



UE 3A

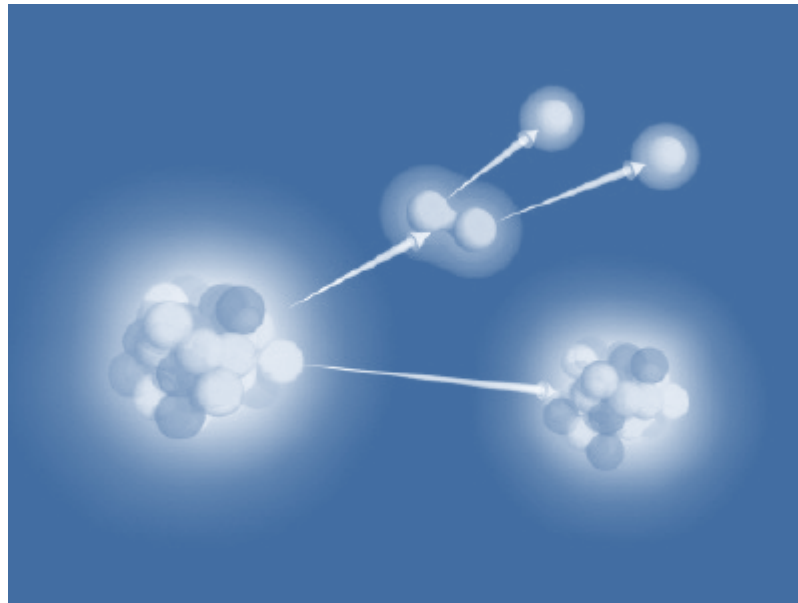
Organisation des appareils et des systèmes : Aspects fonctionnels et méthodes d'étude

Dr Tristan Richard

UE 3A : Organisation des appareils et des systèmes : Aspects fonctionnels et méthodes d'étude

- MODULE 1: Etats de la matière et leur caractérisation
- MODULE 2: Méthodes d'étude en électrophysiologie jusqu'à l'ECG
- MODULE 3: Les très basses fréquences du spectre électromagnétique
- MODULE 4: Le domaine de l'optique (prépare en particulier la microscopie en UE2)
- **MODULE 5: Rayons X et gamma – Rayonnements particuliers**
- MODULE 6: Utilisations thérapeutiques

La radioactivité



La radioactivité

1. Transformations radioactives

1.1 Généralités

1.2 Digramme de stabilité neutron/proton

1.3 Lois de conservation

1.4 Radioactivité α

1.5 Radioactivité β^-

1.6 Radioactivité β^+

1.7 Capture électronique

1.8 Conversion interne

1.9 Emission γ

1.10 Tableau récapitulatif

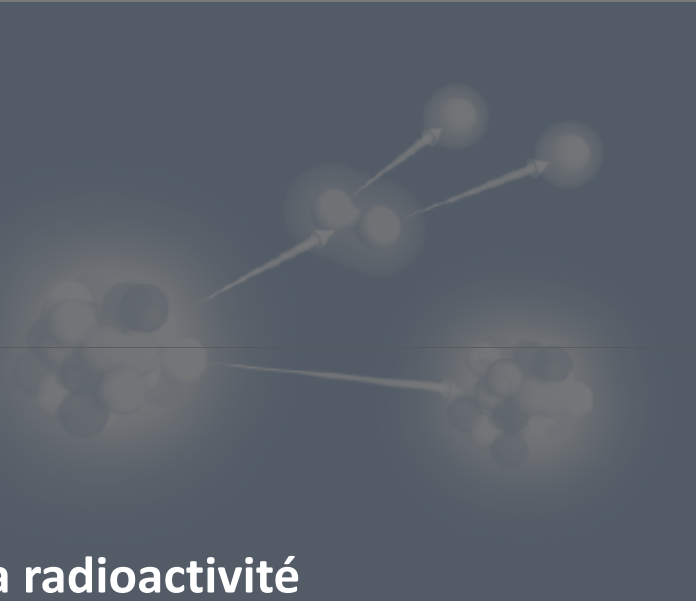
2. Lois générales de la radioactivité

1.1 Constante radioactive

1.2 Activité

1.3 Lois de décroissance radioactive

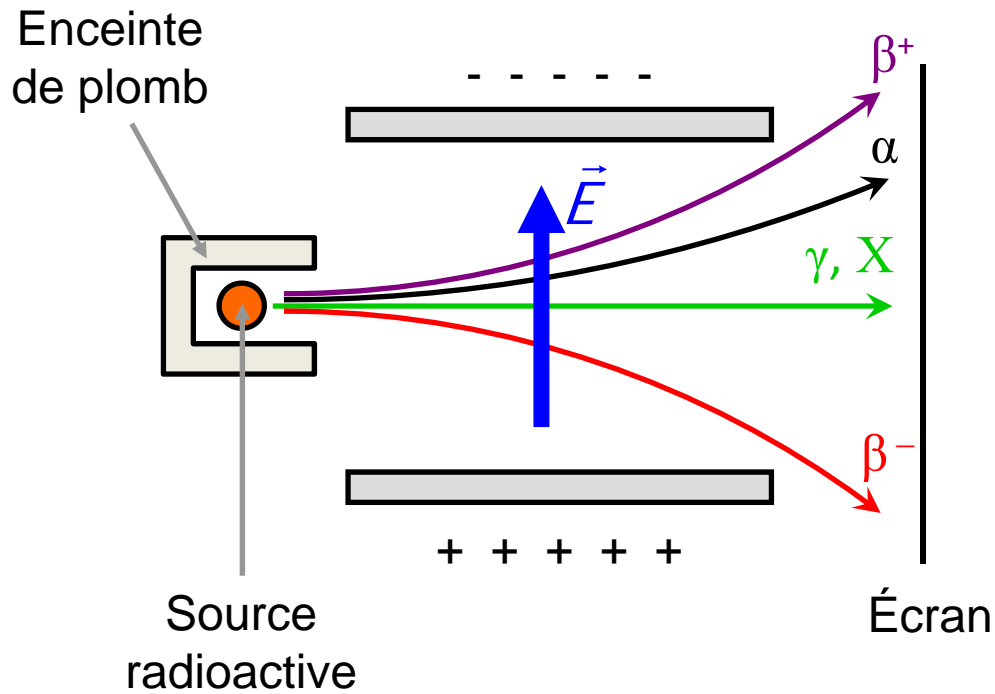
1.4 Les familles radioactives



1. Transformations radioactives

1.1 Généralités

● **Radioactivité**: émission spontanée de rayonnement corpusculaire ou électromagnétique par un noyau



Différents types de rayonnements selon la source radioactive

Particules α : noyaux ${}^4_2\text{He}$

Particules β^- : électrons ${}^0_{-1}\text{e}$

Particules β^+ : positons ${}^0_1\text{e}$

Rayons γ et X : rayonnement électromagnétique (photons)

- 2 critères conditionnent une transformation radioactive

- énergie de liaison par nucléon (B/A)

- B/A élevée \rightarrow noyau stable

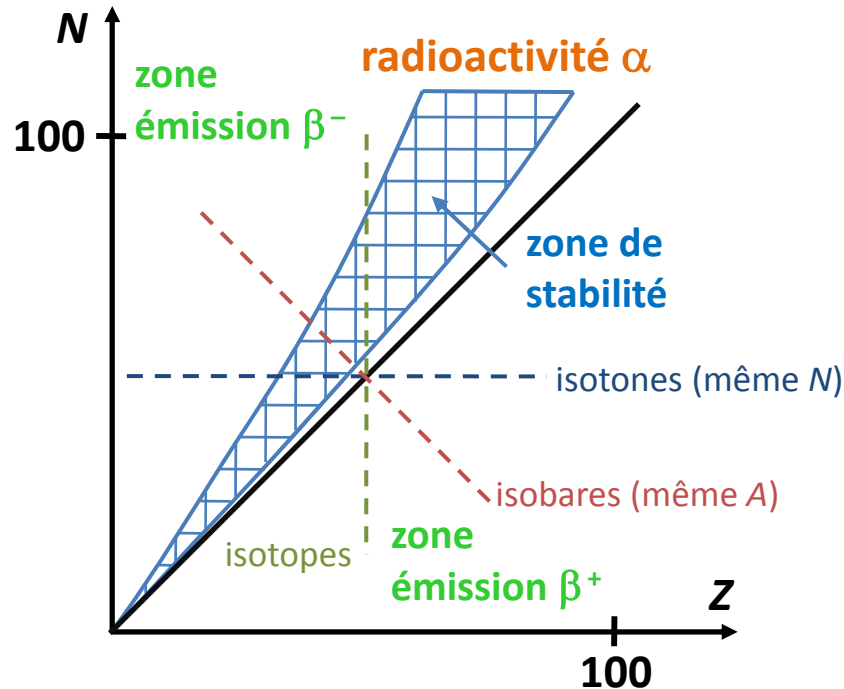
- B/A faible \rightarrow noyau instable

transformation spontanée
radioactivité naturelle

- répartition neutron/proton au sein du noyau

1.2 Diagramme de stabilité neutron/proton

● **diagramme** nombre de neutron en fonction nombre proton $N = f(Z)$



● augmentation Z et $N \rightarrow$ **zone stabilité s'éloigne 1^{ère} bissectrice**

● augmentation $Z \rightarrow$ **noyaux stables $N > Z$**

🔴 **noyaux instables par excès de protons**

- sous ligne de stabilité
- réaction nucléaire interne:



- **émission d'un positon (particule β^+)**

● **noyaux instables par excès de neutrons**

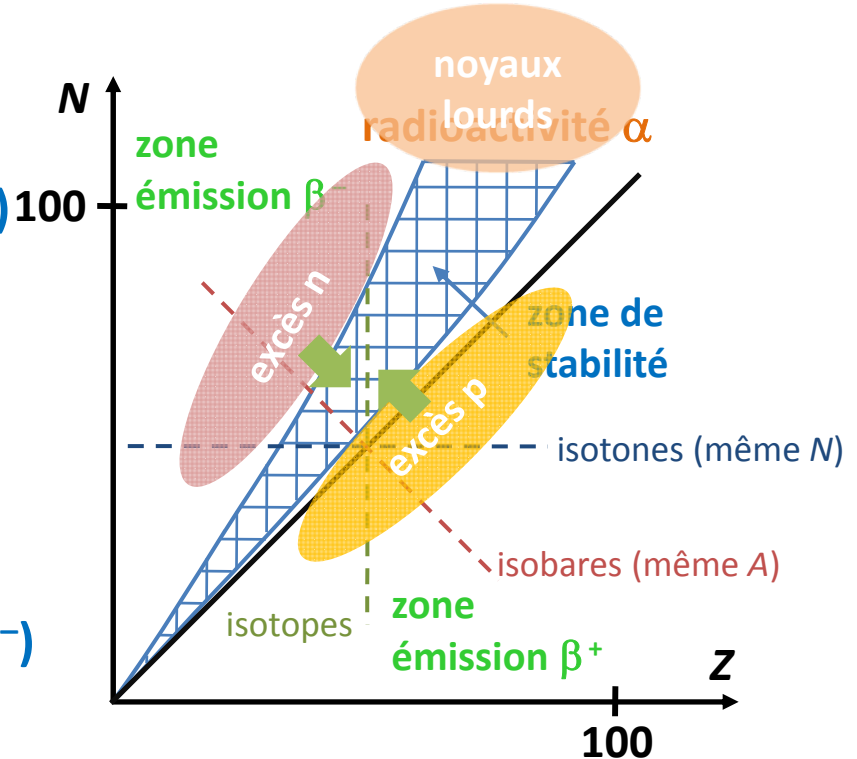
- au-dessus ligne de stabilité
- réaction nucléaire interne:



- **émission d'un électron (particule β^-)**

● **noyaux lourds ($A > 140$)**

- excès nombre N et Z
- **fission spontanée avec émission noyau Hélium (particule α)**



1.3 Lois de conservation

noyau père \longrightarrow noyau fils + particule(s)

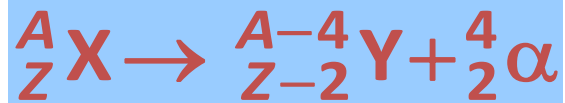
désintégration
radioactive

- conservation de la **charge électrique (Z)**
- conservation du **nombre de nucléons (A)**
- conservation de **l'énergie** (énergies cinétique et de masse)
- conservation de la **quantité de mouvement**

1.4 Radioactivité α

- noyau père: **excès de nucléons** (noyaux lourds)
 - noyau se libère excès masse par émission **particule α : noyau d'hélium**

- **réaction nucléaire:**



- noyau fils éventuellement dans état excité: ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}^{(*)} + {}^4_2\text{He}$

- équation pour les atome (avec e^-): $[{}^A_Z\text{X}] \rightarrow [{}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}^{(*)}]^{-2} + [{}^4_2\text{He}]^{+2}$

- **bilan énergétique** (conservation de l'énergie):

$$\underline{M_X c^2 = M_Y c^2 + M_\alpha c^2 + E c^\alpha + E c^Y}$$

énergie cinétique
noyau fils
(énergie de recul)

énergies de masse (\approx noyaux)

énergie cinétique particule α

● bilan énergie avec **masse atomique** m

● masse atomique atome A_ZX

$$M_X c^2 = M_Y c^2 + M_\alpha c^2 + E_c^Y + E_c^\alpha$$

$$E_c^\alpha + E_c^Y = M_X c^2 - M_Y c^2 - M_\alpha c^2$$

$$E_c^\alpha + E_c^Y = m_X c^2 - m_Y c^2 - m_\alpha c^2$$

📖 masse noyau

$$m_X = M_X + Zm_e$$

📖 masse atome

↩ simplification Σm_e

● **Energie libérée par la réaction Q:**

$$Q = (m_X - m_Y - m_\alpha)c^2$$

● **réaction possible** si $Q > 0$

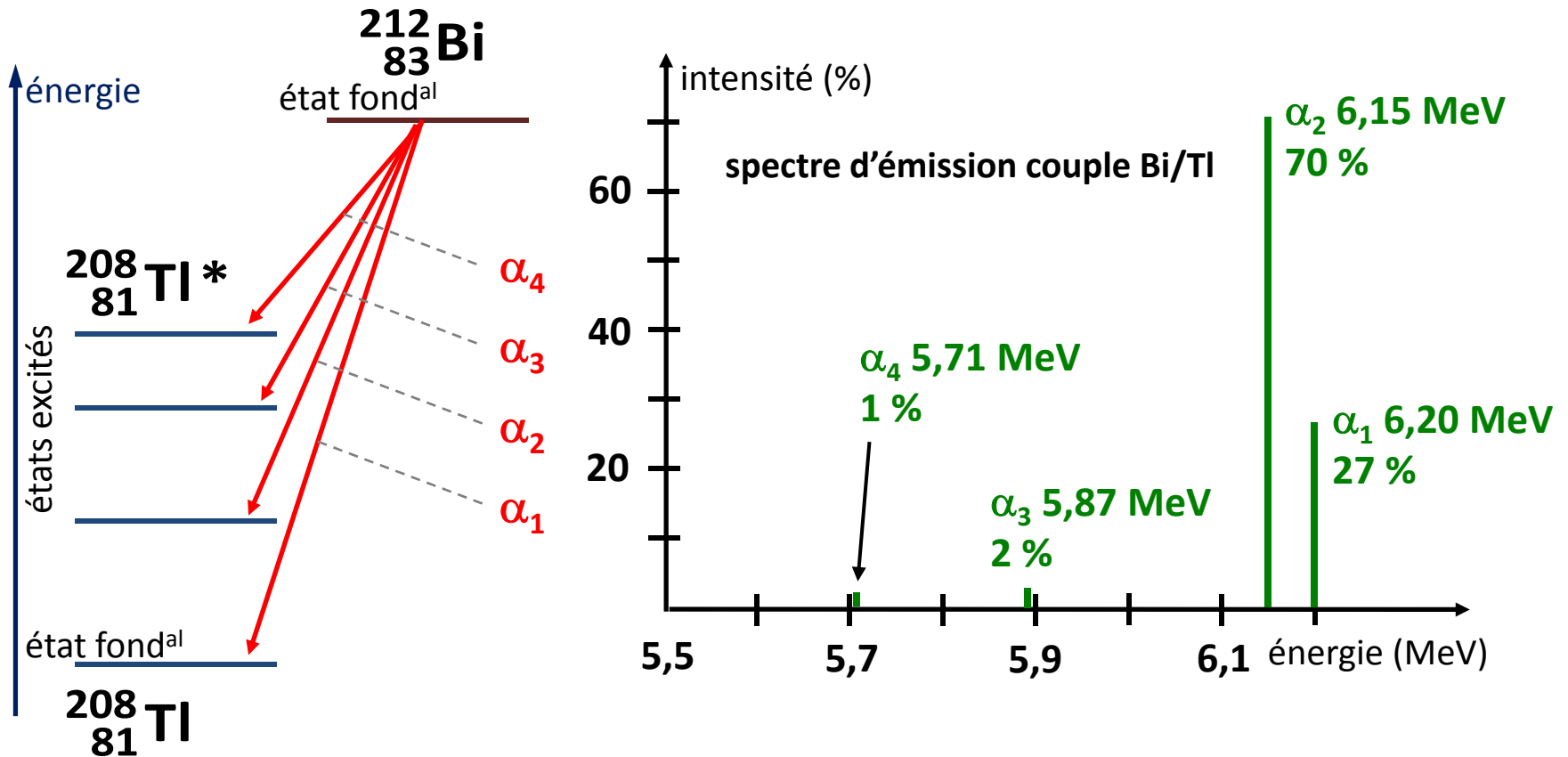
● **$A > 140$** (noyaux lourd)

● conservation de l'énergie et conservation quantité de mouvement:

$$E_c^\alpha = Q \frac{m_Y}{m_Y + m_\alpha} \quad E_c^Y = Q \frac{m_\alpha}{m_Y + m_\alpha}$$

● Spectre énergétique des particules α : **spectre de raies**

● couple **Bismuth/Thallium**



● émission particules α quantifiée

● propriétés particules α

- très énergétiques (3 à 10 MeV)
- lourdes ($6,64 \cdot 10^{-27}$ Kg)
- lentes ($\approx 10^7$ m.s $^{-1}$)
- peu pénétrante

● présence états excités (métastables) → **émission photons γ ($h\nu_\gamma$)**

● couple **Bismuth/Thallium**

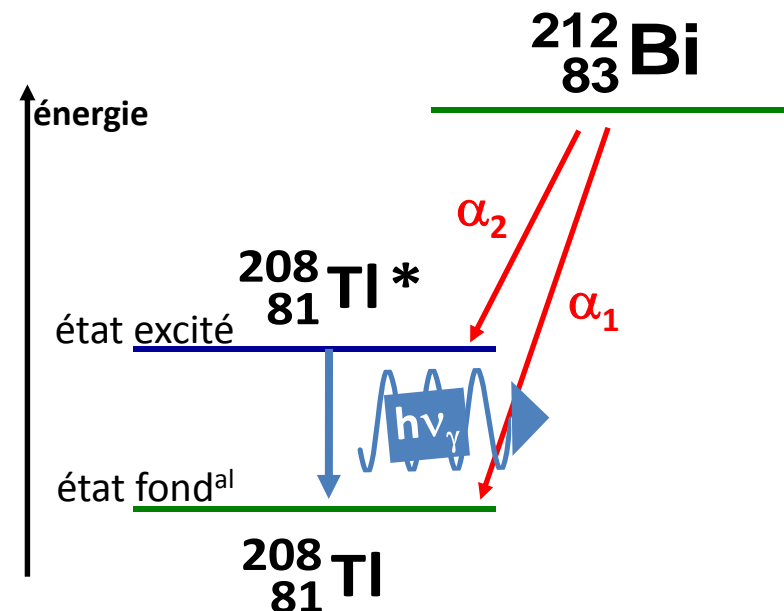
➤ émission α_1 :



➤ émission α_2 :



➤ Tl * état excité → retour vers état fondamental par **émission $h\nu_\gamma$** :



- autre exemples d'émission α

- couple Uranium/Thorium



- couple Radium/Radon



- couple Radon/Polonium



- applications médicales

- pas d'application médicale en routine

1.5 Radioactivité β^-

● noyau père: **excès de neutrons**

● transformation un neutron en proton avec émission d'un électron (particule β^-) et d'un antineutrino ($\bar{\nu}$)



● réaction nucléaire:
$${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z+1}\text{Y} + {}^0_{-1}\text{e} + \bar{\nu}$$

● noyau fils éventuellement dans état excité:
$${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z+1}\text{Y}^{(*)} + {}^0_{-1}\text{e} + \bar{\nu}$$

● équation pour les atome (avec e^-):
$$\left[{}^A_Z\text{X} \right] \rightarrow \left[{}^A_{Z+1}\text{Y}^{(*)} \right]^+ + {}^0_{-1}\text{e} + \bar{\nu}$$

● notion de neutrino et antineutrino

- problème conservation énergie
- 1936: particule masse nulle indétectable (Pauli)
- 1956: observation neutrino

● caractéristiques des neutrino et antineutrino

- charge électrique nulle
- masse négligeable
- spin ½ entier

● bilan énergétique (conservation de l'énergie):

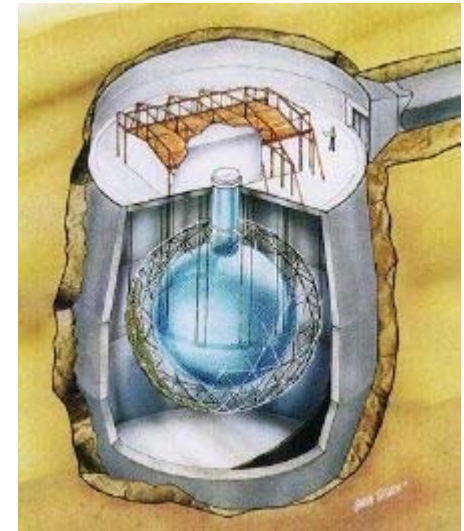
$$\underline{M_X c^2 = M_Y c^2 + m_e c^2 + E_c^e + E_c^\nu + E_c^\gamma}$$

énergies de masse (\approx noyaux)

énergie cinétique e^-

énergie antineutrino

énergie cinétique
noyau fils
(énergie de recul)
NEGLIGEABLE



Observatoire de neutrinos
de Sudbury (ONS)

● bilan énergie avec **masse atomique** m

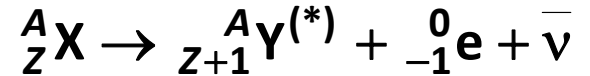
● masse atomique atome ${}^A_Z\text{X}$

$$M_X c^2 = M_Y c^2 + m_e c^2 + E_c^e + E_c^v$$

$$E_c^e + E_c^v = M_X c^2 - m_e c^2 - M_Y c^2$$

$$E_c^e + E_c^v = (m_X - m_Y) c^2$$

$$m_X = M_X + Z m_e$$



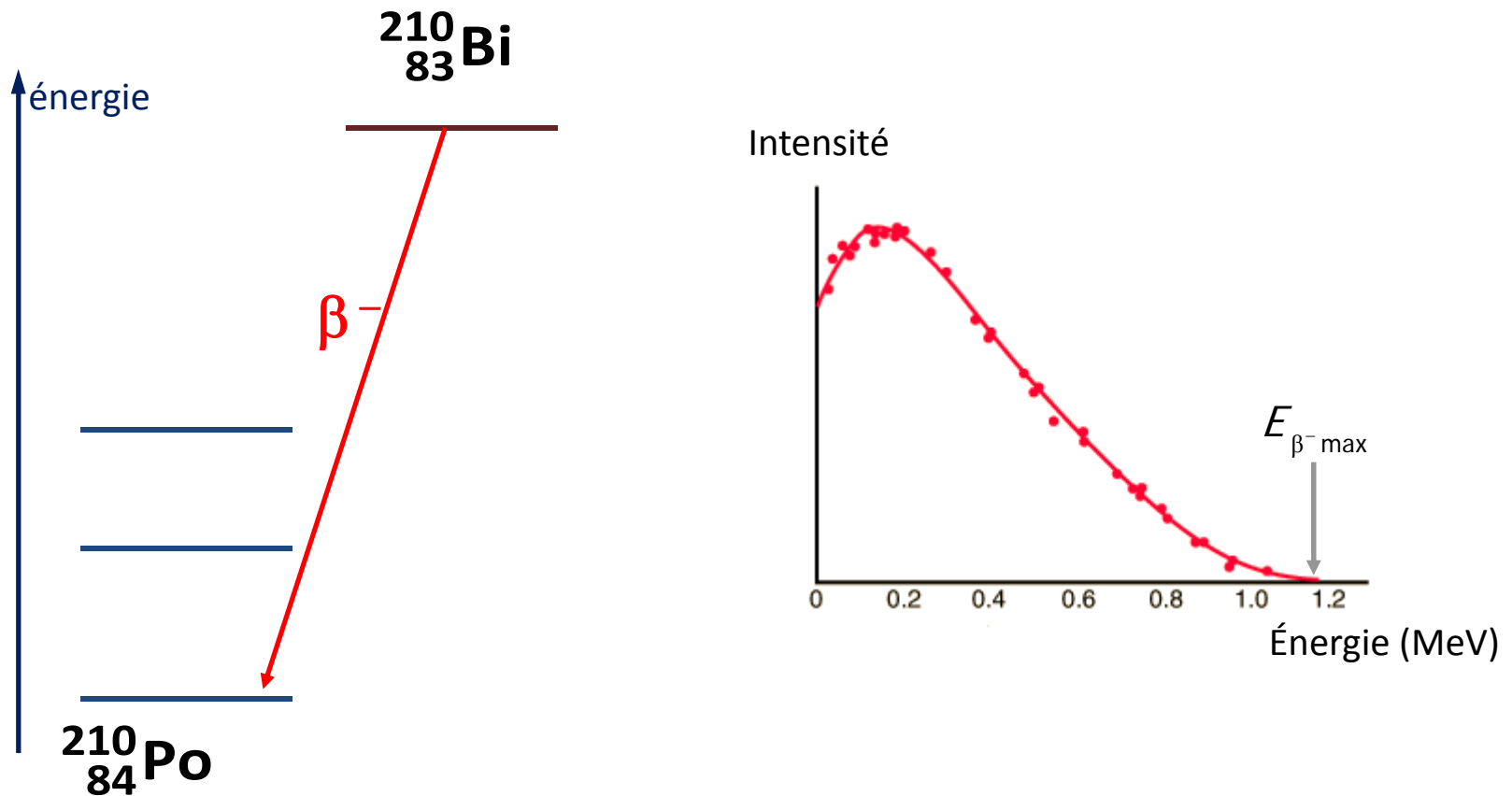
 simplification Σm_e

● **Energie libérée par la réaction Q:** $Q = (m_X - m_Y) c^2$

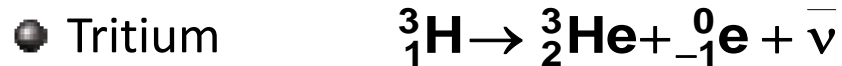
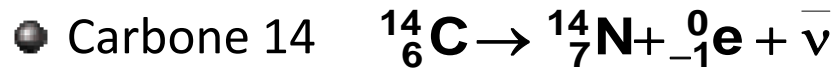
● réaction possible si $Q > 0$: $m_X > m_Y$ (*toujours possible*)

● spectre continu

- E_e peut prendre des valeurs entre 0 et $E_{\beta^- \text{max}}$
- répartition énergie entre e^- et antineutrino



● exemples



● propriétés particules β^-

● $E = 0$ à quelques MeV mais généralement # 100 keV

● légères

● rapide (voisin c) \rightarrow particules relativistes

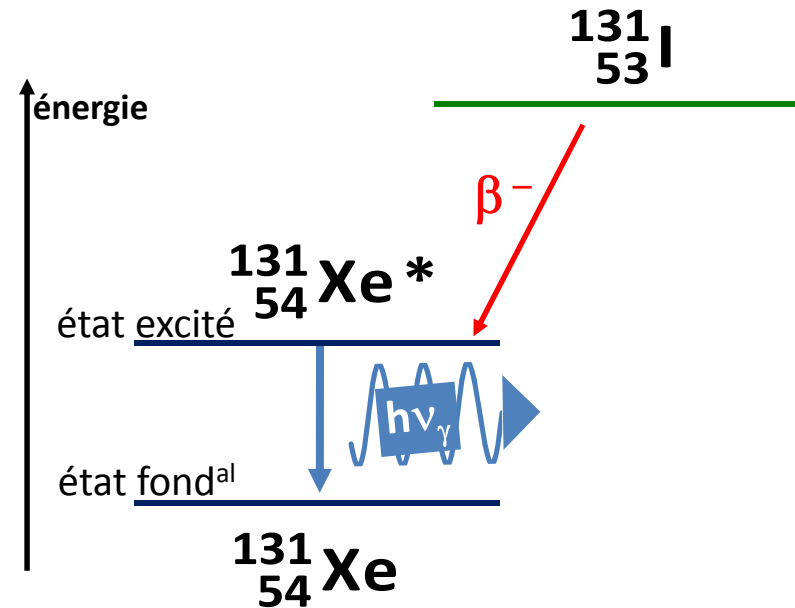
● plus pénétrantes que les particule α

● présence états excités (métastables) \rightarrow **émission photons γ ($h\nu_\gamma$)**

● Iode 131



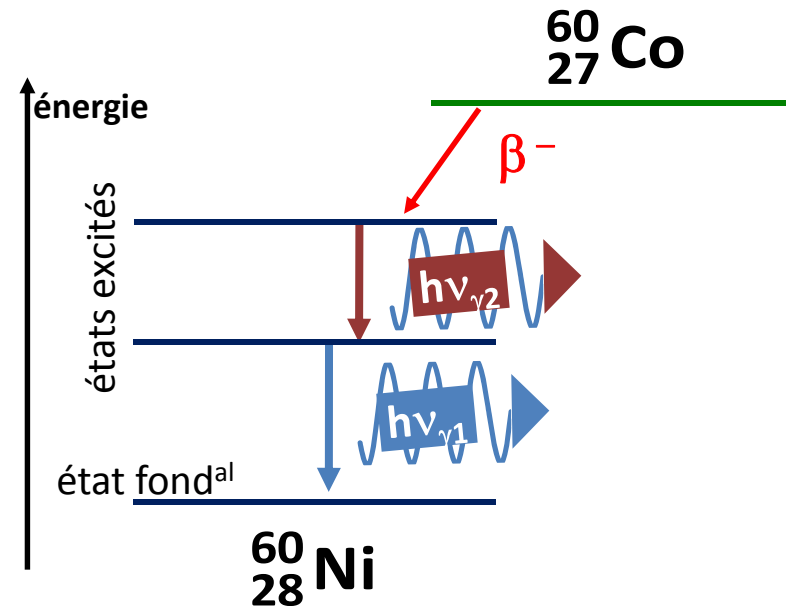
- Xe * état excité → retour vers état fondamental par **émission $h\nu_\gamma$** :



● Cobalt 60



- Xe * état excité → retour vers état fondamental par **émission $h\nu_\gamma$ en cascade**



● applications médicales

- **radiothérapie vectorisée**: administration molécule contenant un radionucléide émetteur β^- spécifique de l'anomalie tumorale à traiter
- ✿ injection **Iode-131**: métastase cancer thyroïdien différencié
- ✿ injection **tetraphosphonate-(^{153}Sm)** (Samarium-153): métastase osseuse
- ✿ injection **anticorps anti-CD20 marqué Yttrium-90**: lymphome

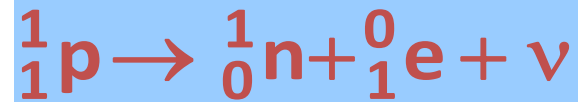
| Iode-131 | |
|--|---|
| période radioactive | 8,04 jours |
| activité massique | $4,59 \cdot 10^{15} \text{ Bq.g}^{-1}$ |
| émissions principales (rendement d'émission pour 100 désintégrations) | désintégration β^- $E_{\text{max}} = 606 \text{ keV}$ émission γ $E = 364 \text{ keV (81\%)}$ $E = 637 \text{ KeV (7\%)}$ $E = 284 \text{ keV (6\%)}$ |

[ICRP, 1983 - Browne et Firestone, 1986]

1.6 Radioactivité β^+

● noyau père: **excès de protons**

● transformation un proton en neutron avec émission d'un positon (particule β^+) et d'un neutrino (ν)



● réaction nucléaire: ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z-1}\text{Y} + {}^0_1\text{e} + \nu$

● noyau fils éventuellement dans état excité: ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z-1}\text{Y}^{(*)} + {}^0_1\text{e} + \nu$

● équation pour les atome (avec e^-): $[{}^A_Z\text{X}] \rightarrow [{}^A_{Z-1}\text{Y}^{(*)}]^- + {}^0_1\text{e} + \nu$

● **bilan énergétique** (conservation de l'énergie):

$$\underline{M_X c^2 = M_Y c^2 + m_e c^2 + E_c^e + E_c^{\nu} + E_c^Y}$$

énergies de masse (\approx noyaux)

énergie cinétique
positon

énergie neutrino

énergie cinétique
noyau fils
(énergie de recul)
NEGLIGEABLE

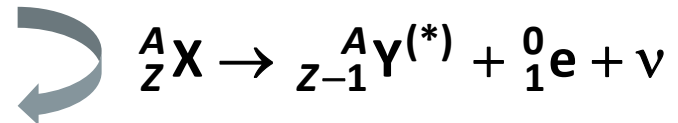
● bilan énergie avec **masse atomique** m

● masse atomique atome ${}^A_Z X$

$$m_X = M_X + Zm_e$$

$$E_c^e + E_c^{\nu} = M_X c^2 - m_e c^2 - M_Y c^2$$

$$E_c^e + E_c^{\nu} = (m_X - m_Y - 2m_e)c^2$$

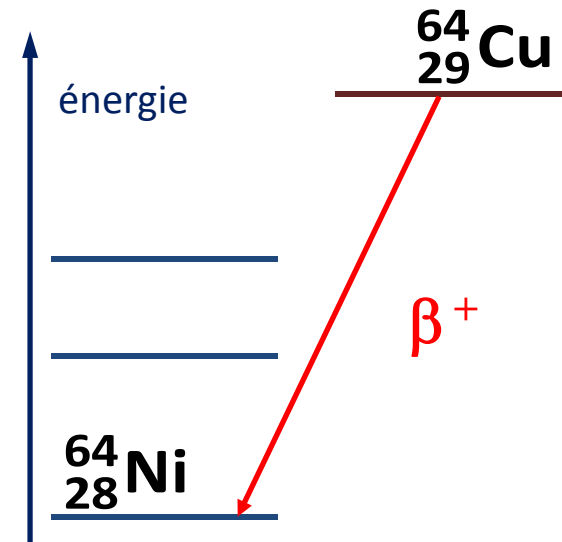
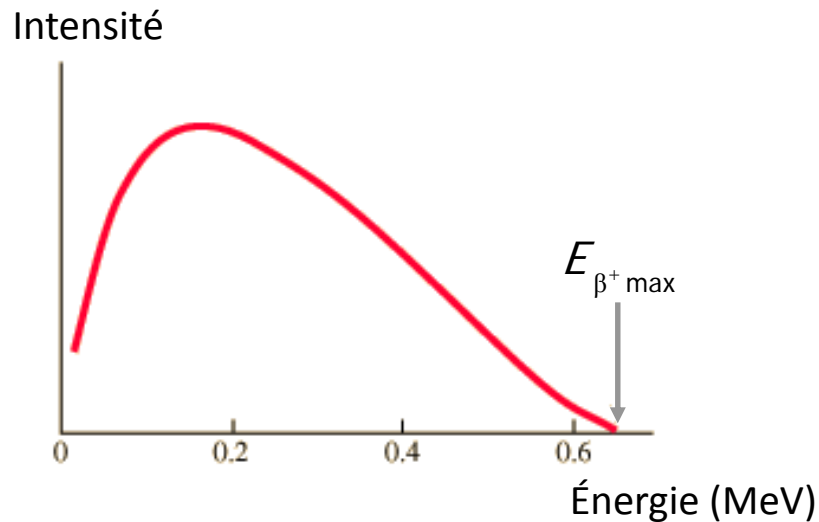


● **Energie libérée par la réaction Q:**

$$Q = (m_X - m_Y - 2m_e)c^2$$

● réaction possible si $Q > 0$: $m_X - m_Y > 2m_e$

● spectre continu



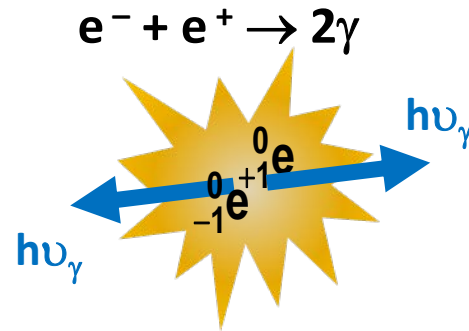
● propriétés particules β^-

- $E = 0$ à quelques MeV mais généralement $\# 100$ keV
- légères \rightarrow rapide (voisin c) \rightarrow particules relativistes
- non pénétrantes \rightarrow **annihilation**

● **annihilation positon**: rencontre positon – électron

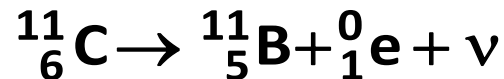
● dématérialisation

● **émission 2 photons γ ($E = 511 \text{ keV}$)**: même direction sens opposé



● **exemples**

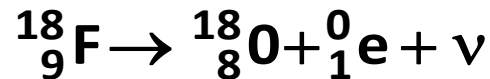
● Carbone-11



● Oxygène-15



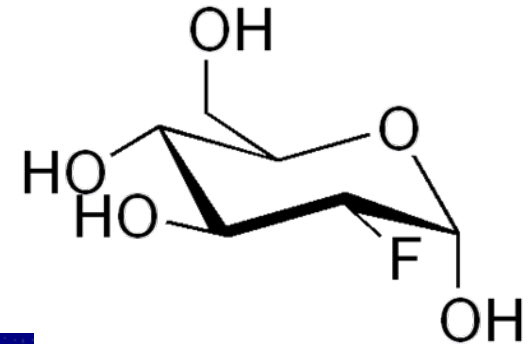
● Fluor-18



● applications médicales

- **tomographie par émission de positons (TEP)**: détection photons produits par annihilation positon

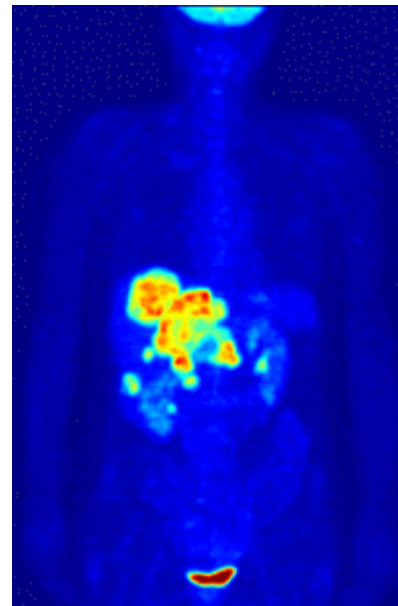
- ⚙ injection **fluorodésoxyglucose-(^{18}F)**: fixation tissus consommateurs glucose (tissus cancéreux, cerveau,...)



[^{18}F]-FDG



tomographe TEP

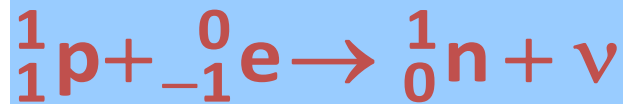


distribution du [^{18}F]-FDG
mesurée par TEP

1.7 Capture électronique

● noyau père: **excès de protons**

- capture par noyau d'un électron (couche interne) qui s'associe à un proton pour former un neutron et émission d'un neutrino (ν)
- compétition avec β^+



● réaction nucléaire:



- noyau fils éventuellement dans état excité: ${}_Z^A\text{X} + {}_{-1}^0\text{e} \rightarrow {}_{Z-1}^A\text{Y}^{(*)} + \nu$
- équation pour les atome (avec e^-): $[{}_Z^A\text{X} + {}_{-1}^0\text{e}] \rightarrow [{}_{Z-1}^A\text{Y}^{(*)}]^* + \nu$

● **bilan énergétique** (conservation de l'énergie):

$$M_X c^2 + m_e c^2 - w_K = M_Y c^2 + E c^\nu + E c^Y$$

énergie neutrino

énergie liaison des électrons (couche K)

énergie cinétique
noyau fils
(énergie de recul)
NEGLIGEABLE

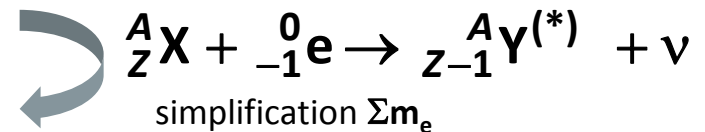
● bilan énergie avec **masse atomique** m

● masse atomique atome ${}^A_Z X$

$$m_X = M_X + Z m_e$$

$$E c^\nu = M_X c^2 + m_e c^2 - M_Y c^2 - w_K$$

$$E c^\nu = (m_X - m_Y) c^2 - w_K$$



● **énergie libérée par la réaction** Q :

$$Q = (m_X - m_Y) c^2 - w_K$$

● réaction possible si $Q > 0$: $m_X - m_Y > w_K / c^2$

● exemple

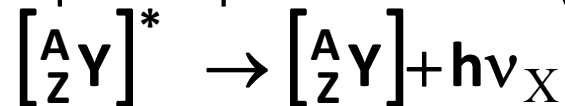


● capture e^- couche K \rightarrow **instabilité atome**
(cortège électronique excité)

● réarrangement du cortège électronique:

● **émission photons fluorescence X**

équation pour les atome (avec e^-):

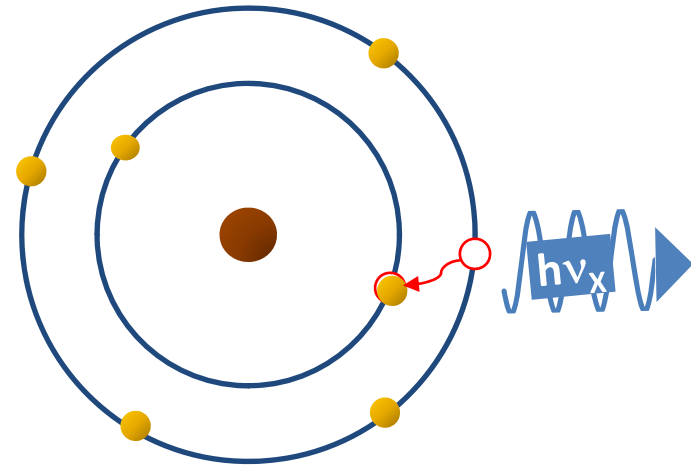


● **Effet Auger** (expulsion e^-)

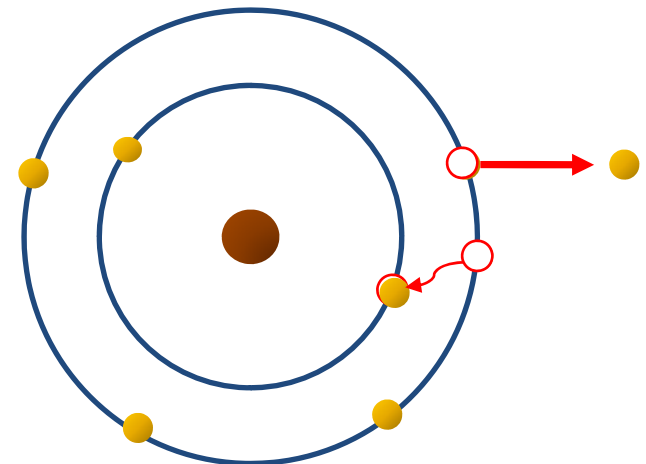
équation pour les atome (avec e^-):



ionisation de l'atome



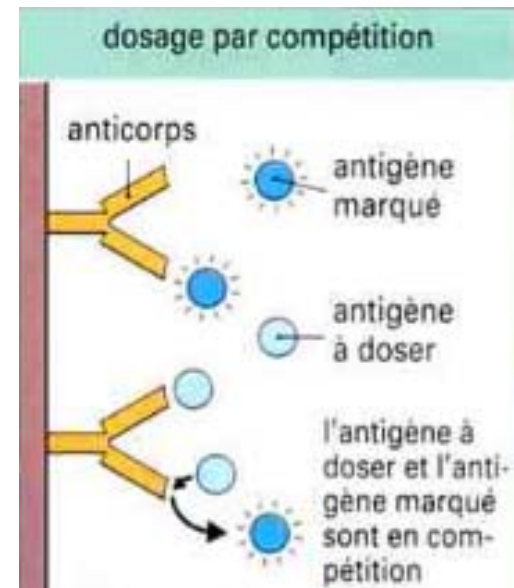
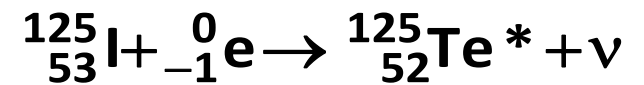
émission photons fluorescence X



effet Auger

● applications médicales

- ❁ désintégration ^{125}I (**Iode-125**): dosage hormonaux en radio-immunothérapie
- ❁ **curiethérapie à l'iode-125**: traitement tumeurs de la prostate



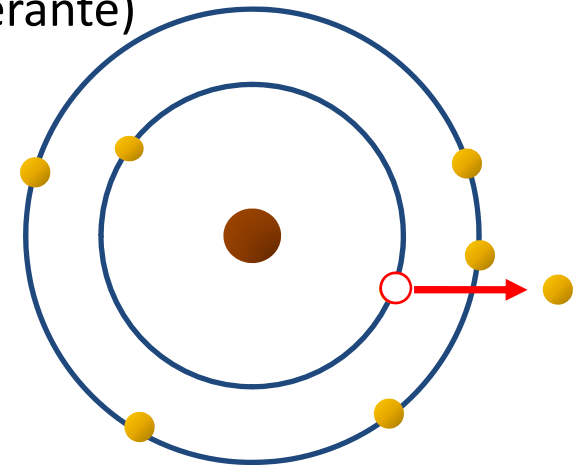
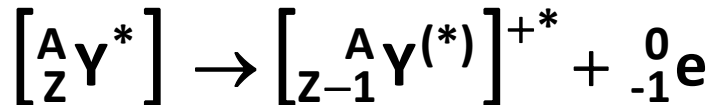
1.8 Conversion interne

- désexcitation du noyau du fils issu de radioactivité α , β ou capture électronique par éjection d'un électron du cortège de l'atome (couche interne)
- compétition avec émission γ (émission γ prépondérante)



électron d'une couche interne éjecté de l'atome

équation pour les atomes (avec e^-):

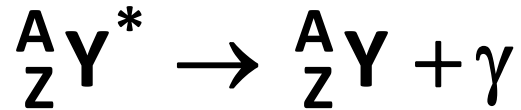


conversion interne

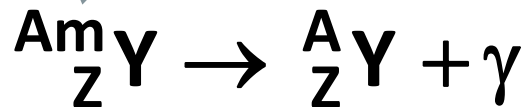
- atome ionisé positivement
- cortège électronique fortement excité $\rightarrow e^-$ Auger éventuels

1.9 Emission γ

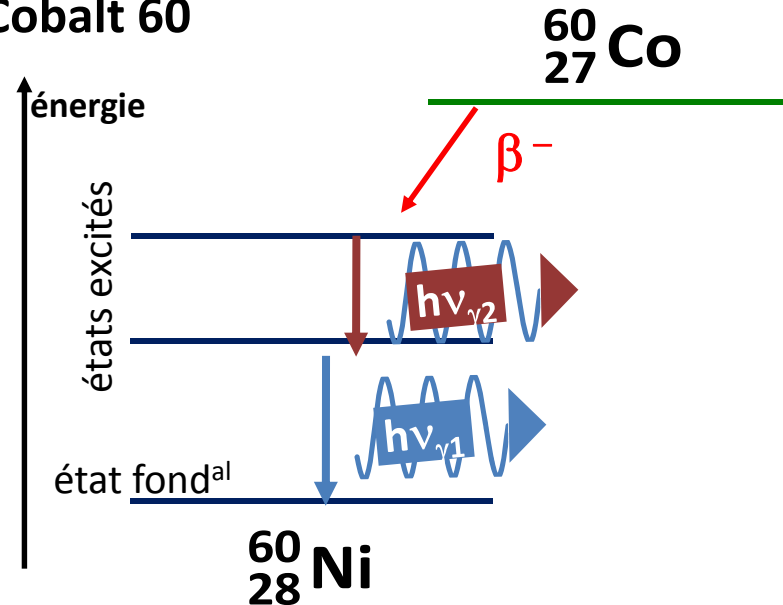
- désexcitation du noyau du fils issu de radioactivité α , β ou capture par émission photon γ



métastable

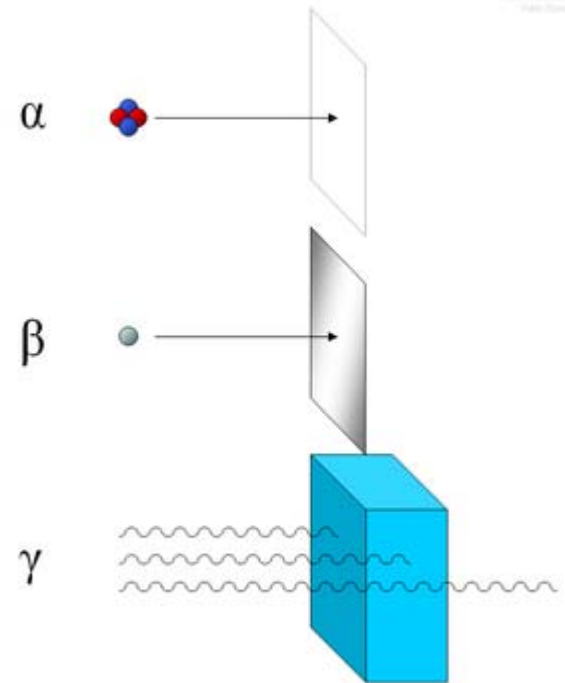


● Cobalt 60



- spectre de raies caractéristique de l'élément radioactif

- **particule α** arrêtés par une feuille de papier
- **particules β** arrêtés par une plaque d'aluminium
- **rayonnements γ** pénètrent de la matière



1.10 Tableau récapitulatif

| | | | |
|--|---|-------------------|-----------|
| réorganisation du noyau | modification du noyau | désintégration | α |
| | | | β^- |
| | | | β^+ |
| | capture électronique | | |
| | désexcitation du noyau | émission γ | |
| conversion interne | | | |
| réorganisation du cortège électronique | désexcitation du cortège électronique | émission X | |
| | | effet Auger | |

2. Lois générales de la radioactivité

1.1 Constante radioactive

- **constante radioactive λ (s^{-1})** : fréquence d'émission d'un radionucléide
= probabilité de désintégration par unité de temps

1.2 Activité

- **activité A (Bq)** : nombre de désintégrations par unité de temps d'un échantillon radioactif

$$A = \lambda N$$

Activité au temps t : $A(t)$

Nombre de noyaux radioactifs au temps t : $N(t)$

- Unité SI : le **becquerel (Bq)**

- 1 Bq = 1 désintégration par seconde

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

- autre unité : le curie (Ci) (*activité 1 g Radium pur*)

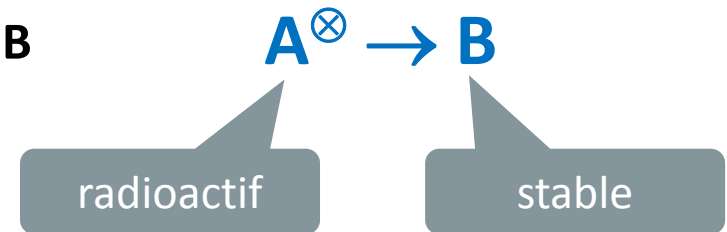
• ordres de grandeurs d'activités

| | |
|--|--|
| 1 homme (70 kg) | 7000 Bq (dont 4500 dus au ^{40}K) |
| 1 kg de poisson | 100 Bq |
| 1 kg de pomme de terre | 150 Bq |
| 1 ℓ d'eau de mer | 10 Bq |
| 1 kg de sol granitique | 8000 Bq |
| 1 kg de minerai d'uranium | $25 \cdot 10^6$ Bq |
| Radioisotopes médicaux pour un diagnostic | 10^8 Bq |
| 1 kg de déchets nucléaires | 10^{12} Bq |

1.3 Lois de décroissance radioactive

1.3.1 Filiation simple

● élément radioactif $A^{\otimes} \rightarrow$ élément fils stable B



● **activité de la source**: variation au cours du temps nombre de noyau $N_A(t)$

● variation au cours du temps $N_A(t)$: $A = -\frac{dN_A(t)}{dt}$

● activité A : $A = \lambda N_A(t)$

$\lambda N_A(t) = -\frac{dN_A(t)}{dt}$

nombre de noyaux au temps $t = 0$

● par intégration:

$$N_A(t) = N_A(0)e^{-\lambda t}$$

$$A(t) = A(0)e^{-\lambda t}$$

activité au temps $t = 0$

1.3.2 Période radioactive

● **période ou demi-vie T (s)** : temps au bout duquel la moitié des noyaux initiaux se sont désintégrés

● **pour t = T**:
$$N_A(t) = \frac{N_A(0)}{2} \rightarrow \frac{N_A(0)}{2} = N_A(0)e^{-\lambda T} \rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda T}$$

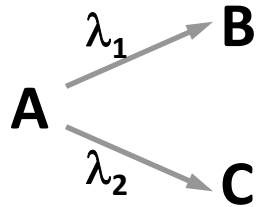
$$T = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$

● T constante caractéristique d'un radionucléide

| | | |
|---------------|-------------------|----------------------|
| Technétium 99 | ^{99m}Tc | 6 heures |
| Molybdène 99 | ^{99}Mo | 67 heures |
| Iode 131 | ^{131}I | 8 jours |
| Thorium 234 | ^{234}Th | 24,1 jours |
| Plomb 210 | ^{210}Pb | 22,3 ans |
| Strontium 90 | ^{90}Sr | 29 ans |
| Radium 226 | ^{226}Ra | 1600 ans |
| Carbone 14 | ^{14}C | 5580 ans |
| Uranium 238 | ^{238}U | $4,5 \cdot 10^9$ ans |

1.3.3 Rapport d'embranchement

● **rapport d'embranchement (%)** : probabilité pour qu'une réaction donne certains produits



● constante radioactive totale:
(observée expérimentalement)

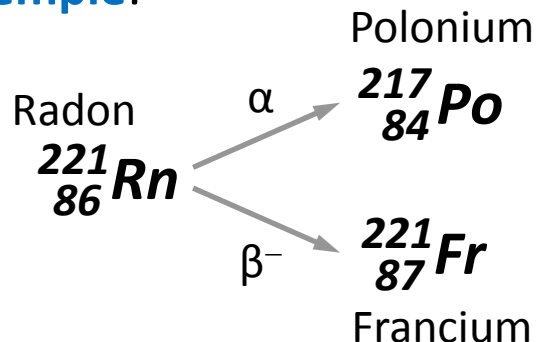
$$\lambda_{tot} = \sum_i \lambda_i$$

● période apparente: $T = \frac{\ln 2}{\lambda_{tot}}$

● rapport d'embranchement :

$$\frac{\lambda_i}{\lambda_{tot}}$$

● **exemple:**



$$\bullet \lambda_{\alpha} = 1,02 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

$$\bullet \lambda_{\beta} = 3,60 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

$$\bullet \lambda_{tot} = 4,62 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda_{tot} = \lambda_{\alpha} + \lambda_{\beta^-}$$

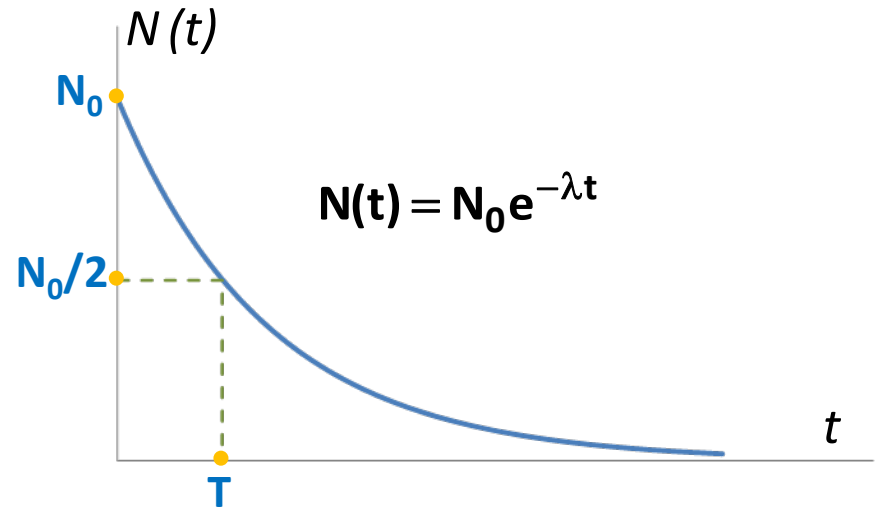
$$T = \frac{\ln 2}{\lambda_{tot}} = 25 \text{ min}$$

$$\frac{\lambda_{\alpha}}{\lambda_{tot}} = 0,22 = 22\%$$

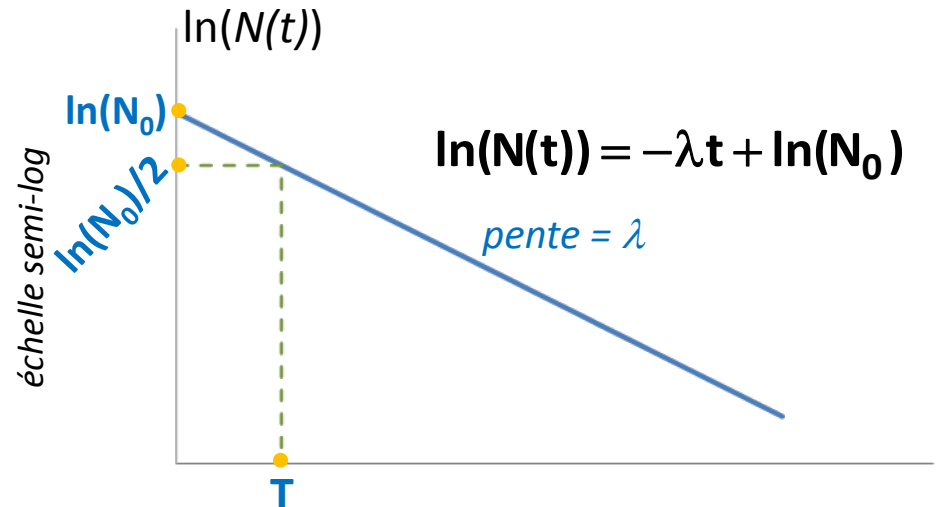
$$\frac{\lambda_{\beta^-}}{\lambda_{tot}} = 0,78 = 78\%$$

1.3.3 Représentation graphique

● échelle linéaire:



● échelle semi-logarithmique:



1.3.4 Filiations multiples

● élément radioactif $A^{\otimes} \rightarrow$ élément radioactif $B^{\otimes} \rightarrow$ élément stable C



● $A^{\otimes} \rightarrow B^{\otimes} : t = 0 \quad N_A(t) = N_{A0} ; N_B(t) = 0 ; N_C(t) = 0$

● variation au cours du temps $N_A(t)$: $N_A(t) = N_{A0} e^{-\lambda_A t}$

● $A^{\otimes} \rightarrow B^{\otimes} \rightarrow C$:

● B^{\otimes} apparaît par désintégration de A^{\otimes}

● B^{\otimes} disparaît par désintégration en C

$$\frac{dN_B(t)}{dt} = \lambda_A N_A(t) - \lambda_B N_B(t)$$

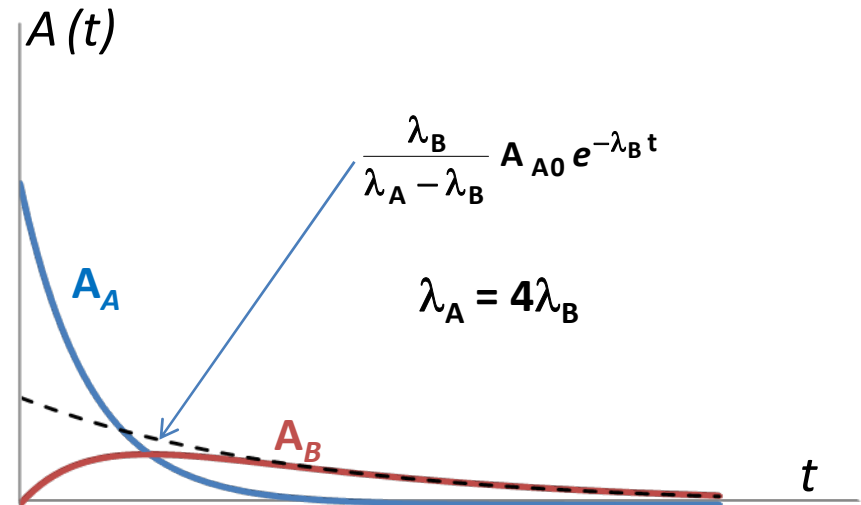
● par intégration:

$$N_B(t) = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_{A0} [e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}]$$

● $\lambda_A > \lambda_B \rightarrow T_A < T_B$

⚙ au bout d'un certain temps:

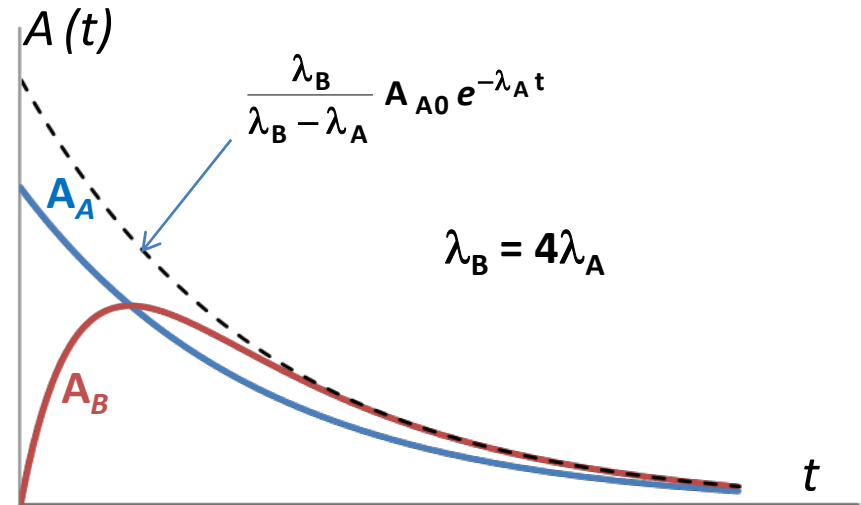
$$A_B \approx \frac{\lambda_B}{\lambda_A - \lambda_B} A_{A0} e^{-\lambda_B t}$$



● $\lambda_A < \lambda_B \rightarrow T_A > T_B$: **équilibre de régime**

⚙ au bout d'un certain temps:

$$A_B \approx \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} A_{A0} e^{-\lambda_A t}$$



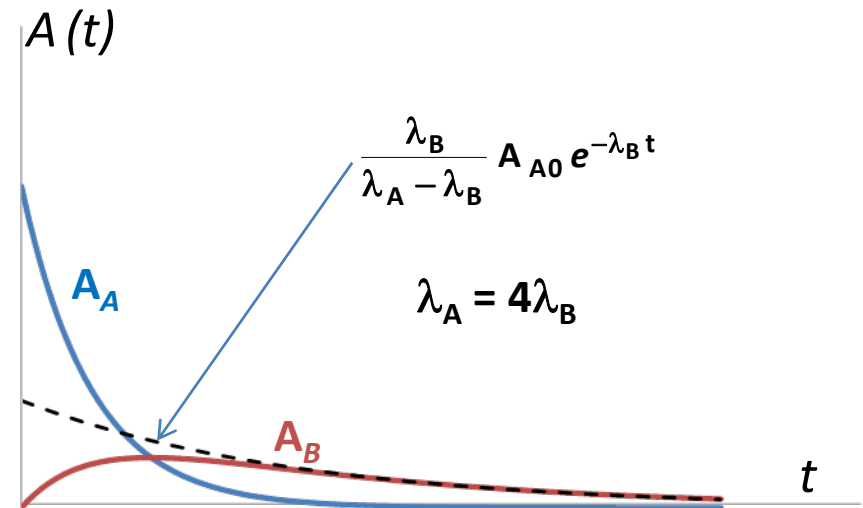
● **B et A mélangés** $\rightarrow T$ apparente T_A

● **B seul** \rightarrow période T_B

● $\lambda_A > \lambda_B \rightarrow T_A < T_B$

⚙️ au bout d'un certain temps:

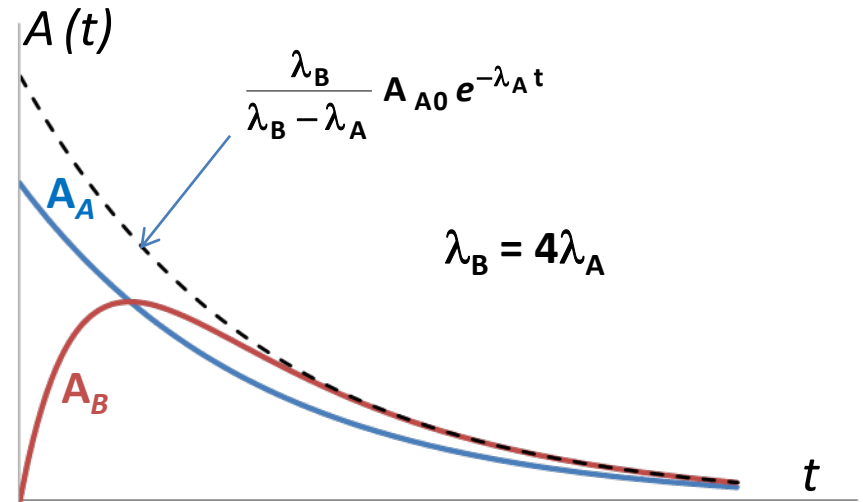
$$A_B \approx \frac{\lambda_B}{\lambda_A - \lambda_B} A_{A0} e^{-\lambda_B t}$$



● $\lambda_A < \lambda_B \rightarrow T_A > T_B$: **équilibre de régime**

⚙️ au bout d'un certain temps:

$$A_B \approx \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} A_{A0} e^{-\lambda_A t}$$



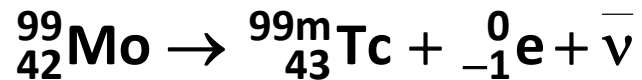
● **B et A mélangés** $\rightarrow T$ apparente T_A

● **B seul** \rightarrow période T_B

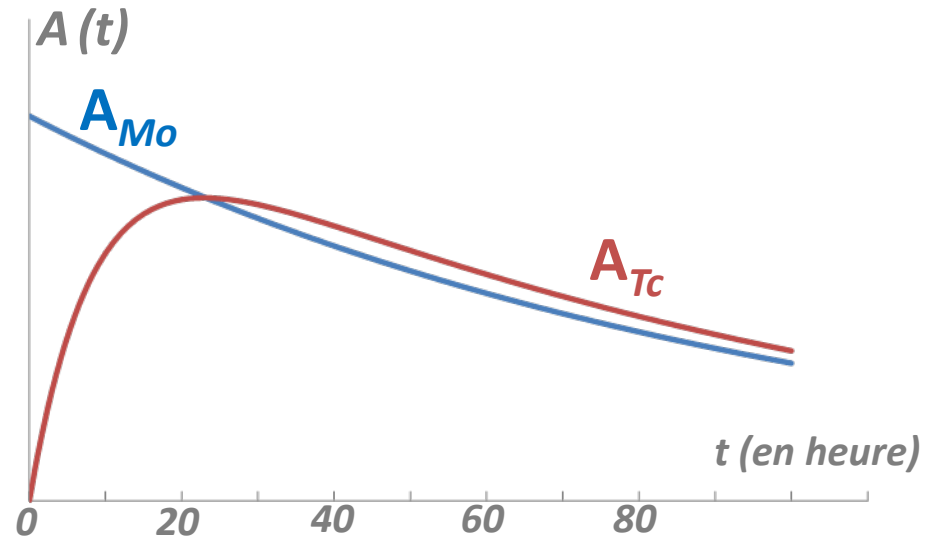
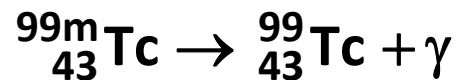
● $\lambda_A < \lambda_B$: utilisation technétium métastable en scintigraphie

| | | |
|---------------|-------------------|-----------|
| Technétium 99 | ^{99m}Tc | 6 heures |
| Molybdène 99 | ^{99}Mo | 67 heures |

● père Molybdène 99:



● Technétium métastable émetteur γ :



⚙ source constante de Technétium métastable services hospitaliers

⚙ « vache à Molybdène »

● intervalles de temps fixes → séparation **Mo/Tc** pour scintigraphies

1.4 Les familles radioactives

● **filiations** à plusieurs termes dont le **précurseur** est **de très longue durée de vie**

● **4 familles**

3 familles radioactives
naturelles

| Famille | Premier terme | Période du premier terme | Dernier terme |
|----------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|
| Uranium-Radium (4n+2) | $^{238}_{92}\text{U}$ | $4,5 \cdot 10^9$ ans | $^{206}_{82}\text{Pb}$ |
| Uranium-Actinium (4n+3) | $^{235}_{92}\text{U}$ | $7,2 \cdot 10^8$ ans | $^{207}_{82}\text{Pb}$ |
| Thorium (4n) | $^{232}_{90}\text{Th}$ | $1,4 \cdot 10^{10}$ ans | $^{208}_{82}\text{Pb}$ |
| Neptunium (4n+1) | $^{237}_{93}\text{Np}$ | $2,1 \cdot 10^6$ ans | $^{205}_{81}\text{Tl}$ |

● principales sources radioactives terrestres

● existence radioéléments isolés: **potassium-40**

● exemple: filiation de l'Uranium-238

| Noyau | Particules émises | Période radioactive |
|------------------|-------------------|----------------------|
| Uranium 238 | α | $4,5 \cdot 10^9$ ans |
| Thorium 234 | β^-, γ | 24 j |
| Protactinium 234 | β^-, γ | 1,2 min |
| Uranium 234 | α, γ | 250 000 ans |
| Thorium 230 | α, γ | 75 000 ans |
| Radium 226 | α, γ | 1 600 ans |
| Radon 222 | α | 3,8 j |
| Polonium 218 | α | 3 min |
| Plomb 214 | β^-, γ | 27 min |
| Bismuth 214 | β^-, γ | 20 min |
| Polonium 214 | α | 160 μ s |
| Plomb 210 | β^-, γ | 22,3 ans |
| Bismuth 210 | β^-, γ | 5 j |
| Polonium 210 | α | 138 j |
| Plomb 206 | stable | |

