

## Option Rayonnements ionisants et radioprotection

*Pr. Abdel Mjid NOURREDDINE*

[Abdelmjid.nourreddine@ires.in2p3.fr](mailto:Abdelmjid.nourreddine@ires.in2p3.fr)

Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien  
UMR 7178 CNRS/in2p3 et Université Louis Pasteur  
B.P 28 - 67037 Strasbourg Cedex 2

Cours disponible sur le site :

<http://www.physique.u-strasbg.fr/ufr/cours-en-ligne.html>

Utilisateur : **L2S4**

Mot de passe : **ri07**



## RADIOACTIVITÉ

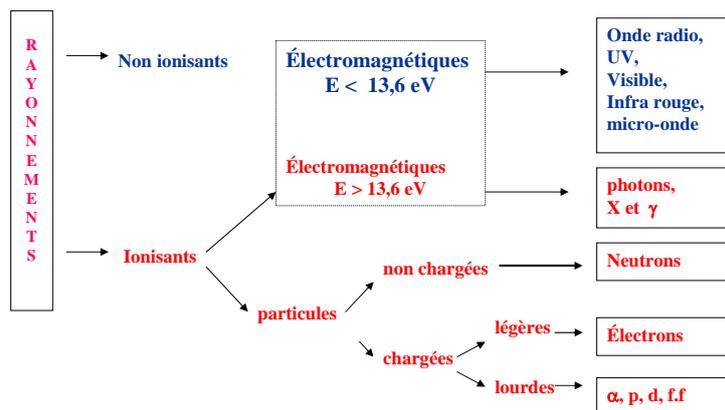
- NATURE ET ORIGINE DES RAYONNEMENTS
- MODES DE TRANSFORMATION
- ACTIVITE ET PERIODE RADIOACTIVE
- FILIATIONS RADIOACTIVES

# NATURE ET ORIGINE DES RAYONNEMENTS

## Classification des Rayonnements

**Deux catégories :**

- ✓ Rayonnements particulaires : **masse au repos, charge et énergie**
- ✓ Rayonnements électromagnétiques : **Énergie**



**Classement selon leurs effets sur la matière**

## Définitions

❖ Un rayonnement est dit "**ionisant**" lorsqu'il est susceptible d'arracher des électrons à la matière :

✓ Exemple : **Rayonnement  $\gamma$  et X**

✓ Condition :  $E_{RI} > B_e$  : énergie de liaison des électrons

⇒ matière biologique (**H, C, N, O**)  $11 < B_e < 14$  eV

Énergie d'ionisation :

**H : 13,54 eV**

**C : 11,24 eV**

**N : 14,24 eV**

**O : 13,57 eV**

❖ **Rayonnements non ionisants** :  $E_{RNI} < 13.6$  eV

✓ ondes radioélectriques,

✓ UV,

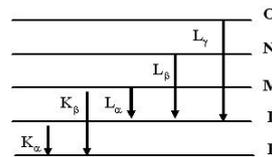
✓ visible,

✓ IR

## RI provenant du cortège électronique

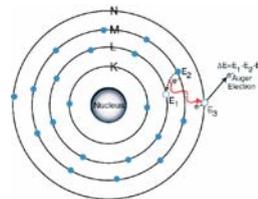
❖ **Photons X de fluorescence** :

excitation électronique  $W = W_K - W_L$



❖ **Électron Auger** :

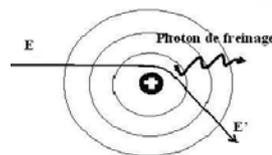
entre un rayon X et un électron du même atome



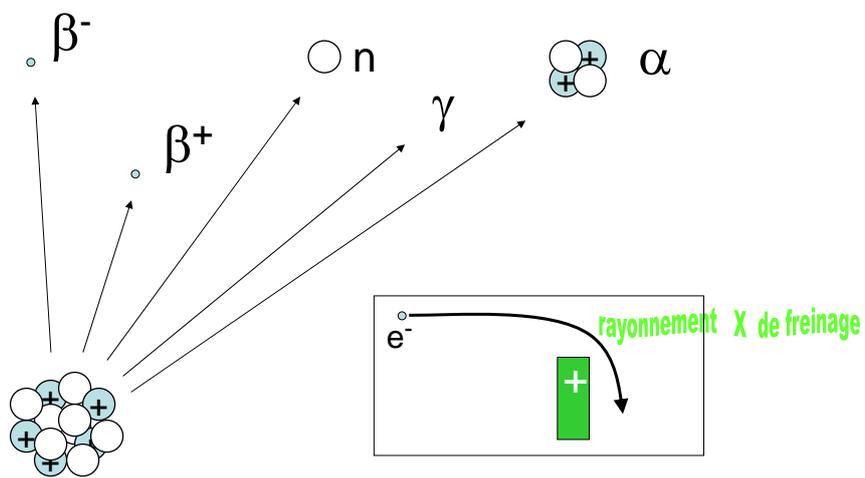
❖ **Rayonnement de freinage** :

Un électron dévié dans le champ d'un noyau atomique rayonne de l'énergie sous forme d'un rayonnement X de freinage.

$$E' = E - h\nu$$



## RI provenant du noyau



A. Nourreddine

Option L2-S4: Rayonnements ionisants et radioprotection

7/chapitre-3

## MODES DE TRANSFORMATIONS RADIOACTIVES

A. Nourreddine

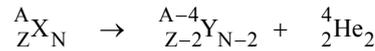
Option L2-S4: Rayonnements ionisants et radioprotection

8/chapitre-3

## Désintégration alpha

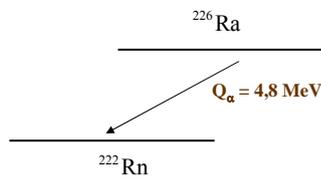
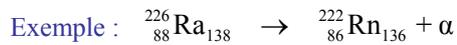
Concerne les noyaux lourds :  $Z > 70$

✓ Équation de désintégration :



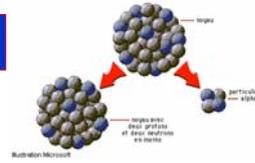
✓ Bilan de désintégration :  $Q_\alpha = (M_X - M_Y - M_\alpha)c^2 = T_Y + T_\alpha - T_X$

✓ Condition d'instabilité :  $Q_\alpha > 0 \Rightarrow M_X - M_Y > M_\alpha$



$$T_{\text{Rn}} = \frac{M_\alpha Q_\alpha}{(M_{\text{Rn}} + M_\alpha)} = 85 \text{ keV}$$

$$T_\alpha = \frac{M_{\text{Rn}} Q_\alpha}{(M_{\text{Rn}} + M_\alpha)} = 4,72 \text{ MeV}$$



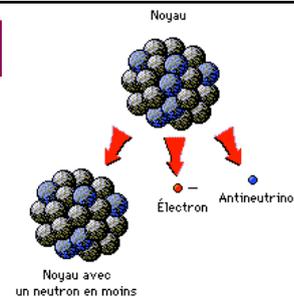
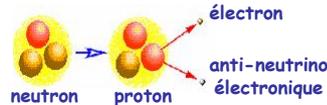
## Désintégration $\beta^-$

Concerne les noyaux riches en neutrons

✓ Équation de désintégration :

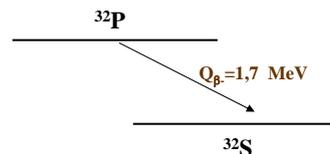


interprétation :



✓ Bilan de désintégration :  $Q_{\beta^-} = (M_X - M_Y)c^2 = T_e + T_{\bar{\nu}} = E_{\beta_{\text{max}}}$

✓ Condition d'instabilité :  $Q_{\beta^-} > 0 \Rightarrow M_X - M_Y > 0$



$^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N} + \beta^- + \bar{\nu}_e$

a) désintégration du  $^{14}_6\text{C}$   
 b) processus élémentaire de désintégration du neutron  
 c) transmutation d'un quark *down* en un quark *up*

A. Nourredine      Option L2-S4: Rayonnements ionisants et radioprotection      11/chapitre-3

### Désintégration $\beta^+$

Concerne les noyaux riches en protons

✓ Équation de désintégration :

$$^A_Z\text{X}_N \rightarrow ^A_{Z-1}\text{Y}_{N+1} + e^+ + \nu_e$$

interprétation :

Noyau  
Noyau avec un proton en moins et un neutron en plus  
Positron  
Neutrino

✓ Bilan :  $Q_{\beta^+} = (M_X - M_Y - 2m_e)c^2 = T_{e^+} + T_{\nu} = E_{\beta^+_{\text{max}}}$

✓ Condition d'instabilité :  $Q_{\beta^+} > 0 \Rightarrow M_X - M_Y > 2m_e$

Exemple :  $^{22}_{11}\text{Na}_{11} \rightarrow ^{22}_{10}\text{Ne}_{12} + e^+ + \nu_e$

A. Nourredine      Option L2-S4: Rayonnements ionisants et radioprotection      12/chapitre-3

## Capture Électronique (CE)

Concerne les noyaux riches en protons

Capture d'un électron orbital du noyau

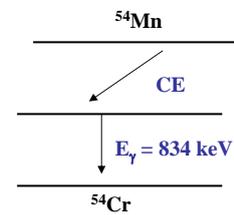
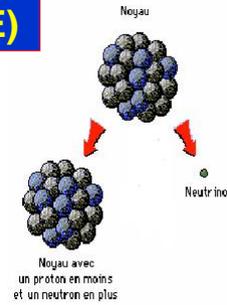
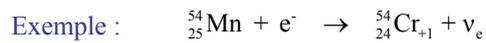
➤ Équation de désintégration :



interprétation :  $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$

➤ Condition d'instabilité :  $(M_X - M_Y)c^2 > B_K$

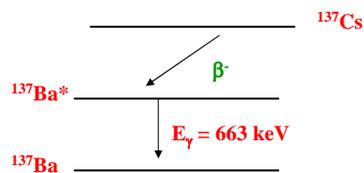
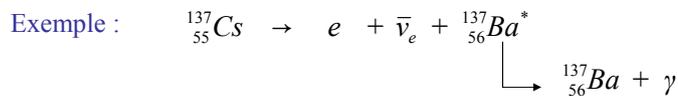
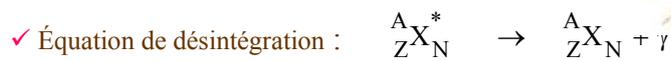
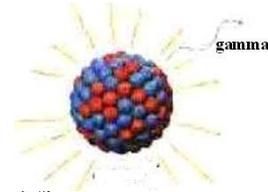
$$B_e(\text{eV}) = 15,73Z^{7/3} < 2m_e c^2$$



## Désintégration $\gamma$

Accompagne le plus souvent la radioactivité  $\alpha$  ou  $\beta$

Réarrangement des nucléons au sein du noyau



## Conversion interne (CI)

Phénomène en compétition avec l'émission  $\gamma$

Un noyau se désexcite en **transmettant** directement son énergie à un électron de son cortège électronique

L'électron est libéré de sa couche si l'énergie qui lui été communiquée est supérieure à son énergie de liaison :

**électron de conversion**

**Conséquence :** Le réarrangement du cortège électronique s'accompagne **d'émission de rayon X**

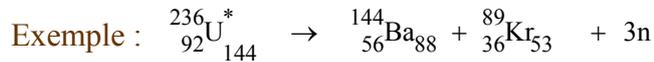
## Fission spontanée

Un noyau lourd **se scinde** en deux autres noyaux moins lourds : **fragments de fission** avec émission de x neutrons

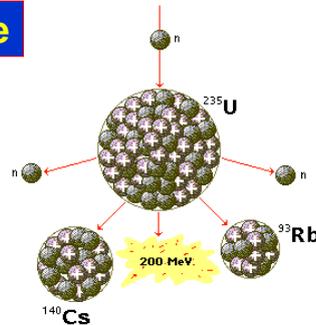
Équation de fission :



**Bilan :**  $Q_{FS} = (M_X - M_{Y1} - M_{Y2} - xm_n)c^2$



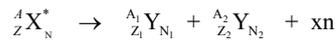
${}^{238}U \Rightarrow T_{FS} = 8 \cdot 10^{15}$  ans et  $T_{\alpha} = 4,5 \cdot 10^9$  ans



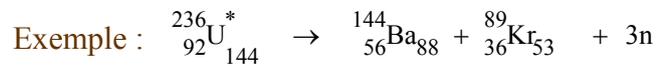
## Stabilité et instabilité nucléaire

Un noyau lourd se scinde en deux autres noyaux moins lourds : **fragments de fission** avec émission de x neutrons

Équation de fission :



Bilan :  $Q_{FS} = (M_X - M_{Y1} - M_{Y2} - x m_n) c^2$



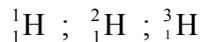
${}^{238} U \Rightarrow T_{FS} = 8 \cdot 10^{15}$  ans et  $T_{\alpha} = 4,5 \cdot 10^9$  ans

## Stabilité et instabilité nucléaire

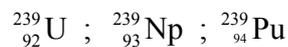
❖ Nucléides stables : 300

❖ Radionucléides : 2700

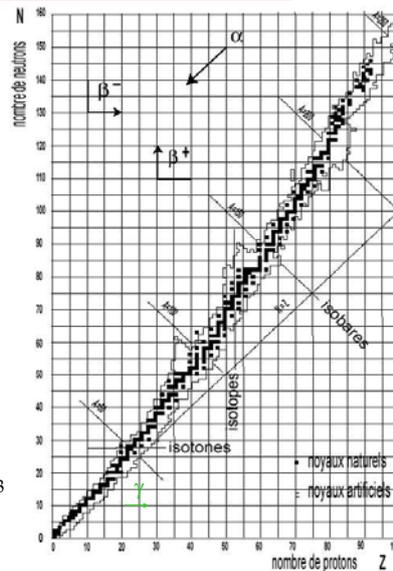
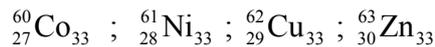
✓ **Isotopes** : même Z



✓ **Isobares** : même A



✓ **Isotones** : même N

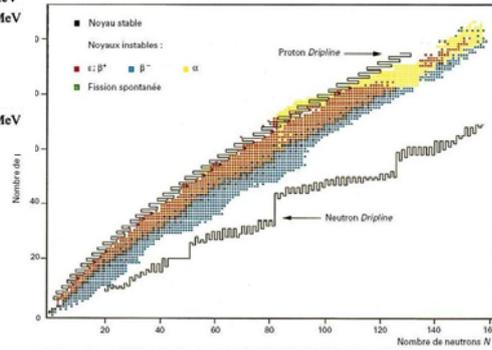
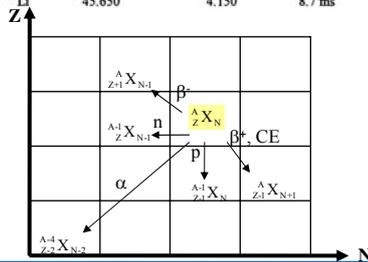


## Stabilité nucléaire

- ❖ Noyau n'est susceptible d'exister que si l'**assemblage** des Z protons et N neutrons est **lié**
  - ✓ sur les **111** éléments connus actuellement : **30** ne possèdent aucun isotope stable
  - ✓ noyau stable  $\Rightarrow B_m(A, Z)$  **maximum**

Charte des isotopes :  
3139 nuclides dont 287 naturels

	Energie de liaison B (MeV)	Energie par nucléon B/A (MeV)	$T_{1/2}$	instabilité
${}^4\text{Li}$	4.620	1.155	inconnu	$S(p) = -3.1 \text{ MeV}$
${}^5\text{Li}$	26.330	5.266	$3 \cdot 10^{22} \text{ s}$	$S(p) = -1.96 \text{ MeV}$
${}^6\text{Li}$	31.994	5.332		stable
${}^7\text{Li}$	39.244	5.606		stable
${}^8\text{Li}$	41.278	5.160	840 ms	
${}^9\text{Li}$	45.341	5.038	178 ms	
${}^{10}\text{Li}$	44.920	4.492	$3 \cdot 10^{21} \text{ s}$	$S(n) = -0.42 \text{ MeV}$
${}^{11}\text{Li}$	45.650	4.150	8.7 ms	



**Dripline : limites théoriques des noyaux liés**

## Paraboles de masse

- ❖ Formule de masse de Weizäcker :  $M(A, Z) = Zm_H + (A - Z)m_n - B(A, Z)/c^2 = a_0 + a_1Z + a_2Z^2$

$$a_0 = (m_n c^2 - a_v + a_s A^{1/3} + a_a) A \pm \delta \quad a_1 = (m_H - m_n) c^2 - 4a_a \quad a_2 = (a_c A^{1/3} + \frac{4a_a}{A})$$

$$\text{Isobare le plus stable : } \left( \frac{\partial M}{\partial Z} \right)_{A=\text{cte}} = 2a_2 Z_0 + a_1 = 0 \Rightarrow Z_0 \approx \frac{A}{2 + 0,015A^{2/3}}$$

- ❖ **Transition A impair :**

$$\checkmark \beta^- ; \text{réactions } (p, n) ; (d, 2n) \Rightarrow Q_{\beta^-} = M(Z, A) - M(A, Z+1) = 2a_2(Z_0 - Z - \frac{1}{2})$$

$$\checkmark \beta^+ ; \text{CE ; réactions } (n, p) \Rightarrow Q_{\beta^+} = M(Z, A) - M(A, Z-1) = 2a_2(Z - Z_0 - \frac{1}{2})$$

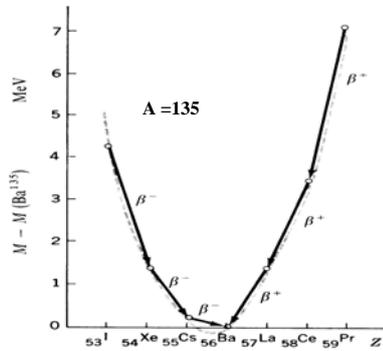
- ❖ **Transition A pair : Estimation de l'énergie d'appariement  $\delta$**

$$M(A, Z_0) = a_0 A - a_2 Z_0^2 + \delta \quad \text{pour } Z \text{ et } N \text{ impairs}$$

$$M(A, Z_0) = a_0 A - a_2 Z_0^2 - \delta \quad \text{pour } Z \text{ et } N \text{ pairs}$$

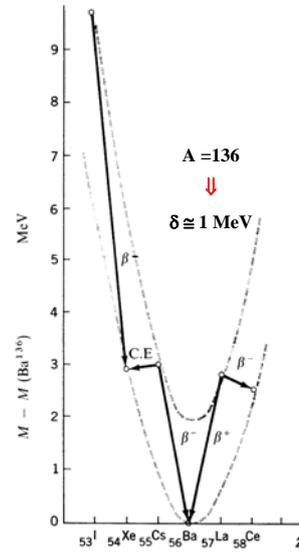
$$Q_{\beta^\pm} = 2a_0 [\pm(Z - Z_0) - \frac{1}{2}] + \begin{cases} + 2\delta & \text{pour } Z \text{ impair} \\ - 2\delta & \text{pour } Z \text{ pair} \end{cases}$$

## Exemple de Paraboles de masse



Systématique des noyaux (pair-pair) et (impair-impair)

$$\delta \approx \frac{12}{\sqrt{A}}$$



A. Nourreddine

Option L2-S4: Rayonnements ionisants et radioprotection

21/chapitre-3

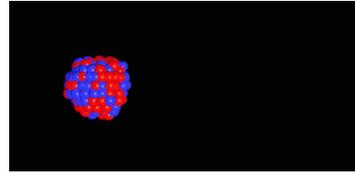
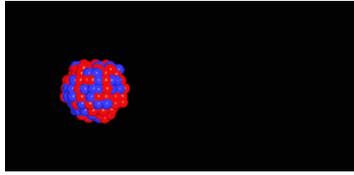
## ACTIVITE ET PERIODE RADIOACTIVE

A. Nourreddine

Option L2-S4: Rayonnements ionisants et radioprotection

22/chapitre-3

## Période et vie moyenne

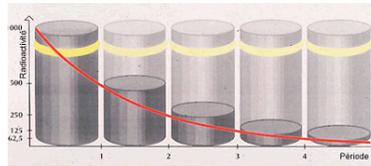


❖ Loi de décroissance :  $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$

❖ Activité :  $A(t) = \lambda N(t)$

❖ Période :  $T = \frac{\ln 2}{\lambda}$

❖ Vie moyenne :  $\tau = \frac{1}{\lambda} = 1,44T$



$$A(nT) = \frac{A_0}{2^n}$$

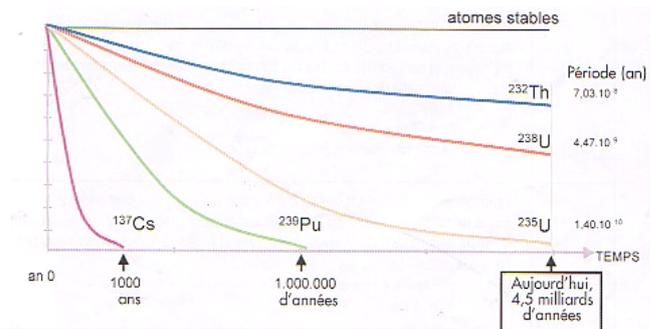
❖ **Unité de l'activité : Bq**      **1 Bq = 1 dps = 27 pCi**      **1 Ci = 37 GBq**

## Période radioactive

**Exemple :** Décroissance de la radioactivité naturelle créée lors de la formation de la Terre

❖ Relation masse-période

$$m = \frac{1}{6,02 \cdot 10^{23}} \frac{A M}{\lambda}$$



Radioélément	Période	Activité massique(Bq/g)
$^{131}\text{I}$	8 jours	$4,6 \cdot 10^{15}$
$^{137}\text{Cs}$	30 ans	$3,2 \cdot 10^{12}$
$^{239}\text{Pu}$	24 000 ans	$23 \cdot 10^9$
$^{238}\text{U}$	$4,5 \cdot 10^9$ ans	$12,3 \cdot 10^3$

## Origine de la radioactivité

### Le Becquerel est une très petite unité

- ✓ Eau minérale : 2 à 4 Bq/L <sup>40</sup>K  
0,02 à 1,8 Bq/L <sup>226</sup>Ra  
0,01 à 0,9 Bq/L <sup>238</sup>U
- ✓ Eau de pluie : 0,5 Bq/L
- ✓ Eau de mer : 13 Bq/L <sup>40</sup>K + traces U, <sup>3</sup>H, <sup>87</sup>Rb
  
- ✓ Poisson : 100 Bq/kg <sup>40</sup>K
- ✓ Lait : 80 Bq/kg dont 62 % <sup>40</sup>K
- ✓ Pomme de terre : 150 Bq/kg <sup>40</sup>K
  
- ✓ Engrais phosphatés : 5 000 Bq/kg U, Th, <sup>40</sup>K
- ✓ Sédiments : 400 Bq/kg <sup>40</sup>K + 12 % U-Th
- ✓ Granite : 8 000 Bq/kg 600 à 2000 <sup>238</sup>U ; 600 <sup>226</sup>Ra
  
- ✓ Matériaux de construction :
  - Béton : 200 à 1 000 Bq/kg <sup>40</sup>K
  - Briques : 600 à 1 000 Bq/kg <sup>40</sup>K
  - Plâtre : 50 à 1 000 Bq/kg <sup>226</sup>Ra dominant du au phosphogypse



A. Nourreddine

Option L2-S4: Rayonnements ionisants et radioprotection

25/chapitre-3

## Origine de la radioactivité

- ✓ Corps humain adulte : 4 500 Bq <sup>40</sup>K  
3 700 Bq <sup>14</sup>C



Nous sommes des sources radioactives

- ✓ Essais atmosphériques : 1945 à 1981  
423 essais = 143 USA + 142 URSS + 45 FR + 21 GB + 22 Chine

➡ <sup>90</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs, <sup>106</sup>Ru

- ✓ Accidents des installations nucléaires :

- ❖ 1957 : Windscale (GB)
- ❖ 1986 : Tchernobyl (URSS) ➡ <sup>131</sup>I, <sup>134-137</sup>Cs, <sup>106</sup>Ru



- ✓ Industries nucléaires :

	Rejets liquides	Rejets gazeux
Réacteur nucléaire	<sup>3</sup> H, <sup>60</sup> Co, <sup>54</sup> Mn, <sup>110</sup> Ag, <sup>131</sup> I, <sup>137</sup> Cs	<sup>3</sup> H, <sup>14</sup> C, <sup>85</sup> Kr, <sup>131</sup> I
Usine de retraitement	<sup>3</sup> H, <sup>14</sup> C, <sup>90</sup> Sr, <sup>129</sup> I, <sup>137</sup> Cs	<sup>3</sup> H, <sup>14</sup> C, <sup>85</sup> Kr, <sup>129</sup> I

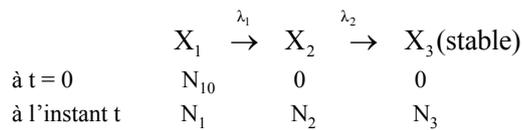
A. Nourreddine

Option L2-S4: Rayonnements ionisants et radioprotection

26/chapitre-3

# FILIATIONS RADIOACTIVES

## Filiation à trois corps



$$\text{Population } X_1 : -\frac{dN_1}{dt} = \lambda_1 N_1 \Rightarrow N_1(t) = N_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

$$\text{Population } X_2 : -\frac{dN_2}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_1 N_1 \Rightarrow N_2(t) = N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

$$\text{Population } X_3 : N_3(t) = N_{10} \left( 1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{-\lambda_1 t} \right)$$

$$\text{Si } N_{20} \neq 0 \text{ et } N_{30} \neq 0 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l}
 N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_{20} e^{-\lambda_2 t} \\
 N_3(t) = N_{30} + N_{20} (1 - e^{-\lambda_1 t}) + (N_{10} \left( 1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{-\lambda_1 t} \right))
 \end{array} \right.$$

## Équilibres idéal

Si on se place dans le cas où à  $t = 0$  on a  $N_{20} = N_{30} = 0$ , l'évolution de l'activité de  $X_2$  :

$$A_2(t) = \lambda_2 N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} (1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t})$$

$A_2$  est maximale si :  $\frac{dN_2}{dt} = 0 \Rightarrow \lambda_2 N_2(t_m) = \lambda_1 N_1(t_m)$

$$t_m = \frac{\text{Log} \frac{\lambda_2}{\lambda_1}}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \frac{\text{Ln} \frac{T_1}{T_2}}{\text{Ln} 2}$$

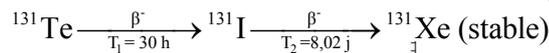
La connaissance de  $t_m$  est importante en particulier en médecine nucléaire pour le diagnostic où on injecte le produit  $X_1$  et on essaye de minimiser les effets néfastes du produit fils.

⇒ On choisit alors un radioisotope tel que  $t_m$  soit supérieur au temps d'élimination biologique.

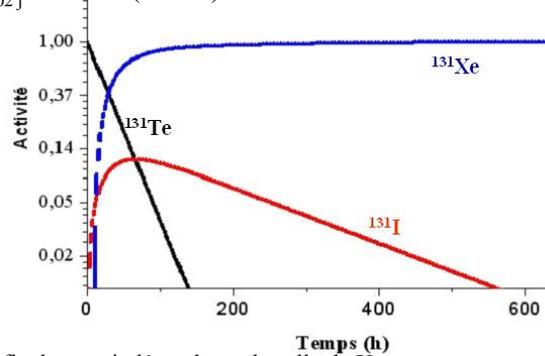
## Équilibres de régime

❖ Cas  $T_1 < T_2$

Le rapport des activités croît constamment avec le temps :  $\frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} (e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t} - 1)$



L'activité de  $^{131}\text{I}$  est maximale au bout de  $t_m = 95$  h  
Le rapport des activités augmente continuellement avec le temps.



Si  $T_1 \ll T_2$ , l'activité de  $X_2$  devient finalement indépendante de celle de  $X_1$ .

Pour  $t \gg T_1$ , l'activité de  $X_2$  atteint la valeur :  $A_2 = N_0 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}$

## Équilibres de régime

### ❖ Cas $T_1 \cong T_2$

$$T_1 = T_2(1 + \varepsilon)$$

Le rapport des activités croît quasi linéairement tant que  $t \ll 2\tau_2/\varepsilon$  :

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{1 + \varepsilon}{\varepsilon} \left(1 - e^{-\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} \frac{t}{\tau_2}}\right) \approx \frac{t}{\tau_2}$$

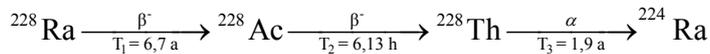
### ❖ Cas $T_1 > T_2$

Le rapport des activités croît d'abord avec le temps puis finit par atteindre une valeur constante :

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \left(1 - e^{-\frac{T_1 - T_2}{T_1} \lambda_2 t}\right)$$

Pour  $t \gg \tau_2 T_1 / (T_1 - T_2)$ , ce rapport prend la valeur simple :  $\frac{A_2}{A_1} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$

**Équilibre de régime** : Quand le rapport des activités de  $X_1$  et  $X_2$  est constant et  $> 1$



$$\text{Équilibre de régime entre } ^{228}\text{Ra} \text{ et } ^{228}\text{Th} \quad \frac{A(^{228}\text{Th})}{A(^{228}\text{Ra})} = \frac{6,7}{6,7 - 1,9} = 1,39$$

## Équilibre séculaire

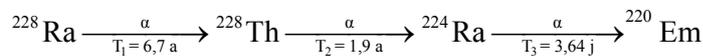
### ❖ Cas $T_1 > T_2$

l'activité du descendant augmente suivant une loi simple :  $A_2 = N_0 \lambda_1 (1 - e^{-\lambda_2 t})$

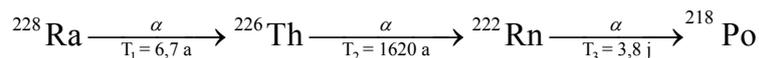
Dans le cas où  $t \gg T_2$ , le rapport des activités des noyaux  $X_1$  et  $X_2$  sont égales, on dit qu'ils sont en « **équilibre séculaire** ».

Exemples d'application

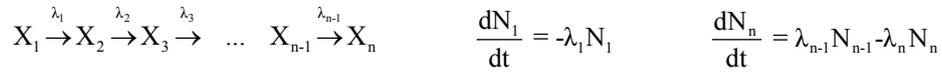
#### ✓ découverte du $^{224}\text{Ra}$ à partir du $^{228}\text{Th}$ (Rutherford et Soddy)



#### ✓ Génération des sources radon à partir du radium



## Généralisation à n corps



La solution générale correspondante ( $N_{n0} = 0$  pour  $n \neq 0$ ) s'écrit :

$$N_n(t) = C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t} + \dots + C_n e^{-\lambda_n t}$$

$$C_1 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_{n-1}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_n - \lambda_1)} N_{10}$$

$$C_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_{n-1}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2) \dots (\lambda_n - \lambda_2)} N_{10}$$

$$C_n = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_{n-1}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_n - \lambda_1)} N_{10}$$

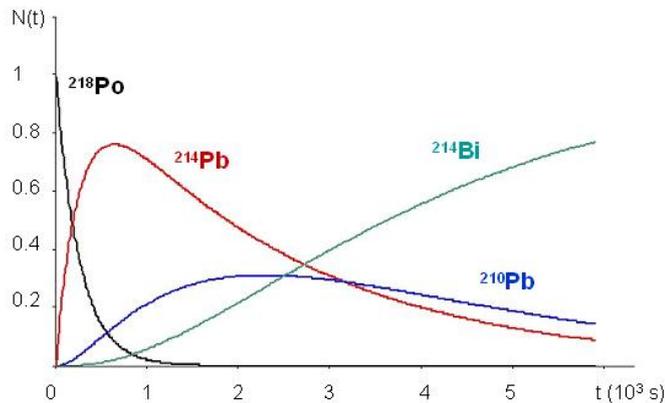
A. Nourreddine

Option L2-S4: Rayonnements ionisants et radioprotection

33/chapitre-3

## Exemple de filiation à n corps

Chaîne de décroissance des descendants du  $^{222}\text{Rn}$  provenant de la famille  $^{238}\text{U}$  :



A. Nourreddine

Option L2-S4: Rayonnements ionisants et radioprotection

34/chapitre-3

## Décroissance de la famille $^{238}\text{U}$

