



Tut'Rentrée – Cours 4

Transformations radioactives

I. Généralités

1. Définition

Une transformation radioactive est une **mutation/désintégration spontanée** d'un noyau atomique : un **noyau père**, **instable**, se transforme en **noyau fils** de **moindre masse**.

On a ainsi une perte de masse, donc une augmentation du défaut de masse, convertie en énergie (**énergie de liaison E_L**). Cette énergie libérée est emportée par une particule ou un photon.

Dans la nature, les noyaux sont **majoritairement stables** donc **non radioactifs** (274 concernés). Il en existe cependant des spontanément instables et radioactifs (51) : la radioactivité est donc un **phénomène naturel** et est omniprésente ! (*rayonnements cosmiques, écorce terrestre, eau, et même le corps humain*)
On peut également fabriquer des noyaux radioactifs : c'est la **radioactivité artificielle**.

2. Classification

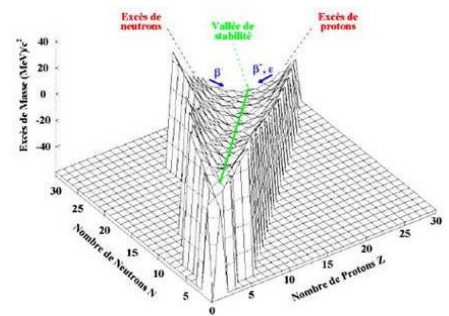
Il existe 3 types de transformations radioactives :

- Radioactivité α ou par partition : pour les **noyaux lourds** qui ont un grand nombre de nucléons (**$A > 200$**). Ils émettent une particule α (noyau d'Hélium) pour retrouver leur stabilité.
- Transformations isobariques : pour les **noyaux instables** autour de la **vallée de la stabilité**. Ils sont trop riches soit en neutrons soit en protons et transforment donc un neutron en proton ou inversement.
/!\ ATTENTION : ils **conservent leur nombre de masse A** ! (« isobare » = « même A »)
- Transformations isomériques : pour les noyaux en **excès d'énergie**. Ils se déséxcitent sans modification du nombre ou du type de nucléons : le noyau **ne change pas de nature**.

3. Evolution vers une masse inférieure

Le but des transformations radioactives est toujours de **perdre de la masse** afin d'**augmenter l' E_L** donc d'**augmenter E_L/A** et donc d'**augmenter la stabilité** (rappel : les éléments les plus stables ont leur E_L/A proche du maximum $\approx 8,5 \text{ MeV/nucléon}$ → cf cours 3)

Sur la vallée de stabilité 3D ci-contre, on voit bien qu'à nombre de nucléons égal, les noyaux les plus stables ont une masse inférieure.



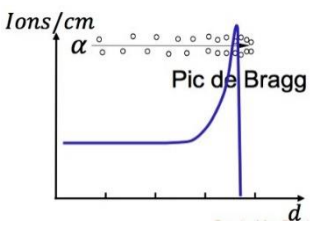
4. Les lois de conservation des transformations radioactives

Conservation nb de nucléons et de charges → A et Z idem

Conservation énergie totale du système → E_{tot} idem

Conservation quantité de mouvement → $p = mv$ idem

II. Radioactivité α ou par partition

Généralités	<p>=noyau père lourd se désintègre en noyau fils plus léger avec émission d'une particule α.</p> <p>Particule α = noyau d'Hélium ($2p+2n$). C'est le seul noyau complexe émis spontanément, car il est particulièrement stable (doublement magique, $E_L/A = 7 \text{ MeV/nucléon}$).</p> <p>Radioactivité efficace car perte de 4 nucléons en même temps.</p>
Réaction de désintégration	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; text-align: center;"> ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}_2^4\alpha$ </div> <p>Z change : élément fils Y différent du père X</p>
Bilan masse-énergie	<p>$\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A - 4, Z - 2) - \mathcal{M}(4, 2)$</p> <p>Energie disponible : $E_d[\text{MeV}] = 931,5 \Delta M$</p> <p><i>Point astuce</i> : à chaque fois que vous devez trouver l'E_d, multipliez votre ΔM par 1000 (donc on décale la virgule de trois rangs vers la droite) puis dans les réponses proposées par le QCM vous prenez la valeur un peu inférieure à celle que vous avez trouvée.</p>
Spectre énergétique	<p>L'énergie est libérée sous forme d'énergie cinétique E_c, partagée entre les noyaux formés.</p> <p>Ici, le noyau fils est trop lourd, on considère donc que la particule α emporte toute l'E_c : on a un spectre de raie ($E_{raie} = E_c$; entre 4 et 10 MeV)</p> <p><u>Remarque</u> : en réalité, le noyau fils emporte un peu d'énergie, c'est « l'E_c de recul », mais elle est négligeable.</p>
Parcours dans la matière	<p><u>La particule α</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> Est lourde \rightarrow trajectoire rectiligne, courte Est non relativiste \rightarrow vitesse faible Est chargée positivement \rightarrow attire les électrons et provoque des ionisations : elle est directement ionisante selon le pic de Bragg <u>Pic de Bragg</u> = la probabilité d'ionisation augmente brutalement à partir d'une certaine distance et maximum d'ionisations en fin de parcours puis tout s'arrête \rightarrow dépôt d'énergie concentré sur une courte distance Interactions obligatoires avec la matière \rightarrow arrêtée par une feuille de papier 
Applications biomédicales	<p>➤ <u>Radioprotection</u> : si <u>exposition externe</u>, aucun danger car les particules α sont arrêtées par la peau ; si <u>exposition interne</u>, possibles ionisations dans les tissus et les \varnothing.</p> <p><i>Exemple : Radon 222 inhalé expose nos poumons à la radioactivité α</i></p> <p>➤ <u>Radiothérapie</u> : dépôt d'énergie localisé (pic de Bragg) représente un intérêt majeur thérapeutique ; c'est en voie de développement !</p> <p><i>Exemple : Bismuth 263 dans le ttt du glioblastome, tumeur cérébrale</i></p>

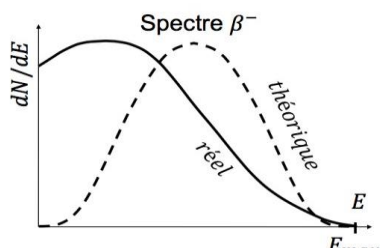
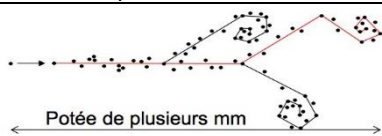
III. Transformations isobariques

Ces transformations se produisent à nombre de masse **A constant** !!

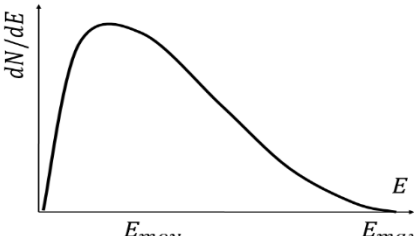
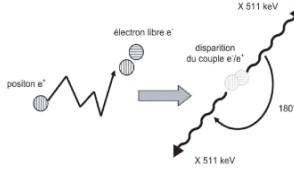
Mais la répartition neutron/proton va changer par inversion des quarks up et down, donc **N et Z changent** : l'élément **fils** est **différent** de l'élément père.

Il existe 3 types de transformations isobariques possibles :

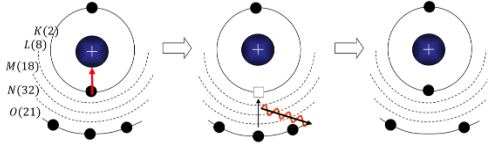
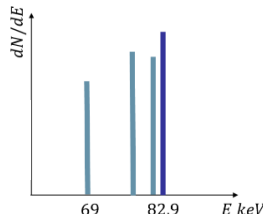
1. Transformation β^-

Généralités	<p>Concerne les noyaux ayant un excès de neutrons. 1 n se transforme en 1 p par inversion d'un quark : $n = udd \rightarrow p = uud$ = noyau père se transforme en noyau fils + 1 électron (d'origine nucléaire) + 1 antineutrino (charge nulle et masse quasi nulle) /\ ATTENTION : l'électron et l'antineutrino proviennent en fait de la réaction de dissociation du neutron, instable hors du noyau !</p> ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e + {}_0^0\bar{\nu}$
Réaction de désintégration	${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + {}_{-1}^0\beta + {}_0^0\bar{\nu}$ <p>A constant mais Z change : élément fils Y différent du père X</p>
Bilan masse-énergie	$\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A, Z + 1)$ <p>/!\ on ne prend pas en compte la masse de l'antineutrino</p> <p>Energie disponible : $E_d [MeV] = 931,5 \Delta M$</p>
Spectre énergétique	<p>L'énergie est libérée sous forme d'énergie cinétique E_c, partagée entre les particules formées. Ici, le noyau fils est trop lourd donc son « E_c de recul » est négligeable. L'E_c se répartie donc au hasard entre β^- et $\bar{\nu}$ (indétectable) : spectre continu avec $E_{max} = E_d$. /\ Seul β^- est détectable \rightarrow on parle du spectre de β^- seulement !</p> <div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 20px;"> <p><u>Spectre théorique</u> : va de 0 (cas où $\bar{\nu}$ emporterait toute l'énergie) à E_{max} (cas où β^- emporterait toute l'énergie). <u>Spectre réel</u> : décalé vers la gauche car il y a des interactions coulombiennes entre β^- et le noyau qui fait que les β^- d'énergie trop faible ne pourront pas s'extraire du noyau et ne seront pas détectés.</p> </div> </div>
Parcours dans la matière	<p><u>La particule β^-</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> est relativiste \rightarrow vitesse proche de celle de la lumière est chargée \rightarrow provoque des ionisations par collisions avec d'autres électrons parcours court (qq mm) et irrégulier/non rectiligne interactions obligatoires avec la matière \rightarrow arrêtée par une feuille métallique  <p>Potée de plusieurs mm</p>
Applications biomédicales	<p><u>Iode 131</u> : isotope radioactif de l'iode 127, on l'utilise dans le ttt du cancer de la thyroïde (glande indispensable car sécrétrice d'hormones) et de ses métastases, dans le cadre de la radiothérapie métabolique.</p>

2. Transformation β^+

Généralités	<p>Concerne les noyaux ayant un excès de protons.</p> <p>1 p se transforme en 1 n par inversion d'un quark : $p = uud \rightarrow n = udd$ = noyau père se transforme en noyau fils + 1 positon (antiparticule de l'électron) + 1 neutrino (charge et masse négligeables)</p> <p>/!\ ATTENTION : le positon et le neutrino ne préexistent pas dans le noyau mais proviennent en fait de la réaction de dissociation du proton !</p> ${}_1^1p \rightarrow {}_0^1n + {}_{+1}^0\beta + {}_0^0\nu$
Réaction de désintégration	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; text-align: center;"> ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-1}^AY + {}_{+1}^0\beta + {}_0^0\nu$ </div> <p>A constant mais Z change : élément fils Y différent du père X</p>
Bilan masse-énergie	$\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A, Z - 1) - 2m_e$ <p>$2m_e = 0,0011 u$ <i>(je vous conseille de l'apprendre par cœur c'est plus rapide pour les QCM)</i></p> <p>Energie disponible : $E_d [MeV] = 931,5 \Delta M$</p> <p>/!\ ATTENTION : Cette transformation est particulière car elle est exoénergétique et possède un seuil énergétique :</p> <p>$\Delta M > 2m_e$ soit $\Delta M > 0,0011u$ ou bien $E_d > 1,022 MeV$</p> <p>En dessous de ce seuil, la réaction n'est pas possible ! (QCM++)</p>
Spectre énergétique	<p>L'énergie est libérée sous forme d'énergie cinétique E_c, partagée entre les particules formées.</p> <p>Ici, le noyau fils est trop lourd donc son « E_c de recul » est négligeable. L'E_c se répartie donc au hasard entre β^+ et ν (indéetectable) : spectre continu avec $E_{max} = E_d$.</p> <p>/!\ Seul β^+ est détectable \rightarrow on parle du spectre de β^+ seulement !</p> <div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 20px;"> <p>Il va de 0 (cas où ν emporterait toute l'énergie) à E_{max} (cas où β^+ emporterait toute l'énergie).</p> <p>Pas de décalage vers la gauche car il n'y a pas d'interactions coulombiennes avec le noyau.</p> </div> </div>
Parcours dans la matière	<p>La particule β^+ :</p> <ul style="list-style-type: none"> est chargée et légère \rightarrow provoque des ionisations par collisions avec les électrons jusqu'à épuisement de l'E_c parcours court et irrégulier/non rectiligne provoque en fin de parcours des réactions d'annihilations avec des électrons (sorte de fusion) \rightarrow émission de 2 photons gamma à 180° d'$E = 0,511 MeV$ <div style="text-align: right;">  </div> <p>Les <u>photons gamma</u> (non chargés) interagissent avec la matière de façon indirectement ionisante : ils sont très pénétrants et il faut donc des épaisseurs importantes de plomb/béton pour les atténuer.</p> <p>/!\ ATTENTION : ils ont une origine non directement nucléaire !</p>
Applications biomédicales	<ul style="list-style-type: none"> <u>Radioprotection</u> : plus difficile de se protéger contre les photons. <u>Radiothérapie</u> : en cancérologie, utilisation du FDG (<i>fluoro-deoxy-glucose</i>) pour détecter les z cancéreuses hyperconsommatrices de glucose (car émission β^+ puis détection des photons gamma).

3. Capture électronique (CE)

Généralités	<p>Concerne aussi les noyaux ayant un excès de protons. = noyau père capte 1 électron qui se combine à 1 proton pour donner 1 neutron + 1 neutrino ${}_1^1\text{p} + {}_{-1}^0\text{e} \rightarrow {}_0^1\text{n} + {}_0^0\nu$</p> <p>L'électron capté provient d'une couche électronique profonde (souvent couche K ou L). L'atome père X a alors une vacance électronique → réarrangements de l'atome fils Y par des photons de fluorescence et/ou électron Auger.</p>  <p><u>/!\ ATTENTION</u> : même finalité que β^+ (puisque $1p \rightarrow 1n$) mais le moyen est différent !</p>
Réaction de désintégration	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; text-align: center;"> ${}_Z^AX + {}_{-1}^0\text{e} \rightarrow {}_{Z-1}^AY + {}_0^0\nu$ </div> <p>A constant mais Z change : élément fils Y différent du père X</p>
Bilan masse-énergie	$\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A, Z - 1)$ <p>Energie disponible : $E_d[\text{MeV}] = 931,5 \Delta M$</p> <p><u>Remarque</u> : Il existe un seuil de l'ordre du keV mais facilement atteignable.</p>
Spectre énergétique	<p>L'énergie est libérée sous forme d'énergie cinétique E_c, partagée entre les particules formées. Ici, le noyau fils est trop lourd donc son « E_c de recul » est négligeable. Toute l'E_c est emportée par le neutrino, mais il est indéetectable ! Donc pas de spectre d'origine nucléaire. Par contre, on observe un spectre électromagnétique de raies d'origine atomique, dû aux réarrangements électroniques de l'atome fils.</p> 
Parcours dans la matière	<p>On ne s'intéresse qu'aux <u>photons de fluorescence</u> émis indirectement (car ν indéetectable). Ils sont non chargés donc interagissent avec la matière de façon non obligatoire (indirectement ionisants) et sont atténués par une épaisseur importante de plomb/béton.</p>
Applications biomédicales	<p>Imagerie/scintigraphie cardiaque au Thallium 201 (<i>détection de l'athérosclérose par exemple</i>)</p>

4. Compétition β^+ et CE

Un noyau instable par **excès de proton** a le choix entre les **2 réactions**, qui dépendra de ΔM :

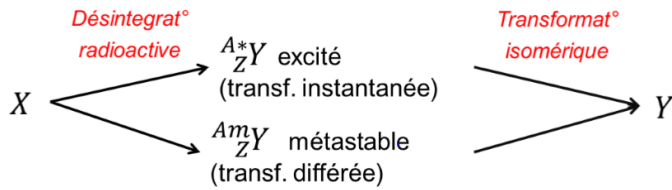
$\Delta M < 1022 \text{ keV}$ ou $< 2m_e \rightarrow$ **CE seulement**
 $\Delta M > 1022 \text{ keV}$ ou $> 2m_e \rightarrow$ **CE ou β^+ possibles**

/!\ QCM +++

IV. Transformations isomériques

Les isomères sont des nucléides ayant les **même Z et A** mais sous **différents états** qui correspondent à **différents niveaux d'énergie** du noyau :

- Etat fondamental A_ZX : niveau d'énergie et masse minimales → **stabilité maximale**
- Etat excité ${}^{A*}_ZX$: niveau d'énergie et masse élevés → très **instable**, retour à l'état fondamental **quasi instantané** ($10^{-12}s$)
- Etat métastable ${}^{Am}_ZX$: niveau d'énergie et masse aussi élevés → **instable** mais retour à l'état fondamental **différé** (*possible plusieurs h*)



Les transformations isomériques sont des **changements d'énergie sans changement de nature du noyau** !

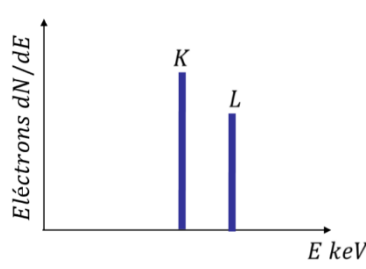
Elles peuvent **succéder à d'autres transformations** radioactives (α , β , CE) pour lesquelles le noyau fils garde un **excédent d'énergie** (Am ou ${}^{A*}_ZY$)

Il existe 2 types de transformations isomériques possibles :

1. Transformation γ

Généralités	= noyau Y père dans un état métastable ou excité se désexcite en noyau Y fils stable par émission d'un photon γ qui emporte le surplus d'énergie . /!\ <u>ATTENTION</u> : le photo γ est un REM d'origine nucléaire (\neq rayons X d'origine atomique)
Réaction de désintégration	${}^{Am} \text{ ou } {}^{A*}_ZY \rightarrow {}^A_ZY + \gamma$ <p>Z ne change pas, même élément !</p>
Bilan masse-énergie	$\Delta M = \mathcal{M}({}^{Am}, Z) - \mathcal{M}(A, Z)$ <p>Energie disponible : $E_d[\text{MeV}] = 931,5 \Delta M = E_\gamma$</p>
Spectre énergétique	<p>Le noyau fils est trop lourd donc son énergie de recul est négligeable. Toute l'énergie E_d est donc emportée par le rayon γ (d'où $E_d = E_\gamma$) : on observe ainsi un spectre électromagnétique de raie(s) d'origine nucléaire. <u>Remarque</u> : il peut y avoir une seule raie si un seul niveau d'énergie ou plusieurs raies si situation complexe avec plusieurs niveaux d'énergie.</p>
Parcours dans la matière	<p>Les <u>rayons γ</u> sont des photons, ils sont donc non chargés et interagissent avec la matière de façon non obligatoire (indirectement ionisants). Ils provoquent des ionisations par collisions avec les électrons, qui entraînent des réarrangements électroniques dans les atomes : effet photo-électrique, effet compton, création de paire... Ils ont un long parcours dans les tissus, et atténués par une épaisseur importante de plomb/béton.</p>
Applications biomédicales	<ul style="list-style-type: none"> ➤ <u>γ-caméra</u> : utilisée en scintigraphie (exemple : ttt cancer de la thyroïde et de ses métastases avec l'iode 131 qui se désintègre d'abord en β^- puis en γ) ➤ <u>Technétium 99m</u> : traceur radioactif en médecine nucléaire (exemple : pour visualiser les voies biologiques du corps grâce à la réaction γ)

2. Conversion Interne (CI)

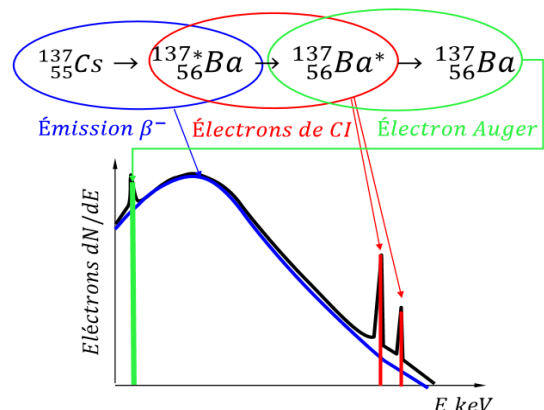
Généralités	= noyau Y père dans un état métastable ou excité se désexcite en noyau Y fils stable par transfert du surplus d'énergie à un électron périphérique . L'atome est alors ionisé (puisque'il lui manque un électron) et subira des réarrangements électroniques avec émission de photons de fluorescence et/ou électrons Auger.
Réaction de désintégration	$Am \text{ ou } {}^A_Z Y^* \rightarrow {}^A_Z Y$ <p>Z ne change pas, même élément !</p>
Bilan masse-énergie	$\Delta M = \mathcal{M}(Am, Z) - \mathcal{M}(A, Z)$ <p>Energie disponible : $E_d [\text{MeV}] = 931,5 \Delta M$</p> <p>Energie cinétique de l'électron éjecté : $E_c = E_d - E_L$ (avec E_L l'énergie de liaison de l'électron à l'atome)</p>
Spectre énergétique	<p>Le noyau fils est trop lourd donc son énergie de recul est négligeable. Toute l'E_d est donc emportée par l'électron sous forme d'E_c : pas de spectre d'origine nucléaire !</p> <p>Par contre, 2 spectres électromagnétiques de raie(s) d'origine atomique : 1 pour l'électron éjecté (valeurs des raies = E_c selon les couches électroniques K, L, ... -exemple ci-contre) et 1 dû aux réarrangements électroniques de l'atome après l'expulsion de l'électron (valeurs correspondant aux photons de fluorescence et/ou électrons Auger).</p> 
Parcours dans la matière	<p><u>L'électron</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> Est une particule chargée → provoque des ionisations par collisions avec d'autres électrons Parcours court (qq ms) et non rectiligne Est arrêté par une feuille métallique <p><u>Remarque</u> : Idem que β^- (sauf que l'électron vient de l'atome et pas du noyau) !</p>

V. Application : spectre électronique réel complet

Souvent dans la réalité, **plusieurs réactions radioactives s'enchaînent** pour que l'élément père retrouve sa **stabilité maximale**, avec passage par des **intermédiaires**. Le **spectre énergétique global** qui en résulte est une **superposition** des spectres de chaque réaction.

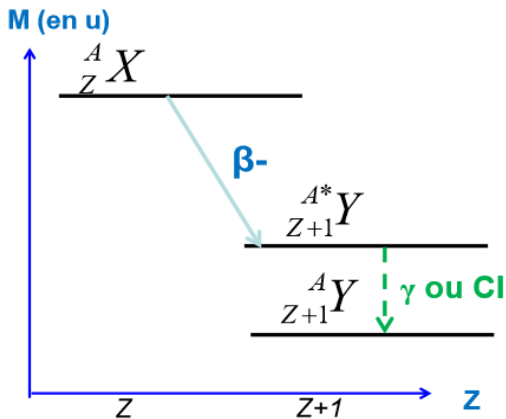
Exemple : désintégration complète du Césium 137

Le spectre complet est une superposition des spectres de la transformation isobarique (partie continue), de la conversion interne du Baryum excité, et de l'émission d'un électron Auger.



VI. Notion de schéma de désintégration

Le schéma/diagramme de désintégration est une **représentation graphique regroupant les principales caractéristiques d'une transformation radioactive**.



- Ordonnée = **masse** des éléments (en u)
- Abscisse = numéro atomique **Z** des éléments
- Segments horizontaux = **niveaux d'énergie**
- Flèches = **réactions** radioactives qui surviennent

Exemple : l'élément père subit une réaction β^- donc il donne un élément fils avec $Z+1 \rightarrow$ décalage d'une unité vers la droite sur l'axe des abscisses (!\ si on avait une réaction β^+ on aurait $Z-1$ donc décalage vers la gauche !)

L'élément fils a un surplus d'énergie donc il subit une transformation isomérique $\rightarrow Z$ idem donc on reste sur la même colonne.

On descend au fur et à mesure car plus les éléments sont stables plus ils sont légers. De même pour les niveaux d'énergie : plus les éléments sont stables et plus leur énergie diminue. In fine l'élément fils est le plus stable donc c'est le plus léger et le moins énergétique \rightarrow c'est le plus en bas !

VII. Notion de famille radioactive

Cette notion ne concerne que les **éléments radioactifs naturels (noyaux lourds)**.

Il s'agit d'une **suite de nucléides descendant d'un même noyau père**, avec une **succession** de désintégrations, **émissions α et $\beta^- \pm \gamma$** seulement, jusqu'à atteindre un **noyau stable** (souvent le plomb).

On distingue **3 familles** définies par 3 noyaux pères : ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th .

La $\frac{1}{2}$ vie des 3 noyaux pères correspond à plusieurs milliards d'années, et chaque élément a une durée de vie propre.

Puisque les désintégrations sont les **émissions α et $\beta^- \pm \gamma$ uniquement**, au sein d'une même famille :

- **A baisse de 4 en 4** (cas émission α) ou **ne change pas** (cas émission β^-)
- **Z varie de 2** (cas émission α) ou **de 1** (cas émission β^-)

Pour retrouver les éléments d'une même famille on se base sur A : ils ont donc **$A \pm 4$**

Exemple descendance de l' ^{238}U :

On a 8 émissions α et 6 émissions β^- pour donner le fils stable ^{206}Pb .

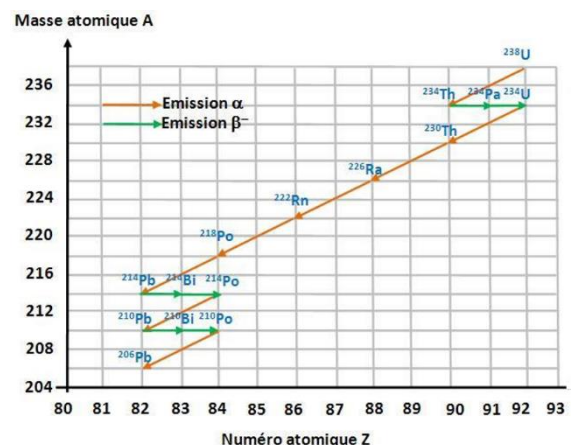
On a bien A qui varie de 4 en 4.

Exemple du fils ^{223}Ra :

Pour trouver à quelle famille il appartient, on remonte de 4 en 4

à partir de 223 : $223 \rightarrow 227 \rightarrow 231 \rightarrow 235$. Donc il descend du père ^{235}U .

Remarque : C'est l'analogue du Calcium \rightarrow utilisé dans le ttt des métastases osseuses du cancer de la prostate.



Fin pour ce dernier cours de TTR ! Il paraît long et compliqué mais ne paniquez pas c'est toujours la même chose au final ! Il suffit de comprendre les mécanismes. Plein de courage à tous, on est avec vous, au taquet !