

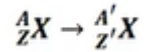
Les transformations radioactives :



Une transformation (=mutation= désintégration) est une modification spontanée du noyau d'un atome.

A- Généralités des généralités :

Spontanément un **noyau instable père** va se désintégrer en un **noyau fils** de **moindre masse** avec potentiellement un A, un N et/ou un Z (donc un élément) différent.



Cette **perte de masse** entraîne une **augmentation de l'énergie de liaison** ce qui se traduit par donc une **libération d'énergie** sous forme d'une **particule** ou d'un **photon** avec **perte de masse**.

Ce phénomène 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.

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

La radioactivité est un **phénomène naturel ou artificiel** où un noyau va vouloir se débarrasser d'un excédent d'énergie.

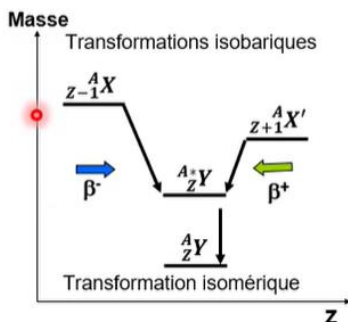
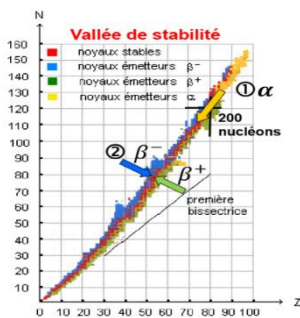
La radioactivité naturelle est partout et concerne 51 noyaux radioactifs naturels (274 stables). Elle est dans les rayonnement cosmiques (radioactivité tellurique issue du magma primitif), dans les eaux, les aliments, les gaz (Radon 222) etc...

B- Historiquement :

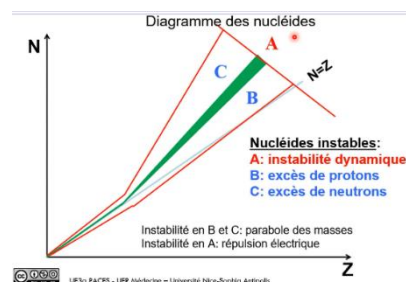
Qui ?	Quand ?	Quoi ?
Becquerel	1896	Expériences sur la fluorescence des sels de minerai d'uranium et découvre les rayons U
Pierre et Marie Curie	1898	Les rayons U deviennent la radioactivité
Rutherford et Villard	1900	Isolent les rayonnement γ , α et β issus de l'uranium et radium
Frédéric + Irène Joliot Curie	1934	Découvrent la radioactivité artificielle
	1960	Les 1 ^{ères} applications médicales font leur apparitions

C- La classification :

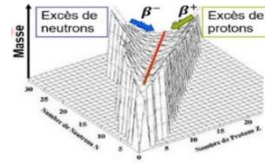
Elle se fait sur la forme d'un graphe où l'on voit le type de radioactivité en fonction du nombre de neutron et de proton.



- Les **noyaux** avec un nombre de nucléons **supérieurs à 200** subissent la **radioactivité α** .
- Excès de protons** : la radioactivité **$\beta+$** , en dessous de la vallée.
- Excès de neutrons** : la radioactivité **$\beta-$** , au-dessus de la vallée.
- Il y a aussi les **modifications de l'énergie** par désexcitation mais il n'y a pas de modification de la nature du noyau : **isomérique**. 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**. Ils obtiendront ainsi une stabilité maximale. La libération d'énergie se fait sous forme de rayonnements.



La **vallée de la stabilité** est représentée sur le même graphique mais avec une notion de 3D avec la masse. Il s'agit d'une **zone où les noyaux stables ont une masse plus faible et donc sont plus stables** que ceux avec une masse supérieure à A constant. Il y a donc pour les noyaux instables une évolution vers une masse minimale à A constant. Ils se dirigent vers le fond de la vallée (on parle de descente dans la vallée de stabilité).

Les transformations radioactives obéissent à des **lois de conservations TOUJOURS APPLIQUEES**.

- ♥ Conservation de la **charge Z et du nombre de nucléons**
- ♥ 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.

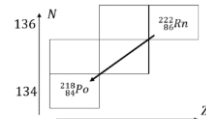
TOUTES LA RADIOACTIVITE TEND VERS UNE MASSE MINIMALE ET UNE EI MAX.

II/ La radioactivité α :

La particule α est le **noyau de l'atome d'Hélium** (A=4 ; Z=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 lourds de **plus de 200 nucléons**.

Réaction de désintégration (conservation de Z et A) : La réaction s'écrit :

$${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \alpha$$
 On obtient donc un nouvel élément fils car le Z change.



Bilan masse énergie (conservation de E) :

On soustrait l'état final à l'état initial.

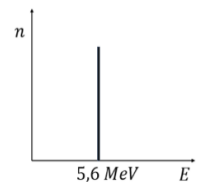
$$\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A - 4, Z - 2) - \mathcal{M}(4, 2)$$

On fait la ΔM en soustrayant la masse de la particule d'hélium et celle du noyau fils au noyau père.

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.

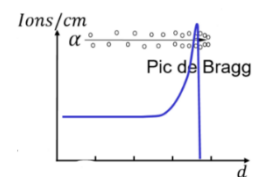
Le spectre (conservation de la quantité de mouvement) :

L'énergie disponible est libérée sous forme **d'E cinétique partagée entre le noyau fils et la particule α**. Le noyau fils possède une énergie cinétique de recul qu'on considère égale à zéro car sa masse étant beaucoup plus élevée que celle de la particule alpha, sa vitesse sera très faible. Donc on considère que **α emporte toute l'énergie disponible**. On obtient donc un **spectre de raie** avec une raie entre 4 et 10 MeV= énergie disponible.



Le parcours dans la matière :

La particule **α est lourde** comparée aux électrons et 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**.



Ce sont des interactions obligatoires donc α est arrêté par du papier.

Les applications biomédicales

- ♥ **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.
 - ♣ Le radon 222 est un descendant gazeux de l'uranium 238 qui peut induire 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.

Les transformations isobariques :

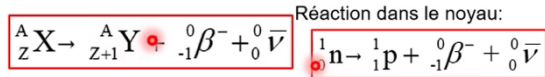
Ce sont des réactions qui se passent avec un nombre de nucléons constants.

III/ La désintégration β^- :

Elle intervient s'il existe un **excès de neutrons** dans le noyau. Il y a une émission d'une particule **béta-** et d'un **antineutrino**. Il y a une « perte » d'un neutron et un « gain » d'un proton par changement de nature d'un neutron en proton.

Réaction de désintégration :

Un neutron devient un proton et libère un antineutrino et un β^- .



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 de la détecter. Il est très pénétrant et non ionisant. Probabilité d'interagir en traversant la Terre de 10^{-10} . Ce n'est pas un REM. Son existence est à l'origine un postulat pour expliquer le spectre de la béta -.

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

Le bilan énergétique :

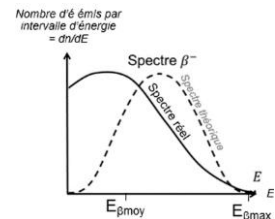
Il y a une perte de masse des éléments : **la masse du noyau père est supérieure** à celle des masses des autres particules. La **différence de masse** est calculée : $\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A, Z + 1)$

Pour calculer l'énergie de la désintégration on multiplie la différence de masse fois 931,5 Pour des MeV (M en u) ou fois c^2 pour E en joule (M en kg).

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

Schéma de la désintégration :

L'énergie est convertie en **énergie cinétique emporté par les particules émises**. Il n'y a pas d'émission de photons électromagnétiques. Elle se **répartit aléatoirement** entre le noyau fils (énergie de recul mais négligeable), l'antineutrino (non détectable) donc **on détecte que l'énergie du béta moins**.

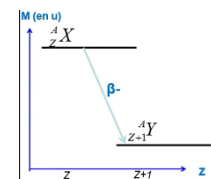


Le spectre de béta moins est un **spectre électronique continue** avec en abscisse et en ordonnée le nombre d'électron. Elle va de 0 à E_{\max} (lorsqu'il a capté toute l'énergie). Le spectre est **décalé vers la gauche** à cause de la force d'**attraction coulombienne**.

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

L'énergie moyenne est égale au tiers de l'énergie maximum.

La hauteur entre les deux atomes est due à la différence de masse et à l'énergie libérée.



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. Ils sont arrêtés par une feuille de métal.

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**. C'est de la radiothérapie.

Il va rentrer dans les follicules thyroïdiens et va émettre son béta - qui va détruire les cellules thyroïdiennes mais aussi le cancer.

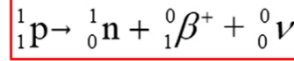
IV/ La désintégration β^+ :

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 n'a pas d'origine nucléaire.

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

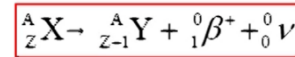
La réaction :



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.



L'énergie totale :

On utilise une fois de plus la **différence de masse** : on

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

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.

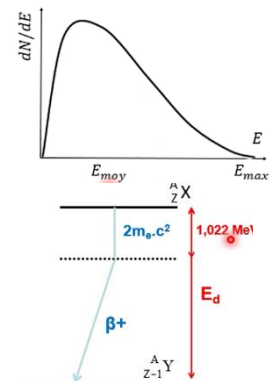
Mais pour que la réaction il faut l'**énergie disponible** soit supérieur à $2m_e \times c^2$ soit **1,022MeV**.

Donc **on vérifie que la différence de masse entre le noyau père et le noyau fils soit supérieure à la masse de 2 électrons.**

C'est le **seuil énergétique** obligatoire à atteindre pour que la réaction ait lieu. Sans ça, il n'y a pas de désintégration bêta +.

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 car le bêta + étant positif il est repoussé par le noyau.
Schéma vers la gauche avec apparition du seuil.



Le parcours dans la matière :

Il va y 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 (180°). 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 : couche de plomb ou béton.

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).

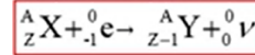
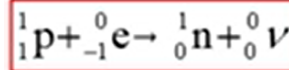
V/ Capture électronique :

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.

Réaction :

Un proton+ un électron = un neutron+ un neutrino

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.

Bilan énergétique :

On calcule la différence de masse : on soustrait la masse du noyau fils au noyau père. 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.**

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

Energie de liaison de l'e⁻ 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.

Le spectre :

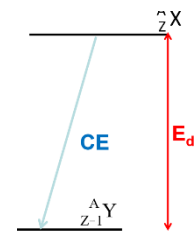
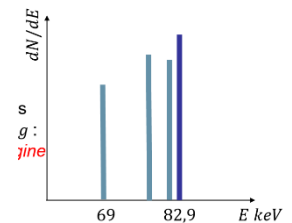
L'énergie libérée est considérée comme entièrement distribuée au neutrino sous forme d'énergie cinétique il n'y a **donc pas de spectre direct de CE**. Cependant il y a un **spectre indirect lié au réarrangement du cortège électronique**.

On s'intéresse au noyau fils donc aux énergies de liaison des électrons du noyau fils 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.

**Parcours :**

Neutrino : pas d'interactions

Photons : effet photoélectrique ou Compton

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 le réarrangement dû à la CE.

VI/ 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 isomériques différents :

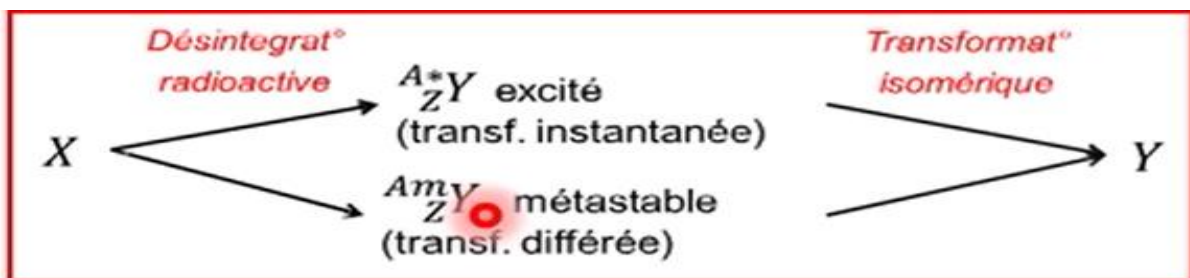
- ♥ **Niveau fondamental** : forte énergie de liaison des nucléons donc **stabilité maximale** au dépend de la masse de chacun des nucléons. La masse du noyau est minimale. Difficulté à céder de l'énergie supplémentaire. Il a un niveau d'énergie disponible plus faible : cohérence maximale.
- ♥ **Etat 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 suit 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

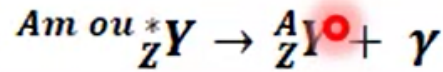
état excité et métastable

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



VII/ Emission γ :

Réaction :



Noyau fils faisant suite à une transformation radioactive qui par désexcitation γ va donner un fils dans son état fondamental et un **rayonnement γ qui est un rayonnement électromagnétique** de même nature que les RX (qui viennent du cortège) mais γ a une **origine nucléaire**.

Bilan :

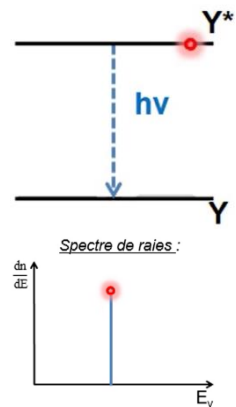
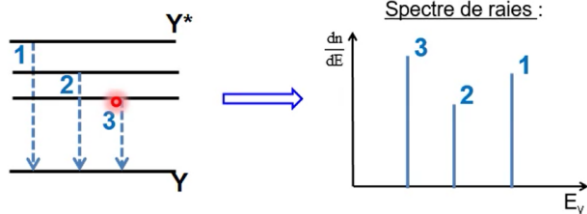
On calcule d'abord la différence de masse (γ n'a pas de masse) puis l'énergie disponible de la même façon :

$$\Delta M = \mathcal{M}(Am, Z) - \mathcal{M}(A, Z) \quad E_d = \Delta M \times c^2$$

$$E_\gamma = \Delta M \times 931.5$$

Spectre :

Emission d'un seul photon qui emporte la totalité de l'énergie car l'énergie de recul est négligeable. C'est un **spectre électromagnétique nucléaire** qui correspond à la différence d'énergie entre les deux états isomériques des deux noyaux. Donc spectre de raie. Souvent il existe plusieurs niveaux d'énergie que Y 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 réalisées. On représente la première réaction qui peut être isobarique par exemple qui formera un noyau Y fils excité qui se désexcitera par un photon γ ou conversion interne pour rejoindre son état fondamental. Les raies naturelles sont plus fines que les raies expérimentales car imprécision de la mesure. **Spectre de raie électromagnétique d'origine nucléaire**.

Parcours dans la matière :

On étudie le **parcours du photon γ** 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.

Applications biomédicales :

Iode 131 capté lors du **cancer de la thyroïde**. Or l'Iode 131 est un émetteur β^- . 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 γ utilisable pour observer la répartition du xénon métastable dans le corps du patient. Ou le **technécium** qui est utilisé comme un **traceur**.

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

(os pour fracture)

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

(globules rouges)

VIII/ Conversion interne :

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).

Bilan :

Pour calculer l'énergie disponible, toujours pareil : défaut de masse*931,5. L'énergie disponible sera libérée sous forme **d'énergie cinétique**. Pour la calculer on **soustrait l'énergie de liaison de l'électron expulsé à l'énergie disponible**.

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

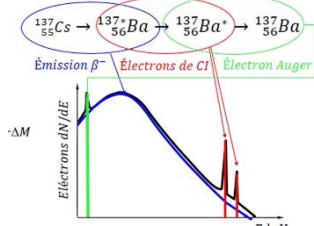
$$E_d = \Delta M \times 931.5$$

$$E_c(\text{électron}) = E_d - E_l$$

Energie rendue disponible par la réaction
Energie de liaison

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.



Exemple: le Baryum 137 excité ($^{137}_{56}\text{Ba}^*$)

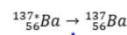
$$\Delta M = 660 \text{ keV}$$

$$E_{K(56\text{Ba})} = -37,4 \text{ keV}; \quad E_{L(56\text{Ba})} = -5,6 \text{ keV}$$

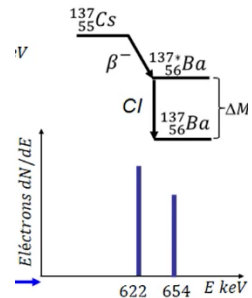
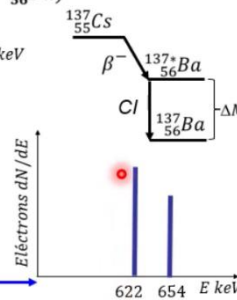
$$E_c(e_K) = 660 - 37,4 = 622,6 \text{ keV}$$

$$E_c(e_L) = 660 - 5,6 = 654,4 \text{ keV}$$

- Spectre électronique de raie par réarrangements atomiques

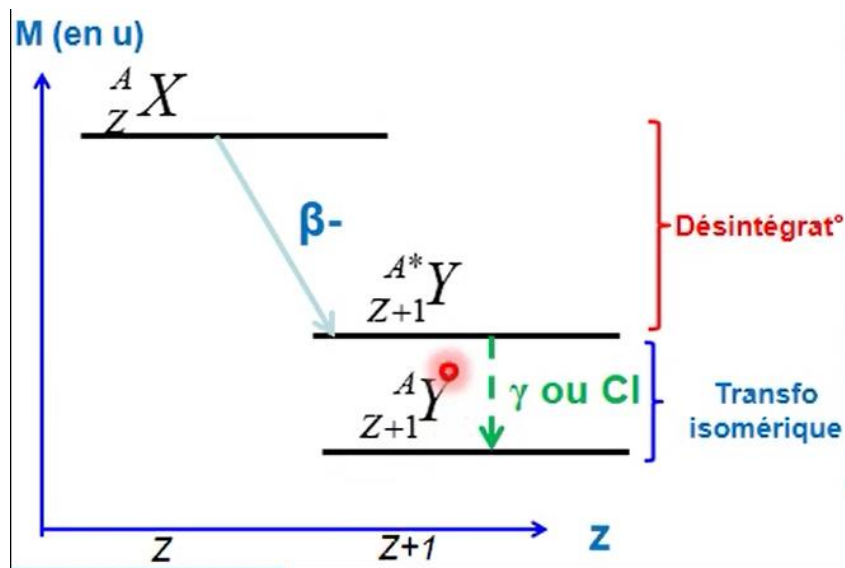


électrons de Cl



Parcours dans la matière :

Même effets biologiques que β^- . Profondeur de quelques millimètres dans les tissus. Ionisations par interactions avec les électrons. Non rectiligne. Arrêté par le métal.

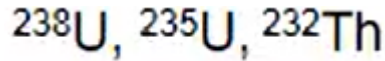


IX/ Familles radioactives :

Elles concernent les **radioéléments naturels** uniquement. Elles concernent les **noyaux lourds** dans la zone d'instabilité dynamique soit la radioactivité α .

Elles correspondent à une **suite de réaction** qui descendent d'un chef de file qui se désintègre en produit de désintégration qui se désintègre etc... Pour constituer une **chaîne de désintégration** qui aboutissent à un des **4 isotopes stables du plomb** quoiqu'il arrive.

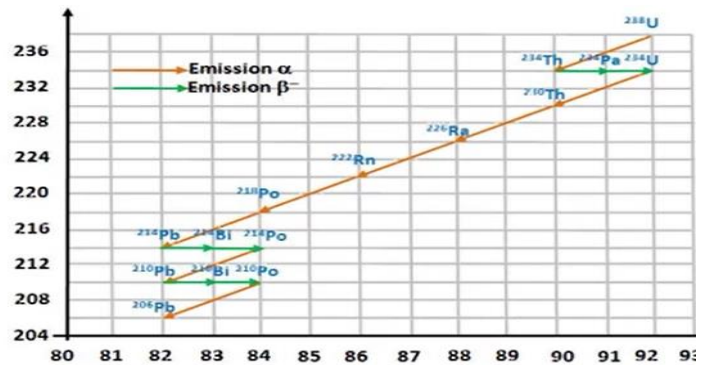
Chaque élément a sa propre $\frac{1}{2}$ vie donc plus ou moins rapides.



Il y a 3 familles :

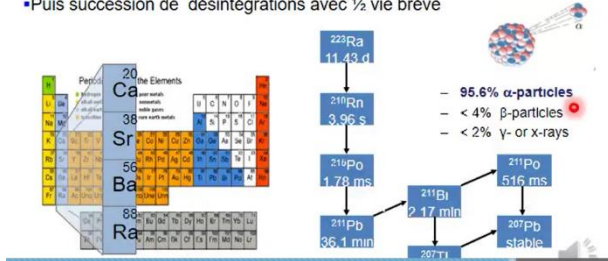
Chaque **chef de file a une $\frac{1}{2}$ vie de plusieurs milliards d'année** (plus grand ou égal à l'âge de la Terre). Avant il y avait un 4^{ème} chef de famille : le Neptunium 237 qui a disparu car sa demi-vie initiale était de 2 144 000 ans.

Les désintégrations sont de types α ou β^- . Leur nombre de masse A peut s'écrire sous la forme $4n+2$.



Applications biomédicales: le Radium 223 (^{223}Ra)

- Appartient à la famille de ^{238}U ($4n+3$)
- Analogue du calcium : se fixe sur l'os nouvellement formé
- La demi-vie de la 1^{ère} désintégration α est de 11,4 jours
- Puis succession de désintégrations avec $\frac{1}{2}$ vie brève



Applications biomédicales: le Radium 223 (^{223}Ra)

- Indication: traitement des métastases osseuses du cancer de prostate
- Parcours dans la matière de quelques micromètres

