

## Les transformations radioactives

*Pareil que les autres fiches, une version complète du cours sera postée ultérieurement*

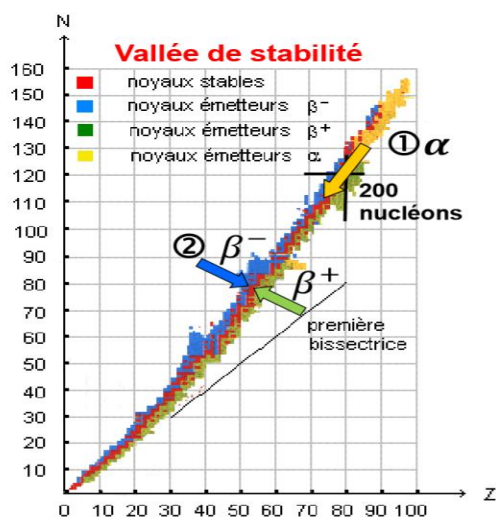


### 1/ Généralités :

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 radioactive  $\lambda$  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  $\alpha$** .
- ♥ Ceux avec un **excès de protons** : la **radioactivité  $\beta^+$** .
- ♥ Ceux avec un **excès de neutrons** : la **radioactivité  $\beta^-$** .
- ♥ 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**

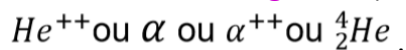
Mais la **masse totale ne se conserve pas** ! Contrairement au nombre de masse.

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

## II/ La radioactivité $\alpha$ :

La **particule  $\alpha$** , 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) : le noyau d'hélium s'écrit :



La réaction s'écrit donc :  ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}^4_2\alpha$

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**.

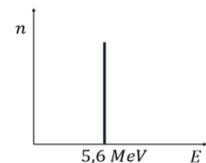
$$\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A - 4, Z - 2) - \mathcal{M}(4, 2)$$

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.

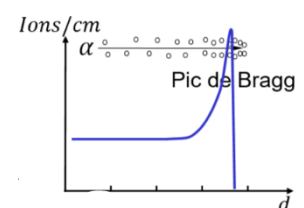
Donc  **$\alpha$  emporte toute l'énergie** disponible. On obtient donc un **spectre de raie** avec une raie **entre 4 et 10 MeV** = énergie disponible.



4. **Le parcours dans la matière :**

La particule  $\alpha$  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 $\beta^-$

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 :



$\beta^-$  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**.

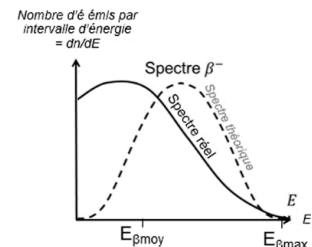
##### 2. Le bilan énergétique est :

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 béta moins (en simplifiant la masse de béta moins disparaît)) **à la masse du noyau père**.

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

##### 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  $\beta^-$  et l'antineutrino (non détectable) donc on détecte que celle du  $\beta^-$ .



Le spectre de  $\beta^-$  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/  $\beta^-$ ). 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  $\beta^-$  va ioniser et détruire le cancer.

## B- La désintégration $\beta^+$ :

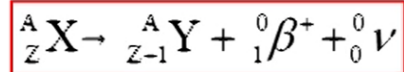
Elle intervient lors d'un **excès de protons** dans le noyau. Il est émis : bêta plus et neutrino. La particule **bêta plus est un positon** : particule identique à l'électron mais avec une charge positive. Il ne pré existe pas dans le noyau mais naît de la transformation.

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.

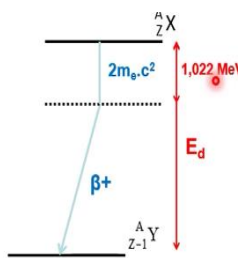
Le **proton inverse un quark up en quark down**.



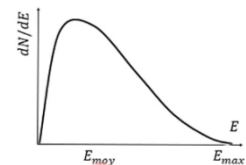
2. **L'énergie totale** :  $\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A, Z - 1) - 2m_e$

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 supérieur à  $2m_e \times c^2$  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 +.



3. **Spectre** : L'énergie disponible est libérée sous forme d'énergie cinétique et réparti 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  $\beta^+$  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

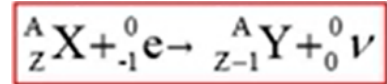
Le **fluor 18** devient de l'oxygène 18 par bêta plus. Il a une demi-vie de 110 min. On le greffe par liaison covalente à une molécule de glucose qui devient alors radioactive émettrice de photons qui seront détectables. Or les cellules tumorales sont très avides en glucose. Donc ce glucose entre la 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 : Noyau père+ électron = Noyau fils avec Z-1+ neutrino

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



#### 2. Bilan énergétique :

Puis on la multiplie encore une fois par  $c^2$  si m (en kg) mais **on y enlève l'énergie de liaison de l'électron capturé** qui est l'énergie seuil.

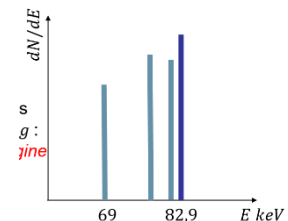
$$E_d = [M(A, Z) - M(A, Z - 1)] \times c^2 - (E_i)$$

Energie de liaison de l'e<sup>-</sup> capturé

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

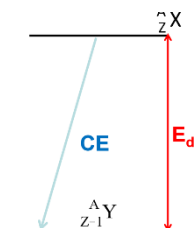


Cependant il y a un **spectre indirecte lié au réarrangement du cortège électronique**.

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 ( $E = E_K - E_L$ ) ou d'électron de Auger ( $E = [E_K - E_L] - E_L$ ). 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 :

**Scintigraphie 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.

#### IV/ Transformation isomérique :

Les **isomères** sont des nucléides avec le même nombre de protons et de neutrons mais un **niveau d'énergie du noyau différent**. Donc pas de changement d'élément mais un **changement de niveau d'énergie**.

Il y a trois niveaux d'énergie différents :

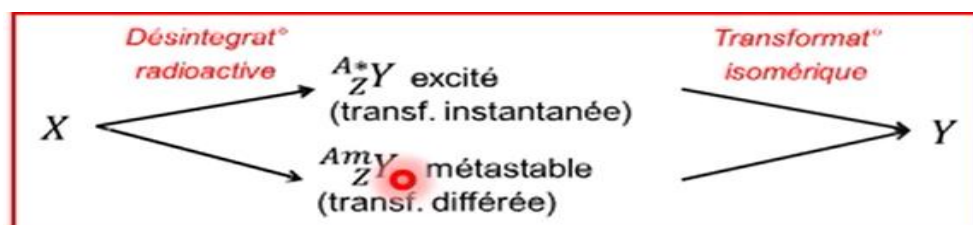
- ♥ **Niveau fondamental** : forte énergie de liaison des nucléons donc stabilité maximale au dépend de la masse de chacun des nucléons. La masse du noyau est minimale. Difficulté à céder de l'énergie supplémentaire. Il a un niveau d'énergie disponible plus faible : **cohérence maximale**.
- ♥ **Etat excité** : niveau d'énergie supérieur, noyau instable, atome perturbé. Fait suite à une transformation radioactive, état temporaire. Transformation isomérique arrive **très rapidement** pour retrouver l'état fondamental.
- ♥ **Etat métastable** : atome perturbé et **instable** avec un excédent énergétique. Fait suite à une première réaction radioactive. Mais période radioactive plus longue. Met **plus de temps** à revenir à l'état fondamental.

##### État fondamental

- Stabilité maximale
- Masse minimale
- Niveau d'E minimal

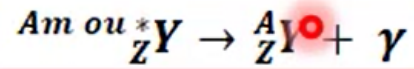
##### état excité et métastable

- Instable
- Masse ↑
- Niveau d'E est ↑



**A- Emission  $\gamma$  :****1. Réaction :**

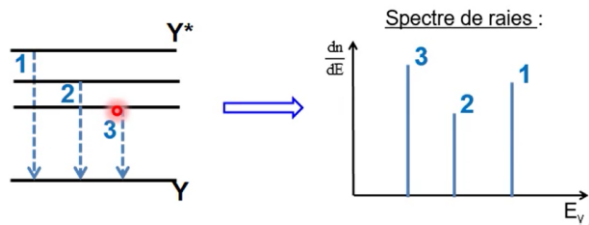
Noyau fils faisant suite à une transformation radioactive qui par désexcitation  $\gamma$  va donner un fils dans son état fondamental et un **rayonnement  $\gamma$  (= rayonnement électromagnétique) d'origine nucléaire.**

**2. Bilan :** on calcule d'abord la différence de masse ( $\gamma$  n'a pas de masse) :

$$\Delta M = \mathcal{M}(Am, Z) - \mathcal{M}(A, Z) \quad \begin{matrix} E_d = \Delta M \times c^2 \\ E_\gamma = \Delta M \times 931.5 \end{matrix}$$

**3. Spectre :** Emission d'un **seul photon qui emporte toute l'énergie** car l'énergie de recul est négligeable.

C'est un spectre électromagnétique nucléaire de raie(s) qui correspond à la différence d'énergie entre les deux états isomériques des deux noyaux. Souvent il existe plusieurs niveaux d'énergie que  $\gamma$  peut prendre mais le photon émis aura une énergie différente selon la désexcitation donc plusieurs raies



On peut donc réaliser un schéma bilan des transformations réalisés. On représente la première réaction qui peut être isobarique par exemple qui formera un noyau Y fils excité qui se désexcitera par un photon  $\gamma$  ou conversion interne pour rejoindre son état fondamental. **Spectre de raie électromagnétique d'origine nucléaire.**

**4. Parcours dans la matière :** On étudie le parcours du photon  $\gamma$  car seul émis. C'est un rayonnement électromagnétique avec des interactions non obligatoire. Il est très pénétrant et **provoque des ionisations** par collisions avec les électrons : effet photo électrique, effet Compton et création de paires.**5. Applications biomédicales :** **Iode 131** capté lors du **cancer de la thyroïde**. Or l'Iode 131 est un émetteur  $\beta^-$ . Il se fixe dans les cellules, émet un électron et ionise les cellules avoisinantes ce qui permet de détruire les cellules cancéreuses. Mais elle aboutit au Xénon métastable et donc émission d'un photon  $\gamma$  utilisable pour observer la répartition du xénon métastable dans le corps du patient. Ou le technécium qui est utilisé comme un traceur.

Vecteur = GR  
Traceur =  ${}^{99m}\text{Tc}$

Vecteur = biphosphonates  
Traceur =  ${}^{99m}\text{Tc}$

(os pour fracture) (globules rouges)



## B- Conversion interne :

1. **Réaction** : C'est une désexcitation **sans émission de photons ou de particules** ; L'énergie disponible est **transmise à un électron du cortège** et celui-ci sera **expulsé**. L'atome est donc ionisé. Le vide du cortège sera **comblé par réarrangement électronique** (photons de fluorescence et électrons de Auger).

2. **Bilan** :

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

$$E_d = \Delta M \times 931.5$$

$$E_e(\text{électron}) = E_d - E_l$$

Energie rendue disponible par la réaction
Energie de liaison

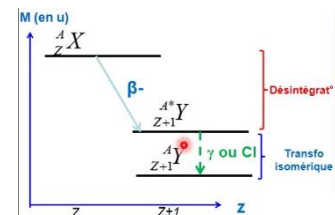
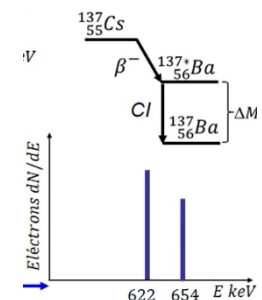
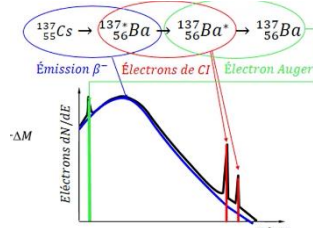
Energie disponible sera libérée sous forme d'énergie cinétique.

3. **Le spectre** : est d'origine atomique, pas nucléaire. Il est direct. Donc spectre électronique direct qui correspond à l'électron éjecté. Il y a aussi un spectre indirect correspondant au réarrangement électronique du cortège. Donc spectre de raies indirect électronique ou électromagnétique.

**Spectre de raies électroniques (électron éjecté).**

**Spectre de raies électromagnétiques (réarrangement).**

**D'origines atomiques.**



4. Même effets biologiques que  $\beta^-$ . Ionisations par interactions avec les électrons. **Non rectiligne.**

Dédicace à mes 2 meilleures amies qui me supportent depuis 7 ans maintenant !



Dédicace à la team FUSHUE3 jvous aime trop fort et jsuis fière d'être tutrice avec vous pour vivre de belles aventures.  
Et dédicace à la team UE 3 du love



Encore une dédicace à la team du MC, on se soutient depuis 1 an et ce n'est pas fini encore. J'vous love mes entrepreneurs (Thomas, Matilda, Raph, Yamina, Cloé, Clara, Thomas, Thi-Maï, Nico, Yanis et Colin)

Et pour finir dédicace à Ada et Tim, mes parrains/marraines ces 2 années de PACES, qui m'ont tellement soutenue pendant ces années. Merciiii