

Option Rayonnements ionisants et radioprotection

Pr. Abdel Mjid NOURREDDINE

Abdelmjid.nourreddine@ires.in2p3.fr

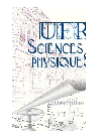
Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien
UMR 7178 CNRS/in2p3 et Université Louis Pasteur
B.P 28 - 67037 Strasbourg Cedex 2

Cours disponible sur le site :

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

Utilisateur : **L2S4**

Mot de passe : **ri07**



A. Nourreddine

Option L2-S4: Rayonnements ionisants et radioprotection

1/chapitre-3

RADIOACTIVITÉ

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

A. Nourreddine

Option L2-S4: Rayonnements ionisants et radioprotection

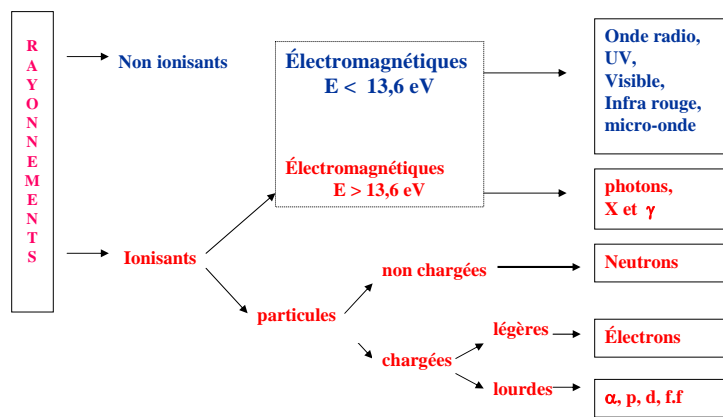
2/chapitre-3

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 γ 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,

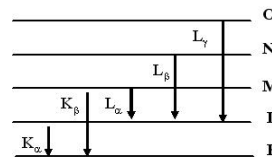
✓ visible,

✓ IR

RI provenant du cortège électronique

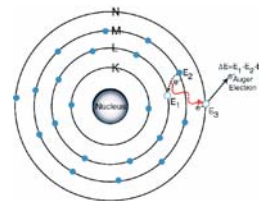
❖ Photons X de fluorescence :

excitation électronique $W = W_K - W_L$



❖ Électron Auger :

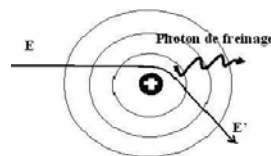
entre un rayon X et un électron du même atome



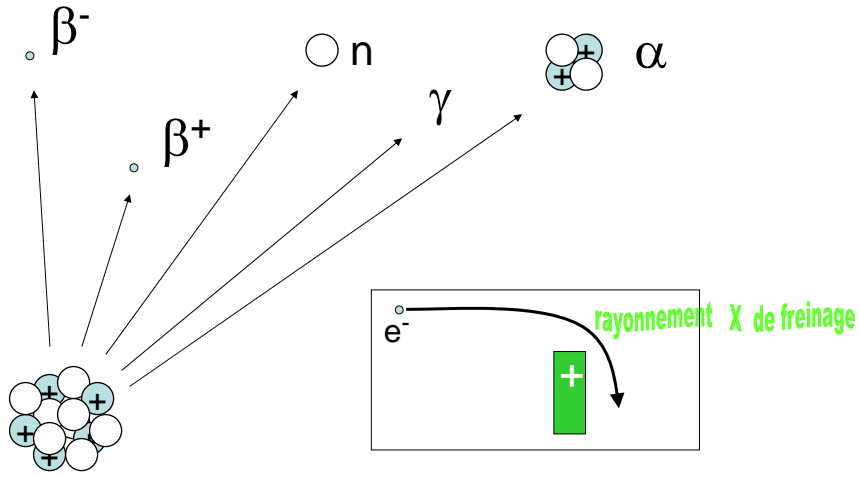
❖ Rayonnement de freinage :

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

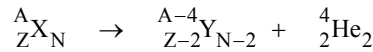
Option L2-S4: Rayonnements ionisants et radioprotection

8/chapitre-3

Désintégration alpha

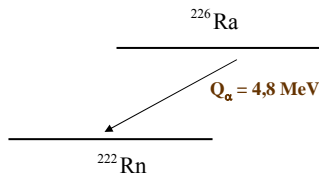
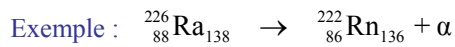
Concerne les noyaux lourds : $Z > 70$

✓ Équation de désintégration :



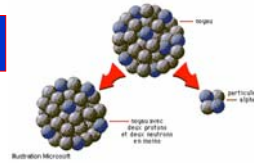
✓ Bilan de désintégration : $Q_\alpha = (M_X - M_Y - M_\alpha)c^2 = T_Y + T_\alpha - T_X$

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



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

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



A. Nourredine

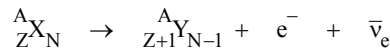
Option L2-54: Rayonnements ionisants et radioprotection

9/chapitre-3

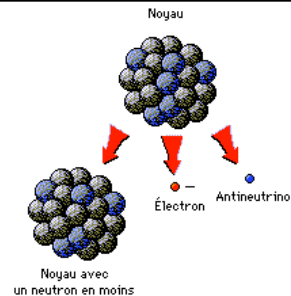
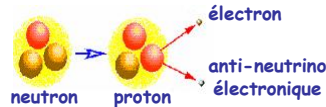
Désintégration β^-

Concerne les noyaux riches en neutrons

✓ Équation de désintégration :

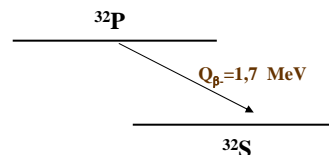
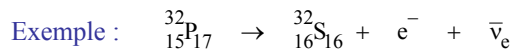


interprétation :



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

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



A. Nourredine

Option L2-54: Rayonnements ionisants et radioprotection

10/chapitre-3

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

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 β^+

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

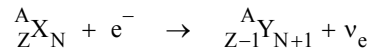
A. Nourredine Option L2-S4: Rayonnements ionisants et radioprotection 12/chapitre-3

Capture Électronique (CE)

Concerne les noyaux riches en protons

Capture d'un électron orbital du noyau

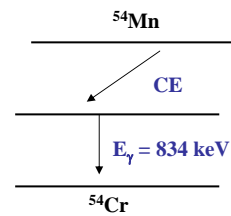
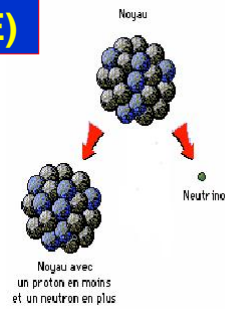
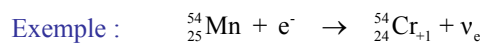
➤ Équation de désintégration :



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

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

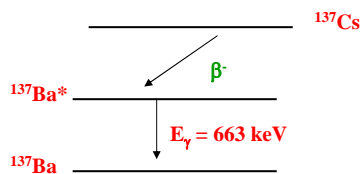
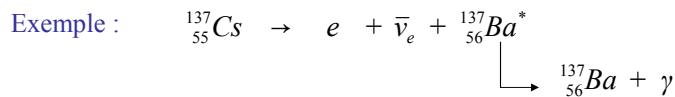
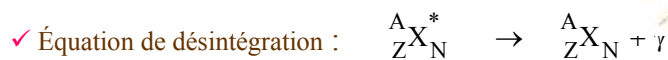
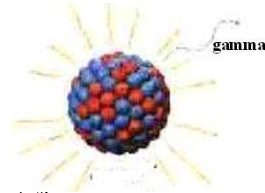
$$B_e(\text{eV}) = 15,73Z^{7/3} < 2m_e c^2$$



Désintégration γ

Accompagne le plus souvent la radioactivité α ou β

Réarrangement des nucléons au sein du noyau



Conversion interne (CI)

Phénomène en compétition avec l'émission γ

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 :

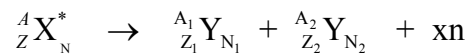
électron de conversion

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

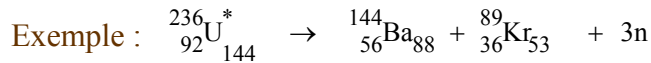
Fission spontanée

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

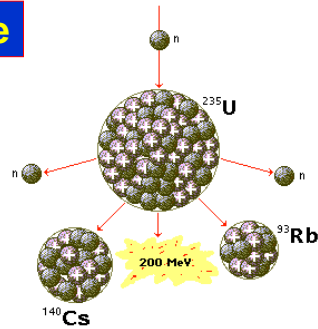
Équation de fission :



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



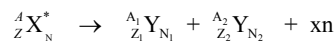
${}^{238}U \Rightarrow T_{FS} = 8 \cdot 10^{15}$ ans et $T_{\alpha} = 4,5 \cdot 10^9$ ans



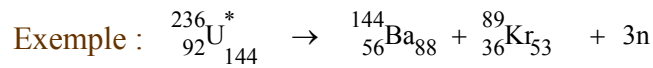
Stabilité et instabilité nucléaire

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

Équation de fission :



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



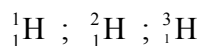
${}^{238} U \Rightarrow T_{FS} = 8 \cdot 10^{15}$ ans et $T_{\alpha} = 4,5 \cdot 10^9$ ans

Stabilité et instabilité nucléaire

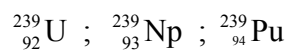
❖ Nucléides stables : 300

❖ Radionucléides : 2700

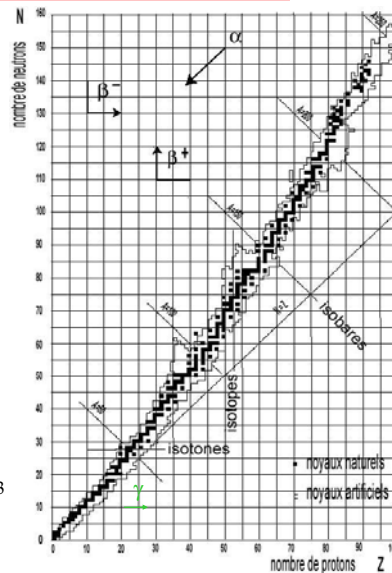
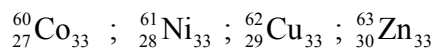
✓ **Isotopes** : même Z



✓ **Isobares** : même A



✓ **Isotones** : même N

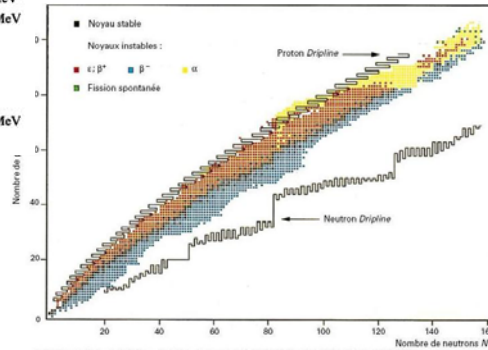
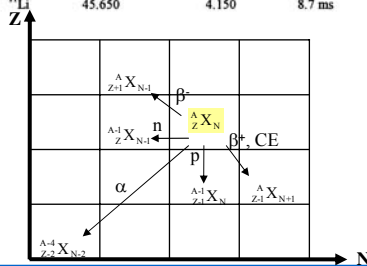


Stabilité nucléaire

- ❖ 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 nucléides 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	



Dripeline : limites théoriques des noyaux liés

A. Nourreddine

Option L2-S4: Rayonnements ionisants et radioprotection

19/chapitre-3

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 δ

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

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

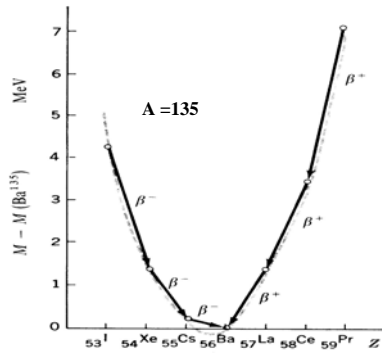
$$Q_{\beta^\pm} = 2a_0 [\pm(Z - Z_0) - \frac{1}{2}] + \begin{cases} +2\delta & \text{pour } Z \text{ impair} \\ -2\delta & \text{pour } Z \text{ pair} \end{cases}$$

A. Nourreddine

Option L2-S4: Rayonnements ionisants et radioprotection

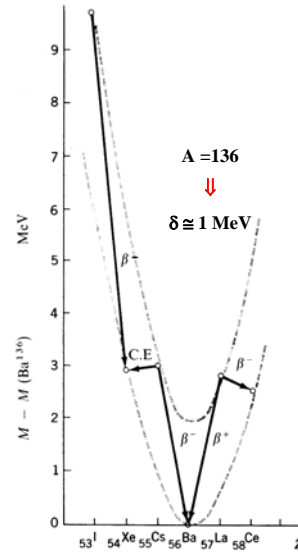
20/chapitre-3

Exemple de Paraboles de masse



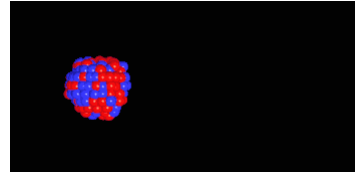
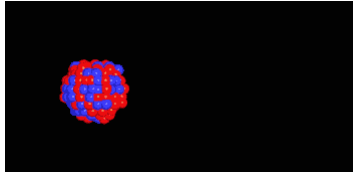
Systématique des noyaux (pair-pair) et (impair-impair)

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



ACTIVITE ET PERIODE RADIOACTIVE

Période et vie moyenne

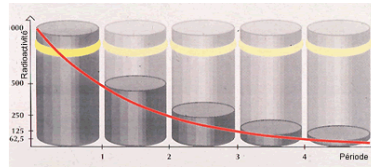


❖ Loi de décroissance : $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$

❖ Activité : $A(t) = \lambda N(t)$

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

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



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

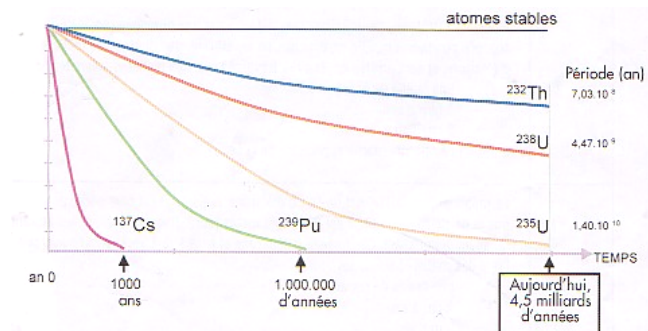
❖ **Unité de l'activité : Bq** **1 Bq = 1 dps = 27 pCi** **1 Ci = 37 GBq**

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}I	8 jours	$4,6 \cdot 10^{15}$
^{137}Cs	30 ans	$3,2 \cdot 10^{12}$
^{239}Pu	24 000 ans	$23 \cdot 10^9$
^{238}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 ⁴⁰K
0,02 à 1,8 Bq/L ²²⁶Ra
0,01 à 0,9 Bq/L ²³⁸U
- ✓ Eau de pluie : 0,5 Bq/L
- ✓ Eau de mer : 13 Bq/L ⁴⁰K + traces U, ³H, ⁸⁷Rb

- ✓ Poisson : 100 Bq/kg ⁴⁰K
- ✓ Lait : 80 Bq/kg dont 62 % ⁴⁰K
- ✓ Pomme de terre : 150 Bq/kg ⁴⁰K

- ✓ Engrais phosphatés : 5 000 Bq/kg U, Th, ⁴⁰K
- ✓ Sédiments : 400 Bq/kg ⁴⁰K + 12 % U-Th
- ✓ Granite : 8 000 Bq/kg 600 à 2000 ²³⁸U ; 600 ²²⁶Ra

- ✓ Matériaux de construction :
 - Béton : 200 à 1 000 Bq/kg ⁴⁰K
 - Briques : 600 à 1 000 Bq/kg ⁴⁰K
 - Plâtre : 50 à 1 000 Bq/kg ²²⁶Ra dominant du au phosphogypse



A. Nourredine

Option L2-S4: Rayonnements ionisants et radioprotection

25/chapitre-3

Origine de la radioactivité

- ✓ Corps humain adulte : 4 500 Bq ⁴⁰K
3 700 Bq ¹⁴C



Nous sommes des sources radioactives

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

➡ ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, ¹⁰⁶Ru

- ✓ Accidents des installations nucléaires :

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



- ✓ Industries nucléaires :

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

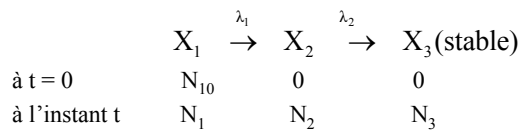
A. Nourredine

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

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

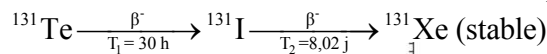
La connaissance de t_m est importante en particulier en médecine nucléaire pour le diagnostic où on injecte le produit X_1 et on essaye de minimiser les effets néfastes du produit fils.

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

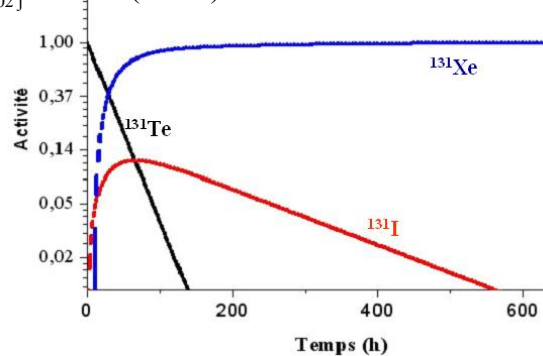
Équilibres de régime

❖ 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}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 $t \ll 2\tau_2/\varepsilon$:

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

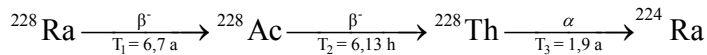
❖ **Cas $T_1 > T_2$**

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



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

Équilibre séculaire

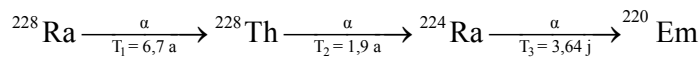
❖ **Cas $T_1 > T_2$**

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

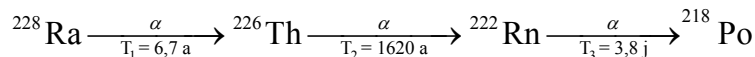
Dans le cas où $t \gg T_2$, le rapport des activités des noyaux X_1 et X_2 sont égales, on dit qu'ils sont en « **équilibre séculaire** ».

Exemples d'application

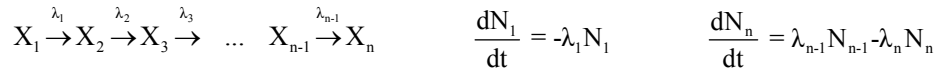
✓ **découverte du ^{224}Ra à partir du ^{228}Th (Rutherford et Soddy)**



✓ **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 :

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

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

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

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

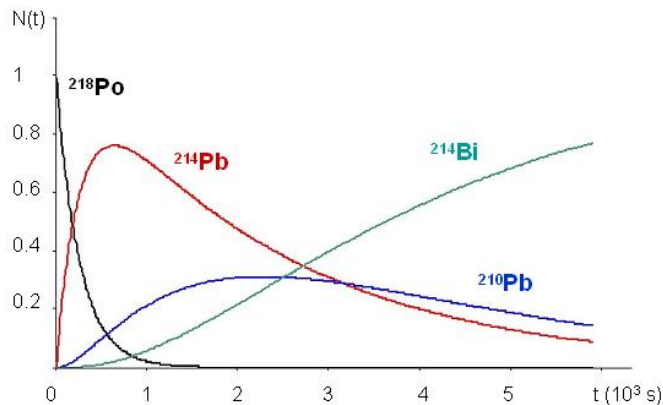
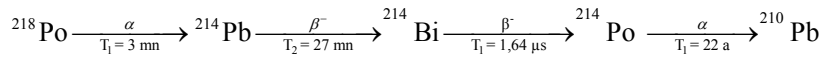
A. Nourreddine

Option L2-S4: Rayonnements ionisants et radioprotection

33/chapitre-3

Exemple de filiation à n corps

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



A. Nourreddine

Option L2-S4: Rayonnements ionisants et radioprotection

34/chapitre-3

Décroissance de la famille ^{238}U

