

Les transformations radioactives

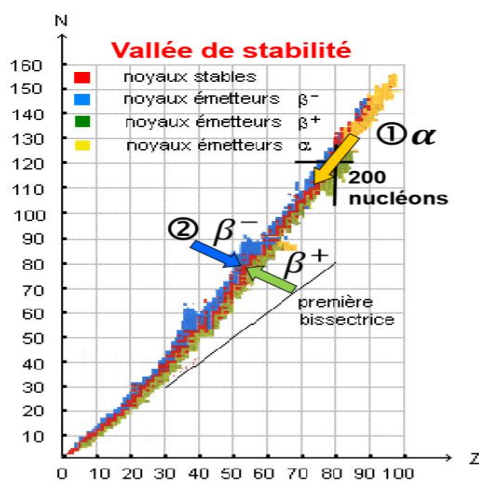


I/ Généralités :

Une transformation est une **modification spontanée du noyau d'un atome**. On l'appelle aussi mutation ou désintégration. Un noyau père devient spontanément un noyau fils de **masse plus faible**.

Cette **perte de masse** entraîne une **augmentation de l'énergie de liaison** et donc une libération d'énergie emportée par une particule ou un photon. Cela augmente la **stabilité et la cohésion** des nucléons du noyau fils. Il y a alors un changement de nature ou de niveau d'énergie du noyau.

La radioactivité est un phénomène **naturel** et **probabiliste** qui dépend d'une constante radioactif lambda invariable qui est indépendante des conditions physico chimiques et de l'âge de l'atome.



- ♥ Les noyaux stables sont sur la vallée de la stabilité
- ♥ Les noyaux avec un nombre de **nucléons supérieurs à 200** subiront la **radioactivité α** .
- ♥ Ceux avec un **excès de protons** : **radioactivité β^+**
- ♥ Ceux avec un **excès de neutrons** : **radioactivité β^-**
- ♥ Il y a aussi les **modifications de l'énergie** par désexcitation sans modification de la nature du noyau : isomérique. Mais elles ne se voient **pas sur ce schéma**.

Il y a donc une **évolution vers une masse inférieure/ minimale** pour avoir une énergie de liaison maximale et donc une stabilité maximale. La libération d'énergie se fait sous forme de rayonnements. Elle obéit à des **lois de conservation** : toujours appliquées

- ♥ Nombre de **nucléons A** reste constant (se répartit)
- ♥ Conservation de la **charge Z**
- ♥ Conservation de **l'énergie totale** (énergie cinétique+ potentielle+ rayonnante)
- ♥ Conservation de la **quantité de mouvement**

Mais la **masse totale ne se conserve pas** ! Contrairement au nombre de masse.

La radioactivité tend donc toujours vers une masse minimale et une énergie de liaison maximale.

II/ La radioactivité α :

La **particule α** , émise lors de cette transformation, est le noyau de l'atome d'Hélium (4 ;2). L'Hélium est **particulièrement stable** grâce à son nombre doublement magique, il a une énergie de liaison de **7MeV/A**. C'est le **seul noyau émis spontanément**. Cela concerne les **noyaux de $A > 200$** . Ils perdent alors 4 nucléons d'un coup, dont 2 protons.

1. **Réaction de désintégration** (conservation de Z et A) :
$${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \alpha$$

La réaction s'écrit :
On obtient donc un **nouvel élément fils**, plus petit, car le Z change.

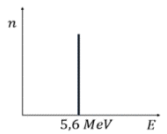
2. **Bilan masse énergie** (conservation de E) :
Pour faire le bilan des masses nucléaires, on **soustrait l'état final à l'état initial**.

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

Cela nous donne donc la différence de masse que l'on **multiplie par 931,5** pour obtenir l'**énergie disponible** de la réaction **en MeV**.

3. **Le spectre** (conservation de la quantité de mouvement) : l'énergie disponible est **libérée sous forme d'énergie cinétique** partagée entre le noyau fils et la particule alpha. Le noyau fils possède une énergie cinétique de recul qu'on considère égale à zéro car sa masse étant élevée, sa vitesse sera très faible.

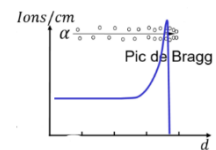
Donc **α emporte toute l'énergie** disponible. On obtient donc un **spectre de raie** avec une raie **entre 4 et 10 MeV**= énergie disponible.



4. **Le parcours dans la matière** :

La particule α est **lourde** comparée aux électrons et est chargée positivement. Elle a une vitesse faible **non relativiste** et une trajectoire **rectiligne**. Elle attire les électrons et est **directement ionisante**.

Son parcours est **court** avec des **effets biologiques obligatoires** et son parcours se termine avec un **maximum d'ionisation** qu'on appelle le **pic de Bragg**.



5. **Les applications biomédicales** (exemple du radon 222) :

- ♥ La **radioprotection** : si la **source est externe** il n'y a **aucun danger** car arrêté par la couche cornée de la peau. Si la **source est interne** il y a des **ionisations pulmonaires**.
- ♥ La **radiothérapie** : effets **ionisants à courte distance** donc **destruction locale** des cellules cancéreuses utilisé par exemple pour le cancer de la prostate métastatique.
- ♥ Cible les cellules cancéreuses sans atteindre les cellules saines.

III/ Les transformations isobariques :

Elles se produisent sans changement du nombre de masse A du noyau père. Mais Z et N changent. Il y a une descente dans la vallée de la stabilité → Augmente la stabilité.

A- La désintégration β^-

Elle intervient s'il existe un **excès de neutrons** dans le noyau. Il y a une **émission** d'une particule **béta moins** et d'un **antineutrino**. Il y a une **perte d'un neutron** et un **gain d'un proton**.

1. **Réaction de désintégration** :
- $${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} \beta^- + {}^0_0 \bar{\nu}$$

β^- est un électron **d'origine nucléaire** avec une masse négligeable et une charge = -1

L'**antineutrino** n'a pas de masse (très faible en réalité) ni de charge. Il ne pré existe pas dans le noyau. Il est **quasiment impossible à détecter**. Il est très pénétrant et non ionisant. Probabilité d'interagir en traversant la Terre de 10^{-10} . Ce n'est pas un REM.

Le **neutron** devient un proton en **inversant un quark down en quark up**.

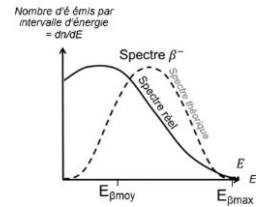
2. Le bilan énergétique est :

Il y a une perte de masse des éléments : **celle du noyau père est supérieure** à celle des masses des autres particules. La différence de masse est calculée en **soustrayant la masse des éléments finaux** (élément fils et bêta moins (en simplifiant la masse de bêta moins disparaît)) **à la masse du noyau père** : $\Delta M = M(\text{noyau père}) - M(\text{noyau fils})$

Pour calculer l'énergie de la désintégration : $\Delta M(u) \cdot 931,5 \text{ MeV}$ ou $\Delta M(\text{kg}) \cdot c^2$ Joule.

3. Schéma de la désintégration :

L'énergie est convertie en **énergie cinétique** emportée par les **particules émises**. Il n'y a **pas d'émission de photons** électromagnétiques. Elle se **répartit aléatoirement entre β^- et l'antineutrino** (non détectable) donc on détecte que celle du β^- .



Le spectre de β^- est un **spectre électronique continu**. Le spectre théorique va de 0 à E_{max} (lorsqu'il a capté toute l'énergie). Le spectre réel est **décalé vers la gauche** à cause de la force **d'attraction coulombienne** (proton/ β^-). L'énergie moyenne est égale au tiers de l'énergie maximum.

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

4. Parcours dans la matière :

Les électrons sont chargés donc ils provoquent des **ionisations** par interactions avec des électrons donc ont un **parcours non rectiligne**. La profondeur de pénétration est de quelques millimètres. L'antineutrino est très pénétrant donc interagit peu.

5. Les applications biomédicales :

L'iode 131 qui se désintègre en Xénon 131 métastable. Il a une origine de l'écorce terrestre ou lors de la fission nucléaire. Il sert pour soigner le cancer métastatique ou non du cancer de la **thyroïde**. L'iode rentre dans la thyroïde, se désintègre, et le β^- va ioniser et détruire le cancer.

B- La désintégration β^+ :

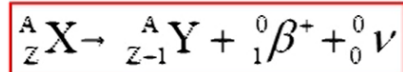
Elle intervient lors d'un **excès de protons** dans le noyau. Il est émis : bêta plus et neutrino. La particule **bêta plus est un positon** : particule identique à l'électron mais avec une charge positive. Il ne pré-existe pas dans le noyau mais naît de la transformation.

Il y a **perte de proton au profit d'un neutron**.

1. **La réaction dans le noyau** : un proton devient un neutron avec émission d'un **bêta plus et d'un neutrino** (pas de charge, masse extrêmement faible).

Le noyau père devient un autre noyau fils Y.

Le **proton inverse un quark up en quark down**.

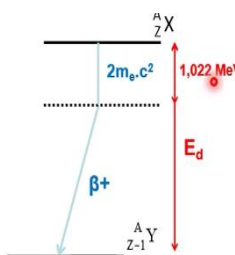


2. **L'énergie totale** :

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

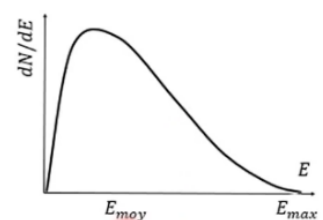
On soustrait à la masse du noyau père, la masse du noyau fils et **deux électrons**.

On la multiplie à c^2 si M est en kg ou par 931,5 si M est en u. Et on obtient l'énergie disponible. Mais pour que la réaction il faut l'énergie disponible soit supérieure à $2m_e \cdot c^2$ **soit 1,022 MeV**. C'est le **seuil énergétique** obligatoire à atteindre pour que la réaction ait lieu. Sans ça, il n'y a pas de désintégration bêta +. Pour trouver si une réaction β^+ a lieu on calcule $\Delta M = M(\text{noyau père}) - M(\text{noyau fils})$ et on



regarde s'il est supérieur à la masse de 2 électrons, si oui : la réaction est possible.

3. **Spectre** : L'énergie disponible est libérée sous forme d'énergie cinétique et répartie entre le positon et le neutrino. **Spectre électronique continu non décalé**. Comme seul le bêta + est détectable on obtient un spectre continu. Le spectre n'est **pas décalé car il n'y a pas d'interaction coulombienne** dans ce cas.



4. Le parcours dans la matière :

Le β^+ va avoir des **interactions avec les électrons du milieu** (donc parcours sinueux) et fini par s'arrêter. Une fois arrêté il va chercher à s'apparier avec un électron du milieu : c'est une **réaction d'annihilation** avec émission de 2 photons en coïncidence. Disparition de toute masse au profit d'une énergie équivalente sous forme de **2 photons de 0,511 MeV** chacun.

Le parcours du **neutrino** est comme celui de l'antineutrino donc quasiment pas d'interaction.

Le parcours des **photons** : effet photo électrique et Compton.

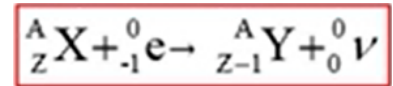
5. Application biomédicale : Fluoro-déoxy-glucose

Le **fluor 18** devient de l'oxygène 18 par bêta plus. Il a une demi-vie de 110 min. On le greffe par liaison covalente à une molécule de glucose qui devient alors radioactive émettrice de photons qui seront détectables. Or les cellules tumorales sont très avides en glucose. Donc ce glucose entre la cellule mais reste bloqué au stade de FDG. Jusqu'à la transformation bêta plus avec émission de photons qui seront fortement **détecté si cellule cancéreuse** et moins détecté (car moins de glucose) dans une cellule normale. Elle sera **détectée par la tomographie par émission de positon (TEP)**.

C- Capture électronique :

Relativement proche de la désintégration bêta plus car pour un **excès de proton** qui va devenir un neutron. Elle consiste en la **capture d'un électron d'une couche électronique profonde** du noyau qui se combinera à un proton pour devenir un neutron.

1. Réaction :



C'est un mode de **désintégration très discret** car le neutrino qui emporte l'énergie libérée est impossible à détecter.

2. Bilan énergétique :

$$E_d = [M(A, Z) - M(A, Z - 1)] \times c^2 - (E_i)$$

Energie de liaison de l'e⁻ capturé

Puis on la multiplie encore une fois par 931,5 mais **on y enlève l'énergie de liaison de l'électron capturé** qui est l'énergie seuil.

Au total pour les **noyaux instables avec excès de protons** : on peut faire une Bêta plus ou une CE. Mais il n'y a **vraiment compétition que si on est au-dessus du seuil de 1,022MeV** sinon il n'y a que la CE.

3. Le spectre :

L'énergie libérée est considéré comme **entièrement distribuée au neutrino** sous forme d'énergie cinétique il n'y a **donc pas de spectre direct de CE**.

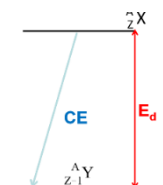
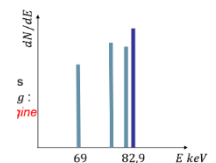
Cependant il y a un **spectre indirecte lié au réarrangement du cortège électronique**.

On s'intéresse au noyau fils donc aux énergies de liaison des électrons du noyau père car cela se passe après la CE. Il y a des émissions de photons de fluorescences ou d'électron de Auger.

Le spectre est un **spectre de raie** car les valeurs sont très précises avec les énergies des électrons.

C'est un spectre atomique d'origine électronique ou électromagnétique.

Le schéma de la CE est un schéma simple décalé vers la gauche avec entre le père et le fils l'énergie disponible.



4. Parcours :

Neutrino : pas d'interactions donc indétectable

Photons X : effet photoélectrique ou Compton

5. Application :

Scintigraphique cardiaque du Thallium 201 qui va se fixer sur les cellules du cœur en fonction du débit sanguin coronarien. On peut donc voir sur le **cœur est bien irrigué**. On détecte seulement le réarrangement dû à la CE.