

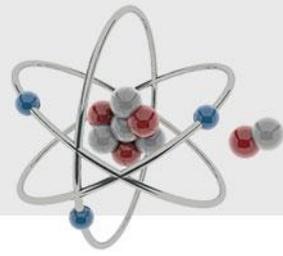


Biophysique des Rayonnements

Dr. S.E. BENTRIDI
s.bentridi@univ-dbkm.dz

3ème Licence Physique Fondamentale

Plan du Cours



Biophysique des Rayonnements

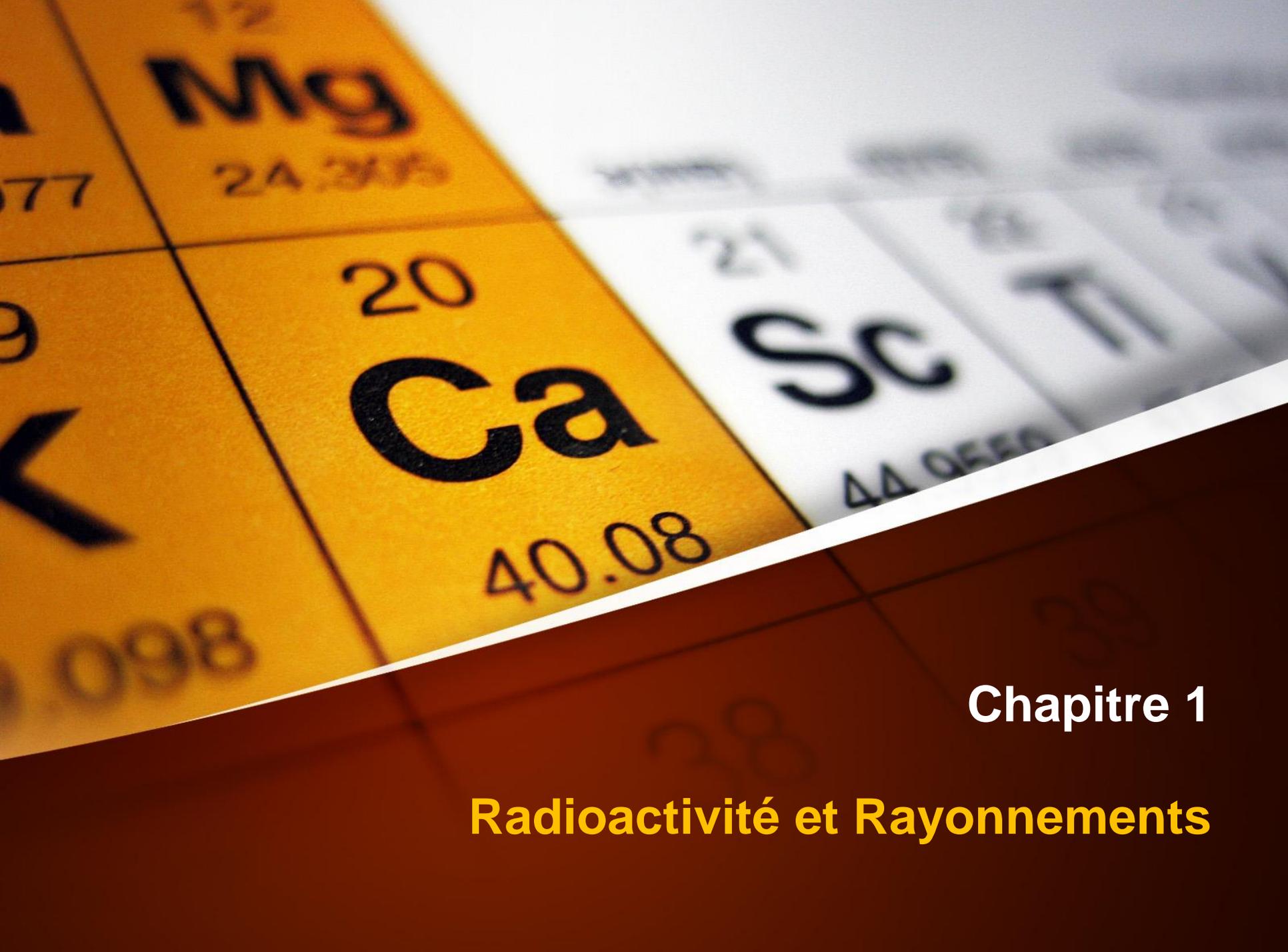
Chapitre 1: Radioactivité et Rayonnements

Application: Radioactivité du corps humain

Chapitre 2: Physique des Rayons-X

Chapitre 3: Interaction Rayonnements-Matière

Chapitre 4: Eléments de radioprotection et Radiobiologie



Chapitre 1

Radioactivité et Rayonnements

Élément du tableau périodique



A 3D rendering of a periodic table with a prominent blue card for the element Uranium (U) in the center. The card displays the atomic number 92, the symbol U, the name Uranium, and the atomic weight 238.0289. Red circles highlight these four pieces of information. The background shows a grid of other elements, including Hydrogen (H) through Francium (Fr) in the first column, and various elements in the second and third columns. The word 'ELEMENTS' is visible in the upper right corner of the table.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
H	He																
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne										
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar										
K	Ca	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr										
Rb	Sr	In	Sn	Sb	Te	I	Xe										
Cs	Ba	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn										
Fr	Ra	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuq										
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

Atomistique



Z: nombre atomique (protons/électrons)

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

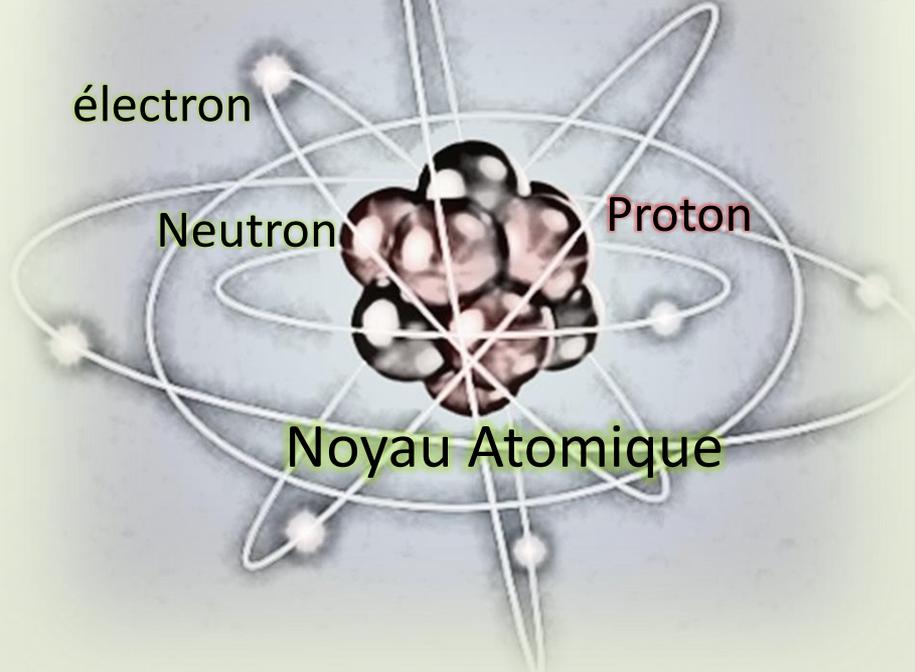
N: nombre de neutrons

Atomistique

$$q_e = -1.6 \times 10^{-19} C \quad m_e = 9.1094 \times 10^{-31} \text{kg}$$

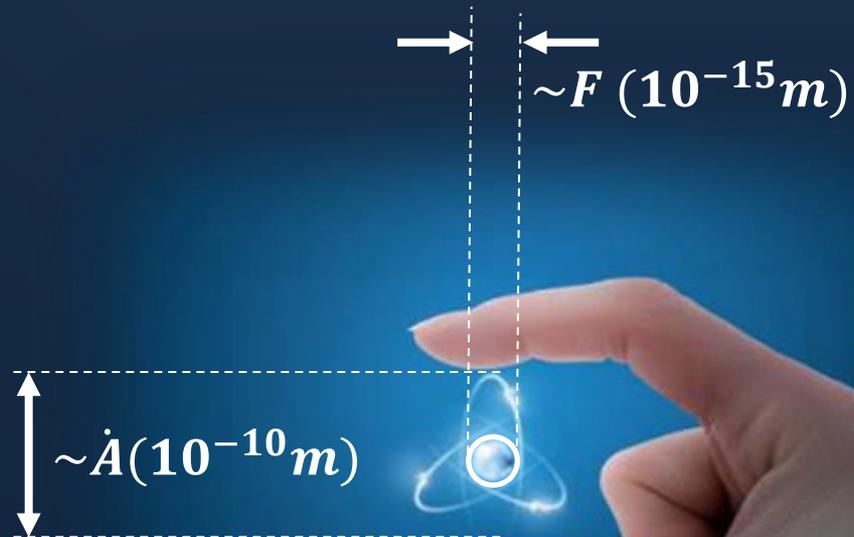
$$q_p = +1.6 \times 10^{-19} C \quad m_p = 1.6726 \times 10^{-27} \text{kg}$$

$$q_n = 0 C \quad m_n = 1.6749 \times 10^{-27} \text{kg}$$



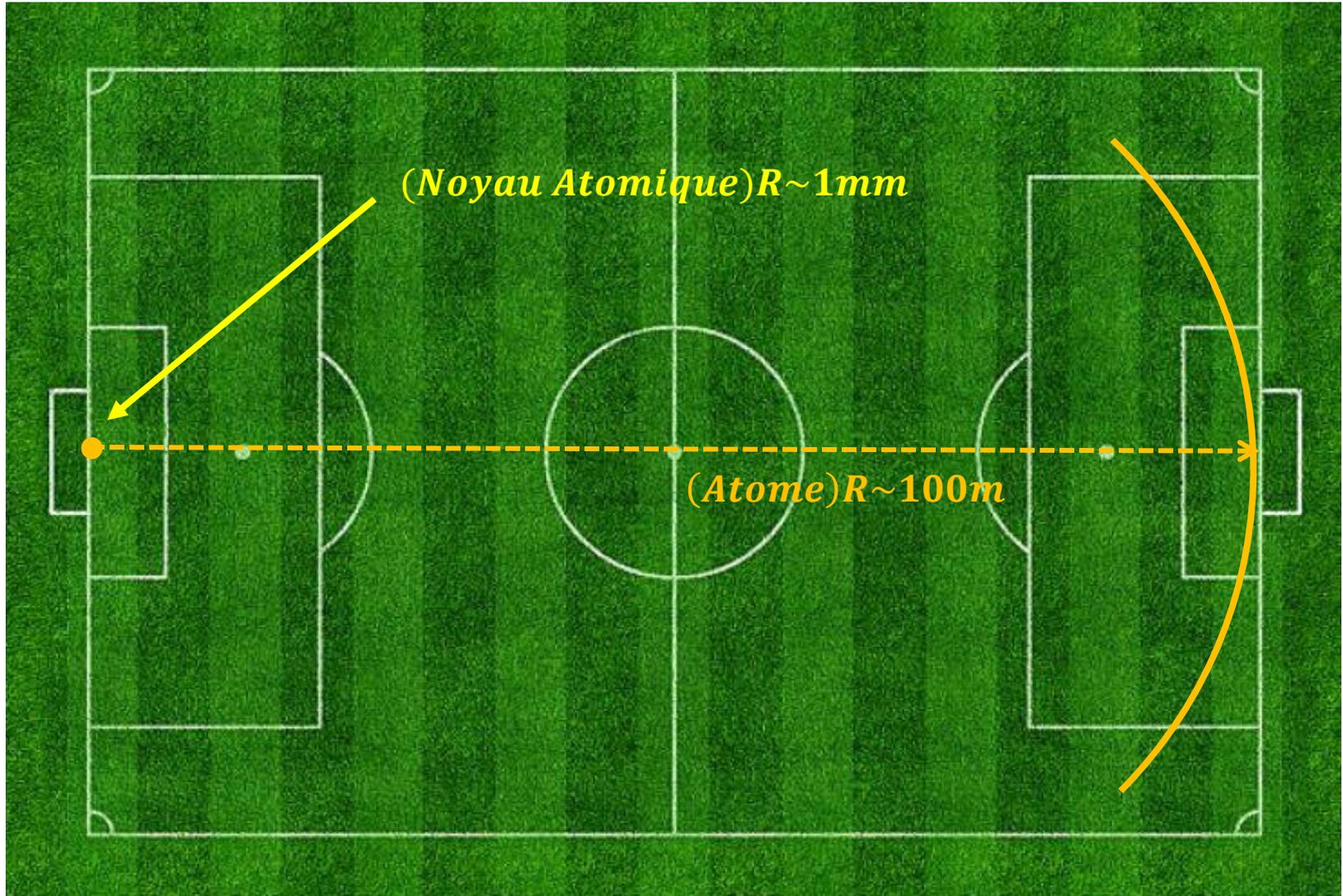
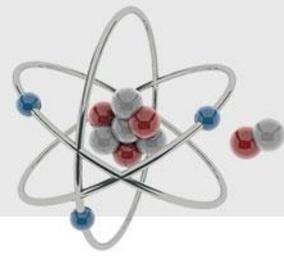
Atome

Atomistique



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

Atomistique



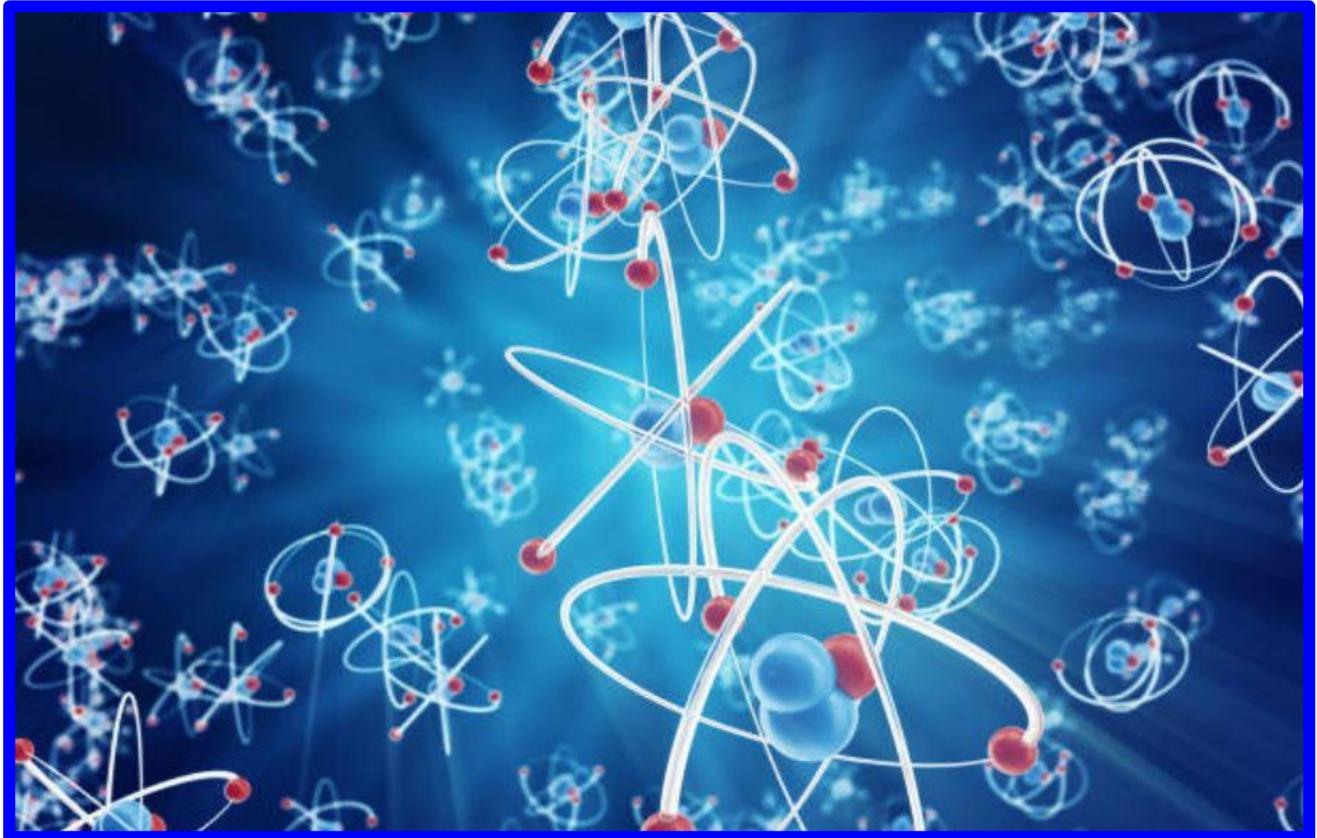
Le mole et le Nombre d'AVOGADRO

$$1 \text{ u. m. a} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg} = \frac{1}{12} m_{12\text{C}}$$

$$m_A = 4.002602 [\text{u. m. a}]$$



Le mole et le Nombre d'AVOGADRO



$$1 \text{ mole} = N_A = 6.022140 \times 10^{23} \text{ unités}$$

Unité: Atome ou molécules

Masse molaire: masse d'un mole de matière $\left[\frac{g}{mol}\right]$

molecule

Le mole et le Nombre d'AVOGADRO

- **Exercice:** dites combien d'atomes trouve-t-on dans un 1 gramme de matière de:

- Hydrogène: $M_H = 1.00794 \left[\frac{g}{mol} \right]$

- Carbone: $M_C = 12.0107 \left[\frac{g}{mol} \right]$

- Nitrogène: $M_N = 14.0067 \left[\frac{g}{mol} \right]$

- Oxygène: $M_O = 15.9994 \left[\frac{g}{mol} \right]$

- Soufre: $M_S = 32.065 \left[\frac{g}{mol} \right]$

- Uranium: $M_U = 238.0289 \left[\frac{g}{mol} \right]$

Déduire pour 70kg?

- **Réponse:** dans un 1 gramme de matière de:

- Hydrogène: $M_H = 1.00794 \left[\frac{g}{mol} \right] \rightarrow N_H = \frac{1g}{1.00794} \times 6.022 \times 10^{23} \approx 6 \times 10^{23} \text{ atmes}$

- Carbone: $M_C = 12.0107 \left[\frac{g}{mol} \right] \rightarrow N_C \cong 5.01 \times 10^{22} \text{ atomes}$

- Oxygène: $M_O = 15.9994 \left[\frac{g}{mol} \right] \rightarrow N_O \cong 3.76 \times 10^{22} \text{ atomes}$

- Nitrogène: $M_N = 14.0067 \left[\frac{g}{mol} \right] \rightarrow N_N \cong 4.3 \times 10^{22} \text{ atomes}$

- Soufre: $M_S = 32.065 \left[\frac{g}{mol} \right] \rightarrow N_S \cong 1.88 \times 10^{22} \text{ atomes}$

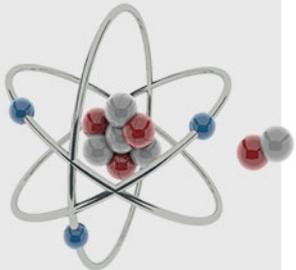
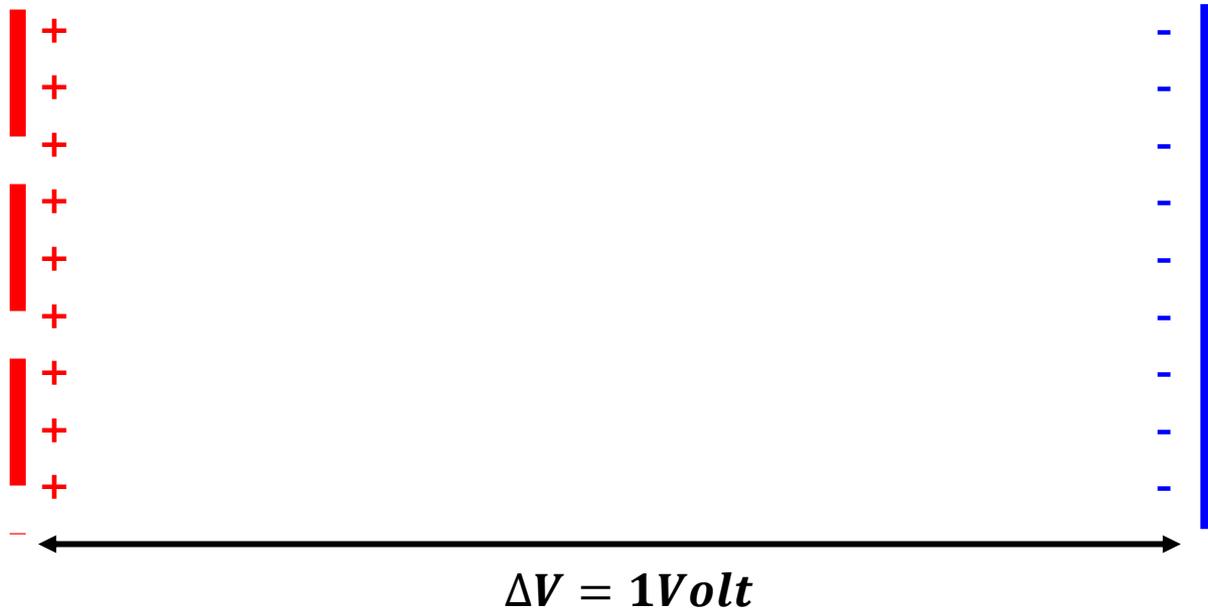
- Uranium: $M_U = 238.0289 \left[\frac{g}{mol} \right] \rightarrow N_U \cong 2.53 \times 10^{21} \text{ atomes}$

molecule

Atomistique

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

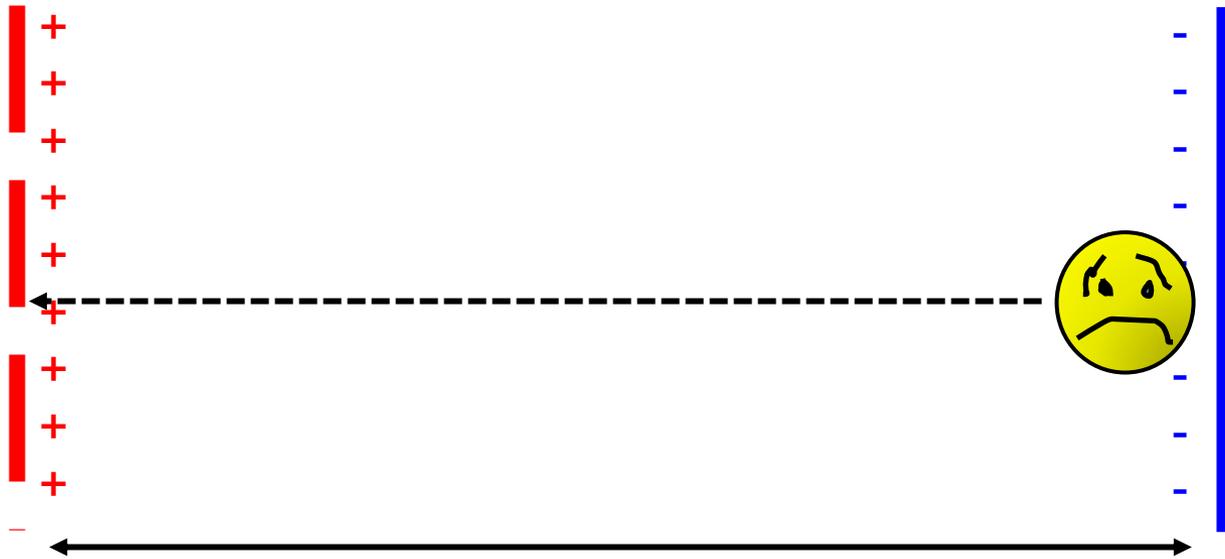
$$T = \Delta E = q_e \times \Delta V = 1.6 \times 10^{-19} J = 1eV$$



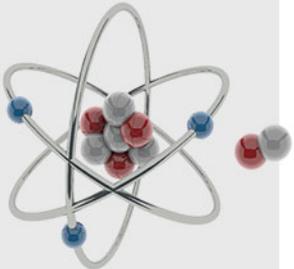
Atomistique

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

$T = \Delta E = ?$



$\Delta V = 100 \text{ Volt}$



Equivalence Energie-Masse

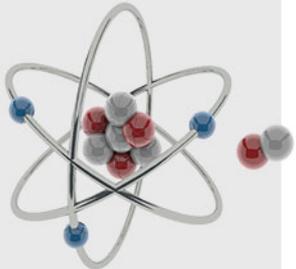
$$\Delta E \Leftrightarrow \Delta M \times c^2$$

$$c = 2.99792458 \times 10^8 [m.s^{-1}]$$



A. EINSTEIN (1879-1955)

$$E_0 \equiv M_0 \times c^2 \quad \text{Energie au repos (Rest energy)}$$



Equivalence Energie-Masse

$$E_e \equiv M_e \times C^2 = 0.511 \text{ MeV}$$

$$E_p \equiv M_p \times C^2 = 938.27 \text{ MeV}$$

$$E_n \equiv M_n \times C^2 = 939.57 \text{ MeV}$$

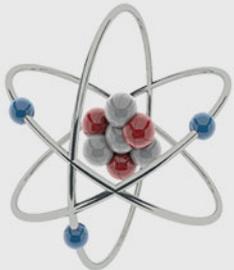
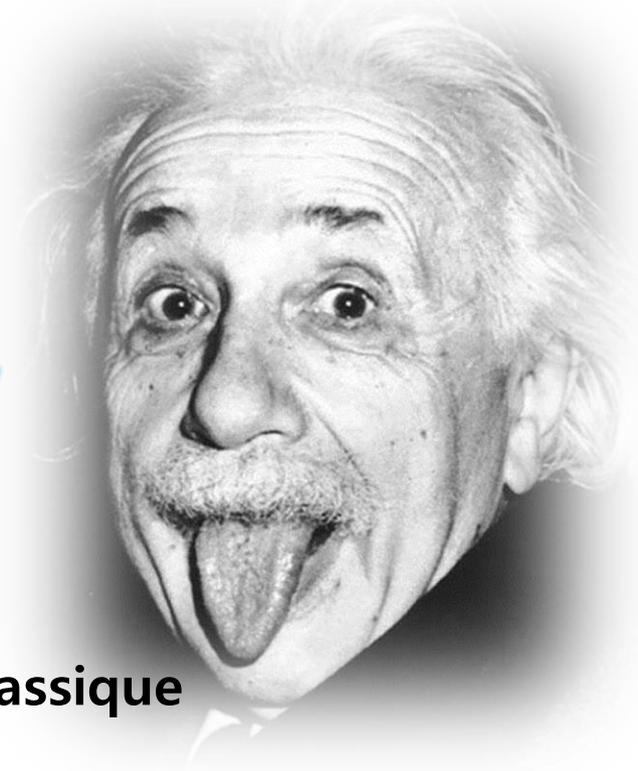
$$E_{TOT} = T + E_0$$

$$T = \frac{1}{2} m v^2 : \text{Energie cinétique classique}$$

Dans le domaine relativiste :

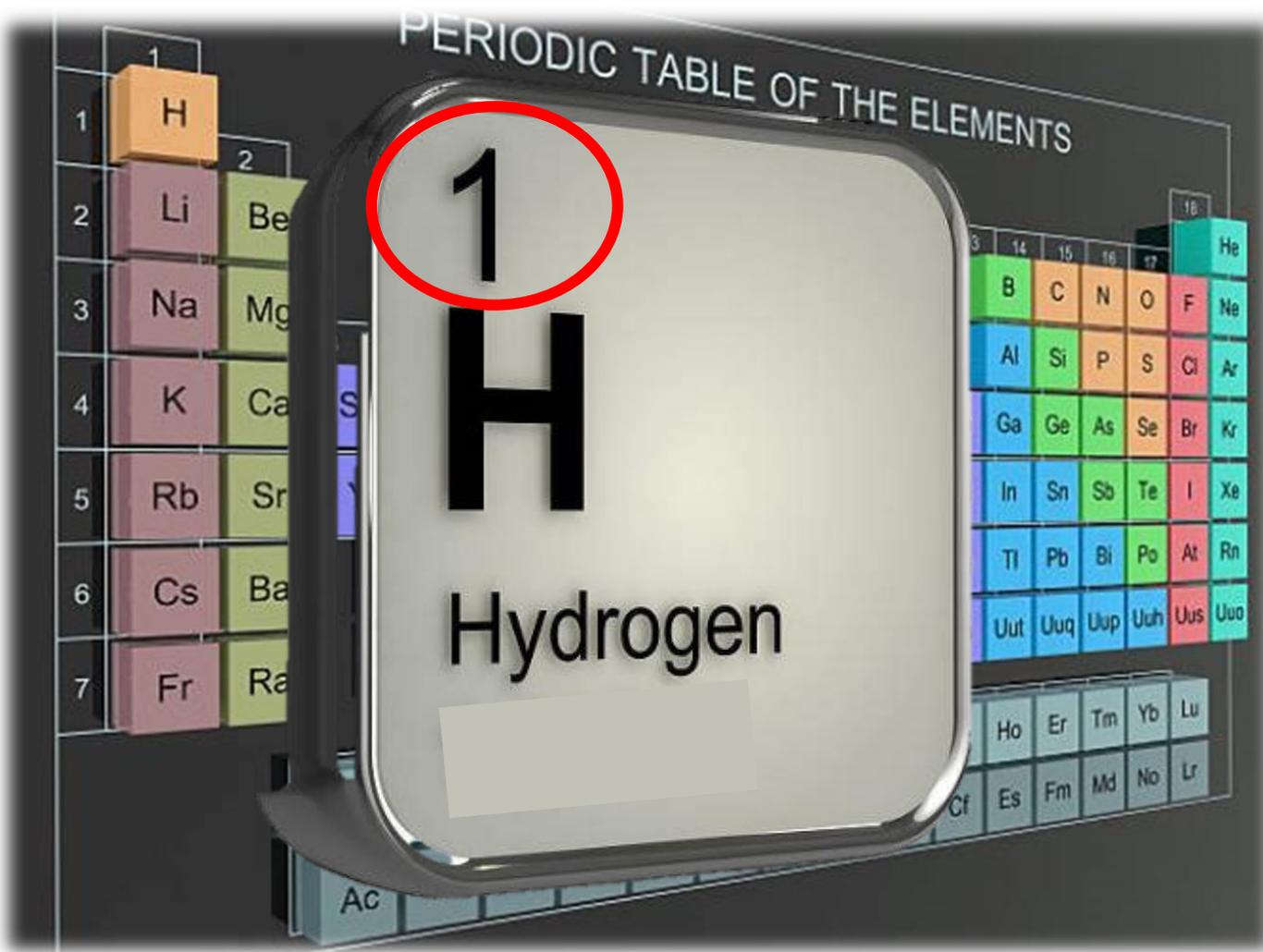
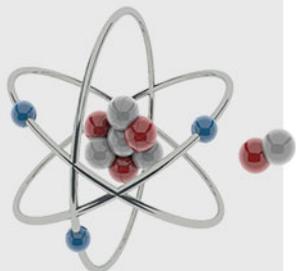
$$E_{TOT}^2 = p^2 c^2 + E_0^2 \quad (\text{Quadri-vecteur moment-énergie})$$

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v} : \text{Quantité de Mouvement (moment/Impulsion)}$$



Éléments et Isotopes

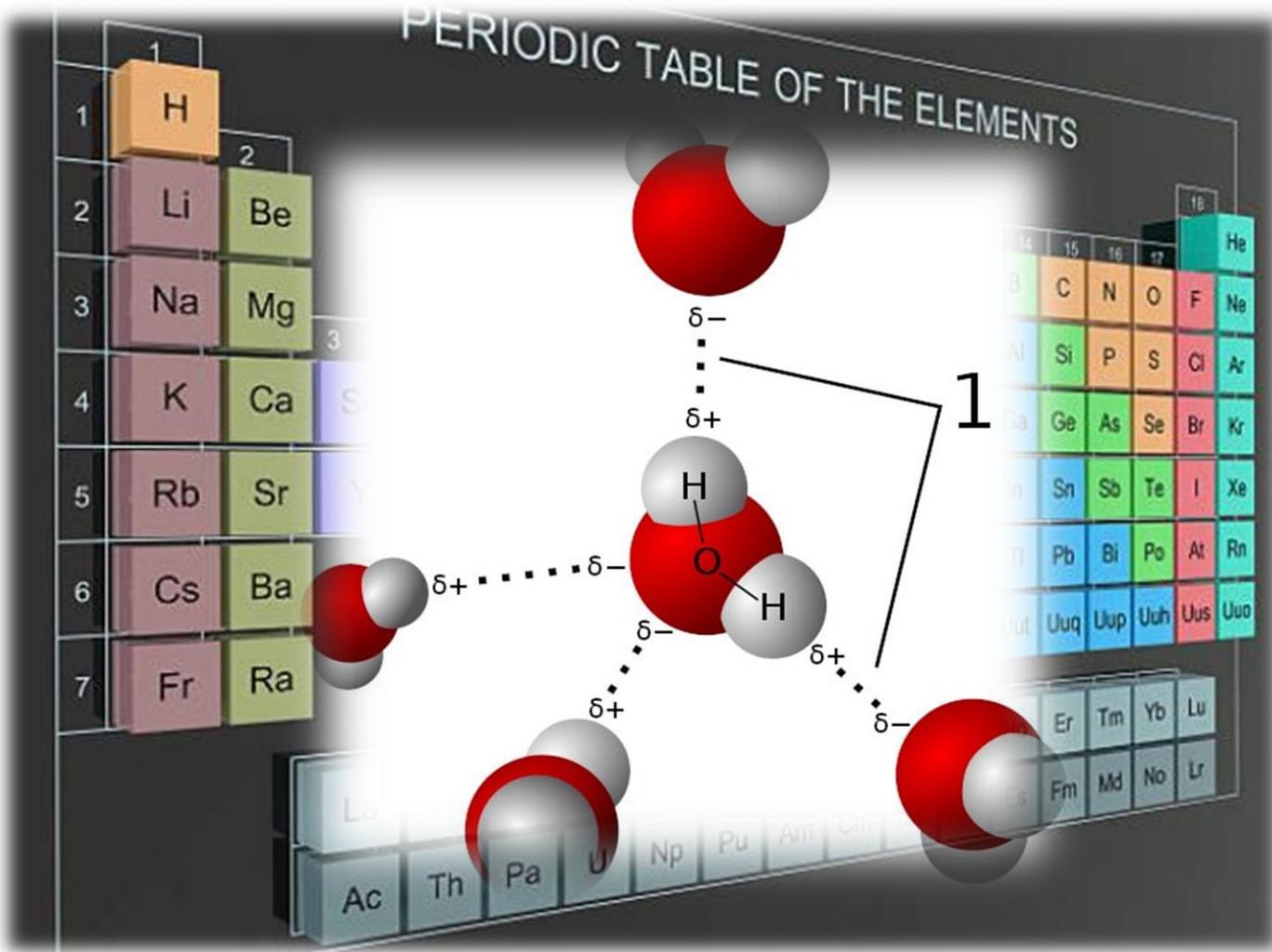
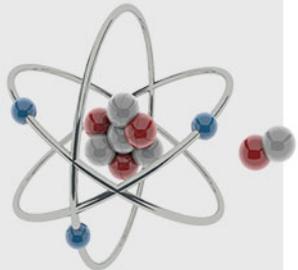
Chimie vs Physique



- Alcalins
- non métaux
- Alcalino terreux
- Métaux transition
- Halogènes
- Gaz nobles
- Actinides

Éléments et Isotopes

Chimie vs Physique



Alcalins

non métaux

Alcalino terreux

Métaux transition

Halogènes

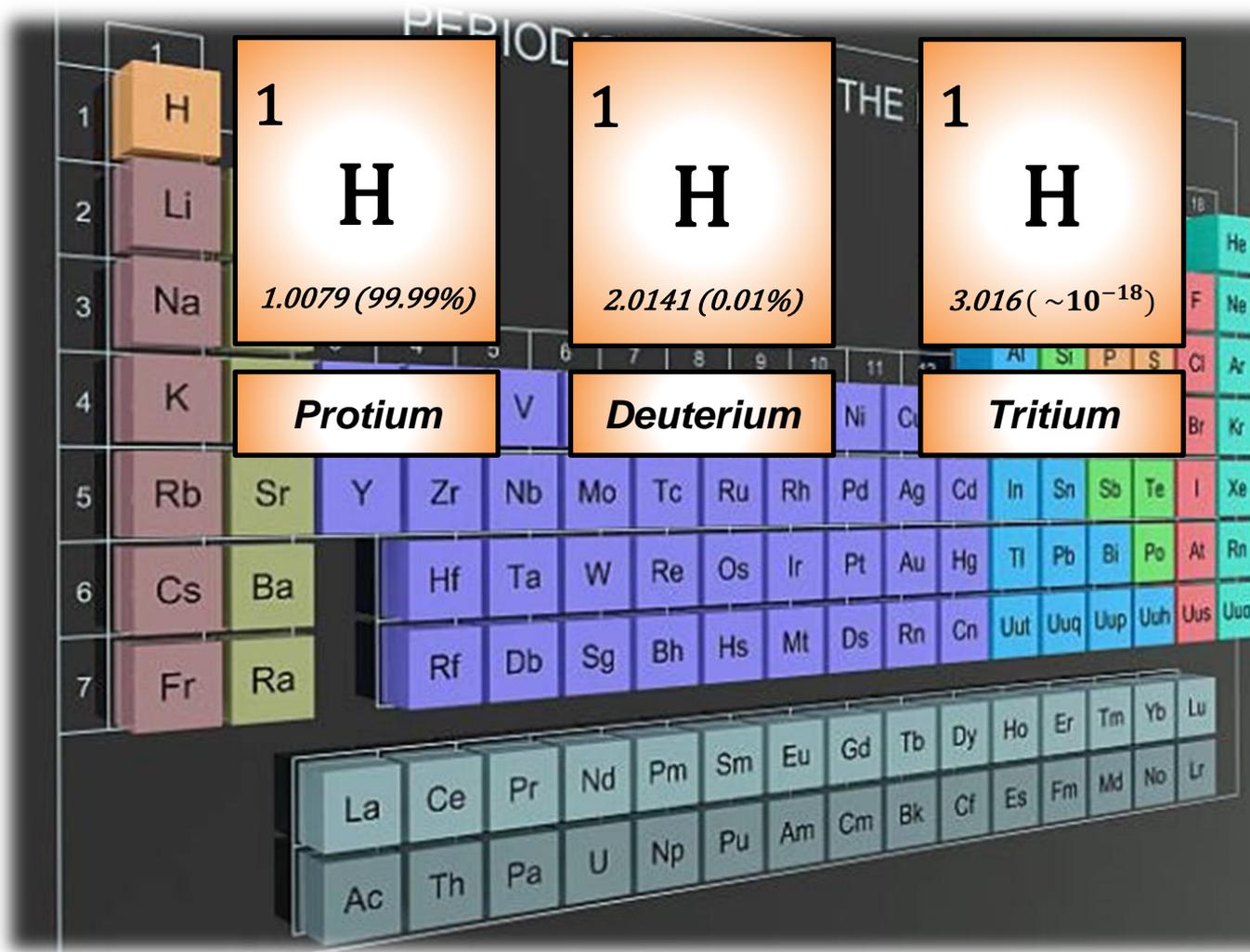
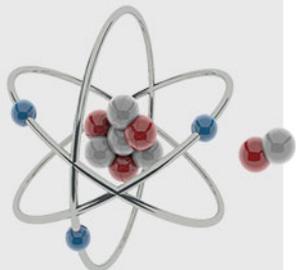
Gaz nobles

Actinides

Éléments et Isotopes

Chimie vs Physique

Radioactivité et Rayonnements



Alcalins

*non
métaux*

*Alcalino
terreux*

*Métaux
transition*

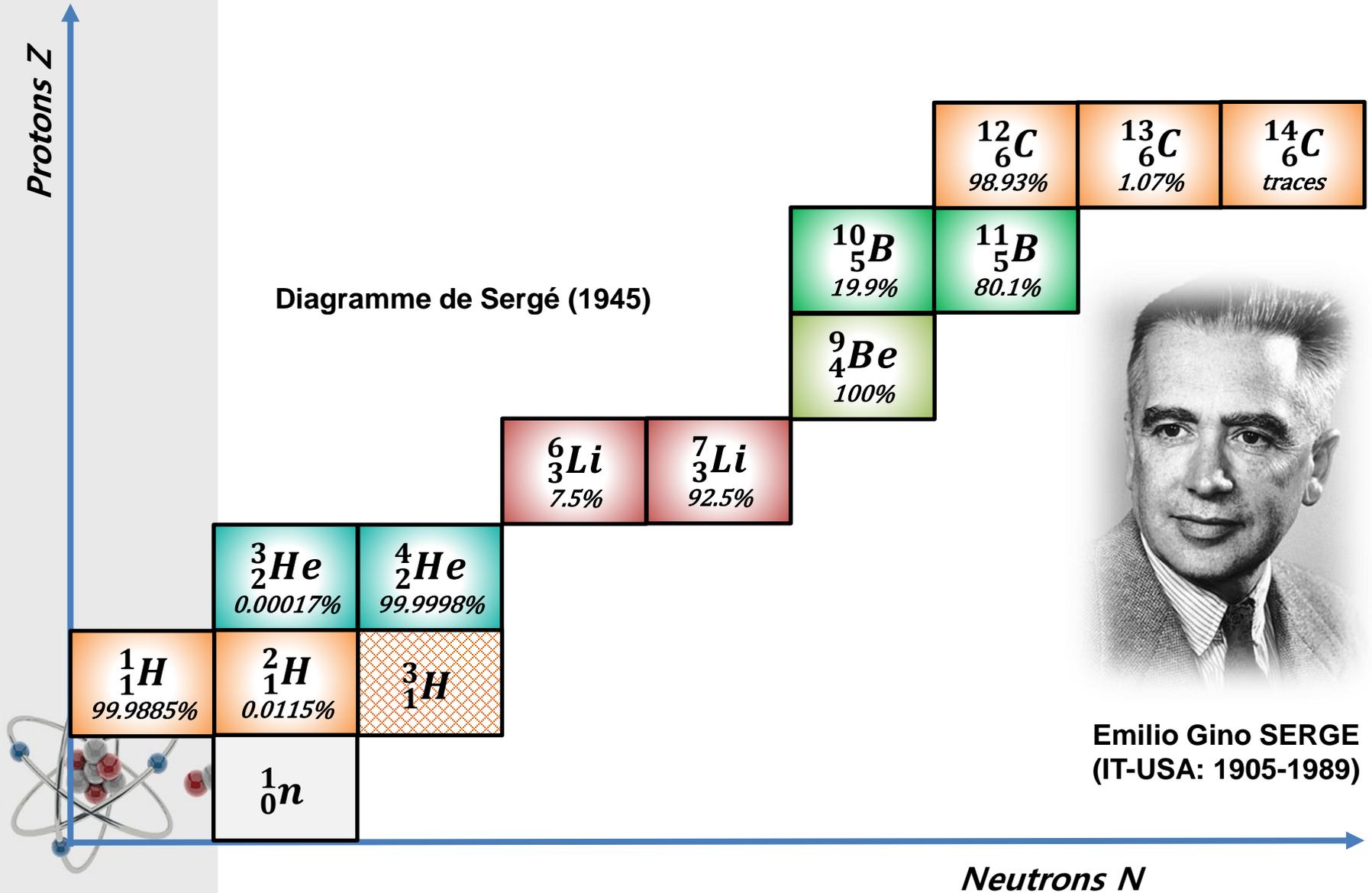
Halogènes

Gaz nobles

Actinides

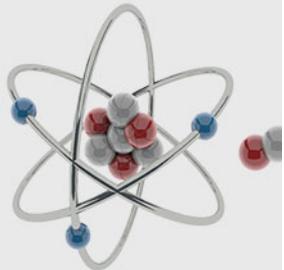
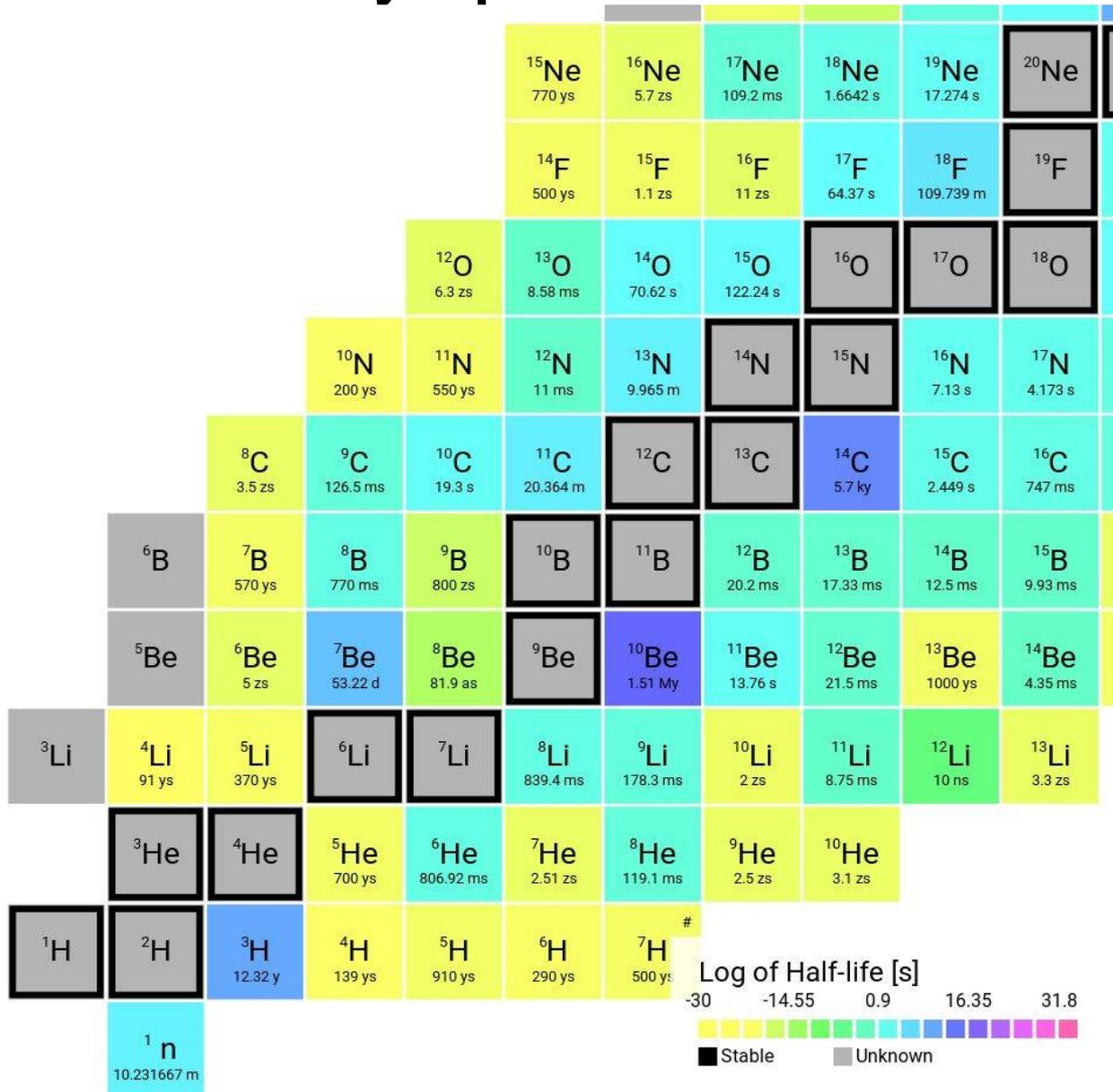
Éléments et Isotopes

Chimie vs Physique



Éléments et Isotopes

Chimie vs Physique



Éléments et Isotopes

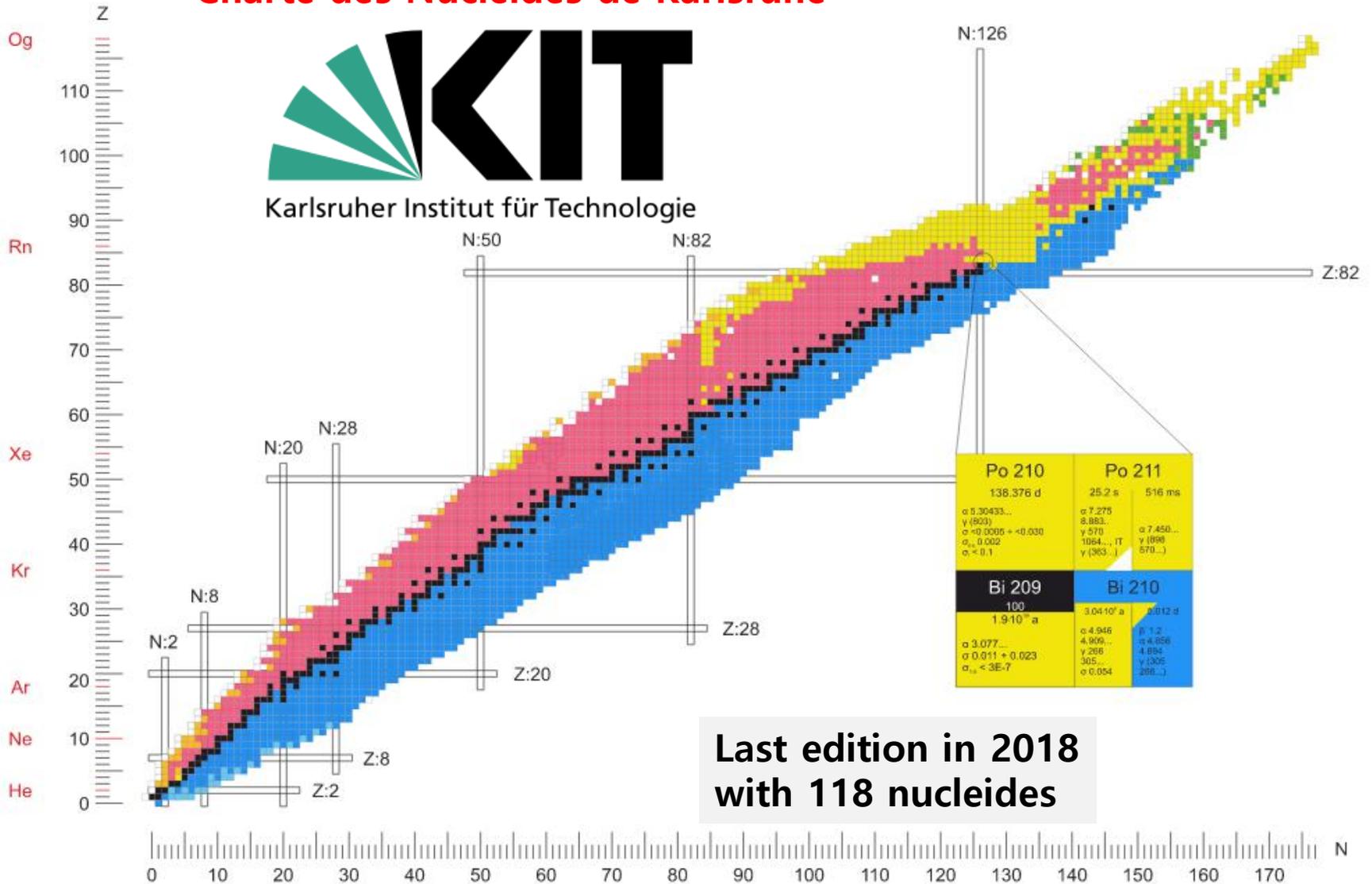
Chimie vs Physique

Charte des Nucléides de Karlsruhe

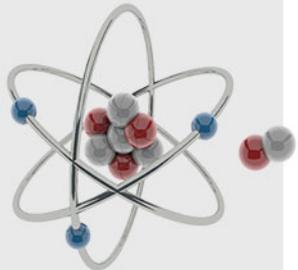
1st edition in 1958
with 102 nucleides



Karlsruher Institut für Technologie



Last edition in 2018
with 118 nucleides



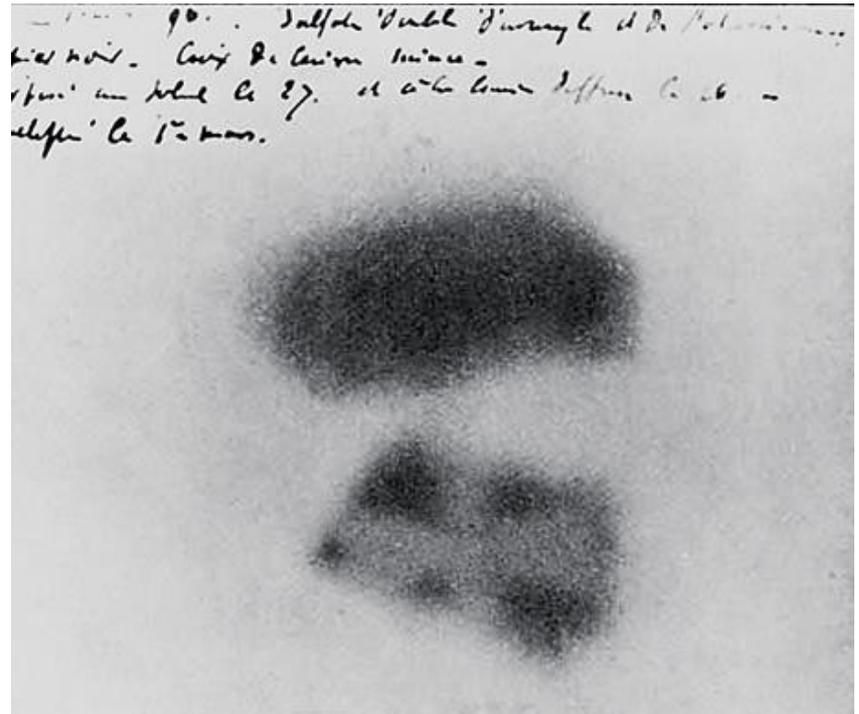
Contexte historique

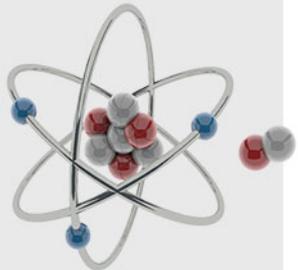
1886: Becquerel découvre la radioactivité par hasard, alors qu'il fait des recherches sur la fluorescence des sels d'uranium (Pechblende UO_2) pour comprendre la nature de ces rayonnements.

C'est en observant une plaque photographique mise en contact avec le matériau qu'il s'aperçoit qu'elle est imprimée même lorsque le matériau n'a pas été soumis à la lumière du Soleil. Ce rayonnement fut baptisé hyperphosphorescence.



*Antoine Henry BECQUEREL
(1852-1908, France)*

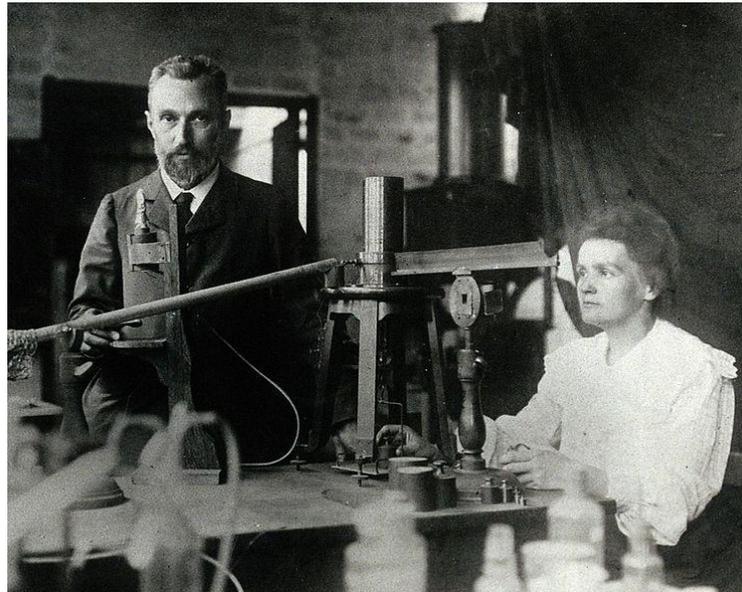




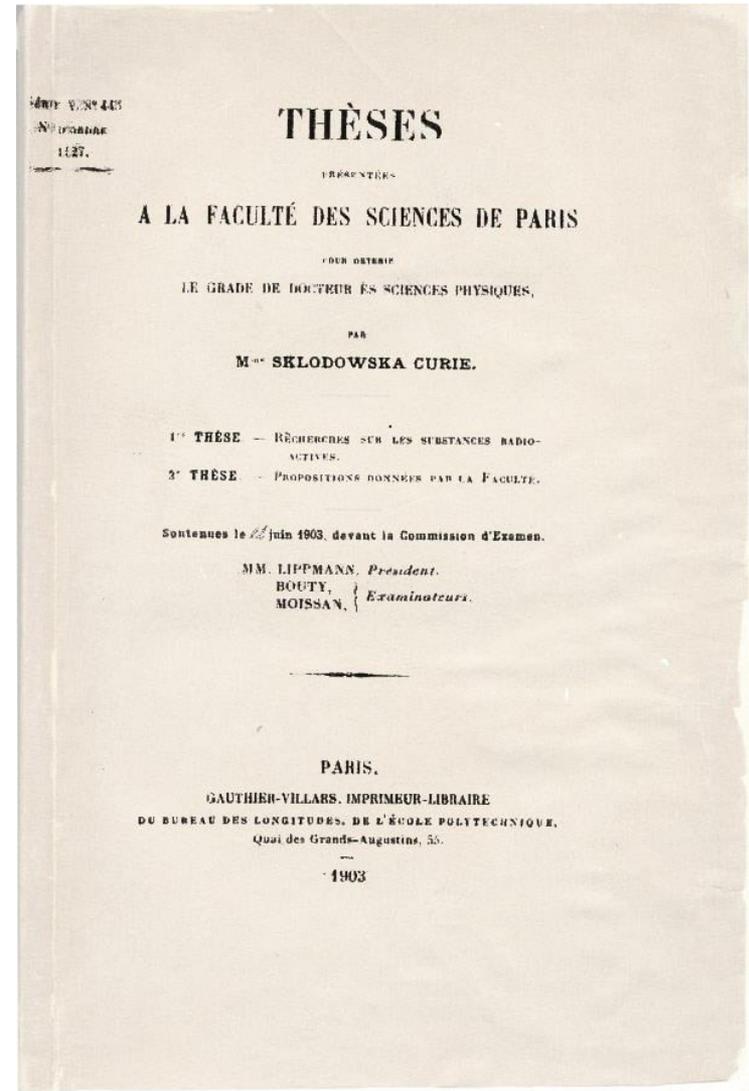
Contexte historique

Juillet 1898: La découverte du Polonium par Pierre et Marie Curie. Un élément très radioactif et lié à l'Uranium (descendant dans la filière radioactive de l'U238).

Décembre 1898: Découverte du Radium par Pierre et Marie Curie. Également lié à l'uranium.



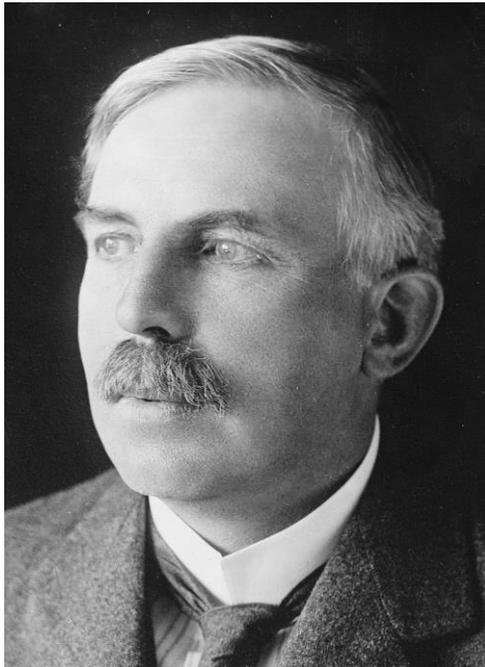
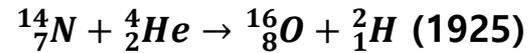
*Pierre et Marie CURIE
(1859-1906, 1867-1934, France)*



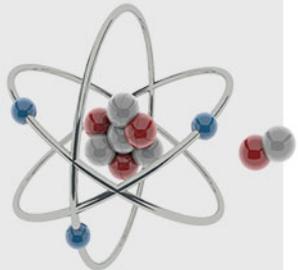
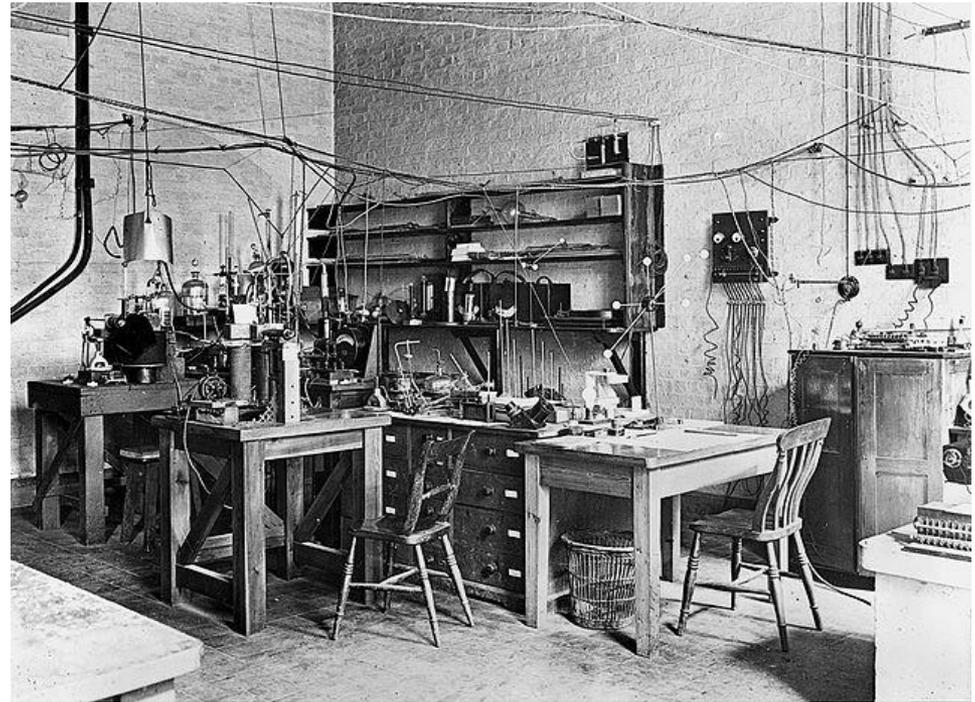
Contexte historique

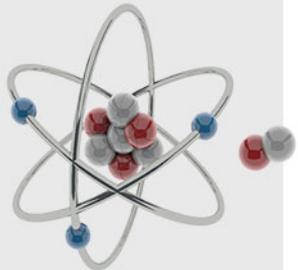
1908: Confirmation que la radioactivité alpha émise par les noyaux lourds (Radium, Polonium, Uranium...) est essentiellement des noyaux d'Hélium (sans électrons).

1919: Rutherford réalise la première transmutation artificielle:

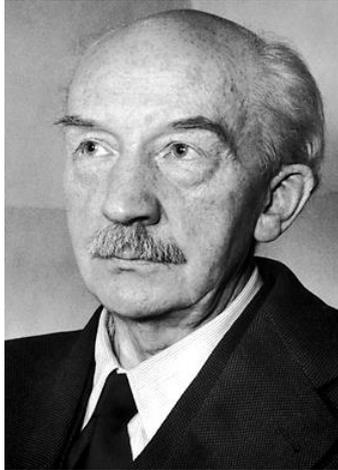


*Ernest RUTHERFORD
(1871-1937, New-Zeland, UK)*





Contexte historique



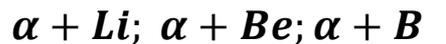
*Walther BOTHE
(1891-1957, Germany)*

1931: En s'intéressant aux recherches de BOTHE, Fred et Irène découvrent la propriété qu'a ce rayonnement de faire déplacer les noyaux, en particulier H. Ils supposent qu'il s'agit d'un effet Compton entre des $\gamma(50MeV)$ et les noyaux H.



*James CHADWICK
(1891-1974, U.K)*

1930: Détection de rayonnements très énergétiques et plus pénétrants émis lors des réactions:

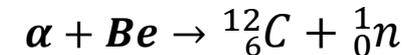


Qu'on supposait comme étant des rayons gammas.



*Frédéric & Irène JOLIOT-CURIE
(1900-1958, 1897-1956, France)*

1932: en utilisant la réaction nucléaire:



Il peut ainsi affirmer que ce rayonnement « ultra pénétrant » n'est pas un gamma mais une particule massive (~1uma) et de charge nulle: Le neutron

Contexte historique

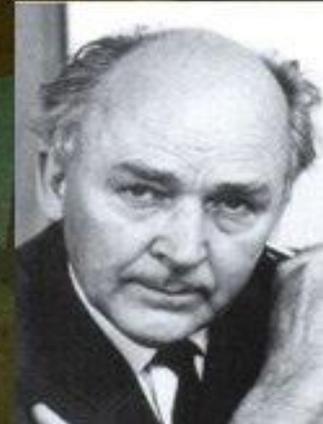
1938: La découverte de la fission induite à Berlin, par O. HAHN et son équipe. Ils ont bombardé de l'uranium par des neutrons:



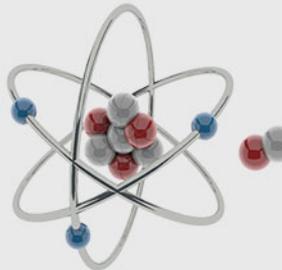
Otto HAHN
(1879-1968, Germany)

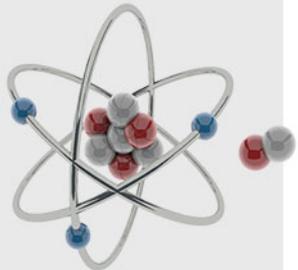


Lise Meitner
(1878-1968, Austria, Sweden)



Fritz STRASSMANN
(1902-1980, Germany)





Contexte historique

Oct-Nov. 1942: Les travaux de construction de Chicago Pile 1 (CP1) dans une salle de Squash sous les gradins du Chicago Univ. Stadium

02 Déc. 1942 à 15h25: Fermi retire la barre de commande en Cd, et laisse diverger CP1 et produire ainsi « 1st Nuclear Watt » !!!

La pile était en structure de bois, qui contenant 50000 briques de graphite (400t de Carbone) qui contenait 36t d'UO₂ et 6t d'uranium pur.

Le réacteur sera utilisé par la suite pour produire du Plutonium pour la bombe A (Projet Manhattan)



*Enrico FERMI
(1901-1954, Italy-USA)*

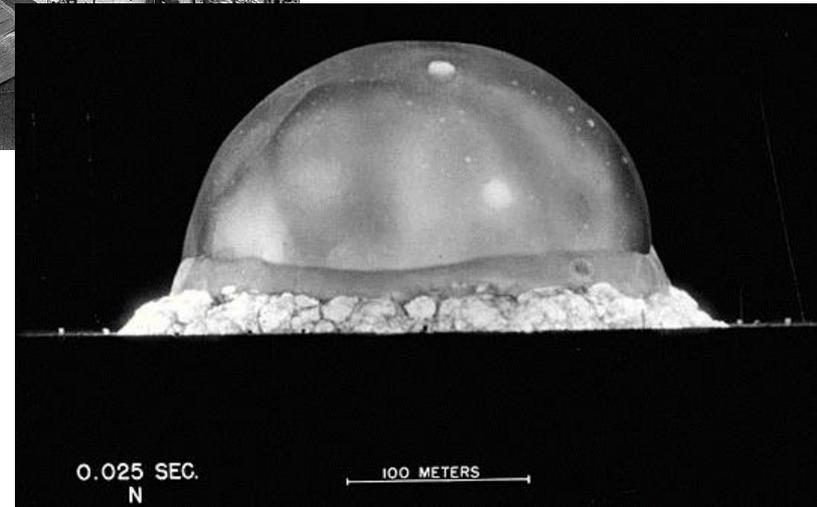
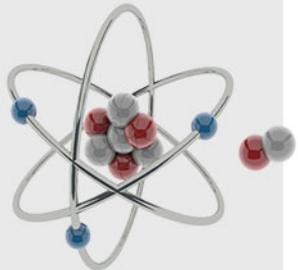


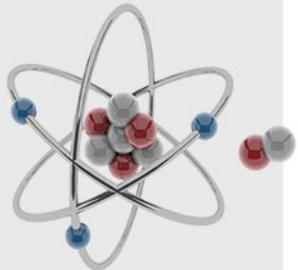
Contexte historique

16 Juillet 1945: Trinity, Test de la première bombe nucléaire



Robert OPPENHEIMER
(1904-1967, USA)
Chef du Projet MANHATTAN,
Los Alamos, New Mexico, USA

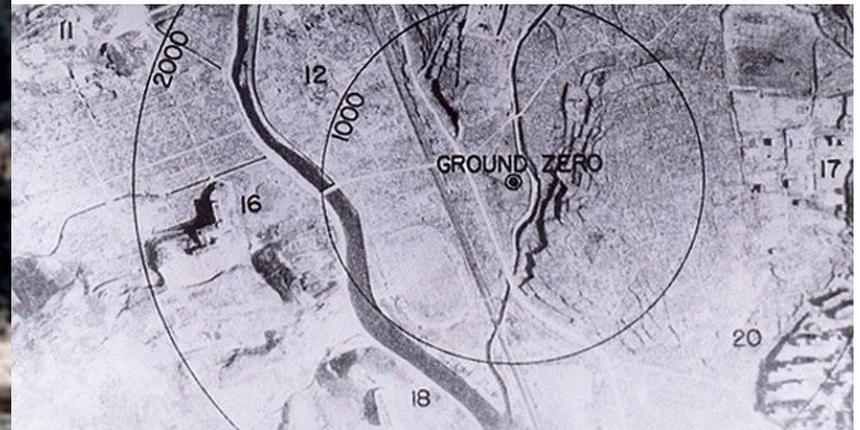
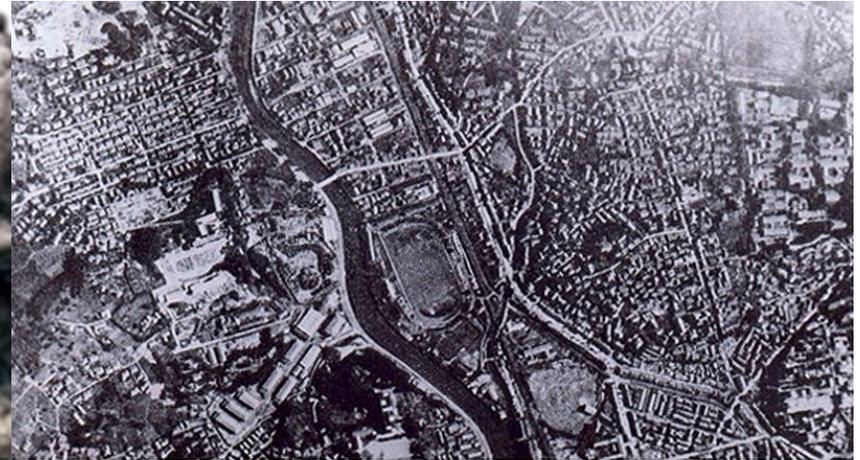
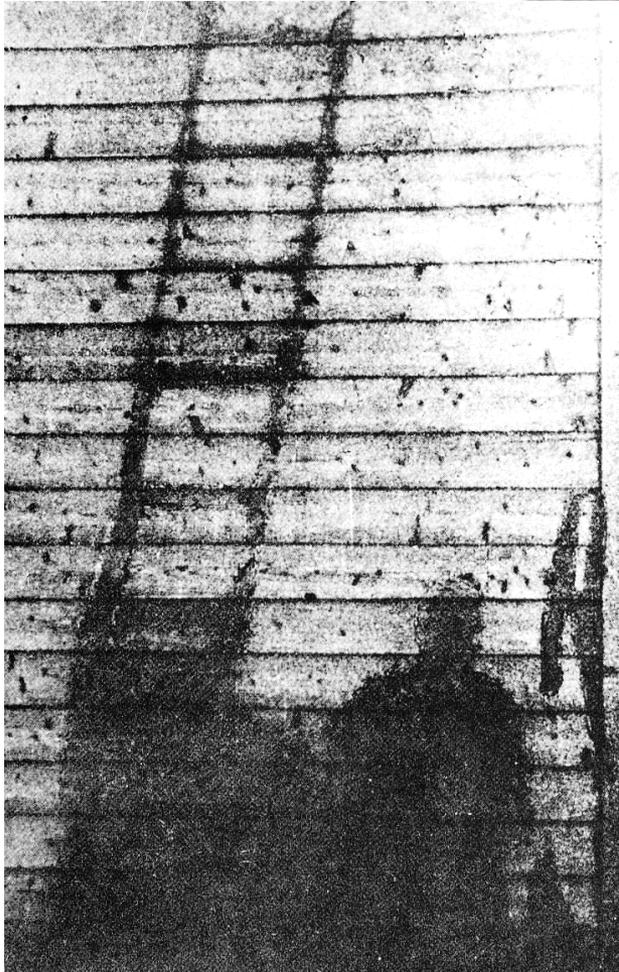




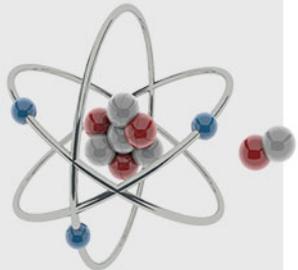
Contexte historique

06 août 1945: Bombardement de Hiroshima (Little Boy)

09 août 1945: Bombardement de Nagasaki (Fat Man)



Nagasaki avant et après le jour J

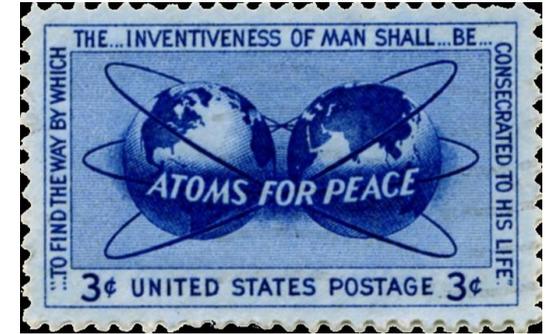


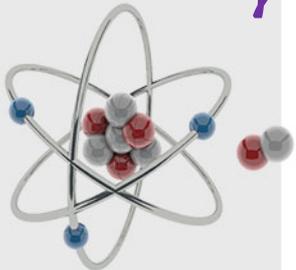
Contexte historique

1953: Le lancement du projet :

Le nucléaire civil: produire de l'énergie électrique à base de l'énergie de la fission nucléaire.

On se lance alors dans la construction des centrales nucléaires



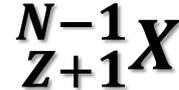
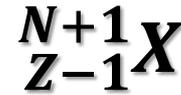
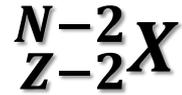


γ

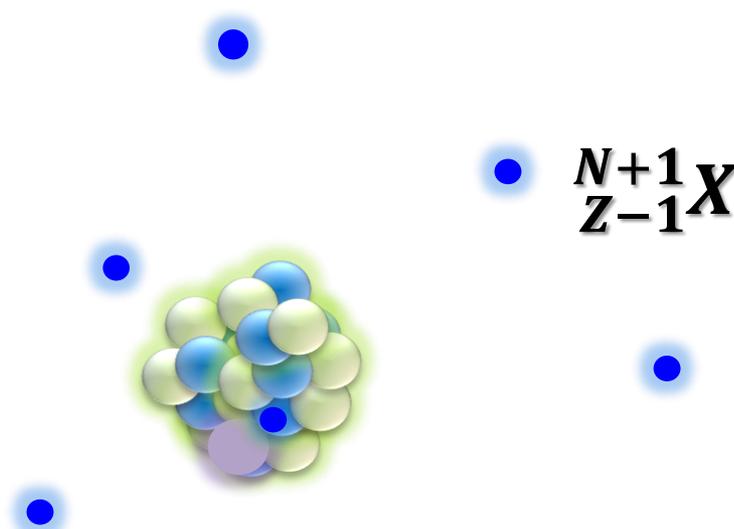
Radioactivité des éléments

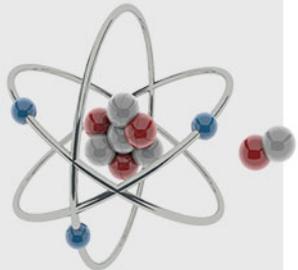
α

β^+

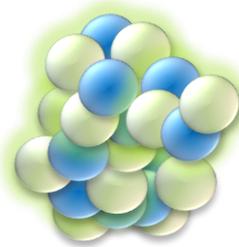


β^-





Radioactivité des éléments



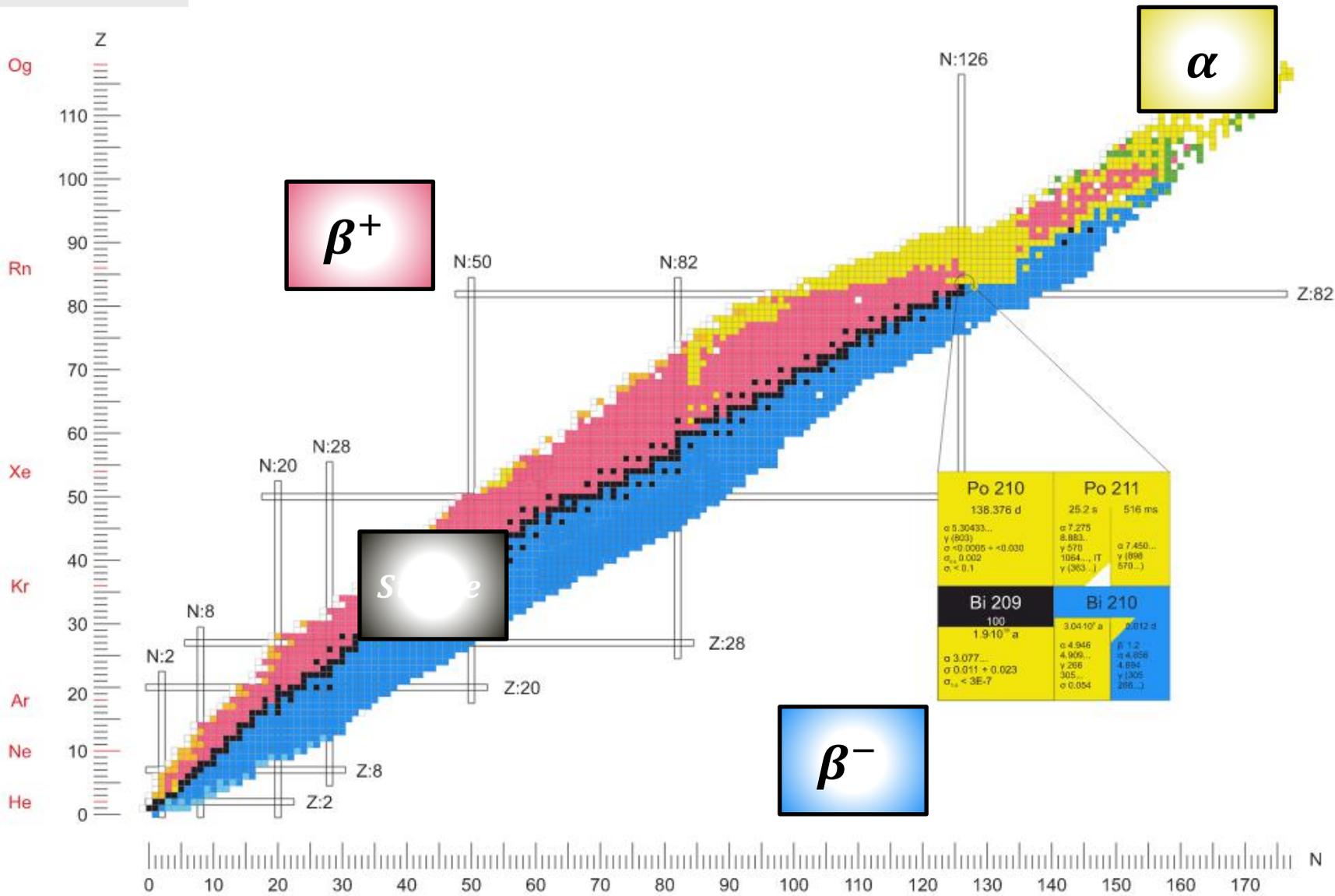
n

n



Éléments et Isotopes

Radioactivité des isotopes



Radioactivité des éléments

Le processus radioactif:

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

Loi de la radioactivité:

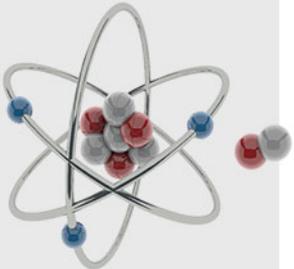
$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \rightarrow N = N_0 e^{-\lambda t}$$

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:

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



Radioactivité des éléments

Filière radioactive:

Noyau père radioactif:

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

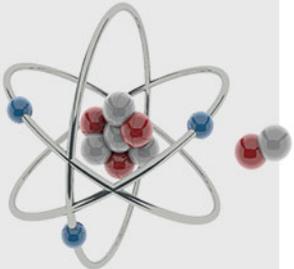
Noyau fils radioactif:

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

on pose : $N_2 = A e^{-\lambda_1 t} + B e^{-\lambda_2 t}$

Variation du noyau fils:

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

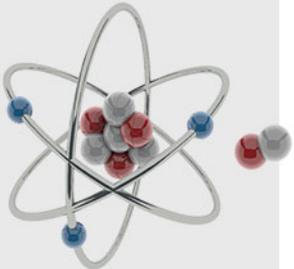


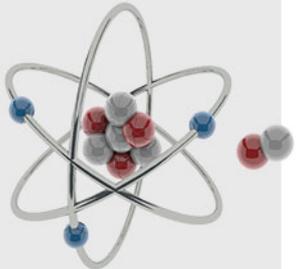
Radioactivité des éléments

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

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

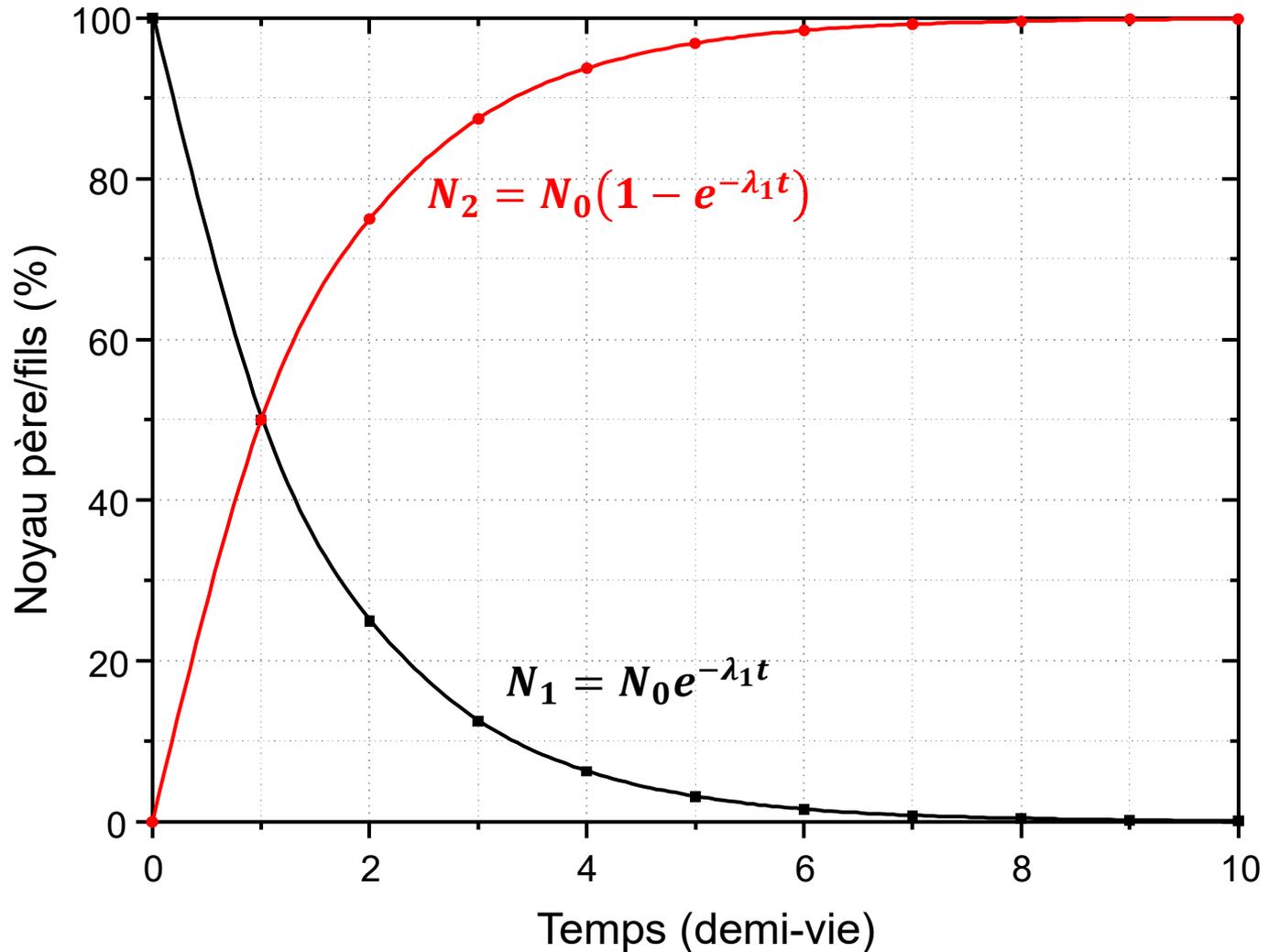
$$N_2 = -N_0 (e^{-\lambda_1 t} - 1) = N_0 (1 - e^{-\lambda_1 t})$$





Radioactivité des éléments

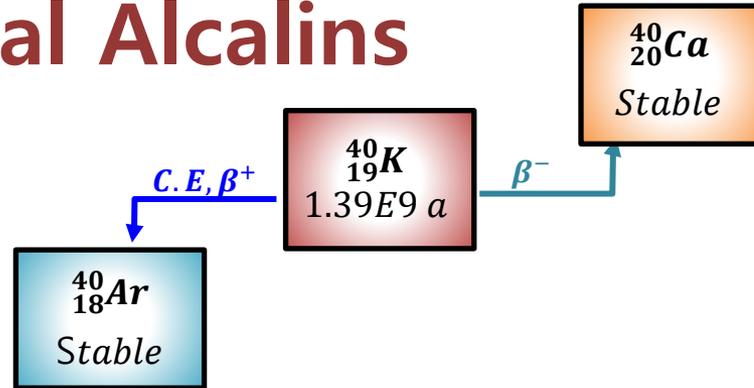
Filière radioactive: Noyau fils stable ($\lambda_2 = 0$)



Cas du Potassium 40:

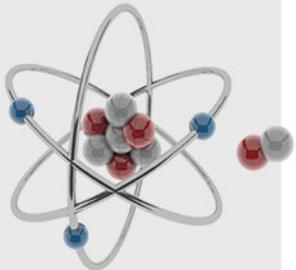
Alcalino-terreux

Métal Alcalins



Gaz noble

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



Radioactivité des éléments

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

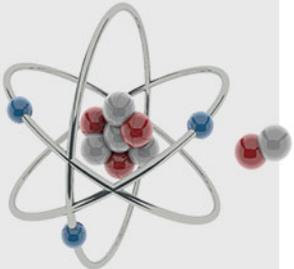
$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

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

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

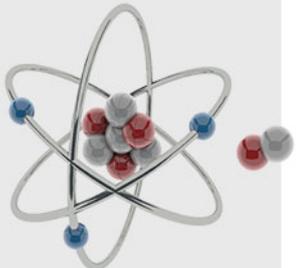
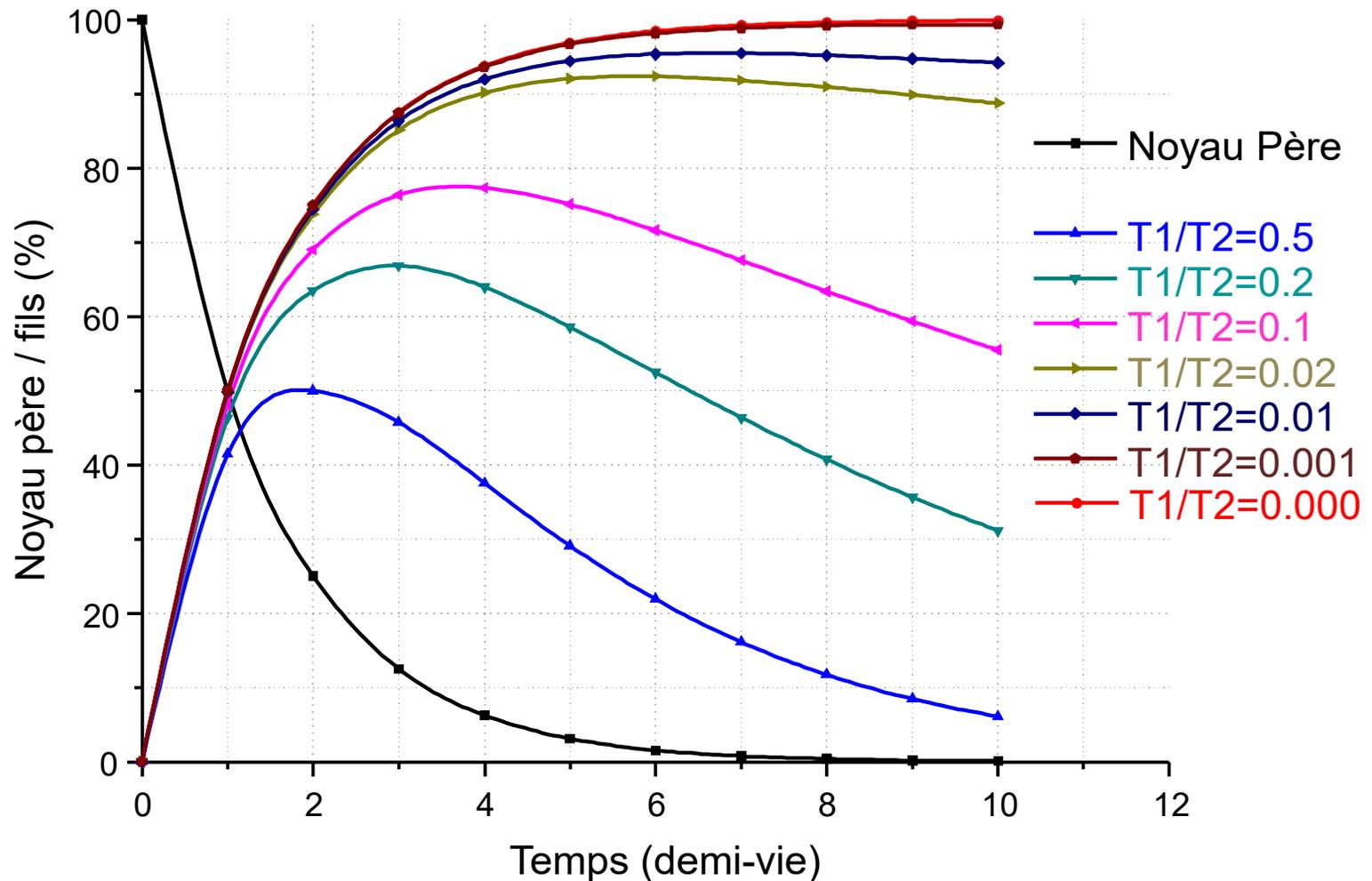
$$N_2 = \frac{N_0}{[T_1/T_2] - 1} (e^{-[\ln 2/T_1] n T_1} - e^{-[\ln 2/T_2] n T_1})$$

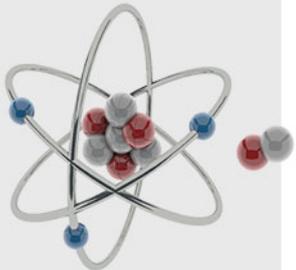
$$N_2 = \frac{N_0}{[T_1/T_2] - 1} (e^{-[n \times \ln 2]} - e^{-[nx \times \ln 2]}) = \frac{N_0}{x - 1} \left(\frac{1}{2^n} - \frac{1}{2^{nx}} \right)$$



Radioactivité des éléments

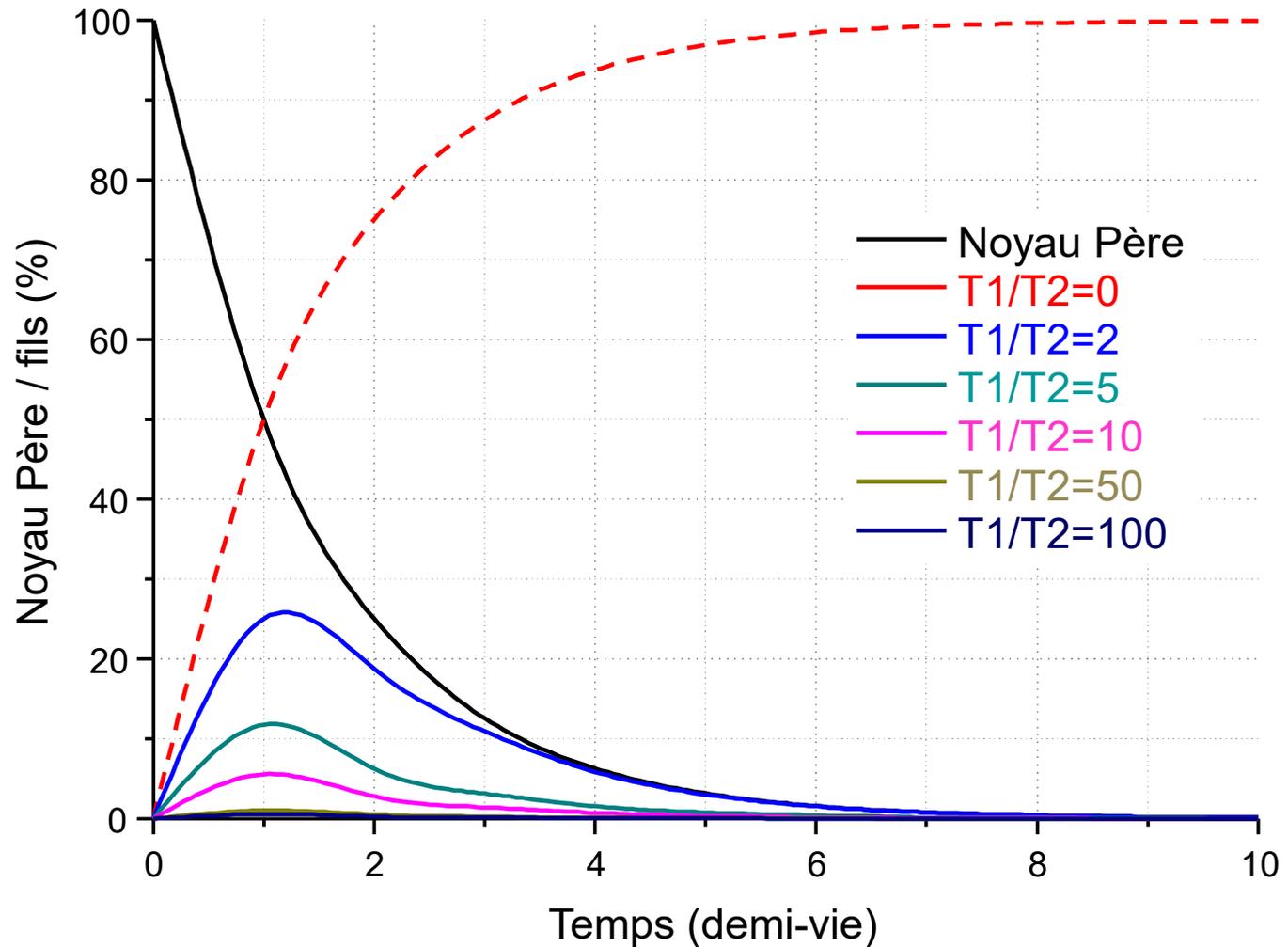
Filière radioactive: Noyau fils instable ($T_2 > T_1$) ou $x < 1$





Radioactivité des éléments

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

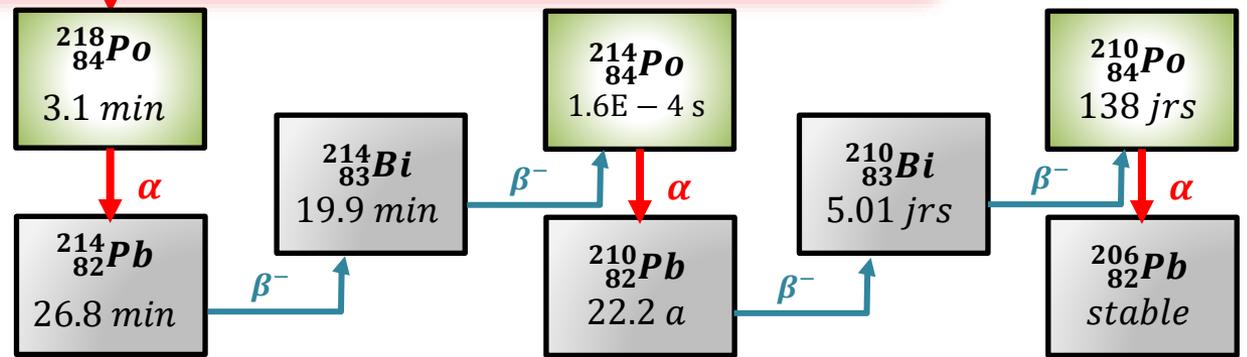
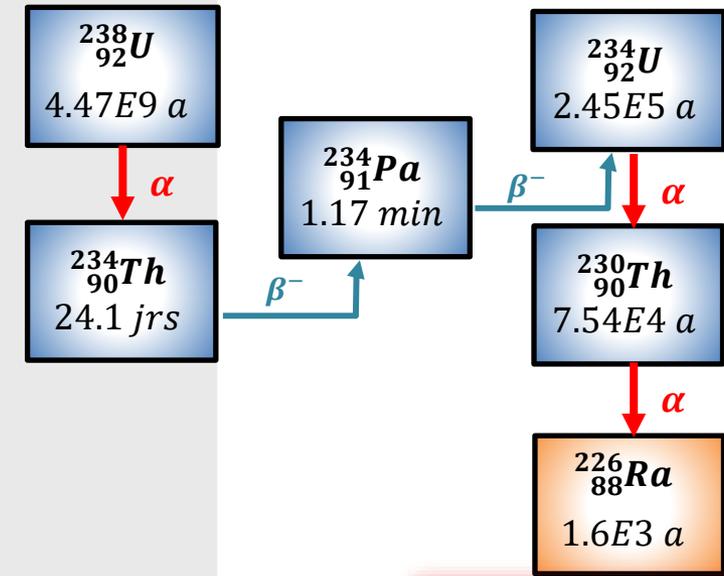


Filiale de l'Uranium 238:

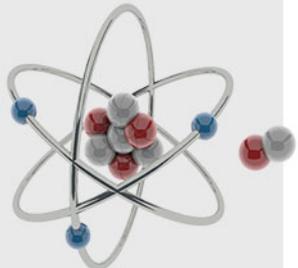
Actinides

Alcalino-terreux

Gaz nobles



Métalloïdes



Métaux post-transitionnels

Radioactivité des éléments

Mesure de la radioactivité: Unités

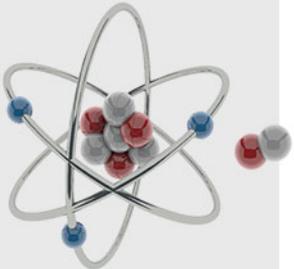
Les unités qui sont d'usage en prospection radionucléaire:

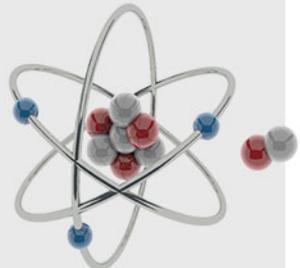
- Mesure de l'activité A: $[1Ci] \equiv 3.7 \times 10^{10} \text{ désint./s}$

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

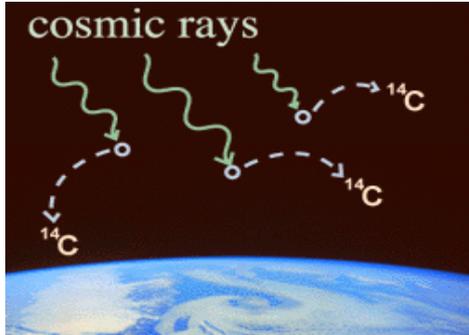
masse (Röntgen): $[1R] \equiv \frac{dE}{dm} [1/kg]$





I. Introduction au Rayonnements

Radioactivité dans la nature: sources et ordre de grandeur



atmosphère

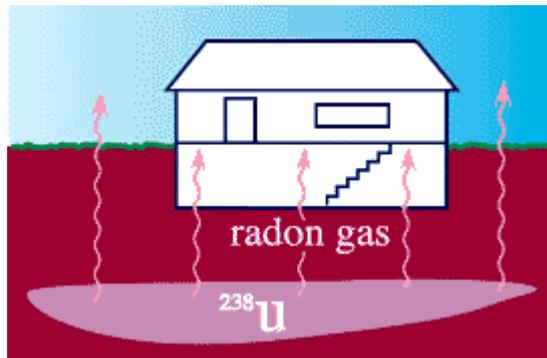
rayonnements cosmiques

Photons, muons, neutrons, ... + radio-éléments ^{14}C , ^7Be , $^3\text{H} \rightarrow \beta$



^{14}C T = 5730 ans s'échange avec ^{12}C stable

⇒ molécules $^{14}\text{CO}_2$ absorbées par plantes ⇒ animaux ⇒ nous ..



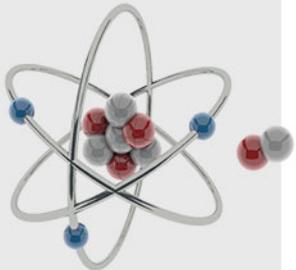
écorce terrestre

rayonnements telluriques

radio-éléments ^{40}K , ^{32}P , ... + familles U, Ra, Rn, Th,



granit maisons : alimente l'air en ^{222}Rn particulièrement nocif car inhalé → fixé dans les poumons !



I. Introduction au Rayonnements

Radioactivité dans la nature: sources et ordre de grandeur

Historiquement, 1Ci = activité de 1 g radium : $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$

Milieux naturels

Eau de pluie	0,3 à 1 Bq/l
Eau de rivière	0,07 Bq/l (^{226}Ra et descendants) 0,07 Bq/l (^{40}K) 11 Bq/l (^3H)
Eau de mer	14 Bq/l (^{40}K essentiellement)
Eau minérale	1 à 2 Bq/l (^{226}Ra , ^{222}Rn)
Sol sédimentaire	400 Bq/kg
Sol granitique	8000 Bq/kg

mineral d'uranium à 10% (activité uranium) : $1,3 \cdot 10^{-4} \text{ GBq}$ par kg

radon (^{222}Rn) contenu dans 1 m^3 d'air atmosphérique : 5 Bq

sources pour la gammagraphie industrielle : 4 à 40 GBq

sources de ^{60}Co pour la radiothérapie : 75 à 200 10^3 GBq

bombe atomique à fissions : $7,4 \cdot 10^{13} \text{ GBq}$ (1 min après l'explosion !)