_d = [18,000938 - 17,9991607] \times 931,5 - 2 \times 5,486 \cdot 10^{-4} \times 931,5$$

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

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



E – Parcours dans la matière



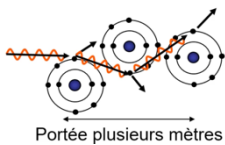
Le **positon** est un électron avec une charge positive, il va donc avoir une **interaction avec les électrons** du milieu environnant. Il va avoir un parcours très **sinueux** de **quelques millimètres** en perdant progressivement son énergie cinétique au cours de ses collisions et va finir par s'arrêter. Attention, 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 associant un e^- et

un β^+ est la **conversion de l'énergie** sous forme de **masse** des deux électrons en une énergie **lumineuse** avec l'émission de **deux photons γ** en coïncidence c'est-à-dire dans des **directions opposées** (à 180° l'un de l'autre).

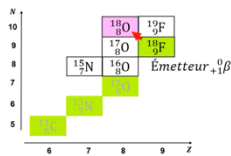
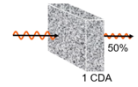
Ici, intervient la loi d'équivalence masse-énergie :

La masse de l'électron est égale à $0,0005486\text{ u}$. Chaque photon γ a une énergie $E = h \cdot \nu = 0,0005486 \cdot 931,5 = 0,511\text{ MeV} = 511\text{ keV}$ par photon γ .

Le **neutrino** possède les mêmes caractéristiques que l'antineutrino sans charge ni masse. Il n'a quasiment pas d'interactions et est **indétectable**.



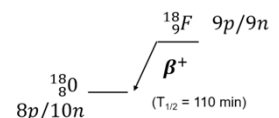
Les photons γ émis suite à la réaction d'annihilation sont d'origine **indirectement nucléaire**. Il a des interactions non obligatoires avec la matière par des effets photo-électrique et Compton. Ils sont atténués par une couche importante de plomb ou de béton (pour les électrons il faut seulement une fine feuille de plomb).



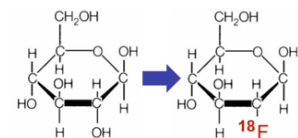
F – Application biomédicale

Il existe une application en cancérologie :

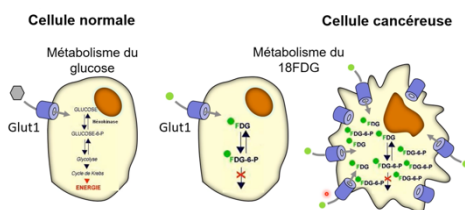
Le **¹⁸Fluoro-déoxy-glucose** (¹⁸FDG) est composé de **Fluor-18** (composé radioactif en surcharge de protons qui va se transformer par une émission β^+ en oxygène-18) et de glucose. Le Fluor-18 a une **demi-vie** égale à 110 min, c'est-à-dire qu'au bout de ce temps, la moitié des atomes de Fluor-18 d'un échantillon se sera transformé. ++++



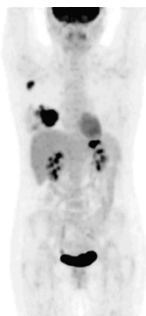
Le Fluor, radioactif, va pouvoir être greffé par une liaison covalente à une molécule de glucose (on enlève alors un groupe hydroxyle de la molécule de glucose standard que l'on va remplacer par un Fluor-18). Cette opération va nous permettre d'obtenir une molécule analogue du glucose, le **¹⁸Fluoro-déoxy-glucose** (¹⁸FDG), qui va avoir comme particularité d'être **radioactif** et donc émetteur de **positons** et donc de manière indirecte de **photons** qui pourront être détectés.



Le glucose → Le ¹⁸FDG



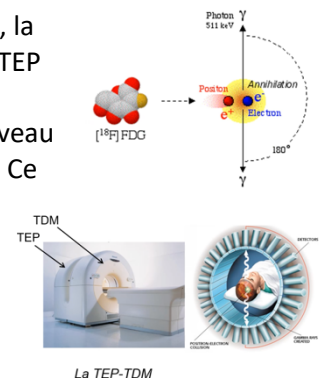
En raison de leur prolifération accrue, les **cellules tumorales** hyper consomment du glucose : c'est **l'effet Warburg**. Dans ces cellules, le 18-FDG rentre par le transporteur GLUT comme une molécule de glucose normale et subit la 1ère phosphorylation de la glycolyse le transformant en FDG-G6P ne 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 β^+** , il y a **émission secondaire de photons γ** .



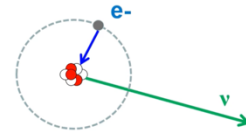
Ces photons sont ensuite détectés par une technique d'imagerie, la **tomographie par émission de positons** couplée à un scanner : le TEP scan.

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

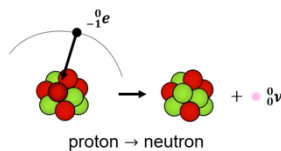
Cette technique est très intéressante dans le domaine de la cancérologie.



IV - La capture électronique



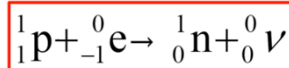
La capture électronique est relativement proche de la transformation β^+ puisqu'elle aussi se produit lorsque le noyau père est en excès de protons (zone B) au vu de l'excès de charge positive, un proton va se transformer en neutron. Cela consiste en la **capture d'un électron** d'une couche électronique profonde (souvent la couche K) par le noyau. Cet **électron se combine à un proton** pour donner un **neutron**. Cette transformation est bien une transformation isobarique puisque A ne varie pas. Une seule particule est émise : le **neutrino** (charge nulle et masse considérée comme négligeable).



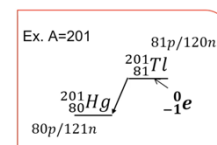
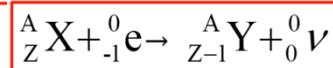
A – La réaction de désintégration

Au niveau de l'écriture de la désintégration :

Au niveau du noyau :



Au niveau du nucléide :



Il s'agit d'un mode de désintégration très **discret** puisque la seule particule émise emportant l'énergie de la transformation est le **neutrino** qui, je le rappelle, est *indétectable*.

B – Le bilan énergétique

Encore une fois, le système est le même ici :

Après simplification, on se rend compte que la **différence de masse des noyaux** est égale à la masse de l'atome père moins la masse de l'atome fil + m_e .

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

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

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

Pour l'énergie délivrée par la transformation (formule de Einstein) :

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

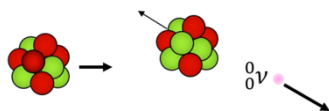
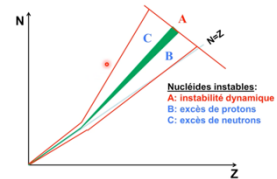
Energie de liaison de l'e- capturé

Ici la **différence avec la formule β^+** ++. 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 $\Delta M > E_l$). Cette énergie doit être soustraite à la formule (pour permettre la transformation, de l'énergie doit être mise en

amont afin de casser les liaisons de l'électron mais cette énergie seuil est extrêmement faible) ! *Non-dit mais l' E_L ici est celle de l'atome père.*

Au final, pour les noyaux INSTABLES dans la zone B (en excès de protons), il y a deux possibilités pour redevenir stable grâce aux deux transformations isobariques possibles (β^+ et CE) :

- **Au dessous de $\Delta M = 1,022 \text{ MeV}$** , seule la **capture électronique** est possible
- **Au dessus de $\Delta M = 1,022 \text{ MeV}$** , il y a une **concurrence** entre les deux types de transformations



C – Le spectre en énergie

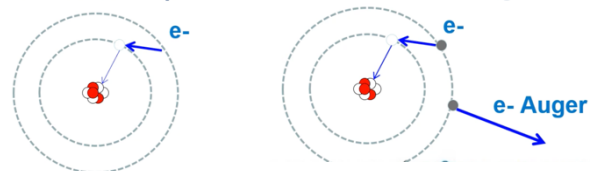
L'énergie délivrée est répartie entre l'énergie cinétique du neutrino et l'énergie cinétique de recul du noyau fils. Cette dernière étant considérée comme nulle du fait de sa masse, **toute l'énergie est emportée par le neutrino**. Étant donné que ce dernier n'est pas détectable, il n'y a donc **pas de spectre direct de la capture électronique**.

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

Explication : Après la capture, 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

Emission d'un photon X Emission d'un e- Auger

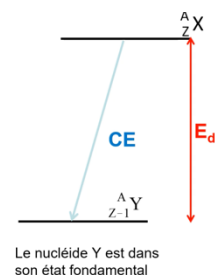


Pour le calcul de ces énergies libérées, il faut utiliser les énergies de liaison de **l'atome fils. ++**

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.

D – Schéma de désintégration

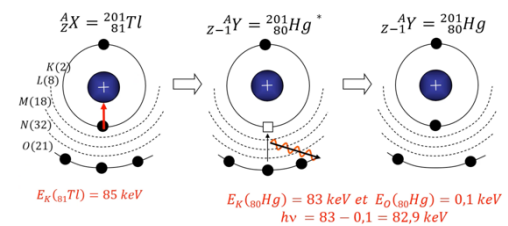
Suite à une CE, X devient Y si **l'énergie seuil est atteinte**, avec une diminution de nombre de protons et libération d'énergie emportée par le neutrino uniquement. Le seuil correspondant à l'énergie de liaison de l'électron capturé n'est pas schématisé car faible (de l'ordre de l'eV) comparée à **l'énergie délivrée** mais n'est **PAS NÉGLIGEABLE**.



Exemple : Le Thallium 201

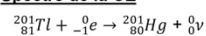
Le Thallium 201 se désintègre par CE en Mercure 201. Ici, l'énergie délivrée est $< 1,022\text{MeV}$ donc la transformation β^+ est impossible.

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.

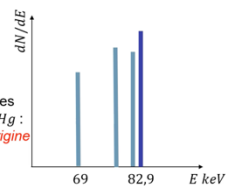


Ici, un électron de la couche O vient combler la case vacante laissée par l'électron capturé au niveau de la couche K. Le photon de fluorescence libéré suite à la désexcitation a donc une énergie $E = E_K - E_O$ (on prend bien les énergies de liaison du MERCURE, le prof insiste +++ là-dessus).

Spectre de la CE



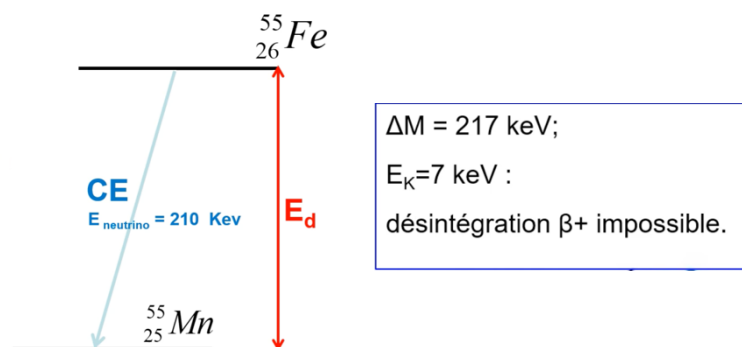
Le seul spectre détectable est celui des réarrangements électroniques de ${}^{201}_{80}\text{Hg}$:
Spectre électromagnétique de raies d'origine atomique.



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.

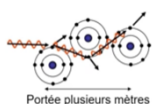
keV	E_K	E_L	E_M	E_N	E_O
${}^{81}\text{Tl}$	85	14	2	0,4	0,1
${}^{80}\text{Hg}$	83	14	2,5	0,5	0,1
E du photon X (hν)		69	80,5	82,5	82,9

Autre exemple :

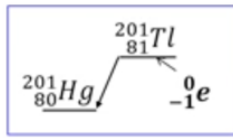


E – Parcours dans la matière

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



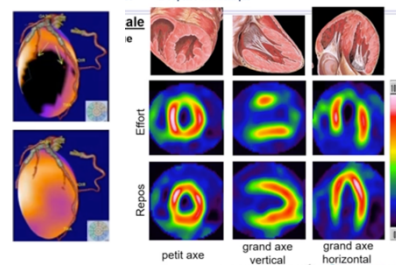
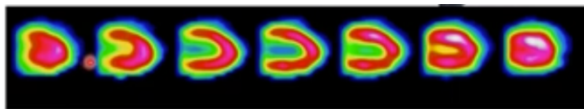
Les **photons** émis indirectement vont interagir via **effets photo-électrique et effet Compton** sur une portée de plusieurs mètres en raison de leurs interactions non obligatoires. Les photons sont atténués par du **plomb ou du béton**.



F – Applications biomédicales



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 coronaires étant les artères irriguant le myocarde, donc les muscles du cœur). Les zones les plus perfusées sont marquées par une émission indirecte de **photons de fluorescence du Mercure** (qui ont initialement captées le Thallium) et donc de déduire celles qui le sont le moins, traduisant une ischémie myocardique (une ischémie étant une souffrance tissulaire due à un manque d'oxygène). Ici, ce sont les réarrangements électroniques du Mercure qui sont captés.



Courage à tous ne baissez pas les bras vous êtes les meilleurs