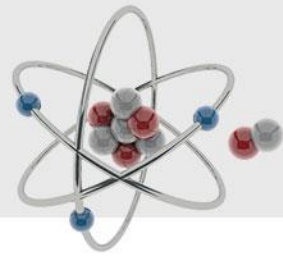




Prospection Radionucléaire

Dr. S.E. BENTRIDI

Plan du Cours



Méthode de Prospection Nucléaire

Chapitre 1: Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Chapitre 2: La radioactivité dans les formations géologiques

Chapitre 3: Instrumentation radiométriques

Chapitre 4: Recherche et prospection radionucléaire

Bibliographie:

- *W.M. Telford, L.P. Geldart, R.E. Sheriff, "Applied Geophysics", 2nd Edition, Cambridge University Press, 2014. Chapter 10: Radioactivity Method.*

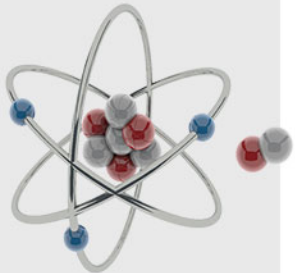
- *Michael Dentith, Stephen T. Mudge, "Geophysics for the mineral exploration geoscientist", Cambridge University Press, 2nd Ed. 2014, Chapter 4: Radiometric method*

I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Introduction: contexte et historique

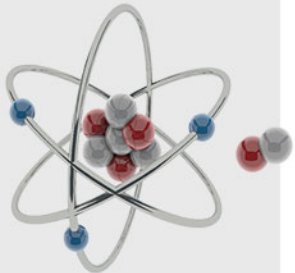
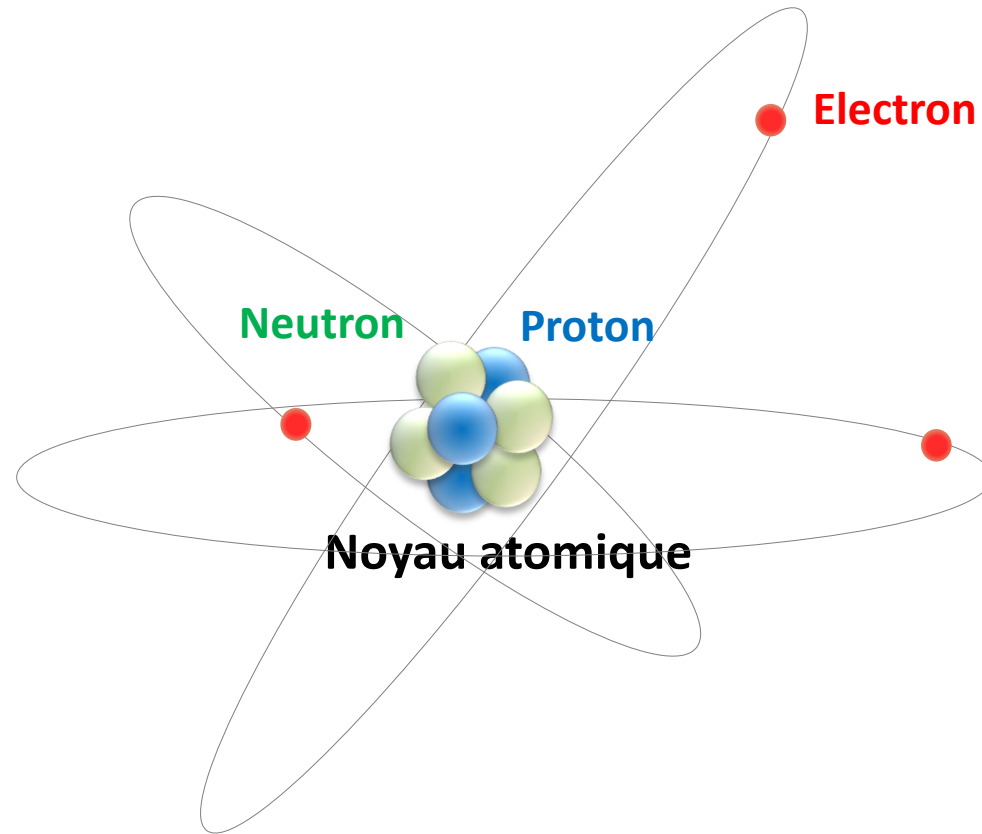
- Techniques géophysiques conventionnelles : propriétés mécanique, chimique, électriques ou magnétiques des roches et minéraux.
- Prospection radionucléaire: propriété intrinsèque de l'élément (isotope) indépendante des conditions environnantes:

force nucléaire faible → désintégration radioactive propre à chaque isotope



I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Les constituants de l'atome:

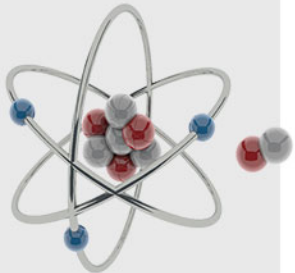


I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Introduction: contexte et historique

Historiquement:

- Découverte des rayons-X par Röntgen en 1895

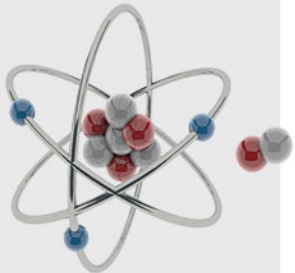
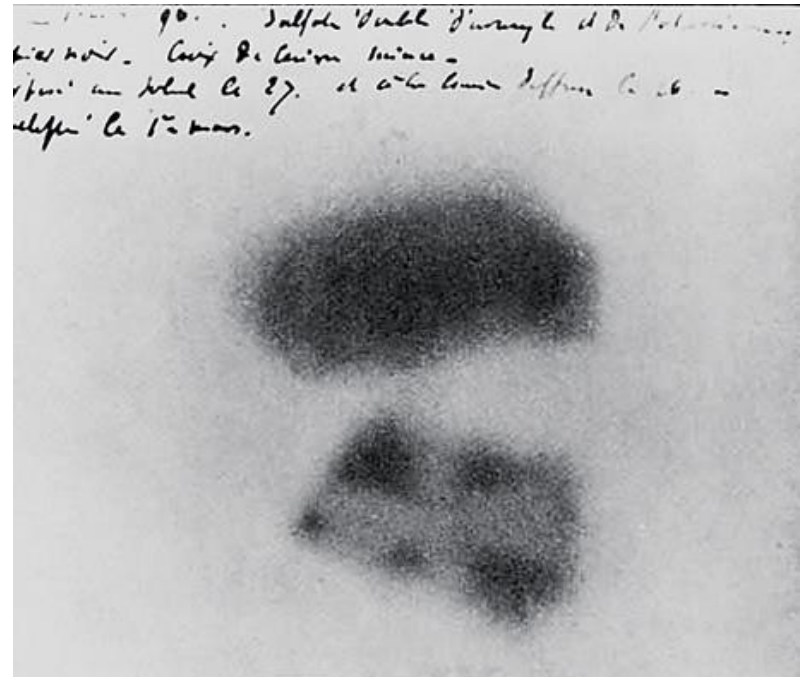


I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Introduction: contexte et historique

Historiquement:

- Découverte de la radioactivité de l'U par Becquerel en 1896

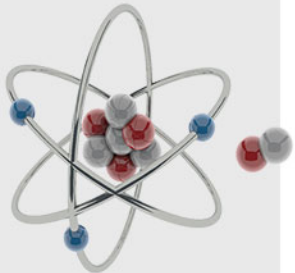


I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Introduction: contexte et historique

Historiquement:

- Pierre et Marie Curie découvrent la radioactivité du Polonium et le Radium, en 1898.

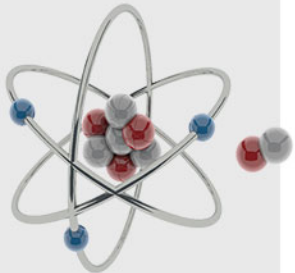
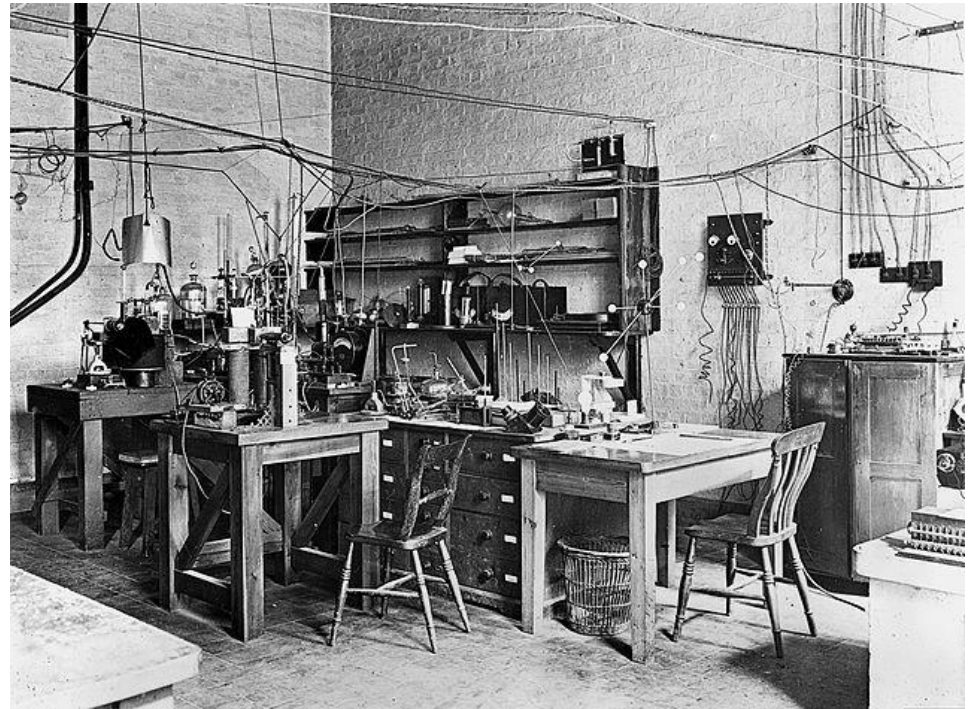
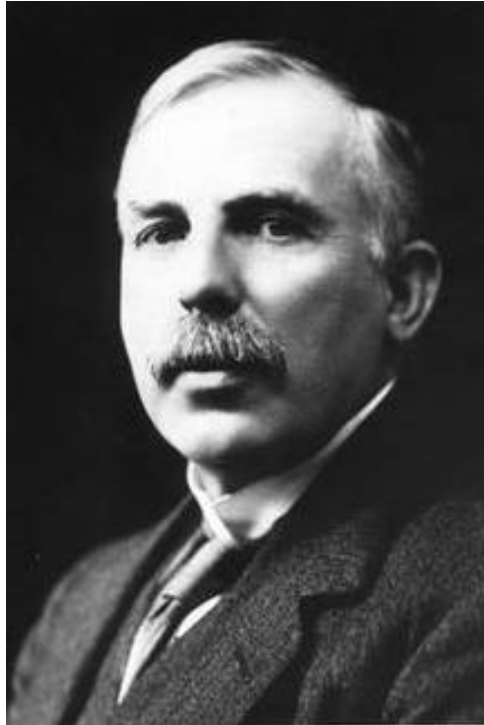


I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Introduction: contexte et historique

Historiquement:

- Dès 1919, Rutherford réalise la première transmutation artificielle : ${}_7N + {}_2He \rightarrow {}_8O$



I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Introduction: contexte et historique

Historiquement:

- En 1934, Irène Curie et Frédéric Joliot, produisent le premier isotope radioactif du Phosphore



avant pour l'aluminium

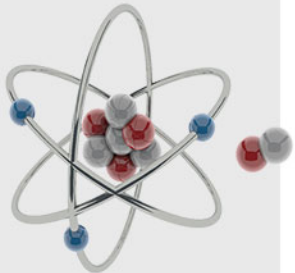
$${}_{13}^{27}\text{Al} + {}_2^4\text{He} = {}_{15}^{30}\text{P} + {}_0^1\text{n}$$

isotope ${}_{15}^{30}\text{P}$ du phosphore
avec une période de décroissance
avec émission ~~de~~ électrons

réaction

$${}_{15}^{30}\text{P} \rightarrow {}_{14}^{30}\text{Si} + e^- + \bar{\nu}$$

Une réaction analogue

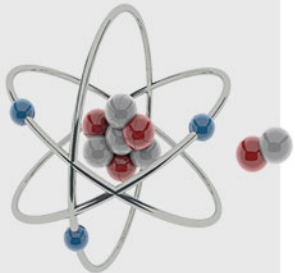
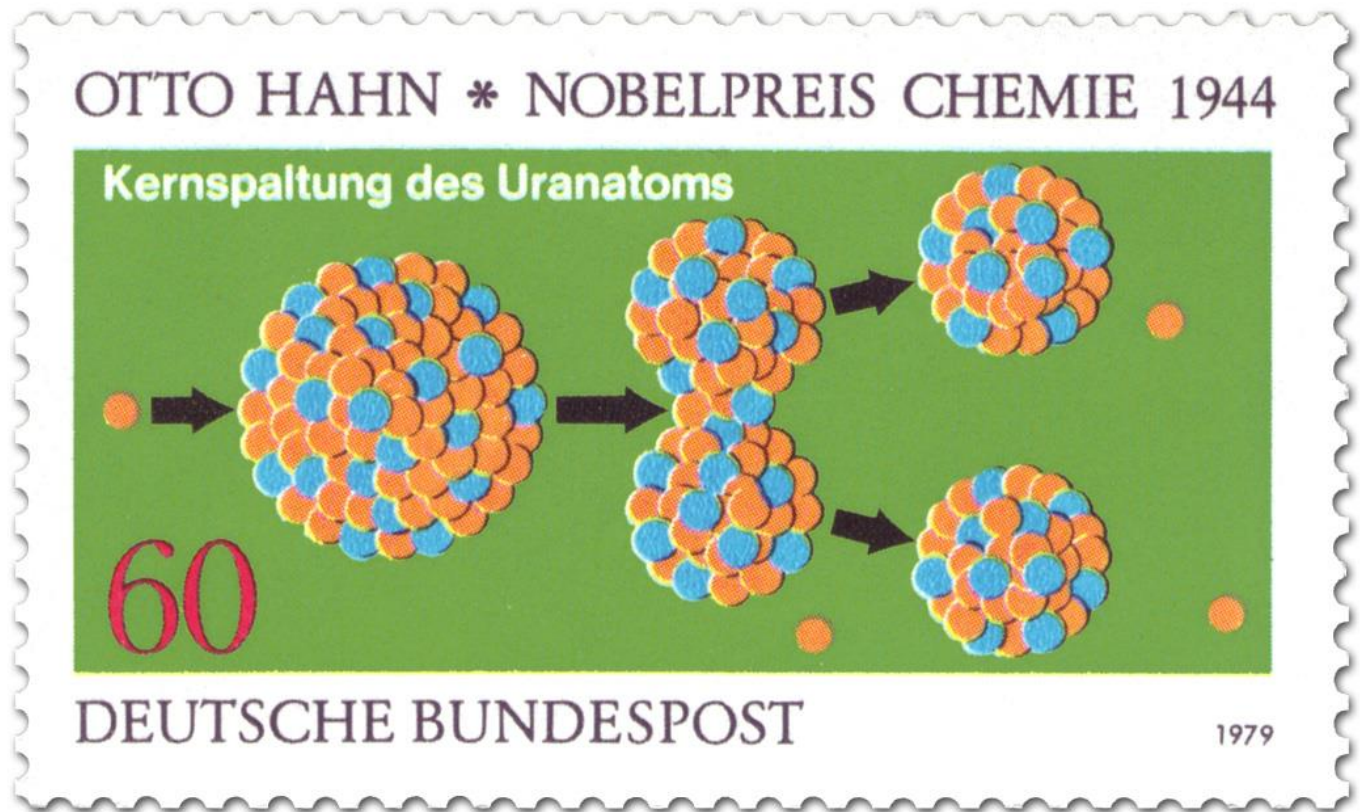


I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Introduction: contexte et historique

Historiquement:

- En 1938, découverte de la fission de l'Uranium par Otto Hahn et Fritz Strassmann à Berlin.

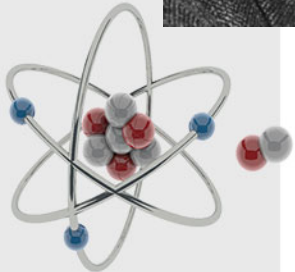
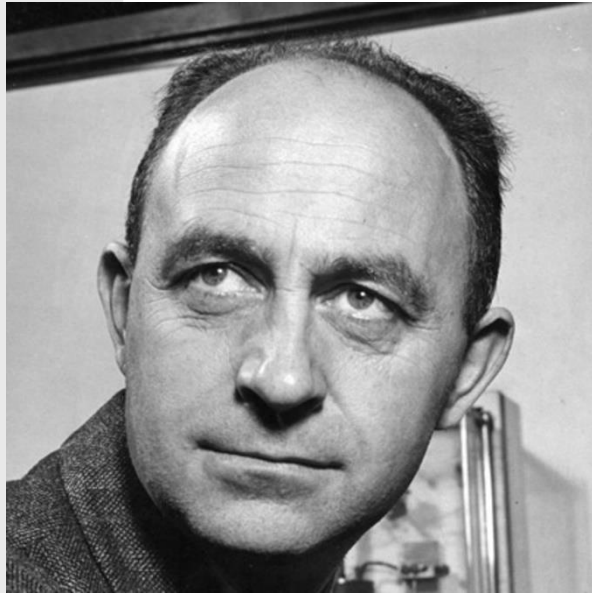


I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Introduction: contexte et historique

Historiquement:

- Fermi réalise le premier réacteur nucléaire en 1942: Pile de Chicago.

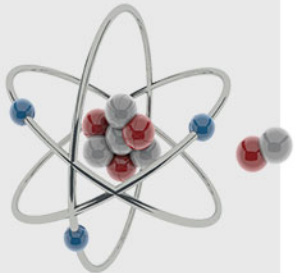
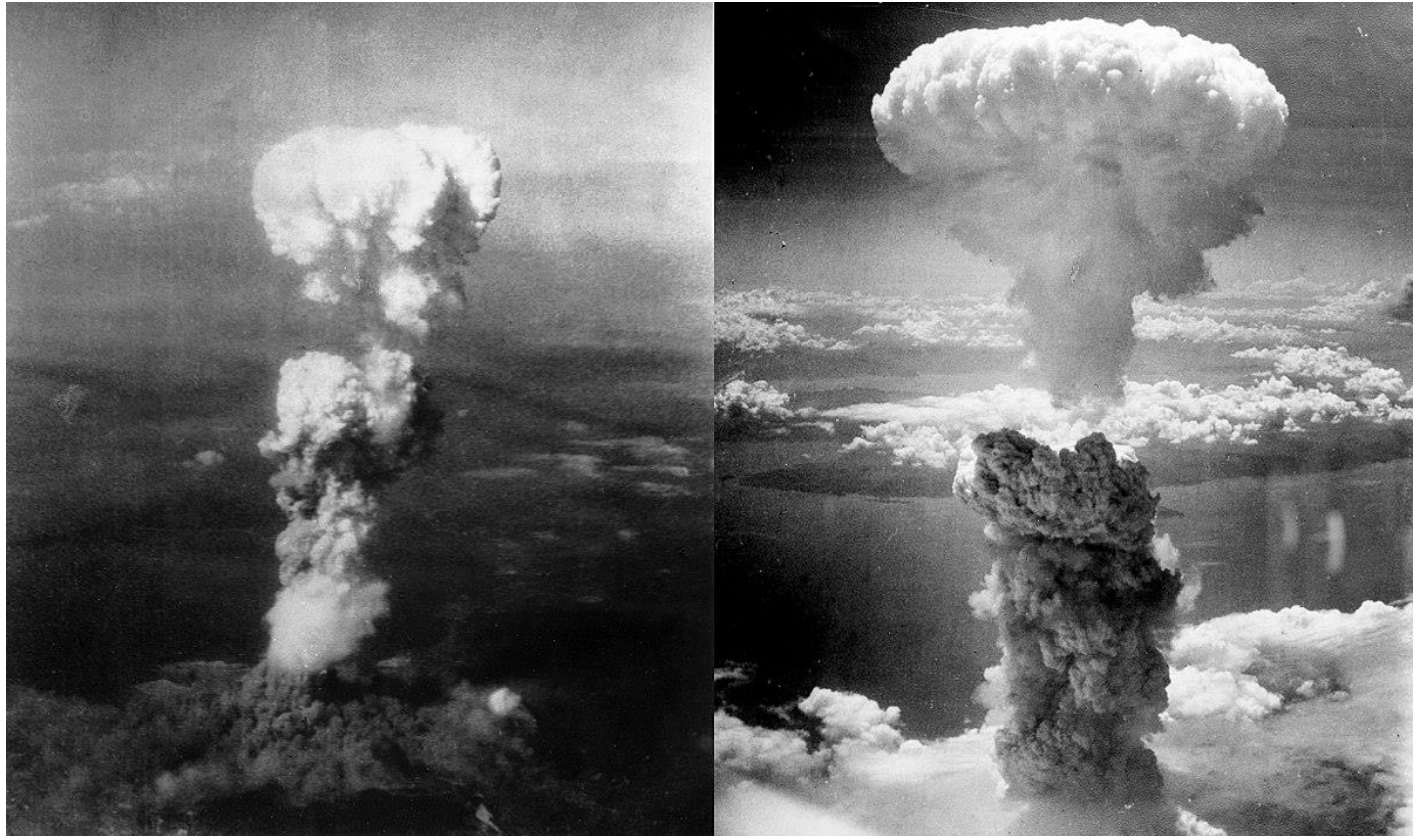


I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Introduction: contexte et historique

Historiquement:

- 6 et 9 août 1945: Hiroshima et Nagasaki

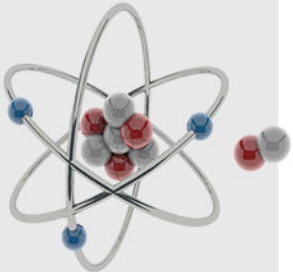


I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Les rayonnements nucléaires

Effets détectables et mesurables des rayonnements :

- 1. Traces sur les films photographiques similaires à ceux déposés par la lumière visible ou les rayons X ;**
- 2. Ionisation des gaz, en les rendant électriquement conducteurs ;**
- 3. Production de scintillations ou phosphorescences dans certains minerais et composés chimiques.**



I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Les types de rayonnements nucléaires:

✓ Radiations α : c'est l'équivalent d'un noyau de H

élium avec $2p + 2n$. ${}_P X^{P+N} \rightarrow {}_{P-2} X^{P+N-4} + {}_2 He^4$



✓ Radiations β : on peut avoir des électrons

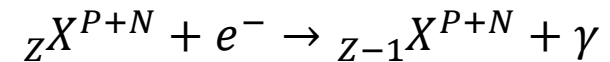
(négatifs) appelés β^- ou des positrons (positifs)

appelés β^+ ${}_Z X^{Z+N} \rightarrow {}_{Z+1} X^{Z+N} + e^-$



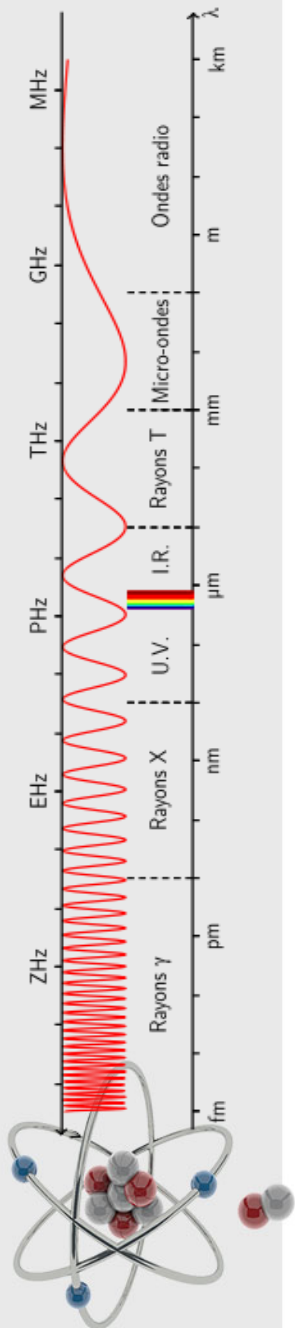
✓ Radiations γ : Rayonnement électromagnétique

très énergétique ($\sim MeV$). Émis suite à la désexcitation d'un noyau dans un état excité.



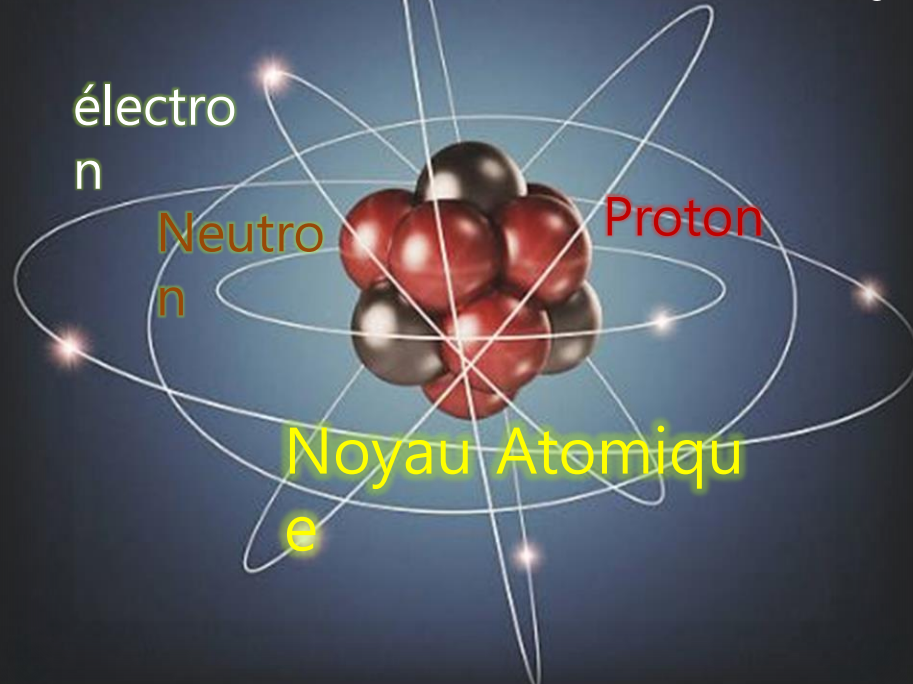
✓ Neutrons: ils accompagnent la fission des

noyaux lourds. On obtient moyennement 3 neutrons par fission.



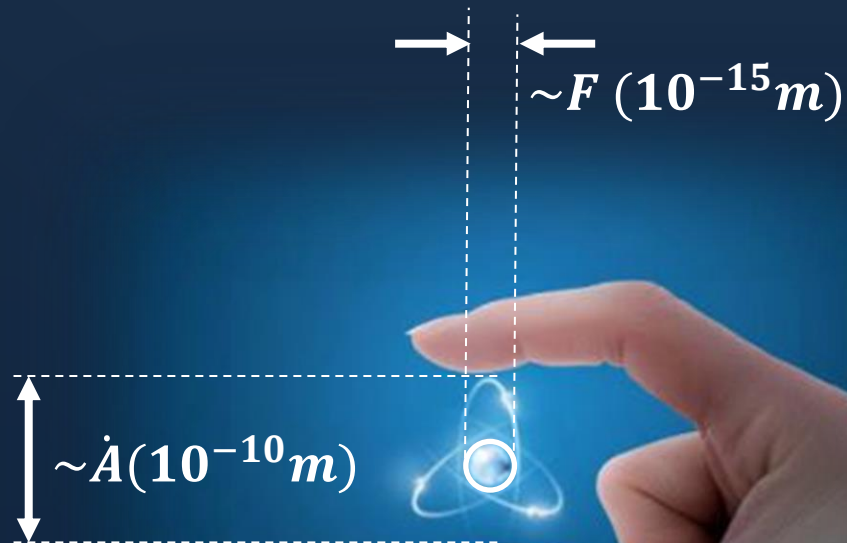
Atomistique

$$q_e = -1.6 \times 10^{-19} \text{C} \quad m_e = 9.1094 \times 10^{-31} \text{kg}$$
$$q_p = +1.6 \times 10^{-19} \text{C} \quad m_p = 1.6726 \times 10^{-27} \text{kg}$$
$$q_n = 0 \text{C} \quad m_n = 1.6749 \times 10^{-27} \text{kg}$$



Atome

Atomistique



$$\frac{R_A}{R_N} \approx 10^5$$

Élément et isotope



Z: nombre atomique (protons/électrons)

A: nombre de masse ($A=Z+N$)

N: nombre de neutrons

Quels éléments ?



PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

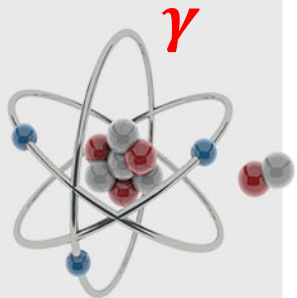
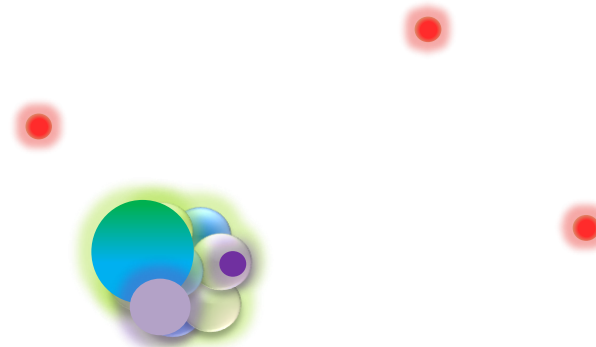
1	H																	18
2	Li											16	17	18				
3	Na											16	17	18				
4	K											16	17	18				
5	Rb											16	17	18				
6	Cs											16	17	18				
7	Fr											16	17	18				
	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			

90
Th
Thorium
232.03806

Noyau stable ou instable

α

β^- , β^+

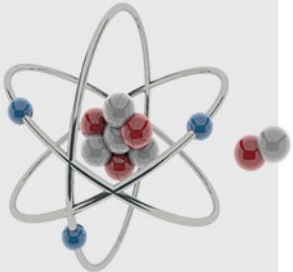
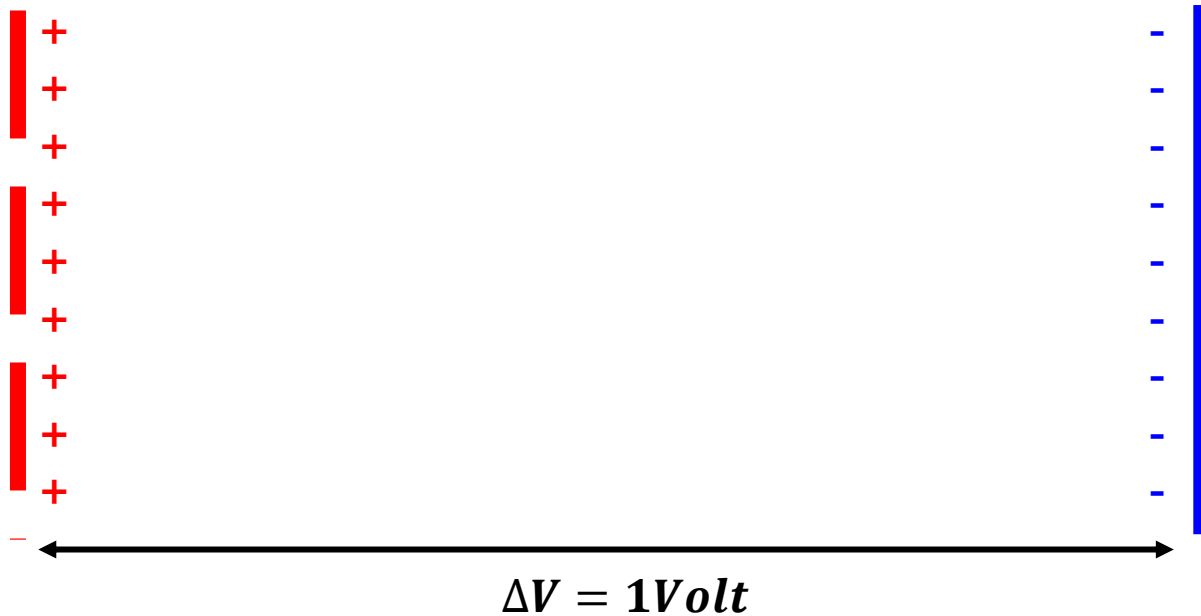


Energie des rayonnements

1 électron-Volt ? $q_e = 1.6 \times 10^{-19} C$



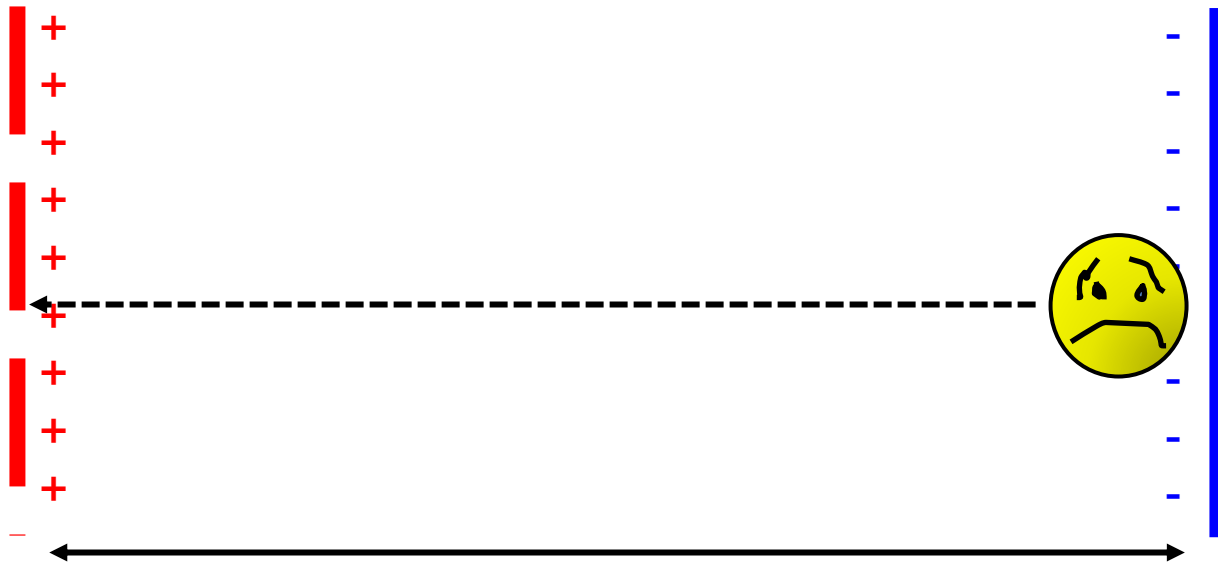
$$T = \Delta E = q_e \times \Delta V = 1.6 \times 10^{-19} J = 1eV$$



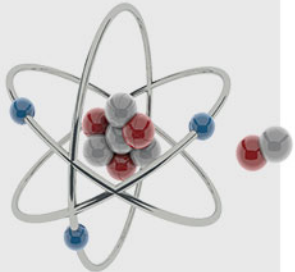
Energie des rayonnements

1 électron-Volt ? $q_e = 1.6 \times 10^{-19} C$

$T = \Delta E = ?$



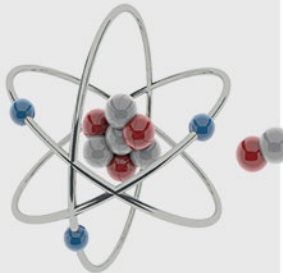
$\Delta V = 1000 \text{ Volt}$



I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

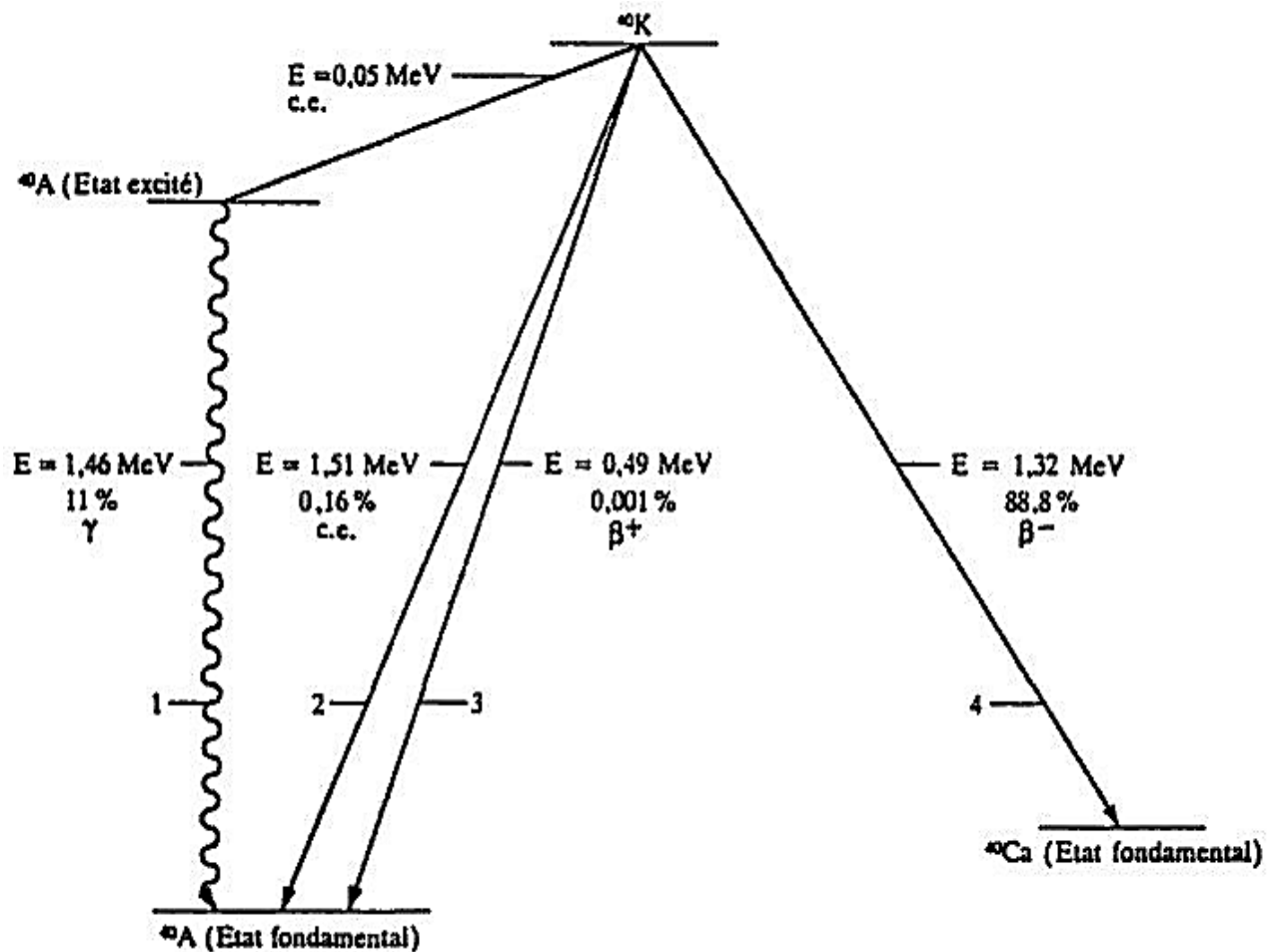
Devoir: Compléter les colonnes: Demi-Vie et Type de rayonnements

Elément	Isotope	Abondance (%)	Demi-vie (Années)	Type de rayt.	Energie (MeV)
Potassium	$^{40}_{19}K$	0.012	1.3×10^9	$\beta, K \text{ cap.}$	1.32 ; 1.46
Calcium	$^{48}_{20}Ca$	0.18	$> 2 \times 10^{16}$	β	0.12
Vanadium	$^{50}_{23}V$	0.24	6×10^{15}	$\beta, K \text{ cap.}$	0.71 ; 1.59
Rubidium	$^{87}_{37}Rb$	27.8	4.7×10^{10}	β	0.27
Indium	$^{113}_{49}In$	95.72	6×10^{14}	β	0.60
Lanthane	$^{136}_{57}La$	0.069	1.1×10^{11}	$\beta, K \text{ cap.}$	0.54 ; 0.81 ; 1.43
Cérium	$^{142}_{58}Ce$	11.1		α	1.5
Néodyme	$^{144}_{60}Nd$	23.8	5×10^{15}	α	1.8
Samarium	$^{147}_{62}Sm$	14.97	10^{11}	α	2.32
Samarium	$^{148}_{62}Sm$	11.2	1.2×10^{13}	α	2.14
Samarium	$^{149}_{62}Sm$	13.8	$\sim 4 \times 10^{14}$	α	1.84
Gadolinium	$^{152}_{64}Gd$	0.2	1.1×10^{14}	α	2.24
Lutécium	$^{176}_{71}Lu$	2.6	3×10^{10}	β, γ	0.088 ; 0.20 ; 0.31
Hafnium	$^{174}_{72}Hf$	0.16	2×10^{15}	α	2.5
Rhénium	$^{187}_{75}Re$	62.9	7×10^{10}	β	≤ 0.008
Platine	$^{190}_{78}Pt$	0.013	6×10^{11}	α	3.11
Platine	$^{192}_{78}Pt$	0.78	$\sim 10^{15}$	α	2.6
Plomb	$^{204}_{82}Pb$	1.48			
Thorium	$^{232}_{90}Th$	100	1.39×10^{10}	α, β, γ	0.03-2.62
Uranium	$^{235}_{92}U$	0.72	7.1×10^8	α, β, γ	0.02-0.9
Uranium	$^{238}_{92}U$	99.3	4.5×10^9	α, β, γ	0.4-2.5



I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Radioactivité du ^{40}K



I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Le processus radioactif:

Variation du nombre d'atome : $\frac{dN}{dt} = -\lambda N$

Loi de la radioactivité:

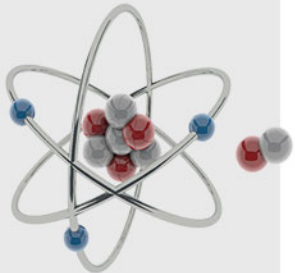
$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \rightarrow N = N_0 e^{-\lambda t}$$

La constante radioactive:

$$N/N_0 = \frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}} \rightarrow \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{T_{1/2}}$$

Activité radioactive:

$$A(t) = -\frac{dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$



I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Le processus radioactif:

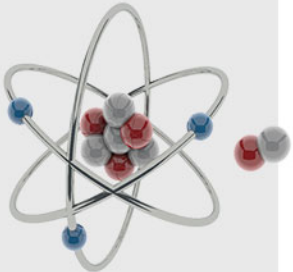
Unités:

$$1Bq = 1 \text{ désintégration/seconde}$$

$$1 \text{ Curie} = 3.7 \times 10^{10} Bq$$

Plus d'activité → meilleure mesure

Éléments signifiants: U, K, Th



I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Filière radioactive:

Noyau père radioactif:

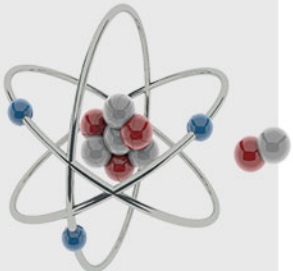
$$N_1 = N_0 e^{-\lambda_1 t} \rightarrow \frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$$

Noyau fils radioactif:

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_0 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 N_2$$

Variation du noyau fils:

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$



Exercice : démontrer l'expression de N_2 .

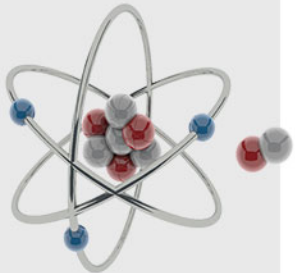
Indice: on pose : $N_2 = Ae^{-\lambda_1 t} + Be^{-\lambda_2 t}$

I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Filière radioactive: Noyau fils stable ($\lambda_2 = 0$)

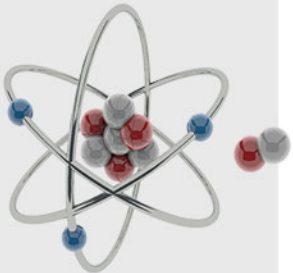
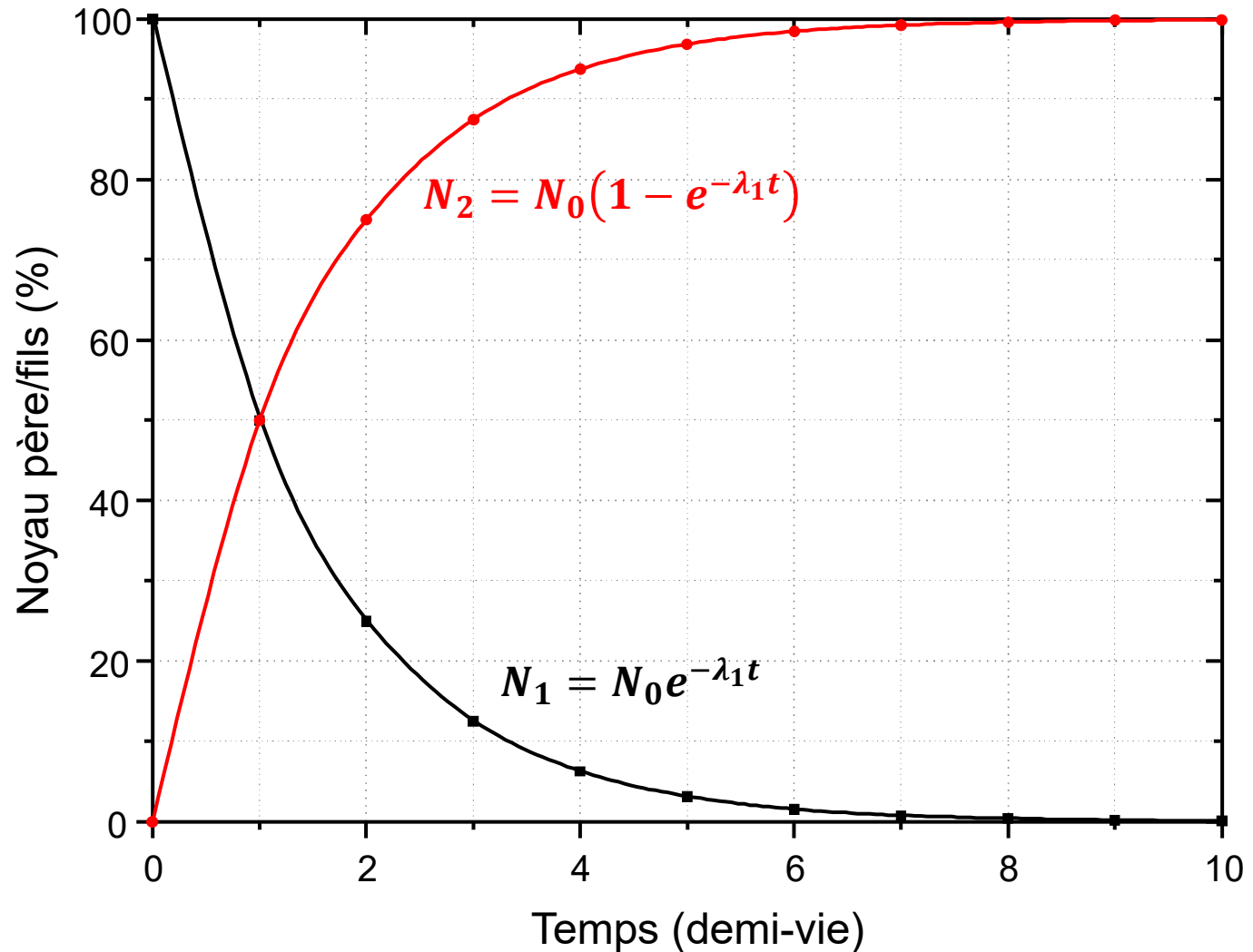
$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) = \frac{\lambda_1 N_0}{-\lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-0})$$

$$N_2 = -N_0 (e^{-\lambda_1 t} - 1) = N_0 (1 - e^{-\lambda_1 t})$$



I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

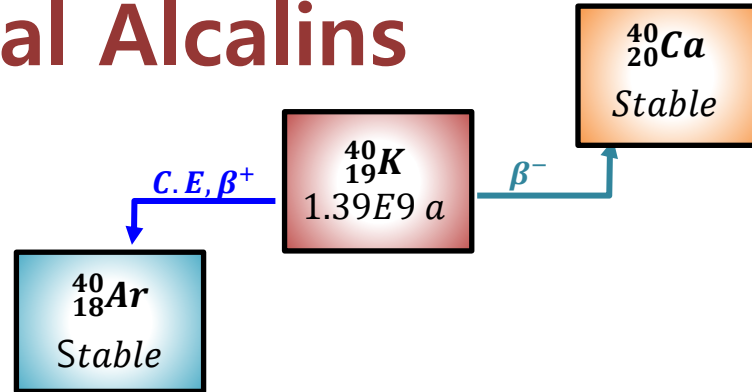
Filière radioactive: Noyau fils stable ($\lambda_2 = 0$)



Cas du Potassium 40:

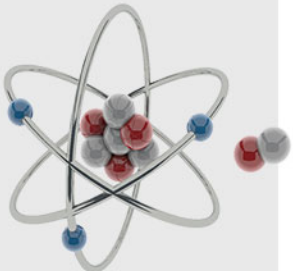
Alcalino-terreux

Métal Alcalins



Gaz noble

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta^- [1.32\text{MeV}]: 88.8\% \\ \beta^+ [0.49\text{MeV}]: 0.01\% \\ C.E: 11.16\% (\gamma[1.46\text{MeV}]: 11\%) \end{array} \right.$$



I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Filière radioactive: Noyau fils instable ($\lambda_2 \neq 0$)

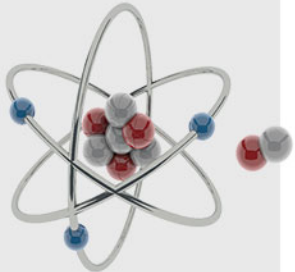
$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

$$N_2 = \frac{[\ln 2/T_1] N_0}{[\ln 2/T_2] - [\ln 2/T_1]} (e^{-[\ln 2/T_1] t} - e^{-[\ln 2/T_2] t})$$

$$t = nT_1 \text{ avec } x = T_1/T_2 ; n \in \mathbb{N}$$

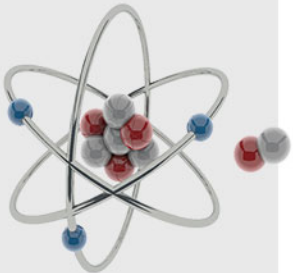
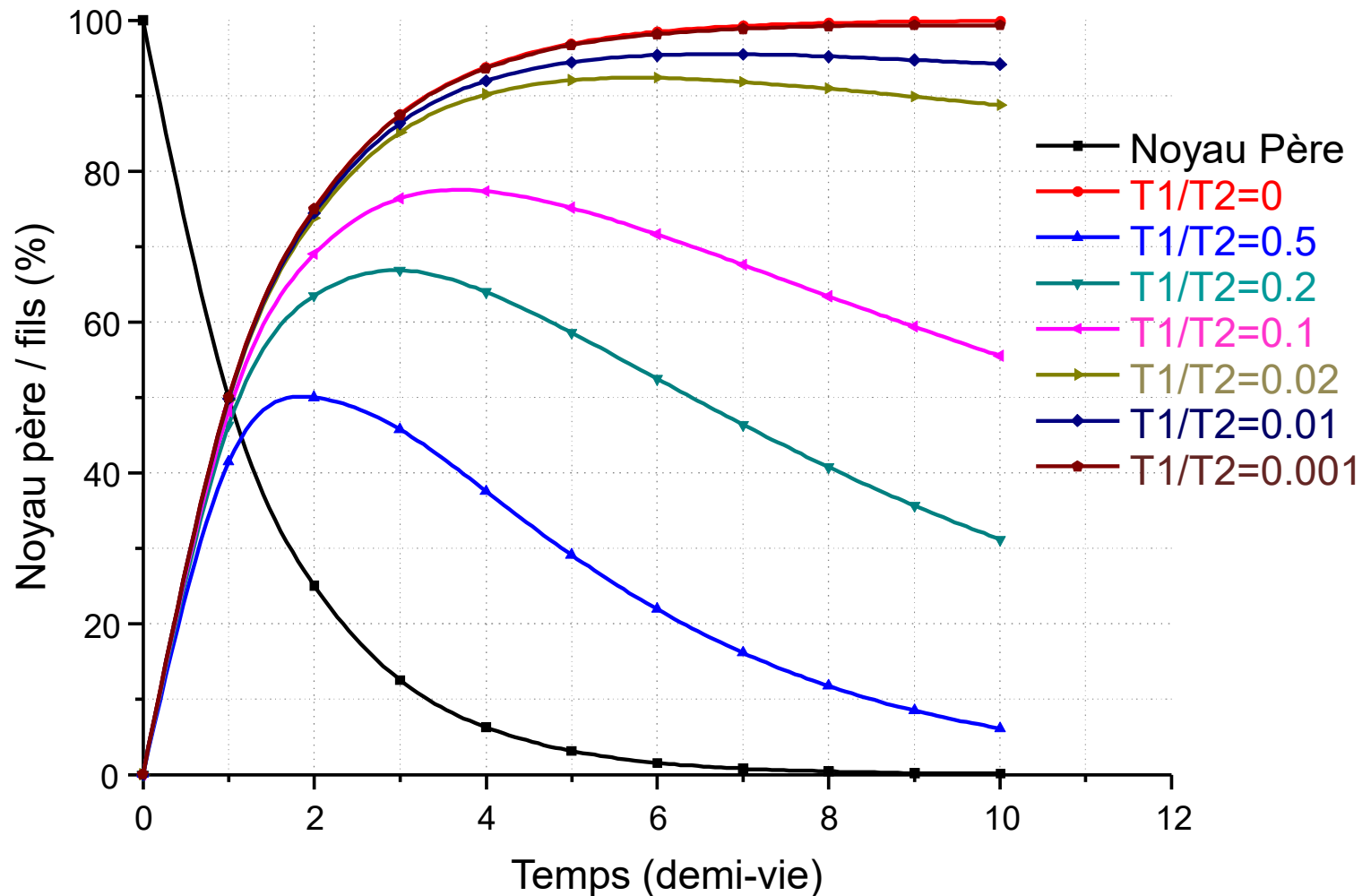
$$N_2 = \frac{N_0}{[T_1/T_2] - 1} (e^{-[\ln 2/T_1] nT_1} - e^{-[\ln 2/T_2] nT_1})$$

$$N_2 = \frac{N_0}{[T_1/T_2] - 1} (e^{-[n \times \ln 2]} - e^{-[nx \times \ln 2]}) = \frac{N_0}{x - 1} \left(\frac{1}{2^n} - \frac{1}{2^{nx}} \right)$$



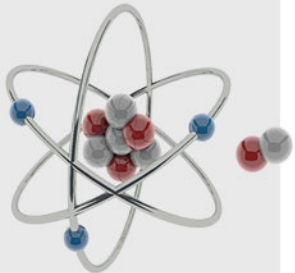
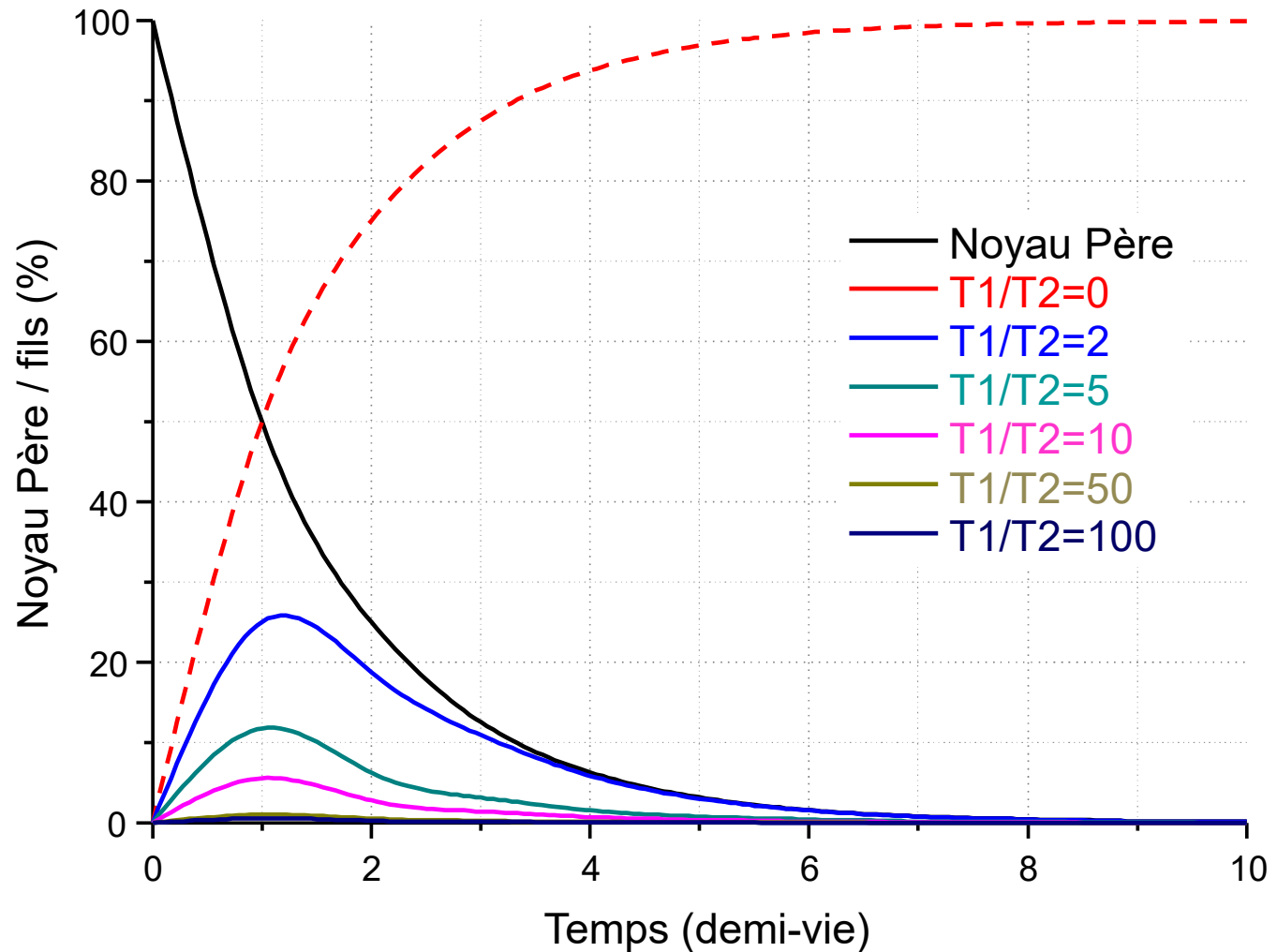
I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Filière radioactive: Noyau fils instable ($T_2 > T_1$) ou $x < 1$



I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Filière radioactive: Noyau fils instable ($T_2 < T_1$) ou $x > 1$



I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Filière radioactive:

Un calcul étendu pour un noyau père radioactif et un nième noyau fils radioactif également:

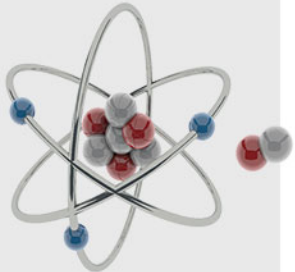
$$N_n = C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t} + \dots + C_n e^{-\lambda_n t}$$

avec:

$$C_i = \frac{KN_0}{\delta_i};$$

$$K = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1};$$

$$\delta_i = (\lambda_1 - \lambda_i)(\lambda_2 - \lambda_i) \dots (\lambda_n - \lambda_i)$$



I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Equilibre radioactif:

Dans le cas d'un équilibre radioactif on peut écrire que:

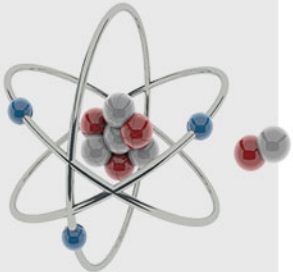
$$dN_2/dt = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 = 0$$

Ce qui implique: $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 \leftrightarrow \frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$; or après un

temps d'équilibre t_{eq} :

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \rightarrow \frac{\frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t_{eq}} - e^{-\lambda_2 t_{eq}})}{N_0 e^{-\lambda_1 t_{eq}}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1) t_{eq}}) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Donc: $e^{-(\lambda_2 - \lambda_1) t_{eq}} = \lambda_1 / \lambda_2 \rightarrow t_{eq} = \left(\frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \right) \ln \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)$



I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Equilibre radioactif:

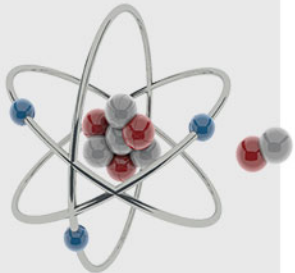
Cette condition est généralisée pour un noyau radioactif avec n génération de noyaux fils:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots = \lambda_n N_n$$

Avec l'équation que vérifie le temps d'équilibre:

$$\frac{N_n}{N_1} = K \left(\frac{1}{\delta_1} + \frac{e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t_\infty}}{\delta_2} + \frac{e^{(\lambda_1 - \lambda_3)t_\infty}}{\delta_3} + \dots + \frac{e^{(\lambda_1 - \lambda_n)t_\infty}}{\delta_n} \right) = \frac{\lambda_1}{\lambda_n}$$

Ainsi le temps d'équilibre peut être obtenu via des approximations ou par résolutions graphique ou numérique.



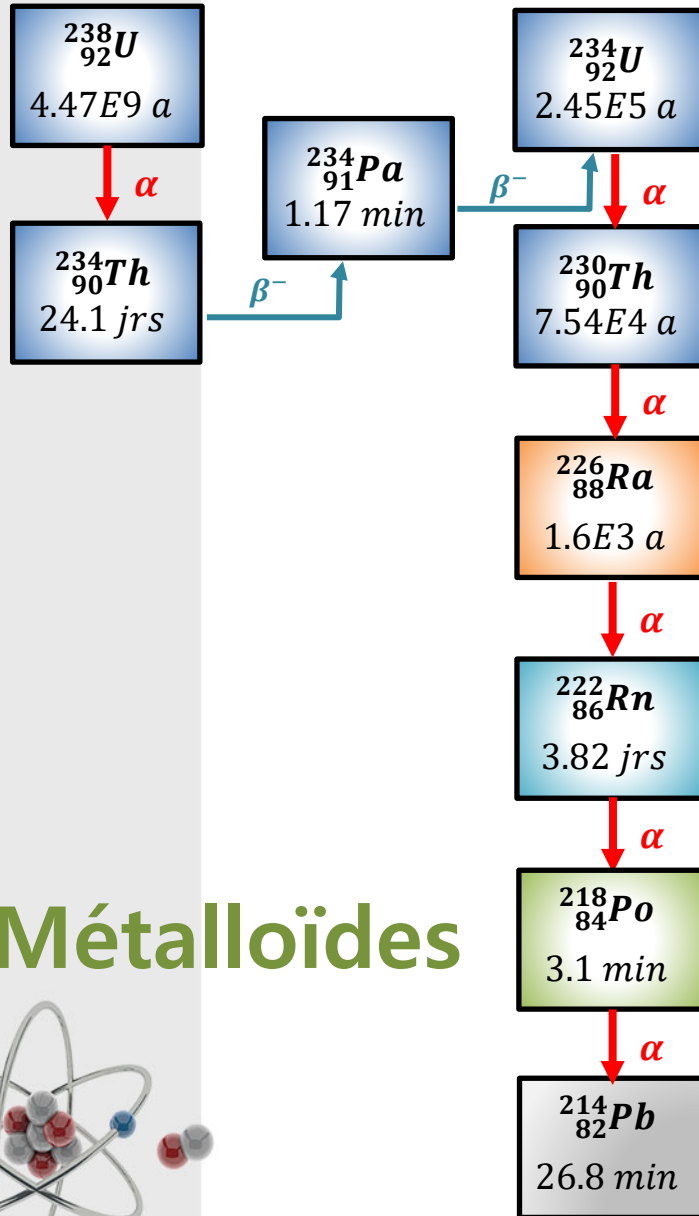
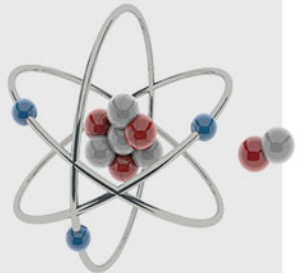
Filiale de l'Uranium 238:

Actinides

Alcalino-terreux

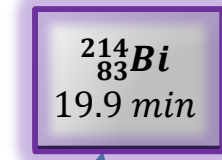
Gaz nobles

Métalloïdes



Métaux post-transitionnels

$\gamma[1.76\text{MeV}]$



I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Unités:

Les unités qui sont d'usage en prospection radionucléaire:

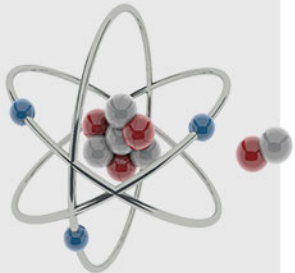
- Mesure de l'activité A: $[1Ci] \equiv 3.7 \times 10^{10} \text{ désint./s}$

C'est l'équivalent de l'activité d'un gramme de ^{226}Rn

- On utilise également: $[1Bq] \equiv 1 \text{ désint./s}$

- On mesure également l'intensité des rayonnements en mesurant la quantité d'énergie déposée par unité de

masse (Röntgen): $[1R] \equiv \frac{dE}{dm} [1J/kg]$



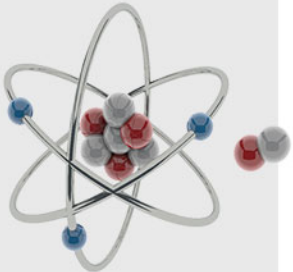
I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Unités:

On utilise également dans le comptage des radiations:

- Intensité d'émissions: [Coups/seconde] \equiv [Cps/s]
- Intensité d'émissions: [Coups/minute] \equiv [Cps/min]
- L'énergie des rayonnements: $E \equiv$ [eV]; [KeV]; [MeV]
- La concentration des radioéléments :

$$\text{Une partie par million} \equiv [1ppm] \equiv \left[\frac{1}{10^6} \right]$$

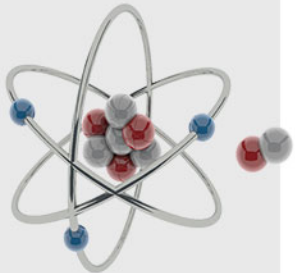


I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Exercice:

Une mole d'uranium naturel est formé de: 99.2742% d'U238 [$T_{U8} = 4.47E9 \text{ ans}$], 0.7202% d'U 235 [$T_{U5} = 0.71E9 \text{ ans}$] et 0.0055% d'U234 [$T_{U4} = 2.455E5 \text{ ans}$].

1. Quelle est l'activité de chaque isotope? Comparer.
2. Après un temps $\Delta t = 2E9 \text{ ans}$ qu'on peut considérer suffisamment long, l'uranium naturel atteint son équilibre radioactif, que devienne l'activité et le nombre de l'U238?
3. Déduire l'activité et la quantité du descendant le Bi214 [$T_{Bi14} = 19.9 \text{ min}$] à ce moment là.



I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Exercice:

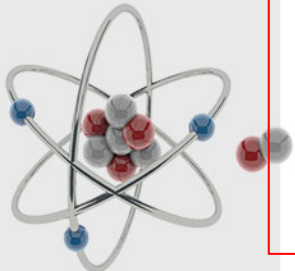
Une mole d'uranium naturel est formé de: 99.2742% d'U238 [$T_{U8} = 4.47E9 \text{ ans}$], 0.7202% d'U 235 [$T_{U5} = 0.71E9 \text{ ans}$] et 0.0055% d'U234 [$T_{U4} = 2.455E5 \text{ ans}$].

1. Quelle est l'activité de chaque isotope? Comparer.

$1 \text{ mole} \equiv 6.022 \times 10^{23} \text{ atomes}$:

Isotope	$T_{1/2}[\text{s}]$	$\lambda_{1/2}[\text{s}^{-1}]$	N[atomes]	A[Bq]
U234	7.74×10^{12}	8.95×10^{-14}	3.312×10^{19}	2.964×10^6
U235	2.24×10^{16}	3.09×10^{-17}	4.337×10^{21}	1.340×10^5
U238	1.41×10^{17}	4.91×10^{-18}	5.978×10^{23}	2.935×10^6

$A_4 \cong A_8 \text{ et } A_5/A_8 < 5\%$



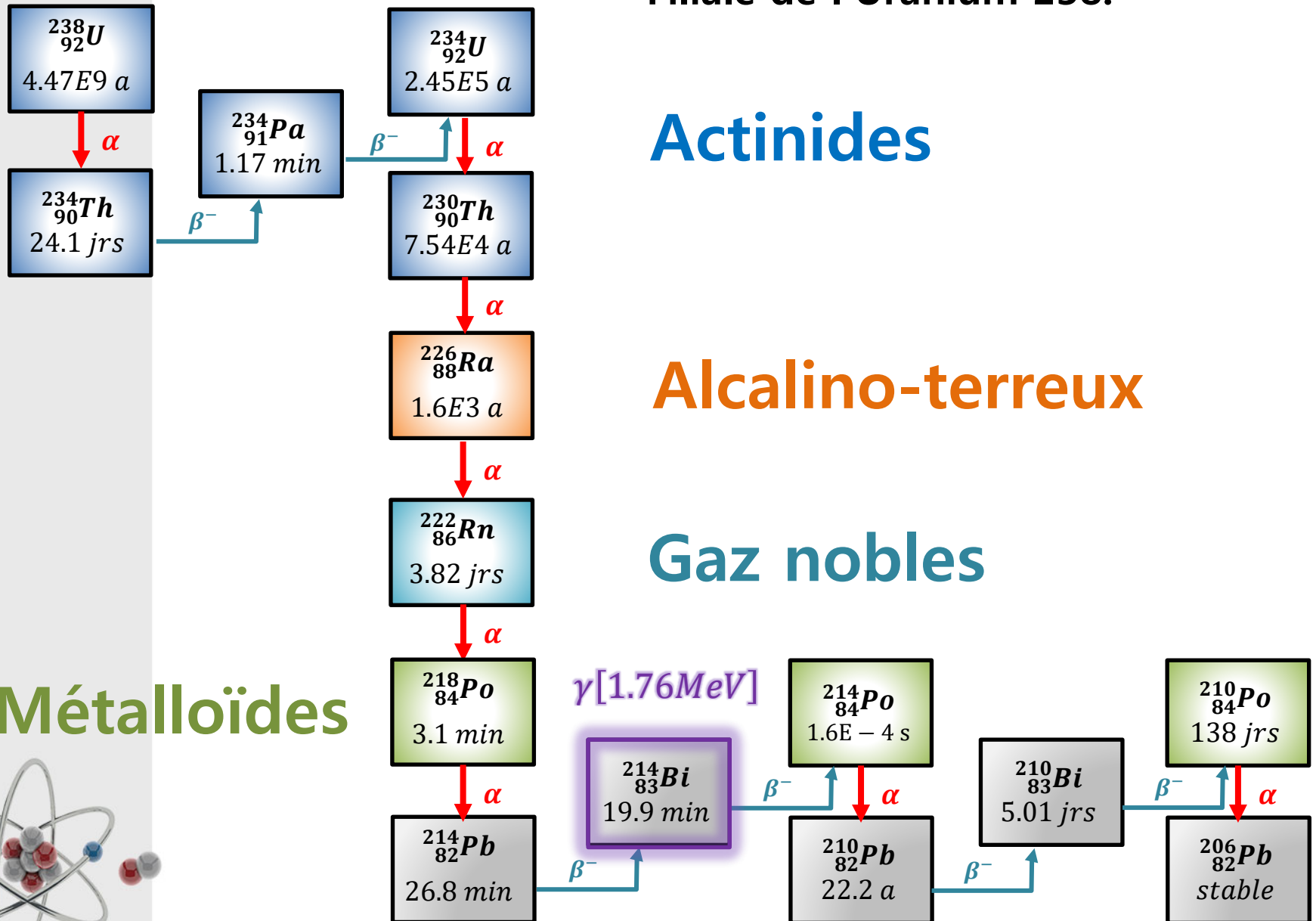
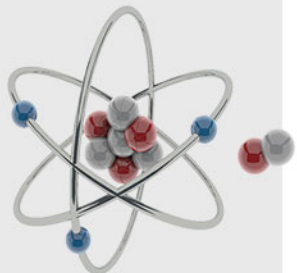
Filiale de l'Uranium 238:

Actinides

Alcalino-terreux

Gaz nobles

Métalloïdes



Métaux post-transitionnels

I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

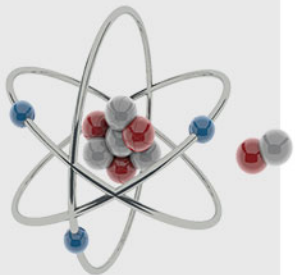
Exercice:

Une mole d'uranium naturel est formé de: 99.2742% d'U238 [$T_{U8} = 4.47E9 \text{ ans}$], 0.7202% d'U 235 [$T_{U5} = 0.71E9 \text{ ans}$] et 0.0055% d'U234 [$T_{U4} = 2.455E5 \text{ ans}$].

2. Après un temps $\Delta t = 2E9 \text{ ans}$ qu'on peut considérer suffisamment long, l'uranium naturel atteint son équilibre radioactif, que devienne l'activité et le nombre de l'U238?

$$A_{U8}(t) = A_{U80} e^{-\lambda_{U8} t} \rightarrow A_{U8}(2 \times 10^9 \text{ ans}) = A_{U80} e^{-\frac{\ln 2}{T_{U8}} \Delta t}$$
$$= 2.935 \times 10^6 \times 0.7333 = 2.152 \times 10^6 \text{ Bq}$$

$$N_{U8}(\Delta t) = \frac{A_{U8}(\Delta t)}{\lambda_{U8}} = 4.382 \times 10^{23} \text{ atomes}$$



I. Principes de radioactivité et rayonnements nucléaires.

Exercice:

Une mole d'uranium naturel est formé de: 99.2742% d'U238 [$T_{U8} = 4.47E9 \text{ ans}$], 0.7202% d'U 235 [$T_{U5} = 0.71E9 \text{ ans}$] et 0.0055% d'U234 [$T_{U4} = 2.455E5 \text{ ans}$].

3. Déduire l'activité et la quantité du descendant le Bi214 [$T_{Bi14} = 19.9 \text{ min}$] à ce moment là.

Équilibre radioactif : $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots = \lambda_n N_n$

$$A_{U8}(\Delta t) = A_{Bi14}(\Delta t) = 2.152 \times 10^6 \text{ Bq} = \lambda_{Bi14} \cdot N_{Bi14}(\Delta t)$$

$$N_{Bi14}(\Delta t) = \frac{A_{Bi14}(\Delta t)}{\lambda_{Bi14}} = \frac{2.152 \times 10^6}{5.804 \times 10^{-4}}$$

$$= 3.7 \times 10^9 \text{ atomes}$$

$$\frac{N_{Bi14}}{N_{U8}} = 8.44 \times 10^{-15}$$

