

Biophysique

Intitulé du cours : Les transformations isobariques

*Rédacteurs : Tristan Baillon (Tristampax)
et Lucile Marchal (Feneex)*

Ronéo n° : 7



Corporation des Carabins Niçois

UFR Médecine

28, av. de Valombrose

06107 Nice Cedex 2

<http://carabinsnicois.fr/>

roneo.c2n@gmail.com

Partenaires



MACSF

Coucou tout le monde ! C'est le retour de Tristampax pour une nouvelle ronéo de Biophysique !! Le 07/10, le Pr. Humbert a fait 2h de QCM sur les transformations isobariques que nous n'avons pas le droit de ronéiser, mais à la demande du professeur je vais ronéiser le cours disponible sur Moodle sous forme de vidéo qu'il a réalisé lui-même. C'est mon avant dernière ronéo, n'hésitez pas à m'envoyer vos remarques, les dernières que j'ai reçues m'ont fait super plaisir ! <3 Vous pourrez aussi remercier Lucile (Feneex sur le fofo) votre gentille tutrice de SSH, qui a bien voulu m'aider à faire cette ronéo que j'ai dû rendre avant le WEI. Bonne lecture à tous !

Biophysique des radiations ionisantes : plan

1. Particules, ondes et atome
2. Interactions des rayonnements avec la matière
3. Rayons X
4. Radioactivité
 1. Le noyau atomique ou nucléide
 2. Les transformations radioactives
 - 2.1 - Généralités
 - 2.2 - Radioactivité α
 - 2.3 - Transformations isobariques
 - 2.4 - Transformations isomériques
 3. Notion de famille radioactive
 4. Lois cinétiques
5. Éléments de radiobiologie et de radioprotection

Les transformations isobariques

Après la radioactivité alpha, nous allons maintenant aborder les transformations isobariques.

Notions principales à maîtriser à l'issue du cours

- Principe des transformations isobariques
 - Transformation β^-
 - Transformation β^+
 - Transformation par capture électronique
- Réaction de désintégration
 - Bilan énergétique
 - Spectre et schéma
 - Parcours dans la matière
 - Applications biomédicales

Il s'agira de comprendre le principe des transformations isobariques et d'en connaître les 3 principales catégories à savoir les transformations β^- , β^+ et par capture électronique.

Introduction :

1. Rappels :



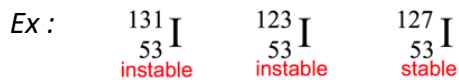
X : symbole chimique du nucléide

A : nombre de masse du nucléide (nombre de nucléons de son noyau)

Z : numéro atomique du nucléide (nombre de protons de son noyau)

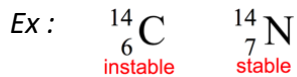
2. Définitions :

- ♦ **Isotopes :** deux nucléides avec le même Z, mais des A différents. Les isotopes sont indiscernables chimiquement. Ils diffèrent uniquement par leur nombre de neutrons.



Ici l'Iode a toujours le même nombre de protons (sinon ce serait un autre symbole chimique). Ces isotopes n'ont cependant pas le même nombre de neutrons (et donc pas le même nombre de nucléons A).

- ♦ **Isobares :** deux nucléides avec le même nombre de masse A, mais des Z différents.



Ici le Carbone 14 et l'Azote 14 le même nombre de nucléons A mais un nombre de protons différent (et donc un nombre de neutrons différent).

3. Écriture d'une transformation radioactive :



X: noyau « père », radioactif

Y: noyau « fils », radioactif ou stable

Particules: n, e-, e+, ou α (${}^4\text{He}_2$)

Photon: inconstant

On a la désintégration d'un noyau X, le noyau père, qui est radioactif. Cela va conduire à la formation d'un nouveau noyau Y, le noyau fils, ainsi qu'à l'expulsion d'une particule et éventuellement d'un photon (qui est un rayonnement électromagnétique).

-Les transformations radioactives ne décrivent que la transformation du **noyau** de l'atome (processus nucléaire). Elles ne concernent que les **noyaux pères instables** (avec un excès d'énergie), en leur permettant de se débarrasser de leur excédant d'énergie.

-Le noyau père va avoir un changement de **nature** (type de nucléide) ou du **niveau d'énergie** de l'atome.

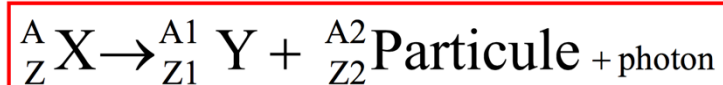
-Pour un même noyau, on aura une constante importante : il s'agit de λ , la probabilité que le noyau se transforme à un instant t précis. Cette probabilité est **invariable** dans le temps : elle est indépendante des transformations ayant eu lieu précédemment ainsi que des conditions physico-chimiques de l'environnement et de l'âge de l'atome.

Une transformation radioactive est donc un **phénomène probabiliste** (la probabilité pour qu'un noyau se transforme pendant un temps dt dépend de λ = constante radioactive).

-La radioactivité peut être **naturelle ou artificielle**.

4. Lois de conservation des transformations radioactives :

Les transformations radioactives répondent à des lois de conservation qui sont au nombre de quatre :



-**Conservation du nombre de nucléons : A = A1 + A2**

Le nombre initial de nucléons du noyau père (A) va être égal au nombre final de nucléons qui se répartit entre le nombre de nucléons du noyau fils (A1) et le nombre de nucléons de la particule émise (A2).

-Conservation de la charge.

Le nombre de charge du noyau père (Z) va être égal au nombre de charge du noyau fils (Z_1) plus au nombre de charge de la particule émise (Z_2).

-Conservation de l'énergie (totale).

L'énergie totale du système (sous toutes ses formes) se conserve au cours de la transformation. Il faut donc ajouter l'énergie cinétique, l'énergie potentielle, l'énergie rayonnante...

-Conservation de la quantité de mouvement.

L'impulsion donnée au système avant et après la transformation radioactive est conservée.

Attention : C'est le nombre de masse (= A = nombre de nucléons) qui se conserve.

La masse totale ne se conserve pas. La masse du noyau père n'est pas égale à la masse des éléments finaux (voir suite du cours).

5. Les transformations isobariques :

Les transformations isobariques se produisent sans changement du nombre de masse A du noyau père (mais Z et N changent).

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

- Émission β^- (désintégration β^-)
- Émission β^+ (désintégration β^+)
- Capture électronique (CE)

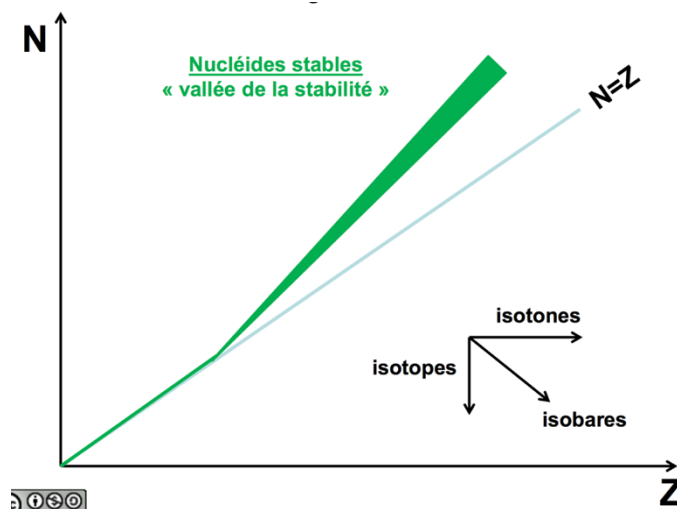
Une transformation isobarique correspond à une « descente du noyau dans la vallée de la stabilité ». Le noyau radioactif va devenir plus stable.

Pour illustrer cette notion de vallée, on va utiliser un graphique sur lequel on pourra positionner l'ensemble des nucléides.

Ce diagramme (dit de Segré) représente le nombre de **neutrons N (en ordonnée)** en fonction du nombre de **protons Z (en abscisse)**.

On connaît à peu près 2000 noyaux, parmi lesquels environ **250 sont stables**.

Ces noyaux stables vont être localisés dans des régions très particulières sur ce graphique.



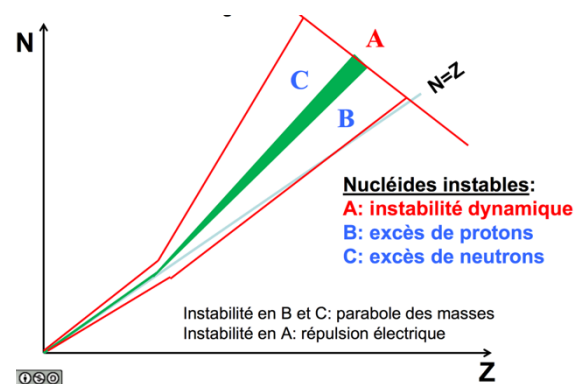
Les noyaux stables se positionnent sur deux droites différentes.

-**Pour les éléments légers**, les noyaux sont stables s'ils ont le même nombre de neutrons que de protons (**N=Z**).

Les noyaux légers stables sont positionnées sur la première bissectrice avec $N=Z$.

-**Pour les éléments plus lourds**, la stabilité du noyau est assurée si le nombre de **neutrons** est légèrement **supérieur** au nombre de **protons**. Les noyaux lourds stables sont positionnés sur une droite s'éloignant progressivement de la première bissectrice.

Ceci s'explique par le fait que les protons ont des charges (électriques positives) répulsives entre elles. Pour compenser cette répulsion entre les protons, il faut mettre un peu plus d'interactions nucléaires en augmentant légèrement le nombre de neutrons.



Les noyaux radioactifs (instables) vont se répartir dans trois zones.

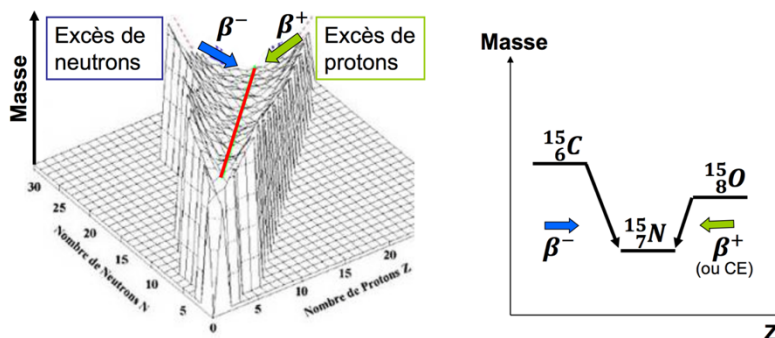
-La **zone A** correspond à la zone d'instabilité dynamique des noyaux radioactifs trop gros/lourds. On y retrouve des noyaux ayant un **trop grand nombre de nucléons**. Il y a une instabilité par répulsion des protons entre eux qui ne peut pas être compensée par les neutrons.

-La **zone B** correspond aux noyaux radioactifs par excès de **protons**.

-La **zone C** correspond aux noyaux radioactifs par excès de **neutrons**.

On va à présent reprendre ce même diagramme dans sa représentation 3D en introduisant une troisième dimension correspondant à la masse de manière à comprendre son évolution au cours des transformations radioactives.

« descente vers la vallée de la stabilité »



➤ Évolution vers une masse minimale (à A constant)

- E_L maximale & stabilité maximale du noyau;
- Libération d'énergie: E_C de la particule β .

Les nucléides stables ont comme particularité d'avoir une masse inférieure à leurs isobares instables. Dans cette représentation ils se situent au fond d'une vallée (la fameuse vallée de la stabilité), tandis que les noyaux radioactifs sont plus en hauteur.

Dans l'exemple de droite, on a 3 isobares (Carbone 15, Azote 15 et Oxygène 15).

-Le Carbone 15 est radioactif, il devra subir une transformation β^- pour donner l'Azote 15.

Au cours de cette transformation, il va libérer de l'énergie et on aura un retour à la stabilité du noyau ainsi qu'une baisse de la masse du noyau.

Donc l'Azote 15 a une masse inférieure à celle du Carbone 15.

-L'Oxygène 15 est également radioactif et va pouvoir se transformer en Azote 15 par transformation β^+ (ou CE) avec une libération d'énergie mais une augmentation de stabilité du noyau dont la masse va diminuer.

Donc le Carbone 15 et l'Oxygène 15, situés en haut de la vallée, vont avoir tendance à descendre vers le fond de la vallée en se transformant en Azote 15 (nucléide moins lourd et plus stable).

I. Transformation β^-

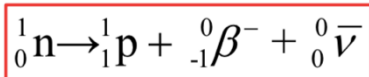
Les transformations β^- interviennent quand il existe un **excès de neutrons** dans le noyau. Le noyau père est radioactif il va subir une transformation pour rejoindre la **vallée de la stabilité** en perdant un neutron et en **gagnant un proton**.

Le nombre de masse **A reste identique** : c'est bien une **transformation isobarique** !

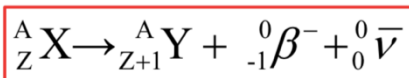
Lors de cette transformation, on a émission d'une **particule β^-** et d'un **antineutrino $\bar{\nu}$** .

1. Réaction de désintégration β^- :

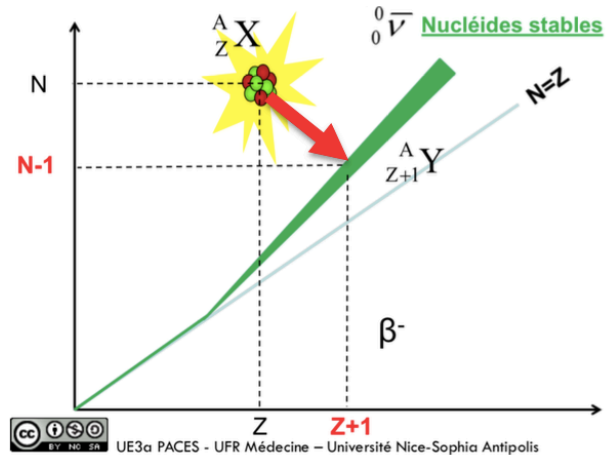
Réaction dans le noyau:



Ce qui donne au niveau du nucléide:



$${}_{-1}^0\beta^- = \beta^- = e^- = \text{électron}$$



Remarque : On a bien le **respect de la loi de conservation de masse A et du nombre de charge Z**.

◆ Particules émises :

- Une **particule β^-** , c'est un électron **d'origine nucléaire** et non du cortège électronique.
- L'**antineutrino $\bar{\nu}$** a une charge nulle est une masse quasi nulle (négligeable).

Qu'est-ce que l'antineutrino ?

On connaît très peu de choses sur cette particule car elle est très **difficile à mesurer**. Son existence a été proposée pour expliquer le spectre continu de la réaction β^- . Au départ il fut décrit de manière théorique, sous forme d'un **postulat**. L'antineutrino et le neutrino sont les particules les plus présente dans l'univers, elles nous traversent constamment mais on ne les sent pas car elles **interagissent peu** (sur 10 milliards de neutrino traversant la terre, 1 seul interagira avec elle).

Propriétés de l'antineutrino :

- **Charge nulle**
- **Masse très faible** (<électron) et **négligeable**
- **Très pénétrant**, non ionisant, peu d'interaction dans la matière
- Ce n'est pas un rayonnement électromagnétique

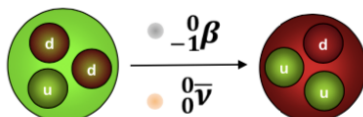
◆ Transformation du neutron en proton :

Cette transformation β^- est possible car les nucléons ne sont pas des particules élémentaires de la matière : **chaque nucléons est composé de trois quarks**.

Les **protons** sont composés de 2 quarks up et un quarks down

Les **neutrons** sont composés de 2 quarks down et un quarks up

La **transformation d'un neutron en proton** c'est la modification d'un quarks qui va **passer d'une position down à une position up**.



2. Bilan énergétique :

Lors de la transformation radioactive il va y avoir une **perte de masse des éléments**, c'est à dire que la masse du noyau père X va être supérieure à la somme de la masse du noyau fils Y et des particules émises.

Cette différence de masse entre les éléments initiaux et les éléments finaux est en fait **convertie en énergie** grâce à la loi d'équivalence masse-énergie. Et donc si on veut connaître l'énergie totale libérée par la transformation radioactive il va falloir calculer la différence de masse entre les éléments initiaux et les éléments finaux.

(L'antineutrino a une masse négligeable donc on ne le comptera pas)

Cette différence de masse se note ΔM est se calcule ainsi :

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

Mais en pratique, il est difficile de connaître la masse des noyaux des éléments chimiques on va donc **utiliser la masse des atomes de ces éléments notée \mathcal{M}** (cette masse des atomes nous est mieux connue).

On réécrit la différence de masse des noyaux :

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

La différence de masse des noyaux est égale à la masse de l'atome père moins la masse de l'atome fils.

Pour calculer l'énergie totale délivré par la transformation radioactive on va utiliser la **relation d'Einstein** qu'on appelle aussi **relation d'équivalence masse-énergie** et qui affirme que toute particule de masse m possède une énergie telle que $E = mc^2$.

Ainsi avec ΔM en kg et E en J on a :

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

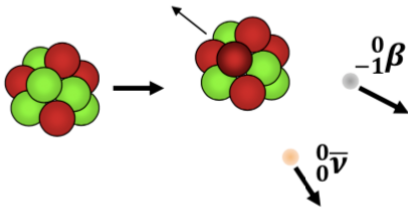
donc $E_d = [\mathcal{M}(A,Z) - \mathcal{M}(A,Z+1)] \times c^2$

Ou bien alors avec ΔM en u et E en MeV on a :

$$E_d = \Delta M \times 931.5 \quad \text{Avec } E \text{ en MeV ; } \mathcal{M} \text{ en u (unité de masse atomique)}$$

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

On préférera utiliser cette expression en pratique ! Et surtout : **Attention aux unités utilisées !!!**



L'énergie libérée lors de la réaction va être convertie sous forme d'**énergie cinétique E_c** emportée par les différentes particules émises par la transformation β^- . Ici, pas d'émission d'énergie sous forme de photon électromagnétique.

$$E_d = E_c(\cancel{\text{recoil}}) + E_c(\beta^-) + E_c(\bar{\nu})$$

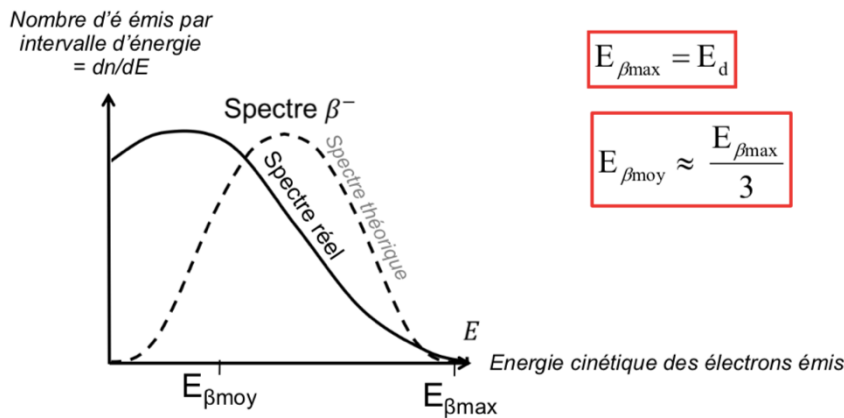
Donc l'énergie délivré E_d par cette transformation β^- est constante et elle se répartie entre l' E_c du noyau fils de la particule β^- et de l'antineutrino $\bar{\nu}$.

L' E_c du noyau fils est une énergie de recul du noyau considérée comme négligeable.

→ Au final l' E_d se répartie de manière aléatoire entre l' E_c du β^- et de l'antineutrino $\bar{\nu}$.

3. Spectre énergétique :

Seul le β^- est détectable (car l'antineutrino est indétectable), son spectre est **continu** et l' E_{max} du spectre sera égale à l' E_d de la réaction.



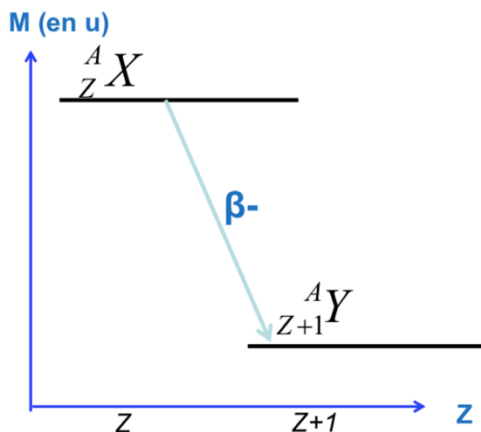
Le spectre théorique : il va de 0 (cas où toute l'énergie est emportée par l'antineutrino) jusqu'à E_{max} (cas où la particule β^- emporte toute l'énergie). Dans la majorité des cas **il se partage entre les deux**.

Le spectre réel : il est **plus décalé vers la gauche**. Il est expliqué par les **forces électriques coulombiennes** d'attraction entre le β^- négatif et les protons positifs du noyau. Les β^- ayant une énergie trop faible ne pourront pas s'extraire du noyau et on ne les détectera pas

Attention : L'énergie moyenne des électrons émis est **égale au tiers de l'énergie totale libérée** par la transformation radioactive.

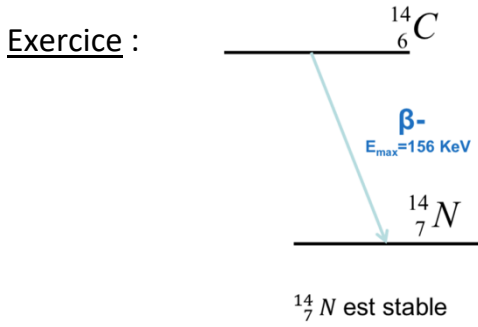
4. Schéma de la désintégration :

C'est une représentation graphique regroupant les principales caractéristiques d'une désintégration radioactive.



- En ordonnée : masse des atomes des Nyx pères et fils (état fondamental ou excité)
- Abscisse = Z des noyaux (pas représenté en pratique)
- Segments horizontaux = ordonnées des niveaux d'E autorisés
- On utilise des flèches pour indiquer les transitions autorisées du père et des états possibles du fils

Suite à une transformation isobarique β^- , X devient Y et libère une certaine quantité d'énergie fixe E_d . La différence entre les deux segments horizontaux correspond à la **différence de masse des deux atomes**, et dans le cas de la **désintégration β^-** cette différence de masse sera **proportionnelle à l'énergie E_d** .



Le Carbone 14 se transforme en Azote 14 par une transformation isobarique β^-
 $M(14,6) = 14,003241 \text{ u}$
 $M(14,7) = 14,003073 \text{ u}$
Quelle est l' E_{\max} du β^- ?

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

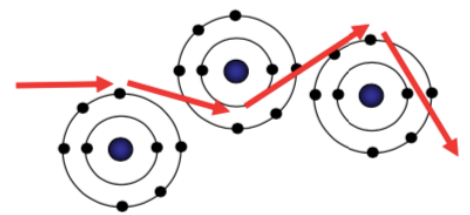
$$E_d = [M(14,6) - M(14,7)] \times 931,5$$

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

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

5. Parcours dans la matière :

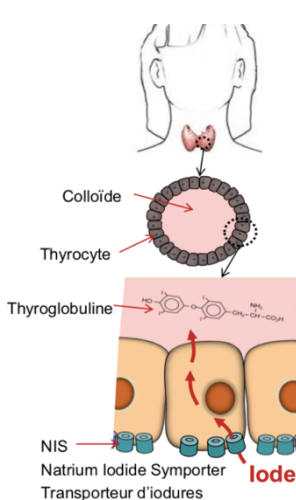
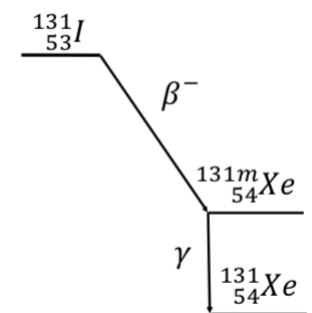
- Le β^- est un **électron**, une particule chargée négativement, il va donc avoir un **parcours « chaotique »** puisqu'il va provoquer de nombreuses ionisations avec les électrons du milieu traversé. Sa **trajectoire** va être **déviée**, il aura donc un parcours **non rectiligne** avec une portée de **quelques mm** dans les tissus. Les β^- sont arrêtées par une **feuille de métal très fine**.
- L'**antineutrino** est très **pénétrant** et va **peu interagir** avec la matière.



6. Application biomédicale :

L'**iode-131** est un isotope radioactif de l'**iode-127** émetteur β^- avec une E_{\max} de 606 keV. Lors de sa transformation β^- il gagne un proton (et perd un neutron) pour devenir le **Xénon-131** (d'abord **métastable**, puis stabilisé grâce à une transformation isomérique de type γ revu dans un prochain cours).

On le trouve à l'état **naturel** dans l'**écorce terrestre**. Mais sinon il est produit dans les **réacteurs nucléaires** lors de la fission des atomes lourds et on l'utilise également en **médecine** : on l'injecte au patient dans le but de traiter et de guérir le **cancer de la thyroïde** qu'il soit **local** ou même **métastatique** : c'est ce qu'on appelle la radiothérapie !



La **thyroïde** est un petit organe **endocrine** qui est situé à la **base du cou** et dont la fonction principale et indispensable à la vie est la **synthèse d'hormones thyroïdiennes**. La thyroïde est organisée sous forme de **follicules** avec les **thyrocytes** en périphérie et la colloïde au centre. C'est dans la colloïde que vont être synthétisées les hormones thyroïdiennes.

Pour cette **synthèse** la thyroïde a **besoin d'iode** qui va être capté par des **transporteurs**, les **NIS**, situés sur les thyrocytes et cette iode sera transportée jusque dans la **colloïde** où il permettra la **synthèse des hormones**. Alors en temps normale cet iode est stable, mais si on a fait une **injection d'iode-131** à notre patient, de la même manière que l'iode stable, l'iode-131 va aller se concentrer sur la thyroïde dans les follicules. Et comme cette iode peut faire une transformation isobarique avec **émission de β^-** il va avoir la particularité d'émettre ces β^- qui sont **délétères pour les cellules** ! Ils vont entraîner des ionisations et notamment des **lésions de l'ADN**

des **thyrocytes**, avec **destruction des cellules thyroïdiennes**. C'est pour cela qu'on injecte de l'iode-131 à un patient qui possède un cancer de la thyroïde. C'est pour induire une captation de l'iode-131 par le **cancer de la thyroïde** et le **détruire** même si **au passage on va détruire la thyroïde saine**. On utilise vraiment la propriété d'émission de ce β^- avec la capacité d'ioniser les cellules avoisinantes, afin d'entraîner une **apoptose** de ces cellules thyroïdiennes ou cancéreuses.

II. Transformation β^+

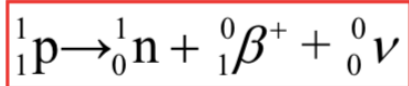
Les transformations β^+ interviennent quand il existe un **excès de protons** dans le noyau. Le noyau père est radioactif il va subir une transformation pour rejoindre la **vallée de la stabilité** en **perdant un proton** et en **gagnant un neutron**.

Le nombre de masse **A reste identique** : c'est bien une **transformation isobarique** !

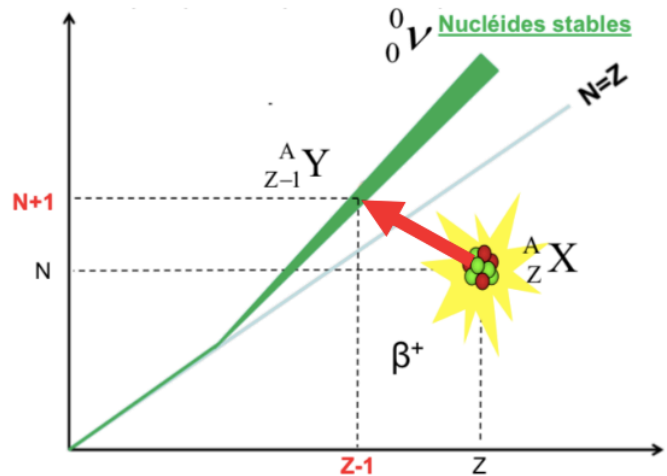
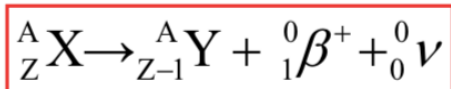
Lors de cette transformation, on a émission d'une **particule β^+** (=positon) et d'un **neutrino ν** .

1. Réaction de désintégration β^+ :

Réaction dans le noyau:



Ce qui donne au niveau du nucléide:



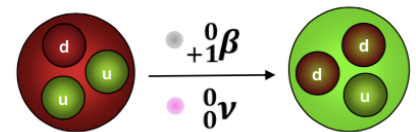
Remarque : On a bien le **respect de la loi de conservation de masse A et du nombre de charge Z**.

♦ Particules émises :

- Un **positon β^+** , c'est un **électron positif** qui naît de la transformation radioactive, **il ne préexiste pas dans le noyau**.
- Le **neutrino ν** a une **charge nulle** est une **masse quasi nulle (négligeable)**.

♦ Transformation du proton en neutron :

Ici c'est l'inverse de la transformation β^- . **L'un des quarks up du proton se transforme en un quarks down**, conduisant à la **formation d'un neutron**.



2. Bilan énergétique :

Une fois encore on va utiliser la **loi de Einstein** (loi d'équivalence masse-énergie) et donc on va commencer par calculer la **perte de masse** de la réaction nucléaire et celle-ci est égale à :

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

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

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

Pour calculer l'énergie délivré on va **multiplier cette différence de masse par c^2** , ce qui donne :

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

Pour la désintégration β^+ l'énergie délivré n'est pas directement proportionnelle à la différence de masse des atomes. Il faut tenir compte de ce facteur qui correspond à la **masse de deux électrons**

Pour que la désintégration β^+ ait lieu il faut que l'énergie fournie à la réaction soit supérieur à 0, une transformation radioactive libre nécessite de l'énergie, donc on a

$$E_d > 0$$

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

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

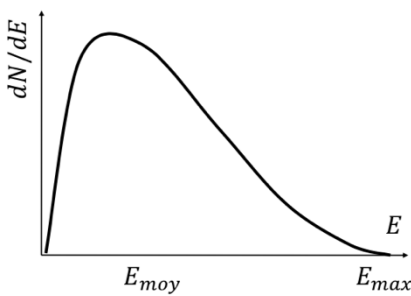
On en conclue que pour que la désintégration β^+ ait lieu il faut que la **différence de masse des atomes père et fils** soit au moins égale à un **équivalent d'énergie de 1,022 MeV**, il faut absolument que cette condition soit respectée !

Pour toute désintégration β^+ l'énergie délivrée est constante et donc elle va se répartir sous forme **d'énergie cinétique** entre les différents éléments finaux :

$$E_d = E_c(\text{recoil}) + E_c(\beta^+) + E_c(\nu)$$

Une fois encore on peut **négliger l'énergie cinétique du noyau fils** qui est considéré comme nulle du fait de la masse importante du noyau. **L'énergie cinétique va donc se répartir entre le positon et le neutrino.**

3. Spectre énergétique :

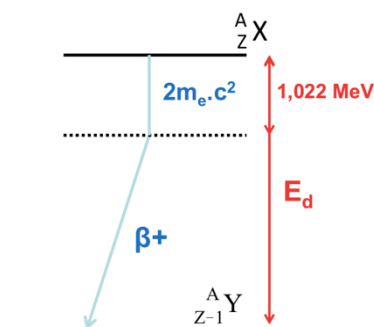


Comme **seul le β^+ est détectable** on va obtenir un spectre électronique **continu**. On ne détecte pas le neutrino, il n'y a donc pas de spectre lui correspondant !

Il va de 0 (quand tout a été pris par le neutrino) jusqu'à E_{max} (situation où toute l'énergie a été emportée par le β^+). L'énergie se **réparti aléatoirement** entre les **deux particules**.

Attention ici **le spectre n'est plus décalé vers la gauche** car il n'y a **plus d'interactions coulombiennes** (car deux entités positives se repoussent).

4. Schéma de la désintégration :

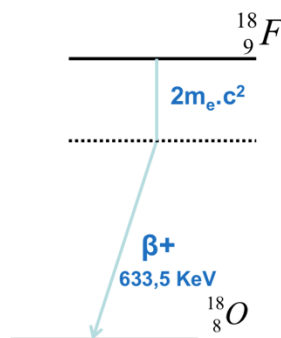


X : Noyau père

Y : Noyau fils, stable dans son état fondamental, à Z-1 (car perte d'un proton)

On a bien le **seuil de 1,022 MeV (=1022 keV)** c'est une sorte de **taxe** que doit obligatoirement payer le noyau père **pour pouvoir subir une transformation β^+** .

Exemple :



Le Fluor 18 se transforme en Oxygène 18 par une transformation isobarique β^+

$$\mathcal{M}(18,9) = 18,0009380 \text{ u}$$

$$\mathcal{M}(18,8) = 17,9991610 \text{ u}$$

$$m_e = 5,486 \cdot 10^{-4} \text{ u}$$

Quelle est l' E_{max} du β^+ ?

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

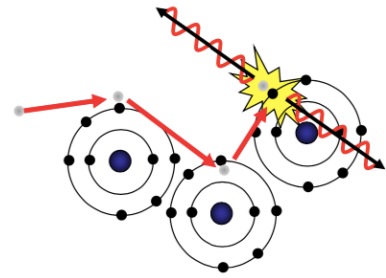
$$E_d = [18,000938 - 17,9991607] \times 931,5 - 2 \times 5,486 \cdot 10^{-4} \times 931,5$$

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

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

5. Parcours dans la matière :

- ◆ **Le positon β^+** est un électron avec une **charge positive**. Il va donc avoir une interaction avec les électrons du milieu environnant son **parcours sera très sinueux**. Il va **perdre son Ec** au cours de ses interactions et il va finir par **s'arrêter** dans la matière.



Une fois stoppé, l'histoire ne s'arrête pas là puisque le positon va chercher immédiatement à **s'apparier avec un électron** du milieu environnant. Cette réaction, qui est la **combinaison d'un β^+ avec un électron libre** du milieu, s'appelle une **réaction d'annihilation**. C'est la conversion de l'énergie des deux particules qui est une énergie sous forme de masse en une énergie lumineuse avec l'émission de deux photons qui sont de **direction opposé** (180° l'un de l'autre)

On a encore une utilisation de la **relation masse-énergie**, mais cette fois dans l'autre sens, car cette fois-ci c'est la masse des deux particules qui va être converti en une énergie équivalente sous forme de **deux photons γ de 511 keV** émis à **180° l'un de l'autre**.

Masse électron et positon = 0,0005486 u

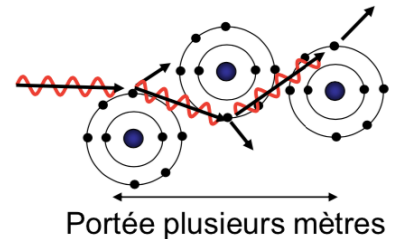
Ainsi chaque photon gamma a une énergie $E = 0,0005486 \times 931,5 = 0,511 \text{ MeV} = 511 \text{ keV}$

Comme **deux photons sont émis**, on a au total une énergie de $2 \times 511 \text{ keV} = 1022 \text{ keV}$. On retrouve donc le **seuil énergétique** de la réaction β^+ , qui est en fait rendu sous la forme des **deux photons gammas**.

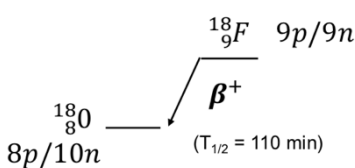
- ◆ **Le neutrino** est très **pénétrant**, il ne fait quasiment **pas d'interaction** et est donc **indétectable**.

- ◆ **Les photons gamma** sont d'origine non directement nucléaire. Le prof vous renvoie au cours sur les **interactions des rayonnements avec la matière**, notamment sur ce qui concerne **l'effet photo électrique** et **l'effet Compton**.

Ils ont des **interactions non obligatoire** avec la matière, il faut des **épaisseurs importantes de plomb/béton** pour les atténuer : il est donc plus difficile de se protéger des photons que des électrons.



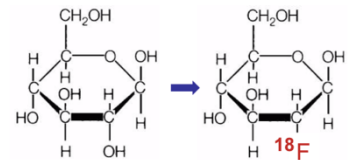
6. Application biomédicale : Le ^{18}F Fluoro-deoxy-glucose (^{18}FDG)



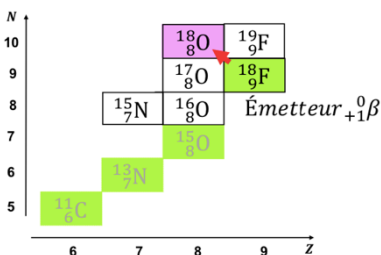
Le ^{18}FDG est composé de **Fluor-18** et de **glucose**. Le Fluor-18 est un atome radioactif qui a une **surcharge de proton** et qui va se transformer par une β^+ en **Oxygène-18** (il va convertir un de ses protons en neutron) avec émission d'un positon β^+ . Le Fluor-18 a une demi-vie de **110 minutes**.

On va **greffer ce Fluor-18 à une molécule de glucose** à la place d'un **groupement hydroxyle**. On obtient une molécule analogue du glucose et radioactif **émetteur de positon** et de **manière indirect de photon** que l'on pourra **détecter**.

→ Le $^{18}\text{Fluoro-deoxy-glucose}$



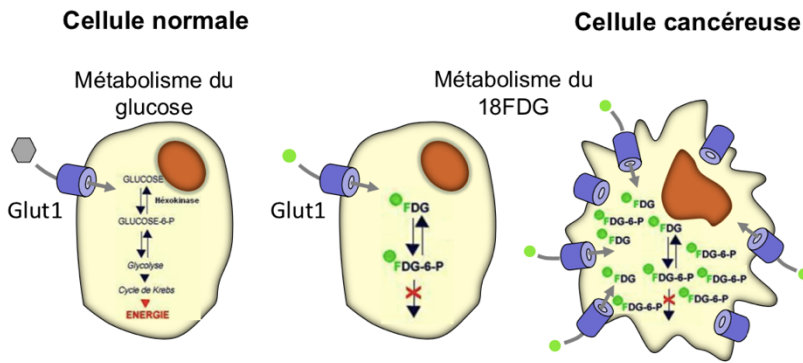
Le glucose → Le ^{18}FDG



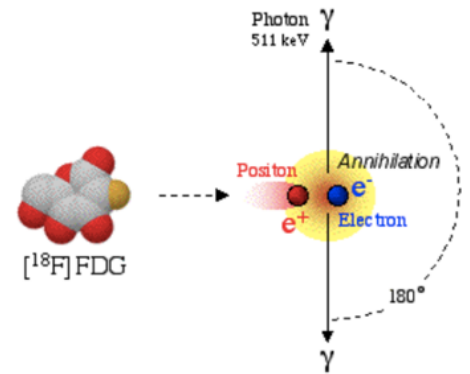
Une des caractéristiques principales de la **cellule tumorale** c'est d'être très **avide en glucose**. Elle a des **besoins énergétiques très important** du fait de sa forte **prolifération** et elle va fortement capter le glucose pour assouvir ses besoins énergétiques.

→ C'est ce que l'on appelle **l'effet Warburg** !

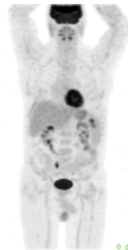
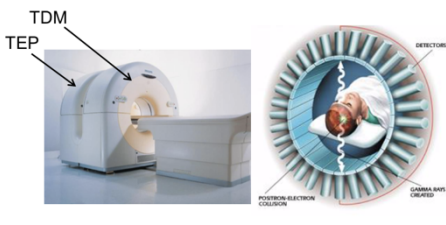
Sur une **cellule normale**, le glucose passe la membrane avec le **transporteur GLUT**, puis arrive dans le cytosol où on aura toute la **cascade de la glycolyse**. Si on remplace la molécule de glucose par une molécule de ¹⁸FDG radioactif, celle-ci passera également par le transporteur GLUT et elle va **subir la première phosphorylation** de la glycolyse avec formation de ¹⁸FDG-6P, une molécule radioactive qui **ne pourra pas subir la suite de la glycolyse** du fait de la présence de l'atome de fluor ce ¹⁸FDG-6P **se retrouve coincé dans la cellule**.



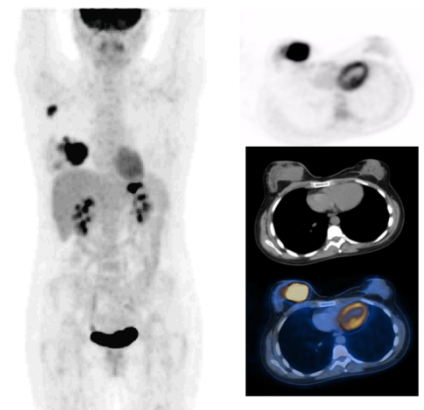
Si la **cellule est normale** on aura une **faible captation de ¹⁸FDG**. Mais si la **cellule est cancéreuse**, elle est très **avide en glucose**, et donc comme le ¹⁸FDG est un analogue du glucose, elle va fortement capter le ¹⁸FDG. Celui-ci va donc être **stocké** dans la cellule jusqu'à ce que l'atome de **Fluor-18** se transforme par **émission β⁺** en **Oxygène-18**. Le **positon** émis va faire **quelques millimètres** dans le tissus, **s'arrêter, s'annihiler** avec un électron libre du milieu, et émettre **deux photons gammas à 180°** l'un de l'autre (d'énergie de 511 keV).



La **cellules tumorale** a capté le ¹⁸FDG qui va la faire devenir **radioactive**, pour finalement émettre des **photons gamma** qui vont pouvoir être **détectés** par une machine qu'on appelle la **tomographie par émission de positon (TEP)**. On va pouvoir obtenir une image de la **répartition du glucose** rendu radioactif par le fluor au sein de l'organisme du patient. Cette imagerie sera donc très sensible pour **détecter les cellules cancéreuses** qui ont capté le glucose radioactif.



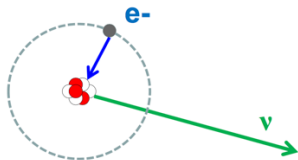
On obtient ici une **image 3D** de la patiente avec des **fixations physiologique** comme au niveau du **cerveau** qui consomme essentiellement du glucose. On a aussi une faible fixation par le **cœur**, par le **foie** et une élimination du ¹⁸FDG par les **voies urinaires**. Mais ce qui est intéressant ici c'est qu'on voit une **petite masse en hyper signal**, et quand on regarde en **imagerie de coupe** on voit que la forte captation du FDG est lié à la présence d'un **cancer du sein** de la patiente. Grâce à la connaissance du **phénomène radioactif d'émission β⁺** et à la **technologie TEP**, on peut réaliser des exploits dans le domaine de la **cancérologie**.



III. La capture électronique (CE) :

Le troisième et dernier type de transformation isobarique que nous allons étudier est la désintégration par capture électronique.

-Cette transformation est relativement proche de la désintégration β^+ car elle survient lorsque le noyau a un **excès de protons (zone B)** et qu'il doit convertir un proton en un neutron pour se débarrasser d'une charge positive.



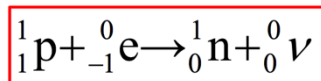
-La CE consiste en la capture d'un électron d'une couche électronique profonde (souvent la couche K car les électrons y sont les plus faciles à capter) par le noyau, au sein duquel il se combine à un proton pour donner un neutron.

-Le nombre de masse A ne change pas donc on parle bien de **transformation isobarique**.

-Une seule particule incidente est émise : le **neutrino**.

1. Réaction de désintégration de la CE :

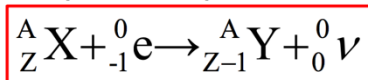
Réaction dans le noyau:



Les lois de conservation du nombre de nucléons et de la charge sont vérifiées.

Le noyau père radioactif X possède Z protons (et N neutrons).

Ce qui donne pour les nucléides:



Un de ses protons se combine à un électron d'une couche profonde du cortège de l'atome, ce qui forme un neutron.

Donc le noyau fils Y présente Z-1 protons (et N+1 protons).

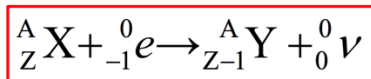
Le neutrino est la seule particule émise au cours de la CE.

Il possède une charge nulle et une masse bien inférieure à celle d'un électron.

Donc la CE est un mode de désintégration très **discret** (contrairement aux deux précédents) car le neutrino, qui emporte l'énergie libérée, est impossible à détecter.

2. Bilan énergétique de la CE :

Energie totale en fonction des **masses atomiques** \mathcal{M} :



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

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

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

Energie de liaison de l'e- capturé

Pour que la réaction soit possible, il suffit que $\Delta M > E_l$

Energie seuil = énergie de liaison (E_l) de l'e- capturé

Explications :

La différence de masse de cette transformation est égale à la masse du noyau d'origine (la masse de l'atome père - la masse de ses Z électrons + la masse de l'électron capturé) à laquelle on soustrait la masse du noyau fils (la masse de l'atome fils - la masse de ses Z-1 électrons).

Lorsque l'on développe puis réduit l'équation, on remarque que **la différence de masse des noyaux pendant la CE est égale à la différence entre la masse de l'atome père et la masse de l'atome fils.**

Le neutrino n'ayant pas de masse, il n'apparaît pas dans l'équation.

Pour calculer l'énergie délivrée on va multiplier cette différence de masse par la célérité au carré puis soustraire l'énergie de liaison de l'électron capturé +++

En effet, pour que la CE ait eu lieu, il a d'abord fallu apporter de l'énergie pour casser cette liaison.

On a donc bien un **seuil énergétique**, comme pour la désintégration β^+ (mais cette fois-ci l'énergie nécessaire à la réaction est bien inférieure à 1,022 MeV car uniquement égale à l'énergie de liaison de l'électron capturé).

Au total, pour les noyaux instables par excès de protons (zone B), on a deux possibilités :

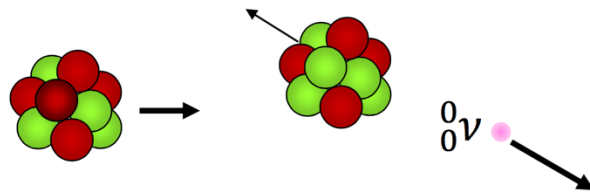
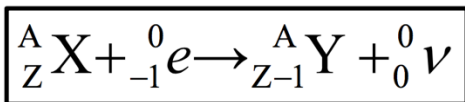
- Une transformation isobarique β^+ .
- Une transformation isobarique par CE.

On peut donc penser qu'il existe une compétition entre ces deux transformations :

-**En-dessous** du seuil énergétique de 1,022 MeV, seule la **CE** est possible.

-**Au-dessus** du seuil énergétique de 1,022 MeV, il y a effectivement compétition entre la **CE** et la désintégration β^+ , le noyau fils Y étant identique.

3. Spectre énergétique de la CE :



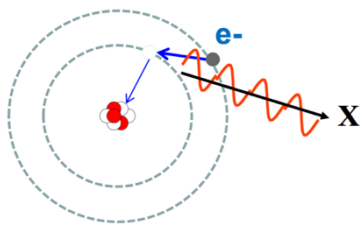
$$E_d = E_c (\text{recul}) + E_c(\nu)$$

L'énergie délivrée est répartie entre l'énergie cinétique de recul du noyau fils et l'énergie cinétique du neutrino. Une fois de plus, l' E_c de recul de Y est considérée comme nulle du fait de sa masse et toute l'énergie délivrée par la transformation est emportée par le neutrino qui est indétectable : **il n'y a donc pas de spectre direct de la CE.**

Néanmoins, on pourra observer un **spectre indirect lié aux réarrangements électroniques secondaires** du cortège de l'atome. On s'intéresse au **noyau fils** car ces réarrangements ont lieu après la CE :

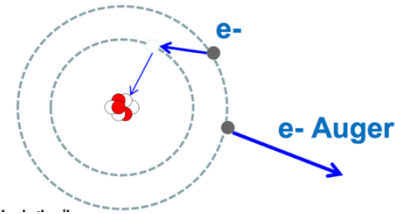
1. Après la CE, il y a un électron manquant au niveau d'une couche profonde du cortège l'atome (*dans cet exemple au niveau de la couche K*). Cela entraîne une instabilité électronique (*et non plus sur une instabilité nucléaire*).
2. Un électron d'une couche plus périphérique et donc plus énergétique (*ici la couche L*) va venir sur cette couche profonde pour remplacer l'électron capturé.
3. Lors du passage d'un électron d'une couche supérieure à une couche plus profonde (moins énergétique) une certaine quantité d'énergie va être libérée de deux manières possibles (*visualisez bien les schémas*) :

Emission d'un photon X



-Soit par **émission d'un photon X** d'énergie égale à l'énergie de liaison de la couche incomplète que va combler l'électron moins l'énergie de liaison de la couche d'où il provient (*ici $E_x = E_k - E_l$*).

Emission d'un e- Auger



-Soit par **transfert de l'énergie à un autre électron moins lié (électron Auger)**. Après comblement de la couche profonde (*ici K*) par un électron d'une couche plus superficielle (*ici L*), on a un autre électron situé sur une couche périphérique de l'atome (*ici encore L*) qui va être expulsé du cortège électronique.

L'excédent d'énergie va donc être émis sous forme d'énergie cinétique (de l'électron Auger). Celle-ci est égale à l'énergie de liaison de la couche à combler moins l'énergie de liaison de la couche d'où provient l'électron qui comble la couche incomplète moins l'énergie de liaison de la couche où était l'électron Auger avant d'être éjecté (*ici $E_c = E_k - E_l - E_l$*).

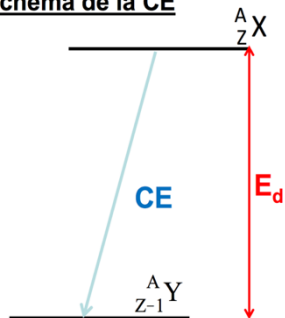
En effet, pour expulser l'électron Auger, il faut apporter une certaine quantité d'énergie (égale à son énergie de liaison) permettant de l'arracher du cortège.

→ On va donc avoir un **spectre de raies** (pas de spectre continu) d'origine **électromagnétique** (si **photons X**) ou **électronique** (si électrons **Auger**).

Ce spectre en énergie est **d'origine atomique** (et non pas nucléaire) car il s'agit d'un spectre indirect lié aux réarrangements secondaires du cortège de l'atome, le photon X ou l'électron Auger étant issus du cortège électronique de l'atome et non pas de son noyau

(rappel : il n'existe pas de spectre nucléaire direct pour la CE).

Schéma de la CE

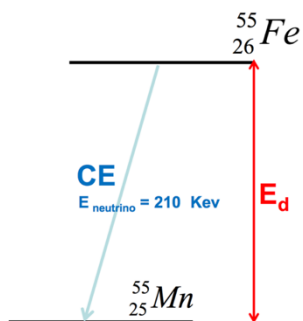


Le noyau fils Y est sur un segment inférieur à celui du noyau père X dont la masse est supérieure. Le fils est décalé sur la gauche par rapport au père car il a perdu un proton (Z-1).

E_d est fonction de la différence de masse entre les deux noyaux.

Ici, l'énergie seuil à fournir n'est pas représentée car très faible (*mais elle existe quand même, il ne faudra pas oublier de l'inclure dans vos calculs*).

Le nucléide Y est dans son état fondamental



Sur l'exemple ci-contre : vous pouvez constater que l'énergie totale de la transformation, soit la différence de masse (217 keV) à laquelle on soustrait l'énergie de liaison de l'électron capturé (7 keV), donc $E_d = 217 - 7 = 210$ keV n'est pas suffisante pour permettre une désintégration β^+ (210 keV < 1022 keV).

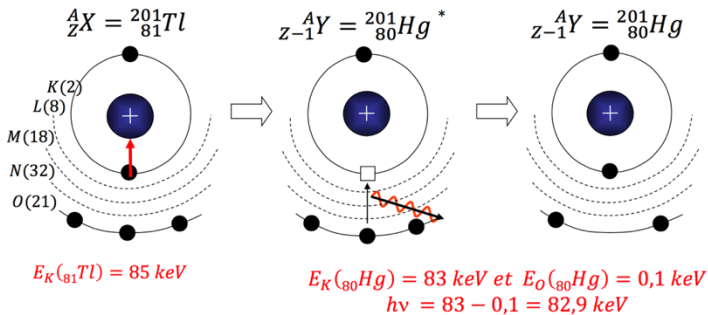
Pour le Fe 55, seule la CE était possible.

$\Delta M = 217$ keV;
 $E_k = 7$ keV :
 désintégration β^+ impossible.

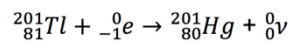
Autre exemple (non abordé dans la vidéo) :

Spectre de la CE: exemple du thallium 201

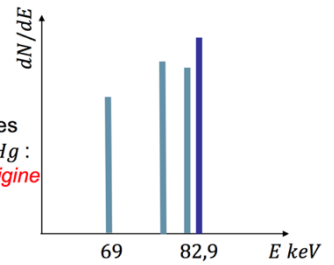
$$\left. \begin{aligned} \Delta M \times 931,5 &= 475 \text{ keV} \\ E_K &= 85 \text{ keV} \end{aligned} \right\} E_c(\nu) = 475 - 85 = 390 \text{ keV}$$



Spectre de la CE

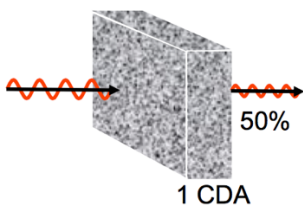


➤ Le seul spectre détectable est celui des réarrangements électroniques de ${}^{201}_{80}\text{Hg}$:
Spectre électromagnétique de raies d'origine atomique.



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 (hv)		69	80,5	82,5	82,9

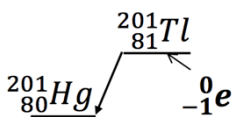
4. Parcours dans la matière :



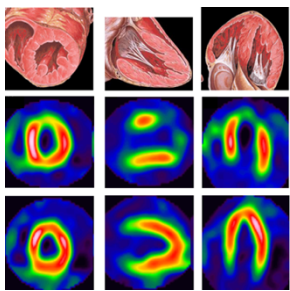
Le **neutrino est indétectable** (tout comme l'antineutrino), car il ne provoque pas d'interactions avec la matière.

Cependant, les **photons X** de fluorescence émis indirectement vont avoir des interactions de type effet **photo-électrique et Compton** et ont une portée de plusieurs mètres (interactions non obligatoires). Il faut une couche importante de plomb ou de béton pour les atténuer.

5. Application biomédicale :



Cette application concerne encore l'imagerie. On va utiliser un noyau radioactif, le Thallium-201, qui a un excès de protons. Il va se désintégrer en Mercure-201 par capture électronique.



L'intérêt du **Thallium-201** est qu'il s'agit d'un analogue du Potassium (K+), qui va, comme le K+, aller se fixer de manière intense au niveau des **cellules myocardiques**, et ce en fonction du débit sanguin coronaire. Cela va permettre de voir les zones du cœur qui sont bien perfusées (et ont donc bien capté le Thallium). On en déduit quelles zones sont insuffisamment perfusées (ce qui indique une ischémie myocardique).

On détecte uniquement les **photons X** émis lors du réarrangement du cortège électronique du Mercure 201.

On voit ici que l'apex du cœur n'est pas bien perfusé (il ne capte pas le Thallium-201).

Dédis de Lucile : Grosse dédi à Anne et Justine les brooo <3 Courage et à l'année prochaine sans faute.

Dédi à Marine, Anna, Céleste et Emilie vous allez tout niquer je compte sur vous.

Bien sûr à mes fillots, continuez comme ça, ça finira par payer !

Bonne chance à vous tous, accrochez-vous, vous n'êtes pas là par hasard ☺

Et pour finiiiiir dédi à l'équipe du Tutorat mes ptits loups notamment au KL. Labiz.

Dédis de Tristan : Dédicace à ceux que j'ai oublié la dernière fois : LN(A) la best, merci pour tes messages trop gentils, Enzo pour les enregistrements et Victoria. Dédicace au Co-Learning qui a fermé (petit ange parti trop tôt). Au Tutorat Niçois, longue vie ! À mes fillots : Diego, Jazz, Maxime, Rahma, Maxence et Eslem.

À Marie la pilote de rallye qui va rouler sur la PACES. Et à mes petits P1 de la BU du coup : Quentin, Isidora, Mathilde, Achille, Giorgio, Alexis, Kevin, Sacha, Yanis, Inès, Arthur, Morgane, Justine, Yanousa, Valentin, Amna.