

Chapitre 3

Propriétés physiques des rayonnements ionisants

- 1 Historique et définition
- 2 Désintégration α
- 3 Désintégration β
- 4 Désexcitation γ et Conversion Interne
- 5 Les lois de la radioactivité
- 6 Filiations radioactives

1 - Historique et définition

Les rayonnements de particules massiques

1895 Röntgen → les Rayons X

1896 Becquerel → les rayons uraniques

1898 Curie → la radioactivité

1899 Rutherford → désintégration radioactive

1900 Villard → « les rayons γ »

1934 Joliot-Curie → radioactivité artificielle

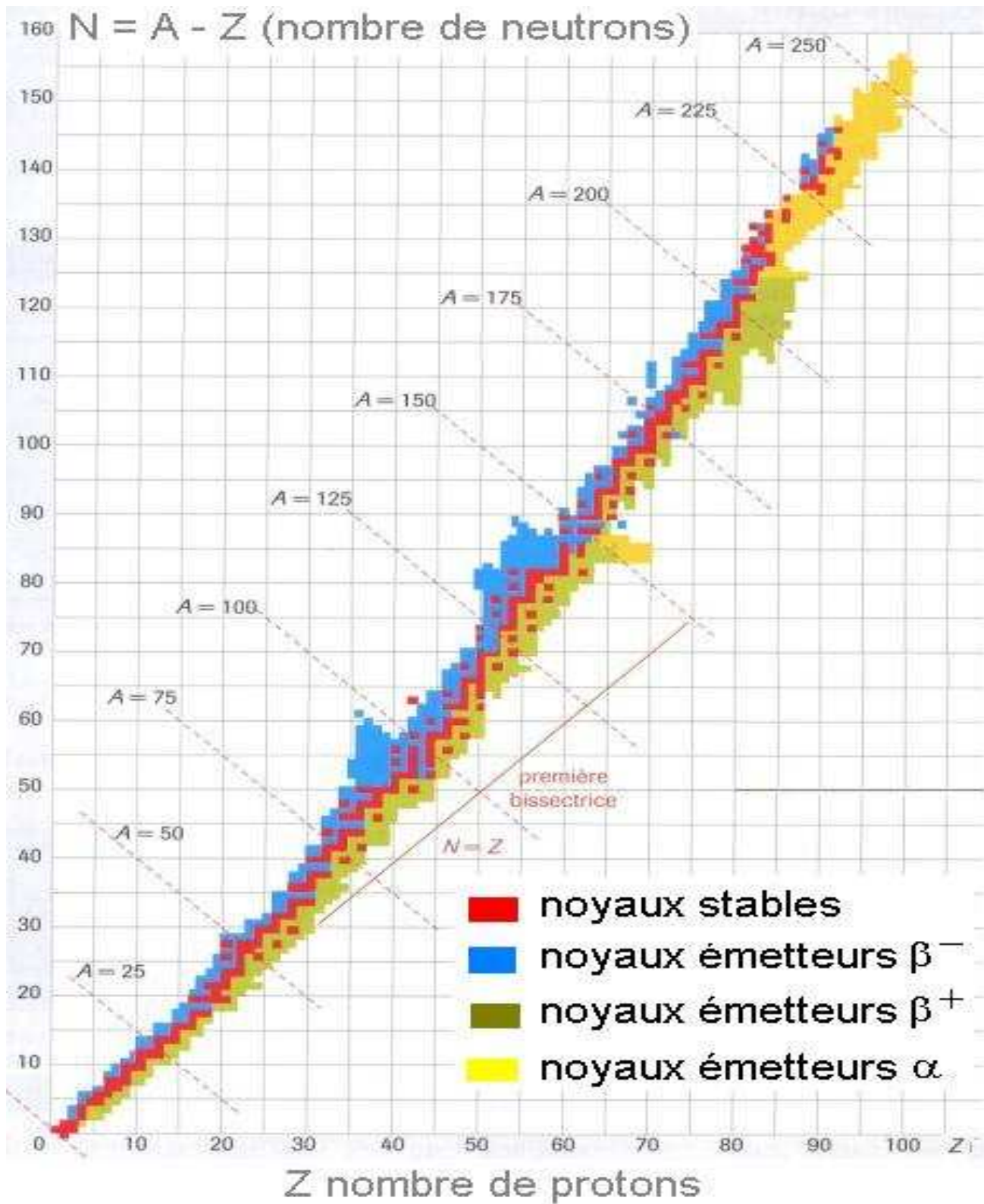
Définition

- la radioactivité est un phénomène nucléaire :
Noyau père → Noyau fils + émission
- c'est une émission spontanée (pas contrôlée)
- elle débute dès l'existence du radionucléide et elle est continue
- les radionucléides émettent 3 types de rayonnement
 - radioactivité α (noyau d'hélium ${}_2\text{He}$)
 - radioactivité β (électron ou positon)
 - désexcitation γ (photon)
- lors des transformations il y a conservation :
 - de la charge
 - de la quantité de mouvement
 - de l'énergie
 - de la quantité de matière

Transformations radioactives



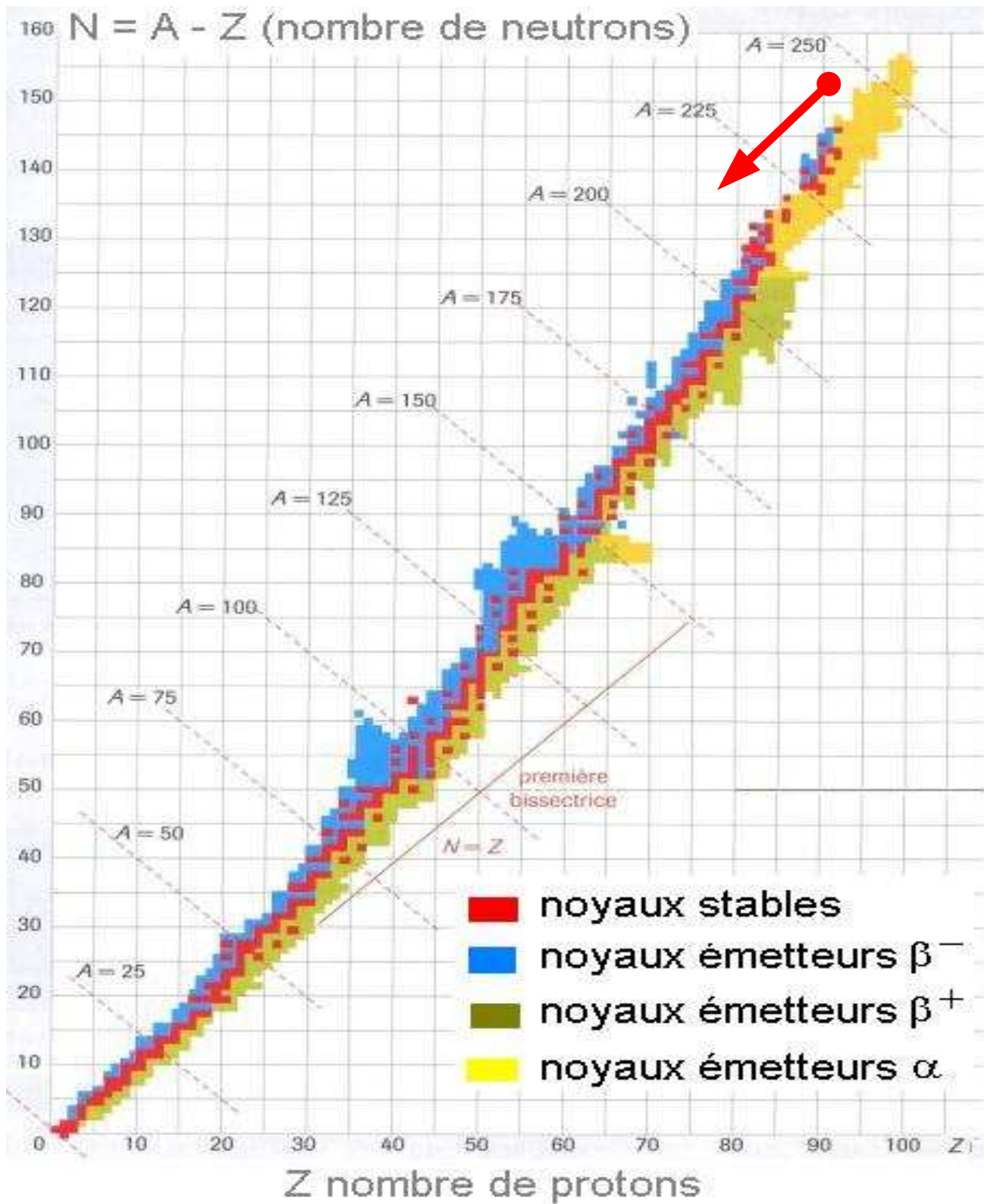
rapprochement de la vallée de la stabilité



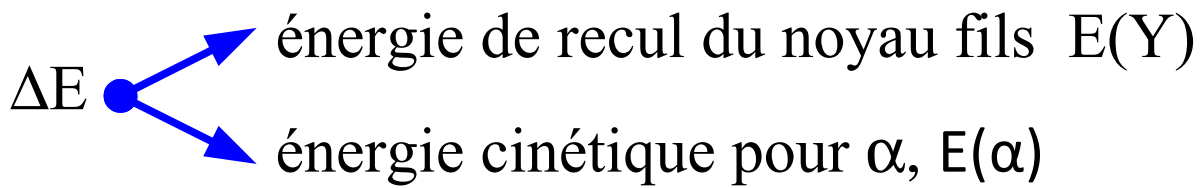
Transformations radioactives



rapprochement de la vallée de la stabilité



ΔE : « énergie disponible »



$$\Delta E = E(Y) + E(\alpha)$$

conservation de la quantité de mouvement :

$$M(Y)v(Y) = M(\alpha)v(\alpha)$$

$$M(Y) \gg M(\alpha) \quad \Rightarrow \quad v(Y) \ll v(\alpha)$$

$$\Rightarrow E(\alpha) \approx \Delta E \quad (\text{de 4 à 9 MeV})$$



pour 1 transformation $X \rightarrow Y + \alpha$ \rightarrow ΔE unique

\rightarrow spectre de 1 raie

Noyau fils Y peut être excité \rightarrow différents ΔE

\rightarrow spectre de raies (très rapprochées)

3 - Désintégration β (interaction faible)

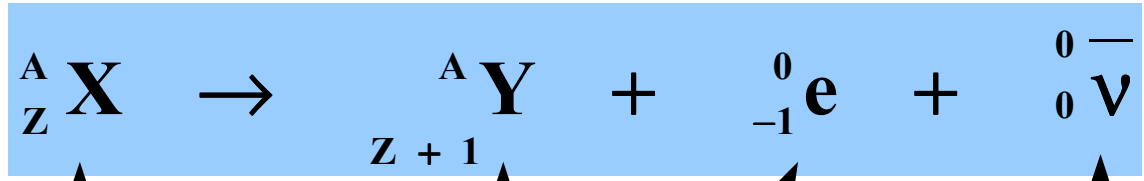
Transformation dans le noyau de :

proton \rightarrow neutron OU neutron \rightarrow proton

- ne modifie pas A -

3.1 Désintégration β^-

Transformation d'un neutron en proton :

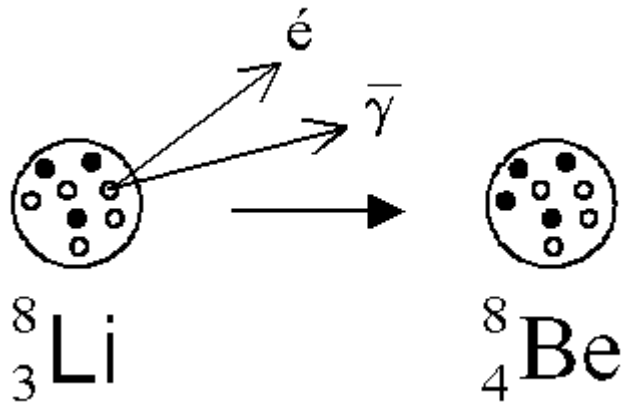


noyau père

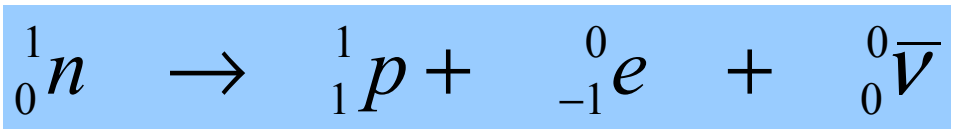
noyau fils

β^-

anti-neutrino



c'est un processus (n, p), c'est-à-dire :

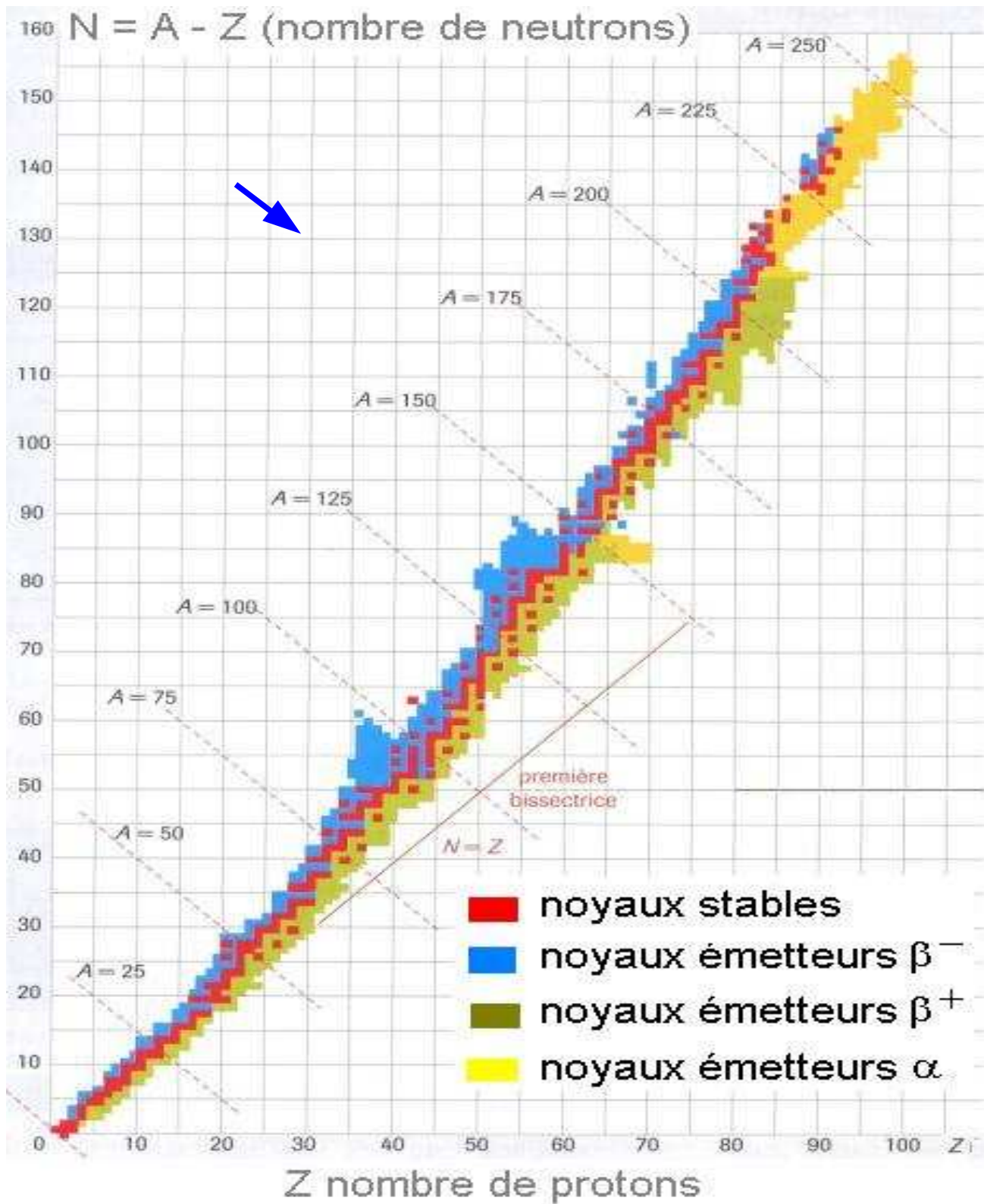


caractéristique des noyaux trop riches en neutrons

Transformations radioactives

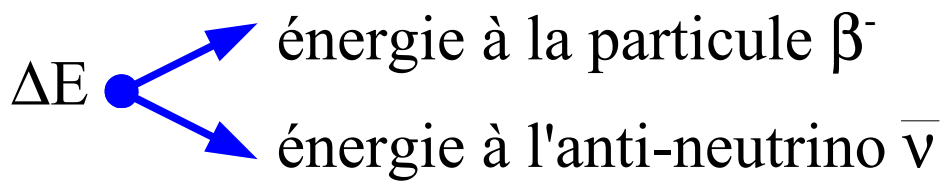


rapprochement de la vallée de la stabilité



ΔE : « énergie disponible » \leftrightarrow défaut de masse :

$$\Delta E = M(X)c^2 - [M(Y) + m_{e^-}]c^2$$



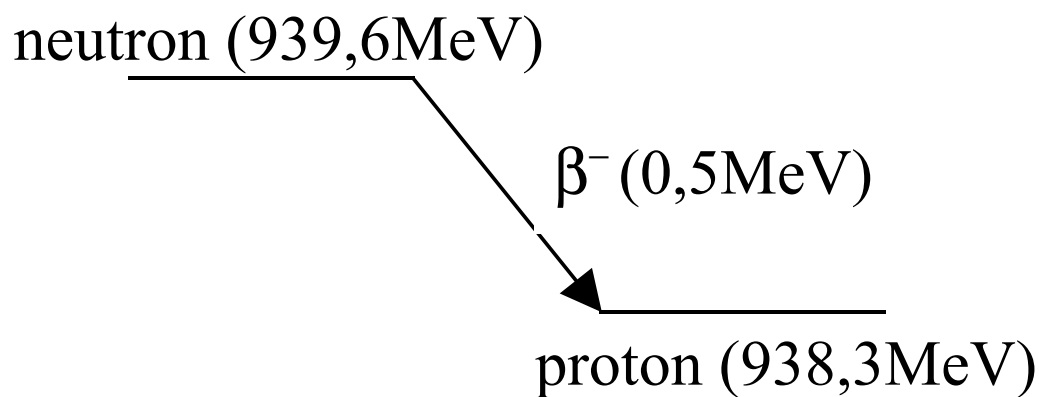
Répartition aléatoire entre β^- et $\bar{\nu}$



\Rightarrow spectre d'énergie continue pour les β^-

L'anti-neutrino fut imaginé par Pauli 1930

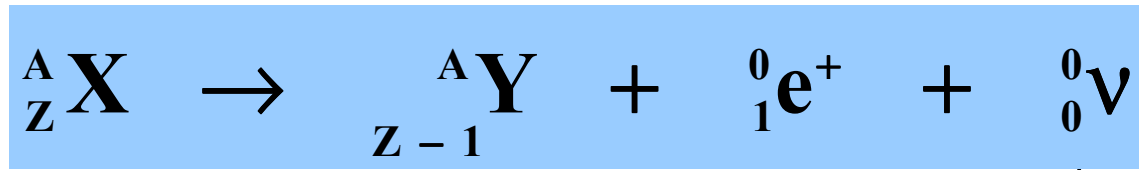
Le neutron libre se désintègre en : proton + électron



dans le noyau ΔE est trop faible (perte de masse)

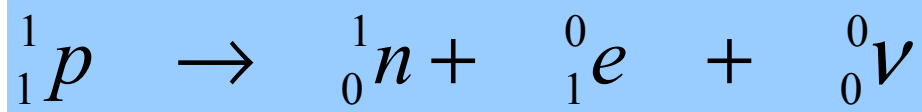
3.2 Désintégration β^+

Transformation d'un proton en neutron :



noyau père noyau fils β^+ neutrino

c'est un processus (p, n), c'est-à-dire :



caractéristique des noyaux trop **riches en protons**

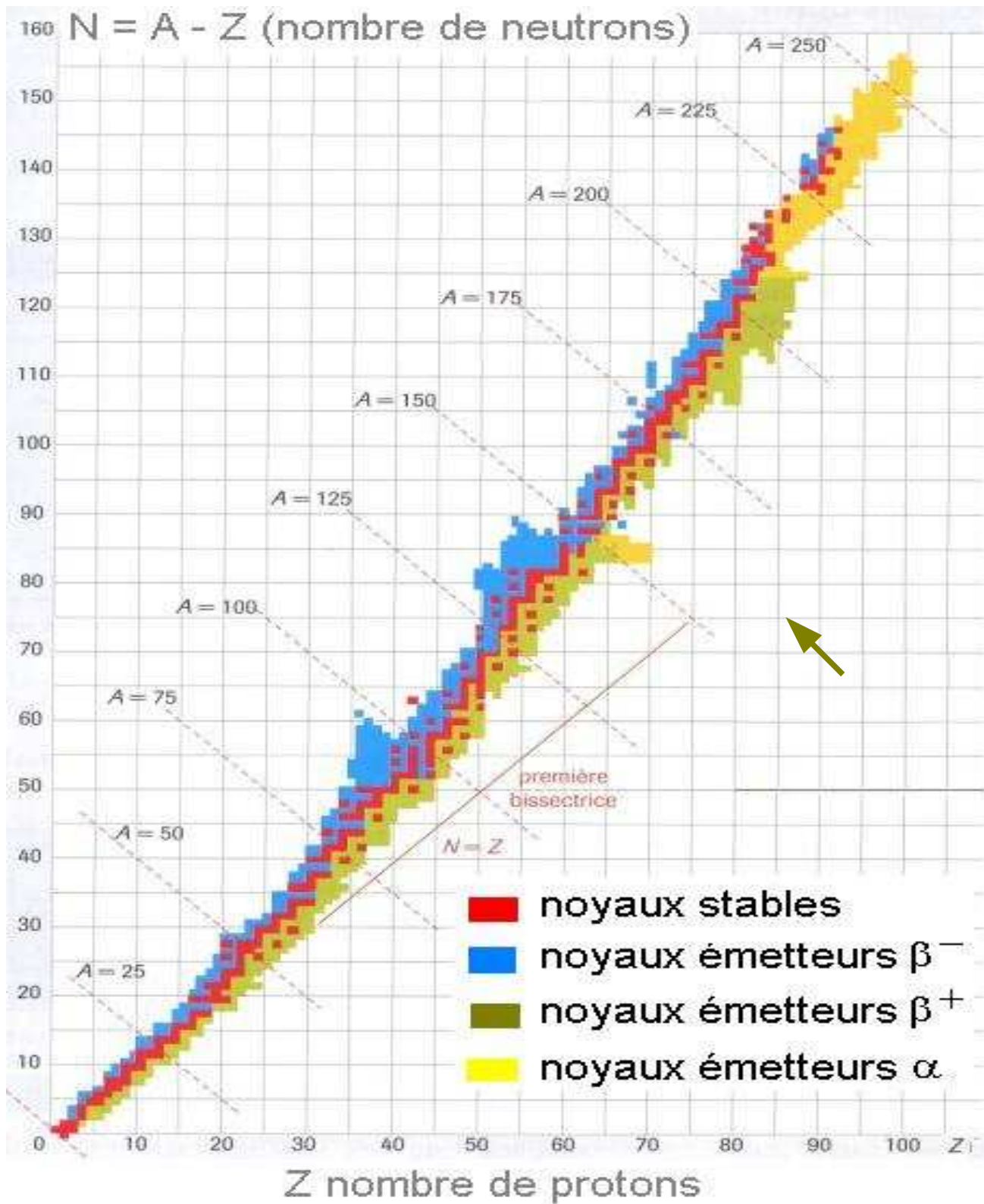
n'existent pas dans la nature
sont fabriqués en laboratoire
→ **radioactivité artificielle**

rapprochement de la vallée de la stabilité :

Transformations radioactives

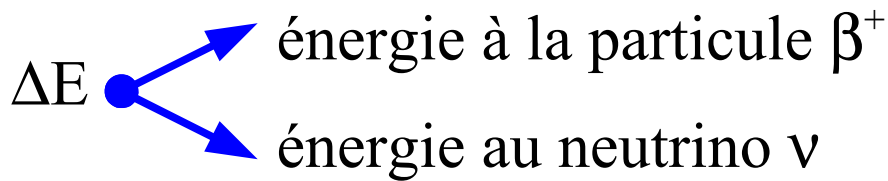


rapprochement de la vallée de la stabilité



ΔE : « énergie disponible » \leftrightarrow défaut de masse :

$$\Delta E = M(X)c^2 - [M(Y) + m_{e^+}]c^2$$

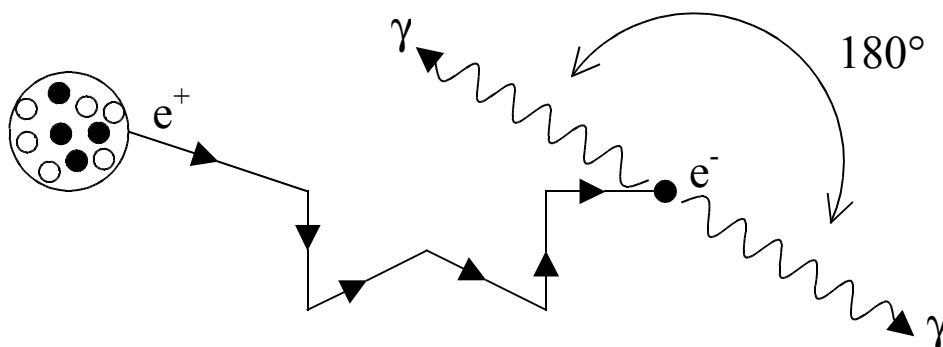


Répartition aléatoire entre β^+ et ν



\Rightarrow spectre d'énergie continue pour les β^+

Le positon perd son énergie par collision et finit par s'annihiler avec un électron pour produire 2 photons

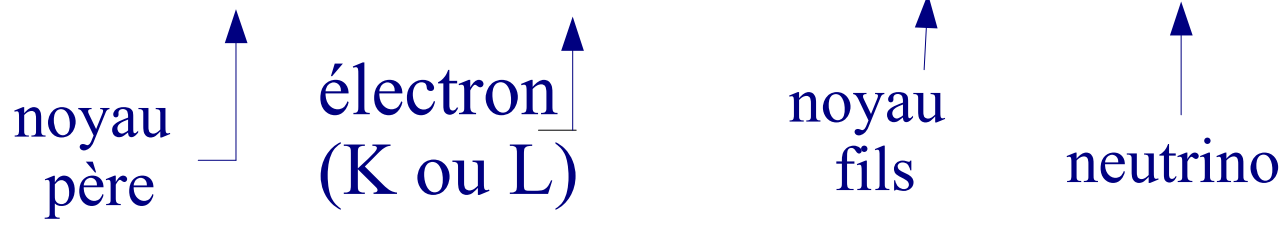
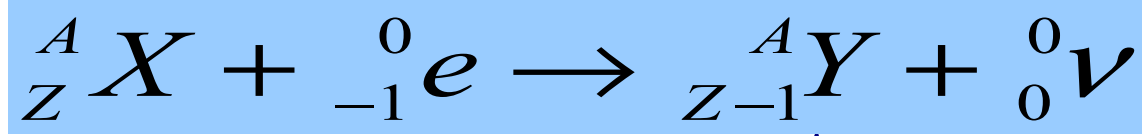


Énergie de masse d'1 $\beta = 511$ keV \rightarrow fournie aux γ

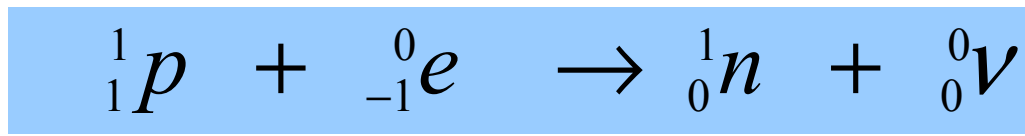
Exploité pour l'imagerie TEP

3.3 Capture électronique

excès de protons → capture d'1 é (K, L) par le noyau



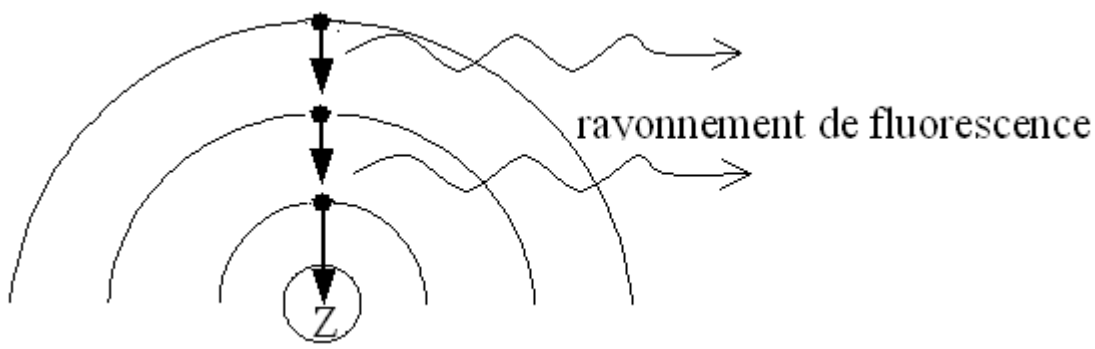
ou



Propre aux noyaux trop riches en protons (idem β⁺)

L'excès d'énergie est donné au neutrino

réarrangement électronique :
→ émission X de fluorescence



→ énergie disponible fournie à 1 é → ionisation

électron de Auger

4 Désintégration γ

(Interaction électromagnétique)

Transformation du noyau suite à une émission α ou β

On distingue 2 types d'émission :

- la radioactivité γ
 - la conversion interne
-

4.1 la radioactivité γ

Désexcitation du noyau avec émission d'1 photon γ

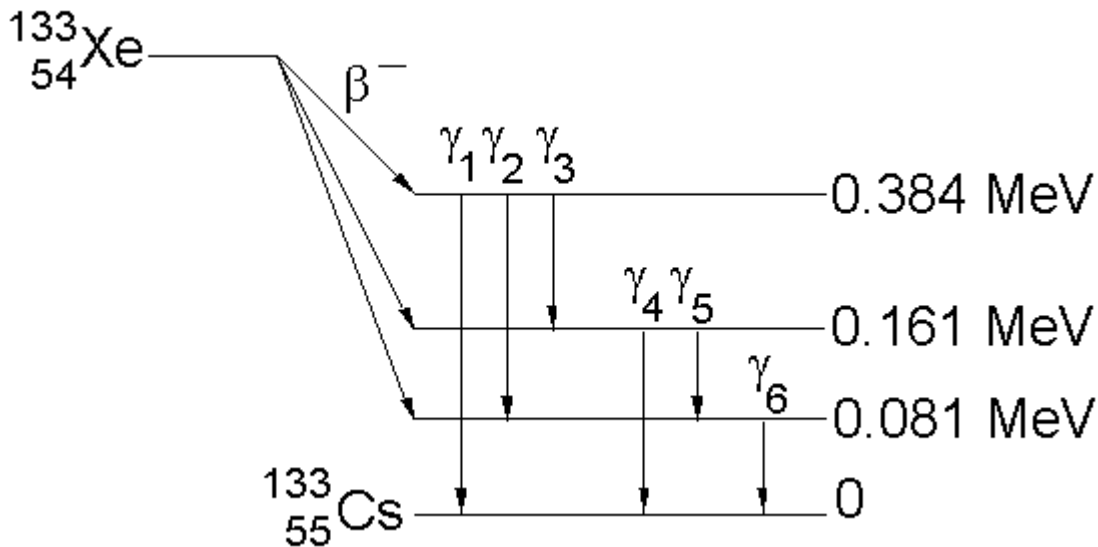


photon γ : $\lambda < 10^{-11}$ m $\nu > 10^{19}$ Hz $E > 100$ keV

La désexcitation n'est pas immédiate (10^{-16} à 10^{10} ans)

Désexcitation comparable à celle de l'atome

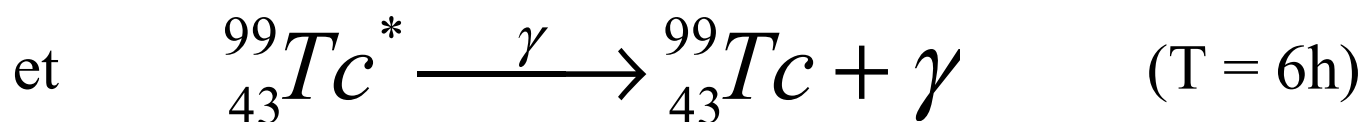
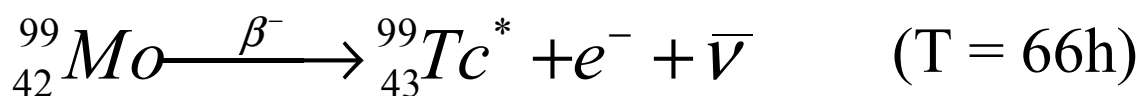
Le processus peut se faire en plusieurs étapes :



⇒ spectre de raie caractéristique de chaque noyau

applications importantes en médecine : imagerie

noyau très utilisé en médecine : Technétium (Tc)



Désexcitation en 2 temps → 2 photons émis
2keV et 140 keV

4.2 La conversion interne

La désexcitation du noyau n'est pas radiative

Transfert d'énergie direct du noyau vers un électron (K)

L'électron est éjecté avec une énergie cinétique

Le réarrangement électronique → Rayon X
→ Electron de Auger

L'électron de Auger = auto-ionisation
un électron est arraché par l'émission du RX

Processus en compétition avec l'émission γ

Dominant chez les gros atomes
(couche K plus proche du noyau)

5 – Les lois de la radioactivité

S'appliquent à tous les types de transformation

5.1 La loi de décroissance radioactive

- à l'instant t : $N(t)$ noyaux radioactifs
- pendant dt : dN noyaux se transforment

On montre que dN est proportionnel à dt et $N(t)$

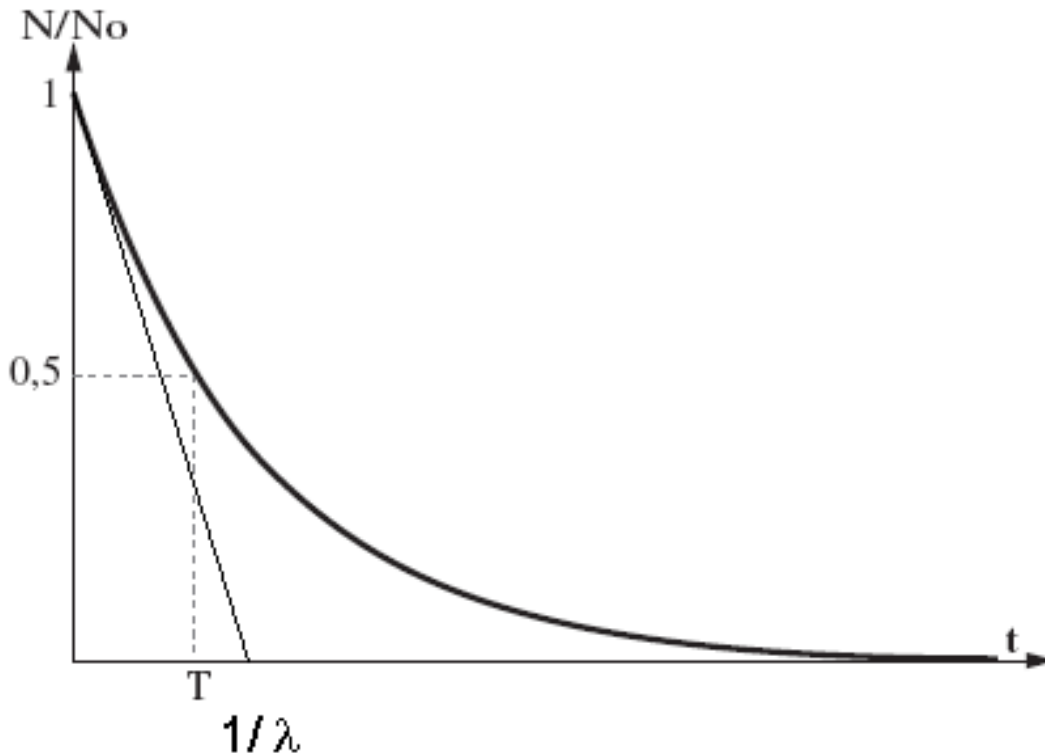
$$dN(t) = -\lambda N dt$$

| constante
radioactive (s^{-1})

avec N_0 = nombre de noyaux à $t = 0$

$$\Rightarrow N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$



Processus de nature probabiliste

- ne dépend pas de l'histoire de l'échantillon
- ne dépend que de la durée d'observation
- Peut être représenté par une loi binomiale

λ = probabilité d'occurrence par unité de temps

5.2 Définitions

• Période ou demi-vie T :

durée au bout de laquelle la moitié des noyaux se sont désintégrés

$$\text{à } t = T : N(T) = N_0 / 2 \quad \Rightarrow \quad e^{-\lambda \cdot T} = 0.5$$

$$\lambda = \frac{\text{Log } 2}{T}$$

ou

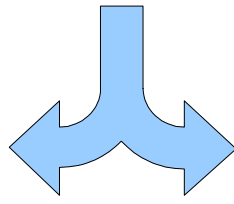
$$T = \frac{0,693}{\lambda}$$

ISOTOPE RADIOACTIF (Z, A)	PERIODE
Uranium 238 (238)	4 500 000 000 ans
Potassium 40 (39)	1 290 000 000 ans
Carbone 14 (12)	5 730 ans
Césium 137 (133)	30 ans
Tritium (1)	12 ans
Iode 131 (127)	8 jours
Iode 123 (127)	15 heures
Carbone 11 (12)	20 minutes
Oxygène 15 (16)	2 minutes
Polonium 212 (209)	0.0000003 secondes

● Période biologique T_b :

radioélément dans l'organisme

désintégration
radioactive



élimination
métabolique

$$dN = dN_p + dN_b$$

$$dN = -\lambda_p N dt - \lambda_b N dt = \lambda_{eff} N dt$$

$$\Rightarrow \lambda_{eff} = \lambda_p + \lambda_b \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_b}$$

Radionucléide	T_p	T_b	T_{eff}
Tritium ^3H	12.3 a	19 j	19 j
Carbone ^{14}C	5 730 a	180 j	180 j
Sodium ^{24}Na	0.63 j	29 j	0.62 j
Phospore ^{32}P	14.3 j	1 200 j	14.1 j
Soufre ^{35}S	87.1 j	22 j	17.6 j
Cobalt ^{60}Co	5.3 a	10 j	10 j
Strontium ^{90}Sr	28.5 a	50 a	18.2 a
Iode ^{131}I	8.1 j	180 j	7.8 j
Polonium ^{210}Po	138.4 j	60 j	41.9 j
Radium ^{226}Ra	1600 a	45 a	43.8 a
Plutonium ^{239}Pu	24 400 a	200 a	198 a

• Vie moyenne τ :

entre t et $t + dt \rightarrow dN$ noyaux se désintègrent

\Rightarrow le nombre de noyaux de durée de vie t est dN

la durée de vie moyenne τ est donc :

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t dN \quad \Rightarrow \quad \tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{\text{Log } 2} = 1,44.T$$

• Nombre de périodes n :

$$n = \frac{t}{T} \quad \Rightarrow \quad N = \frac{N_0}{2^n}$$

Ex. : en 10 périodes, une population de N noyaux sera réduite d'un facteur $2^{10} \approx 1000$

● Probabilité de désintégration P :

Probabilité de désintégration pendant Δt :

$$P(\Delta t) = \frac{\Delta t}{\tau}$$

Ex. : $T = 1600$ ans (radium)

$$\Rightarrow \tau = 1,443 \times 1600 = 2310 \text{ ans}$$

$$\Rightarrow P(1 \text{ an}) = \frac{1}{2310} = 0.04\%$$

● Activité (d'une source) :

Nombre de noyaux se désintégrant par seconde :

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

A = activité à t A_0 activité à $t = 0$

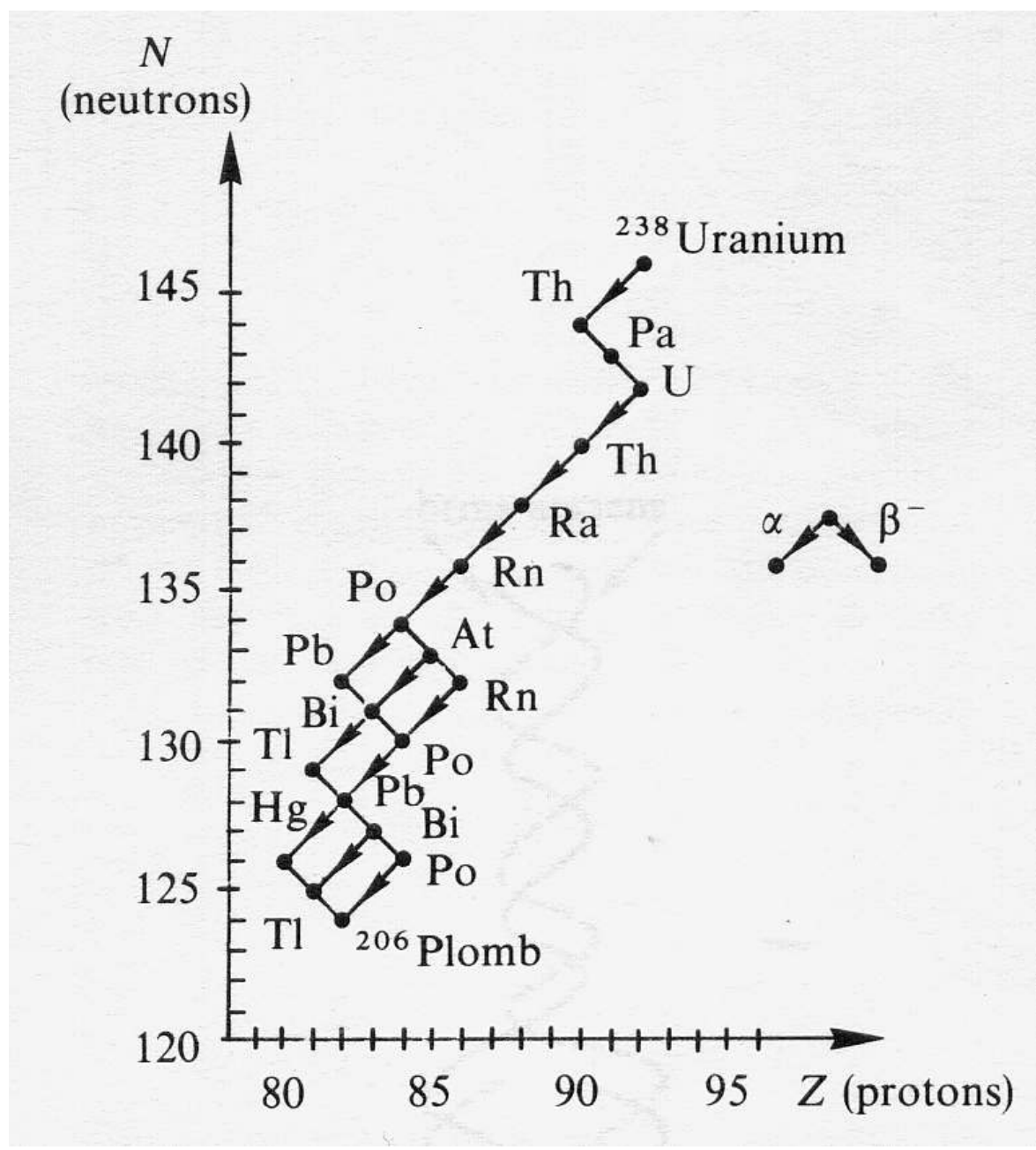
L'unité est le Becquerel (Bq)

1 Bq = 1 désintégration par seconde (d.p.s.)

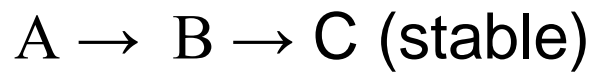
5 – Filiations radioactives

Si le noyau fils est radioactif,
le processus se poursuit...

Famille radioactive :
ensemble des noyaux issus d'un même noyau père



• constante radioactive ?



A : $N_A(t)$ de constante $\lambda_A \rightarrow$

$$N_A(t) = N_{A,0} \cdot e^{-\lambda_A \cdot t}$$

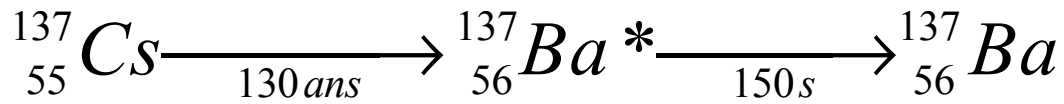
B : $N_B(t)$ de constante $\lambda_B \rightarrow$

$$\rightarrow N_B(t) = N_{A,0} \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t})$$

$N_B(t)$ dépend donc des valeurs relatives de λ_A et λ_B

• Pour $\lambda_A < \lambda_B$ 2 cas se présentent :

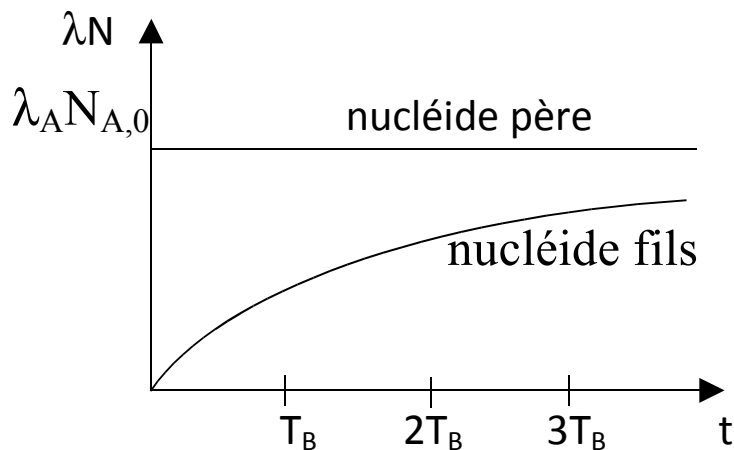
Ex.1 : $\lambda_A \ll \lambda_B$ ou $T_A \gg T_B$



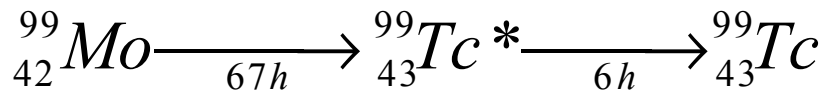
$$t \ll T_A \rightarrow N_A(t) \approx N_{A,0}$$

$$\rightarrow N_B(t) \approx N_{A,0} \frac{\lambda_A}{\lambda_B} (1 - e^{-\lambda_B t})$$

$T_A \gg T_B$

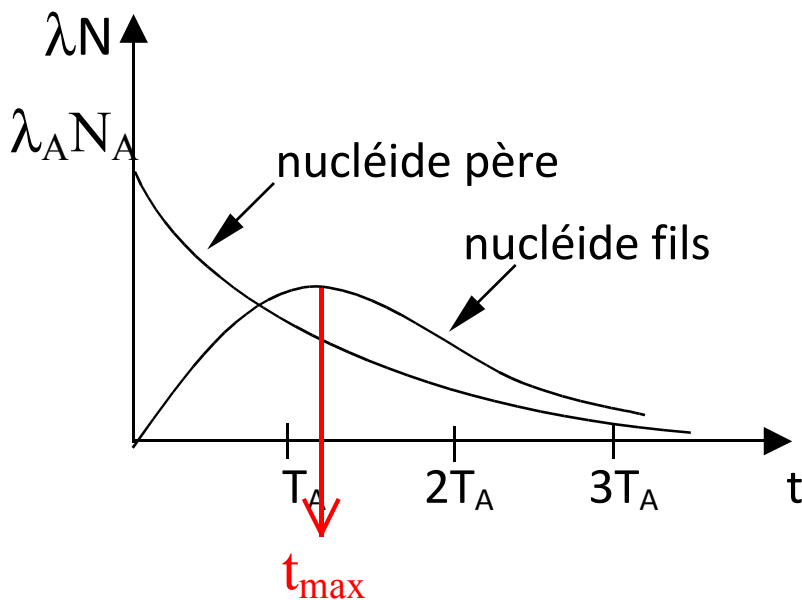


Ex.2 : $\lambda_A \approx \lambda_B$ ou $T_A \approx T_B$



à l'échelle de temps de B
 → l'activité de A décroît exponentiellement

$$T_A \approx T_B$$



l'activité de B passe par un maximum
 puis décroît comme celle de A

$$t_{\max} = \frac{1}{\lambda_B - \lambda_A} \text{Log}\left(\frac{\lambda_B}{\lambda_A}\right)$$