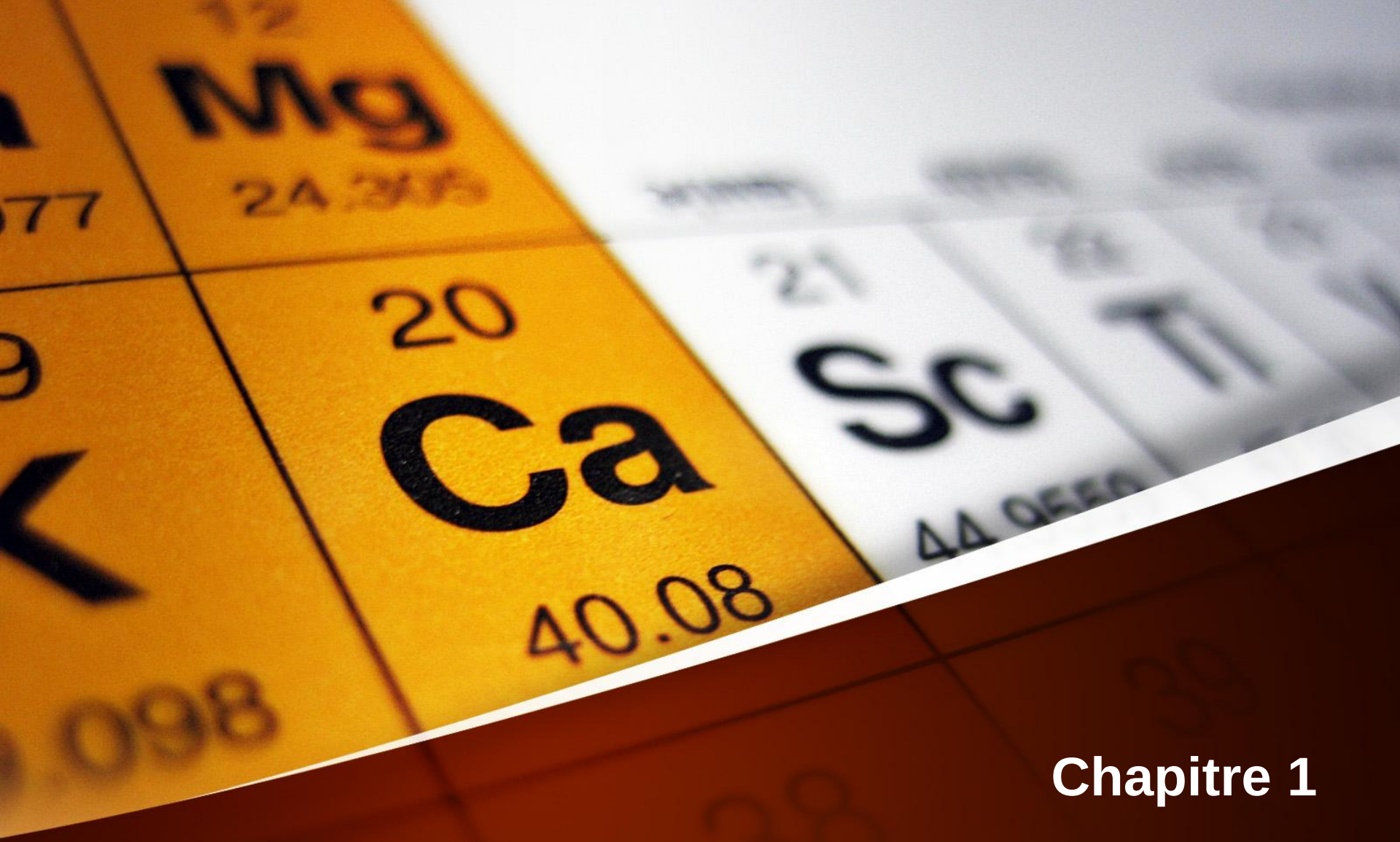
*Khemis Miliana University*
*Faculty of Matter Sciences and Computer Science*
*Department of Physics*
*Master Applied Physics*

# Interaction Radiation-Matter

By Dr. S.E. Bentridi




## Chapitre 1

# Notions élémentaires sur les rayonnements

# Élément du tableau périodique

# Atomistique

$$ {}^{A}_{Z}X $$

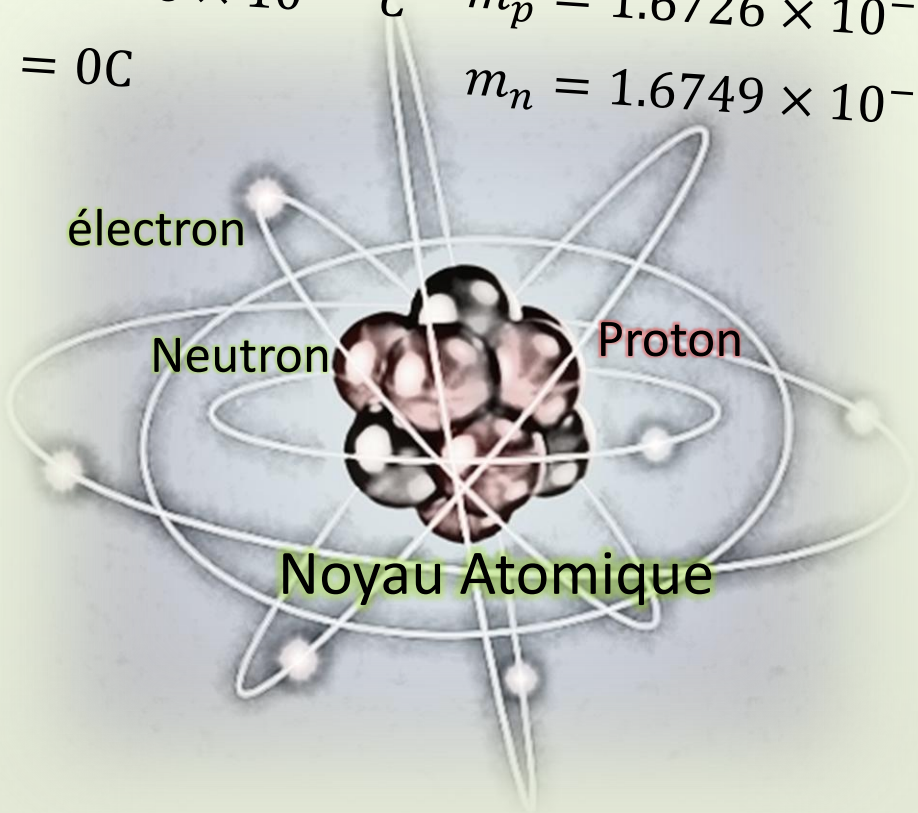
Z: nombre atomique (protons/électrons)
A: nombre de masse (A=Z+N)
N: nombre de neutrons

# Atomistique

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

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

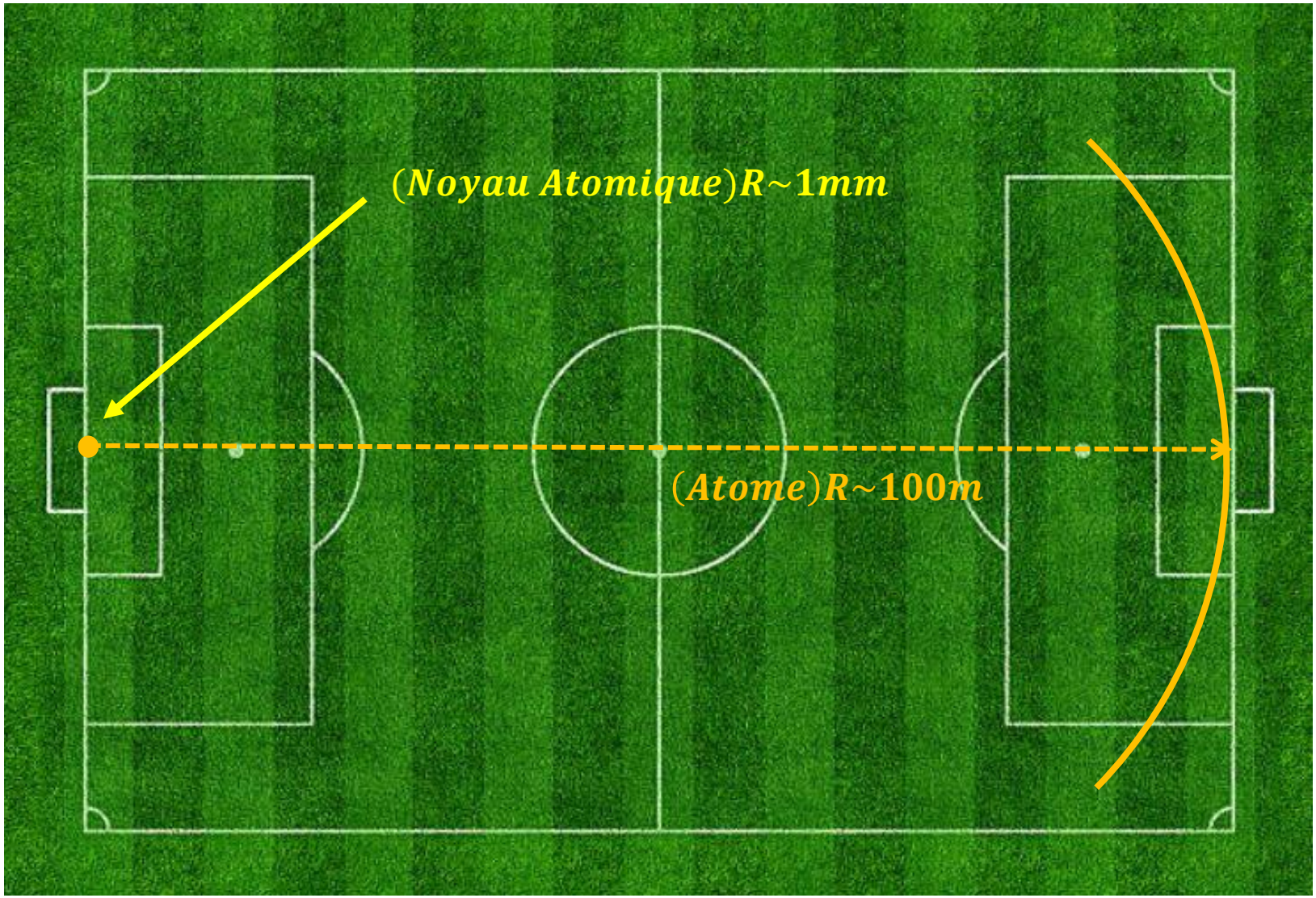
$q_n = 0 \text{C}$ $m_n = 1.6749 \times 10^{-27} \text{kg}$




Atome

# Atomistique

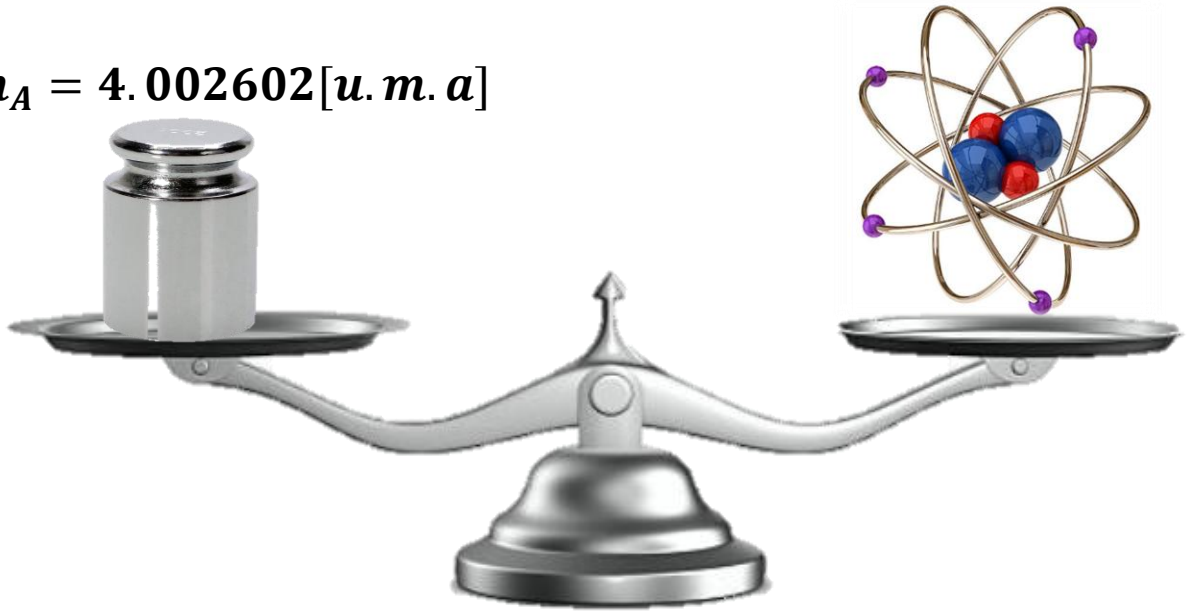
# Atomistique



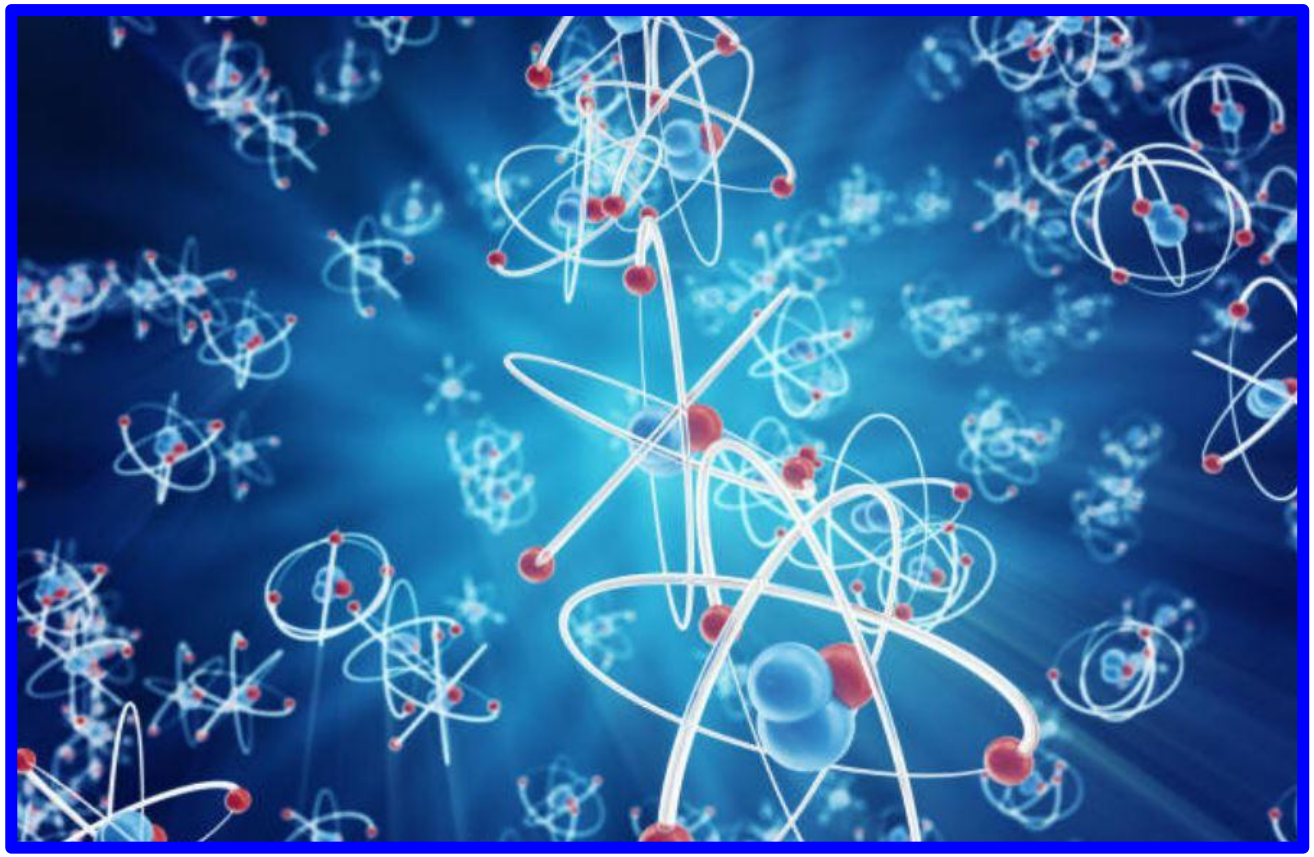
# Le mole et le Nombre d'AVOGADRO

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

$$m_A = 4.002602[u.m.a]$$



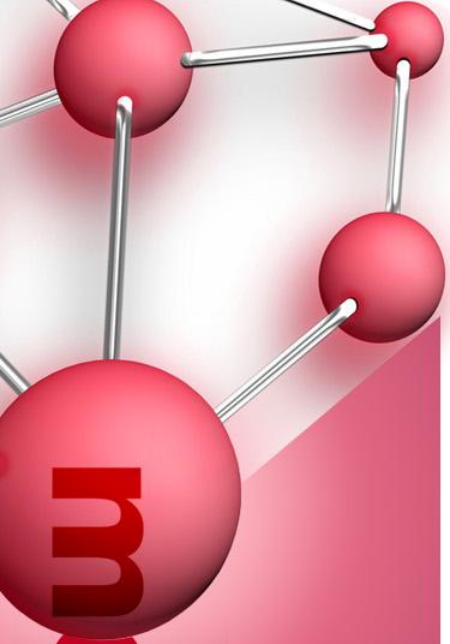
# Le mole et le Nombre d'AVOGADRO



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

***Unité: Atome ou molécules***

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




# 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:** $M_U = 238.0289 \left[\frac{g}{mol}\right]$

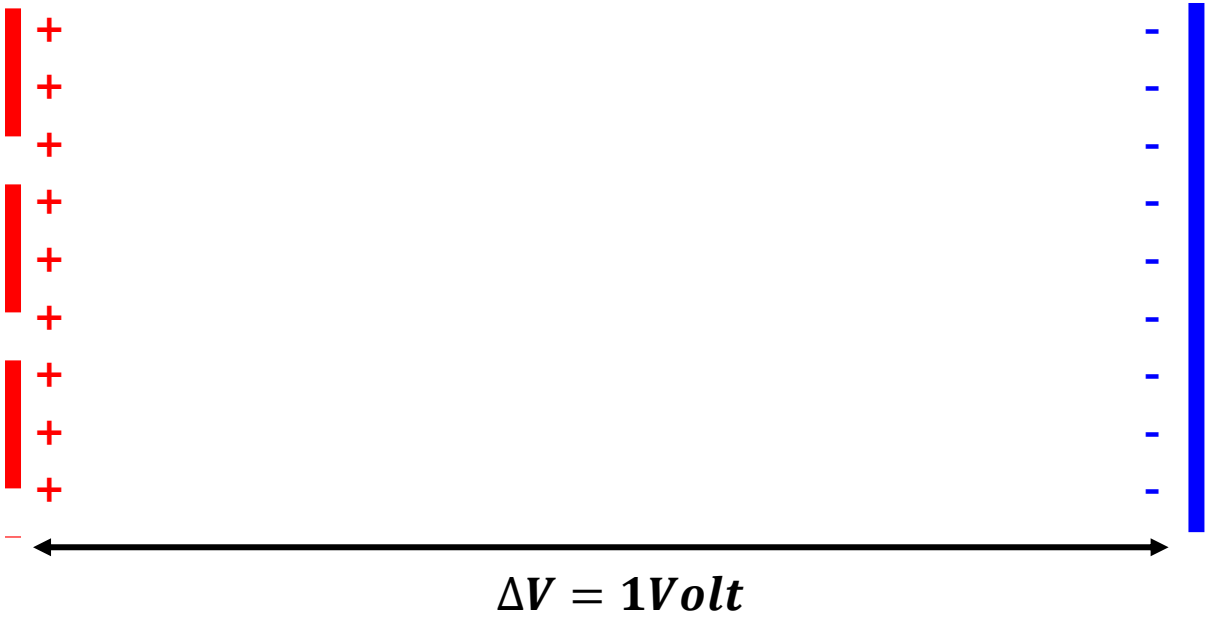
Déduire pour 70kg?

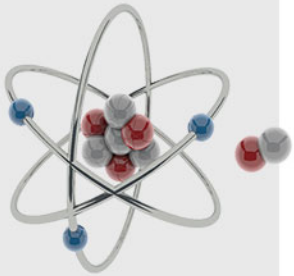
- **Réponse:** dans un 1 gramme de matière de:
  - **Hydrogène:** $M_H = 1.00794 \left[\frac{g}{mol}\right] \rightarrow N_H = \frac{1g}{1.00794} \times 6.022 \times 10^{23} \approx 6 \times 10^{23}\ atmes$
  - **Carbone:** $M_C = 12.0107 \left[\frac{g}{mol}\right] \rightarrow N_C \cong 5.01 \times 10^{22} atomes$
  - **Oxygène:** $M_O = 15.9994 \left[\frac{g}{mol}\right] \rightarrow N_O \cong 3.76 \times 10^{22} atomes$
  - **Nitrogène:** $M_N = 14.0067 \left[\frac{g}{mol}\right] \rightarrow N_N \cong 4.3 \times 10^{22} atomes$
  - **Soufre:** $M_S = 32.065 \left[\frac{g}{mol}\right] \rightarrow N_S \cong 1.88 \times 10^{22} atomes$
  - **Uranium:** $M_U = 238.0289 \left[\frac{g}{mol}\right] \rightarrow N_U \cong 2.53 \times 10^{21} atomes$

# Atomistique

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

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

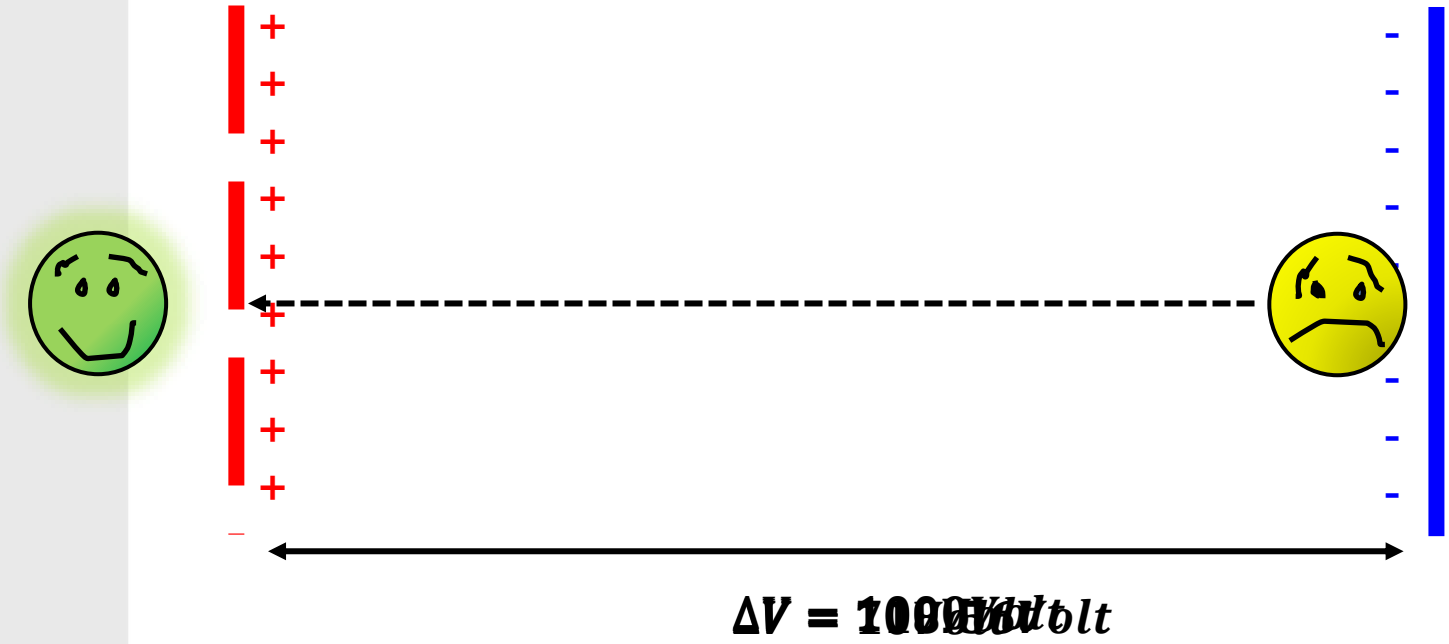


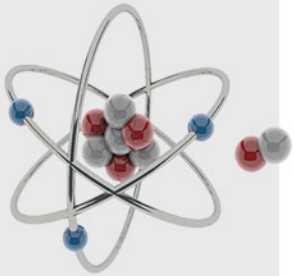



# Atomistique

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

$T = \Delta E = ?$



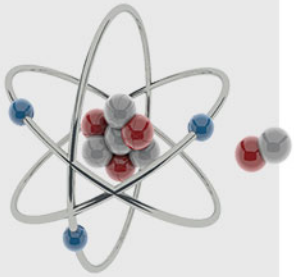



# Equivalence Energie-Masse

$$\Delta E \leftrightarrows \Delta M \times C^2$$

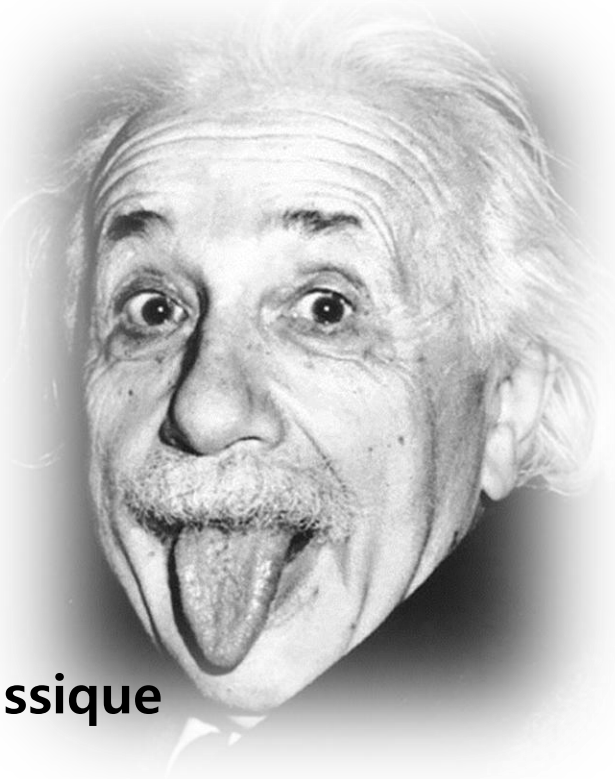
$c = 2.99792458 \times 10^8 [m.s^{-1}]$

A. EINSTEIN (1879-1955)



$$E_0 \equiv M_0 \times C^2$$ *Energie au repos (Rest energy)*

# Equivalence Energie-Masse



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

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

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

$E_{TOT} = T + E_0$

$T = \frac{1}{2}mv^2$ : Energie cinétique classique

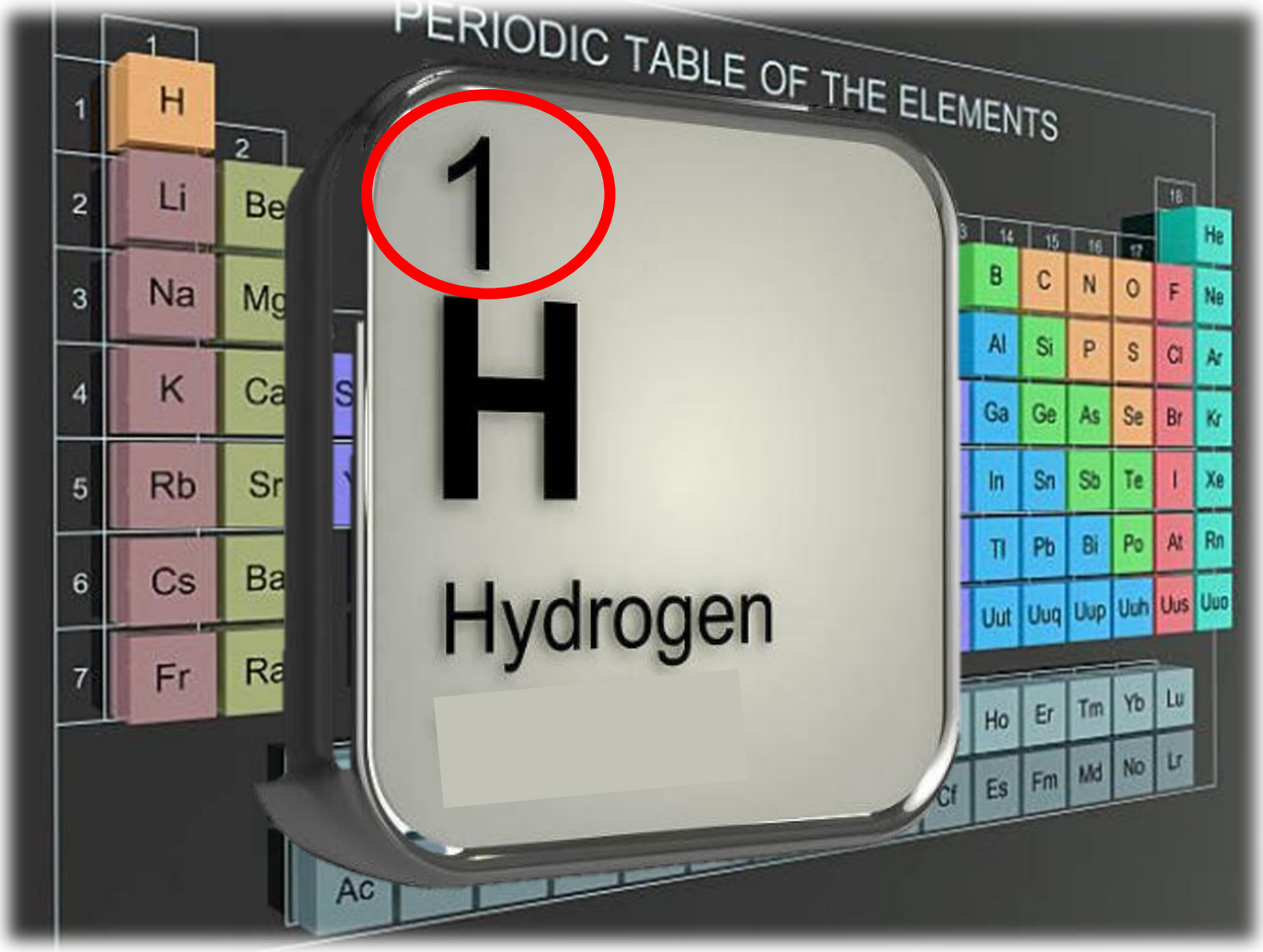
Dans le domaine relativiste :

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

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

# Éléments et Isotopes

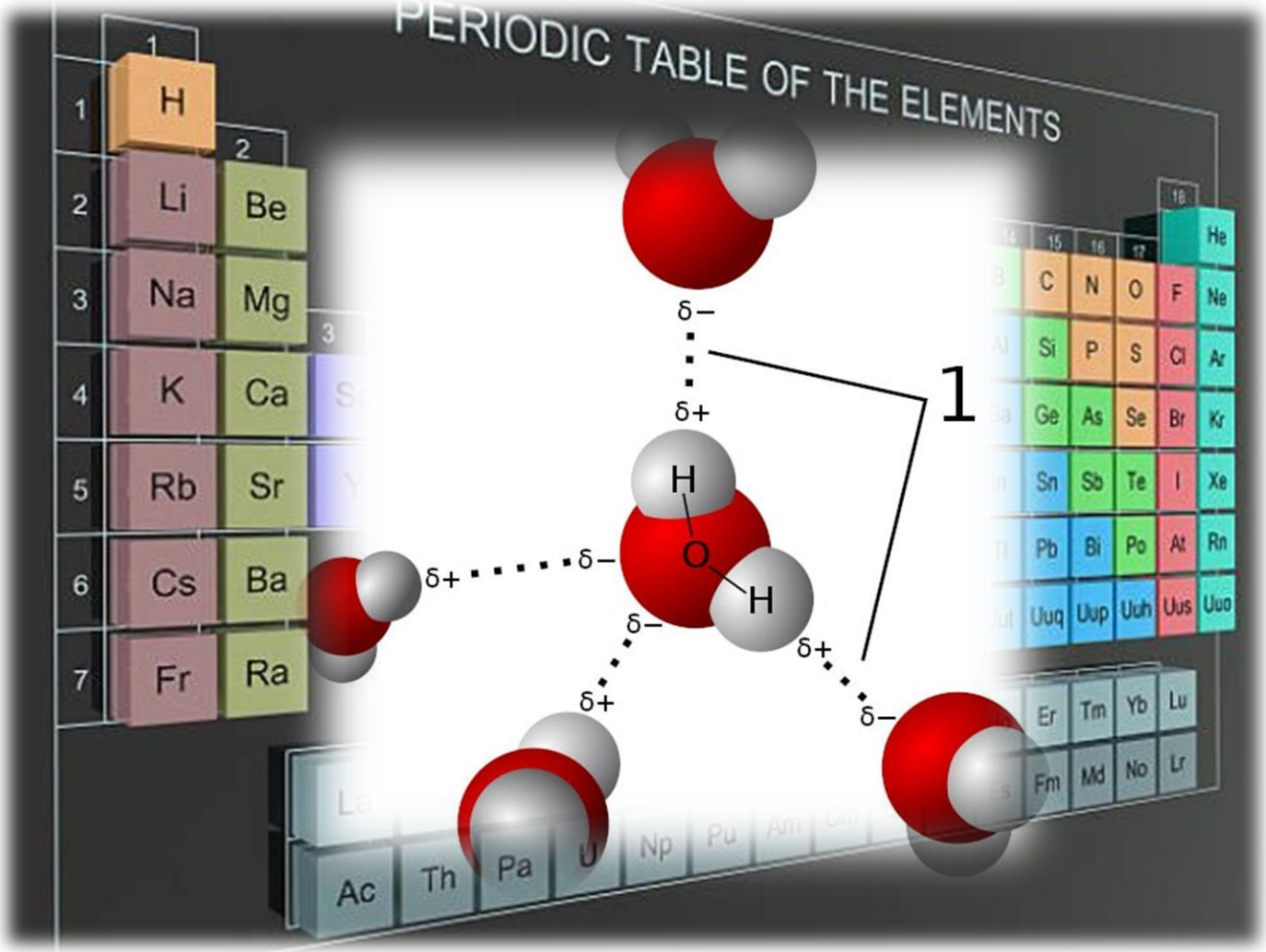
## Chimie vs Physique

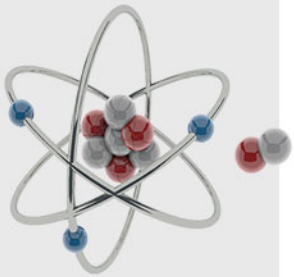



| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Alcalins | non métaux | Alcalino terreux | Métaux transition | Halogènes | Gaz nobles | Actinides |

# Éléments et Isotopes

## Chimie vs Physique

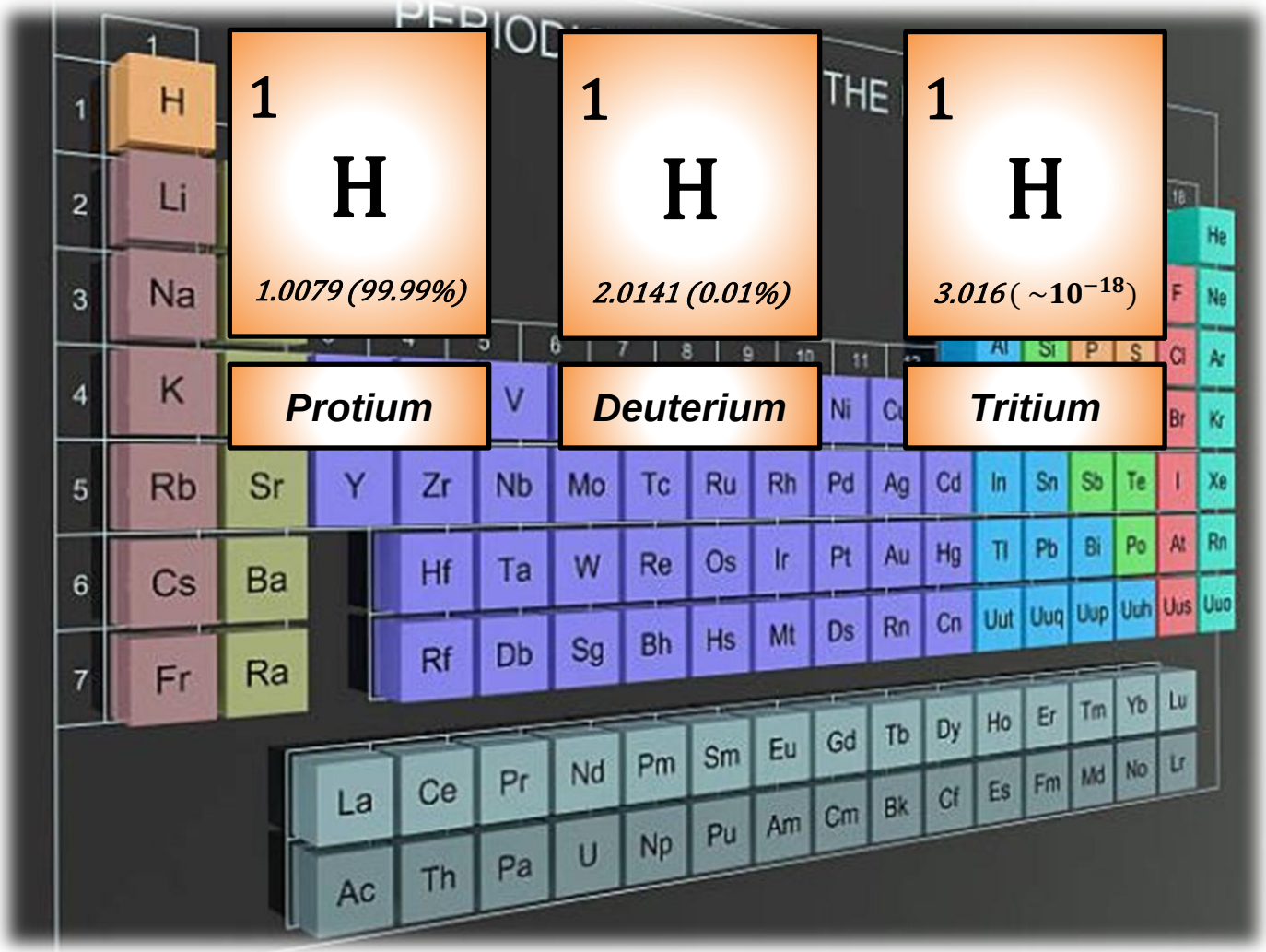


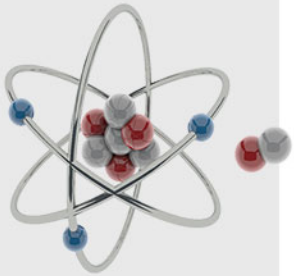



| Alcalins | non métaux | Alcalino terreux | Métaux transition | Halogènes | Gaz nobles | Actinides |
|---|---|---|---|---|---|---|

# Éléments et Isotopes

## Chimie vs Physique



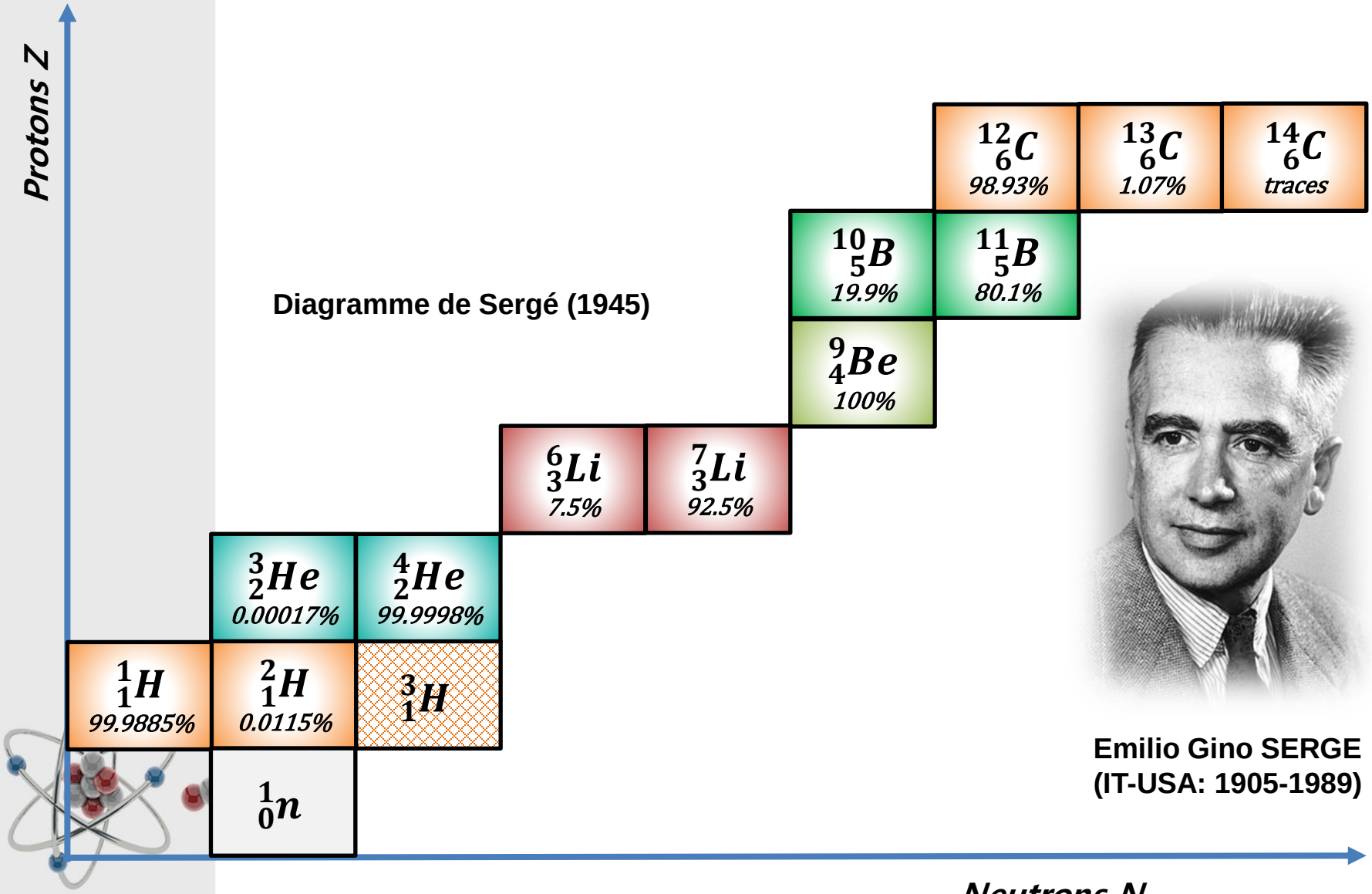



Alcalins | non métaux | Alcalino terreux | Métaux transition | Halogènes | Gaz nobles | Actinides

# Éléments et Isotopes

## Chimie vs Physique

Diagramme de Sergé (1945)

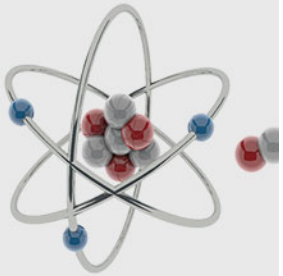


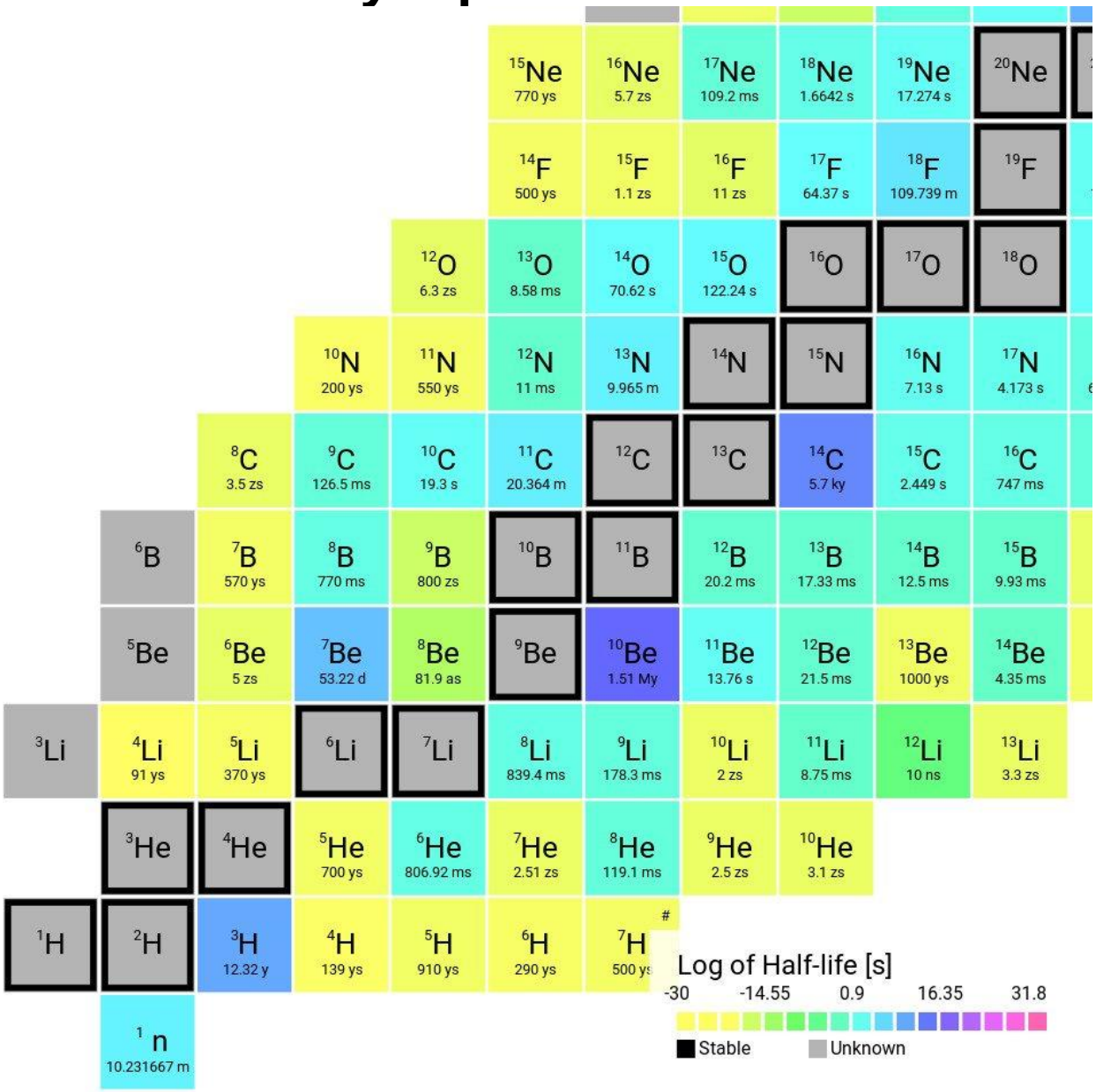



Emilio Gino SERGE
(IT-USA: 1905-1989)

# Éléments et Isotopes

## Chimie vs Physique



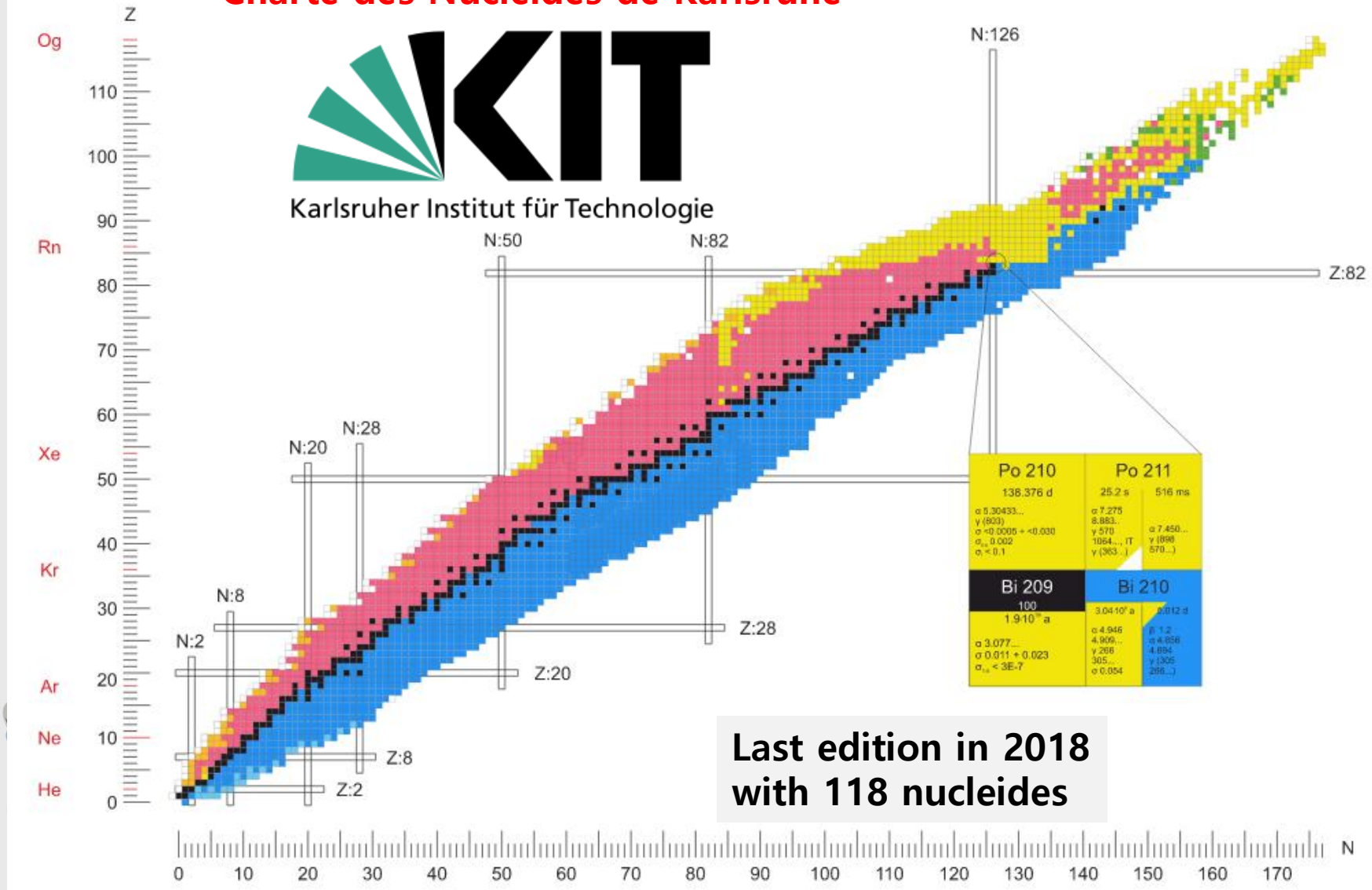


# Éléments et Isotopes

## Chimie vs Physique

**1st edition in 1958 with 102 nucleides**

**Charte des Nucléides de Karlsruhe**



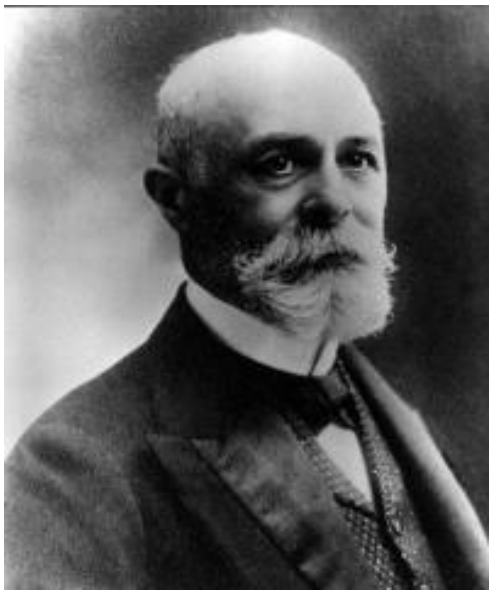

Karlsruher Institut für Technologie

**Last edition in 2018 with 118 nucleides**

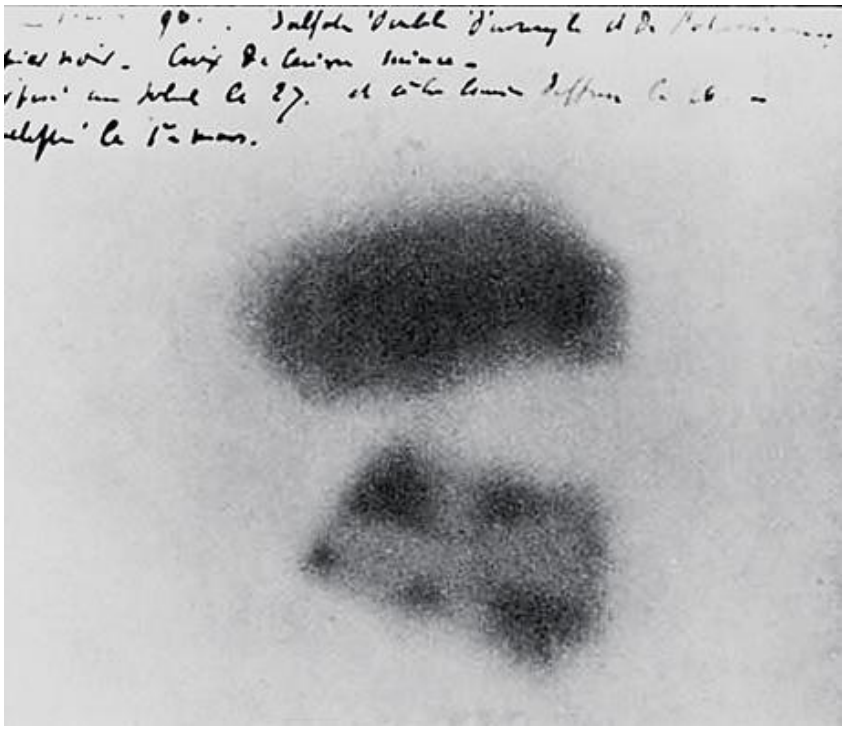
# Contexte historique

**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.**



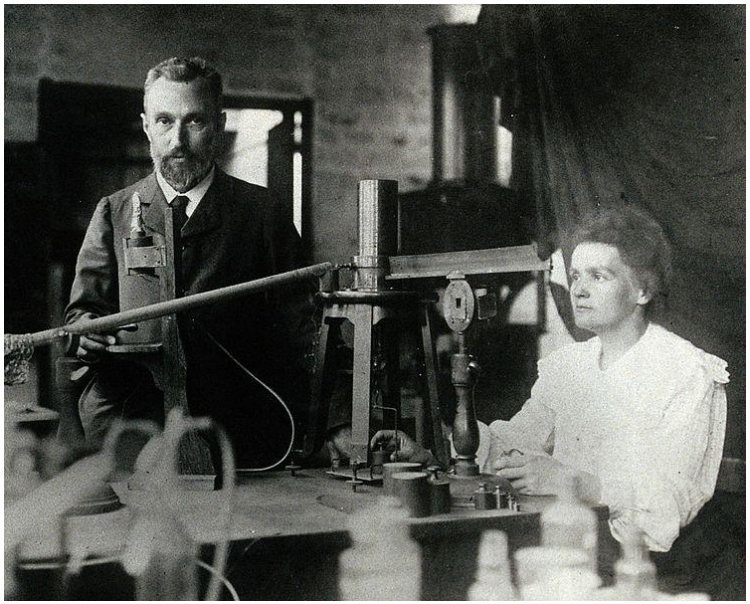
*Antoine Henry BECQUEREL*
*(1852-1908, France)*



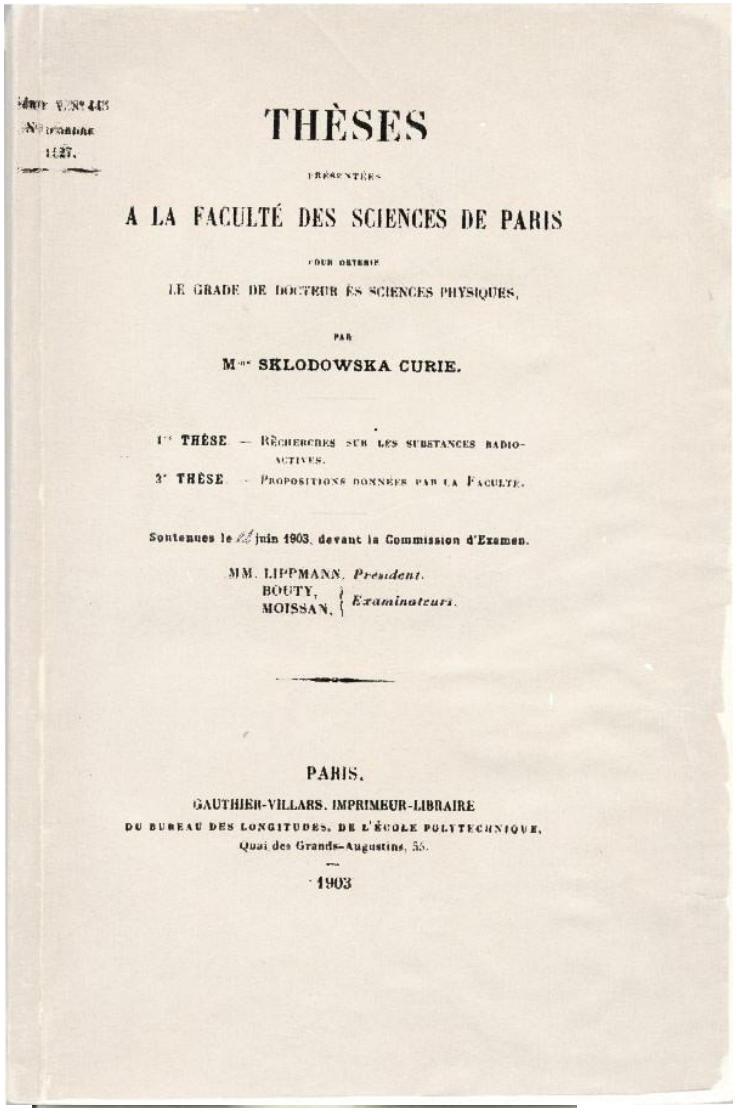
# Contexte historique

**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)*



THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR

Mme SKLODOWSKA CURIE.

1re THÈSE. — RECHERCHES SUR LES SUBSTANCES RADIOACTIVES.

2e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 25 juin 1903, devant la Commission d'Examen.

MM. LIPPMANN, *Président.*
BOUTY, MOISSAN, *Examinateurs.*

PARIS.

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

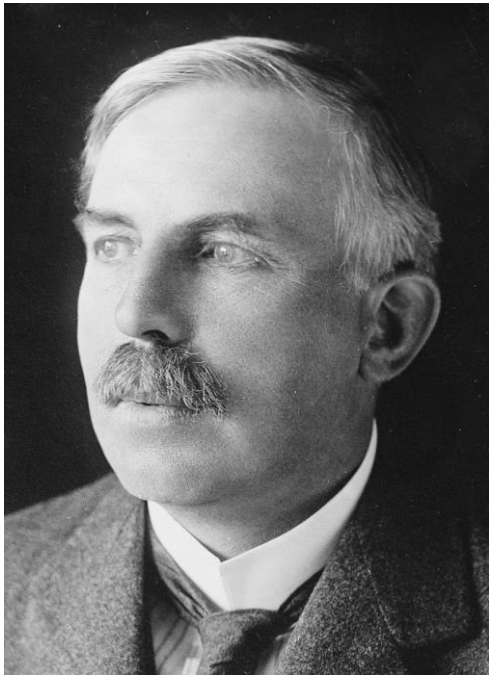
1903

# Contexte historique

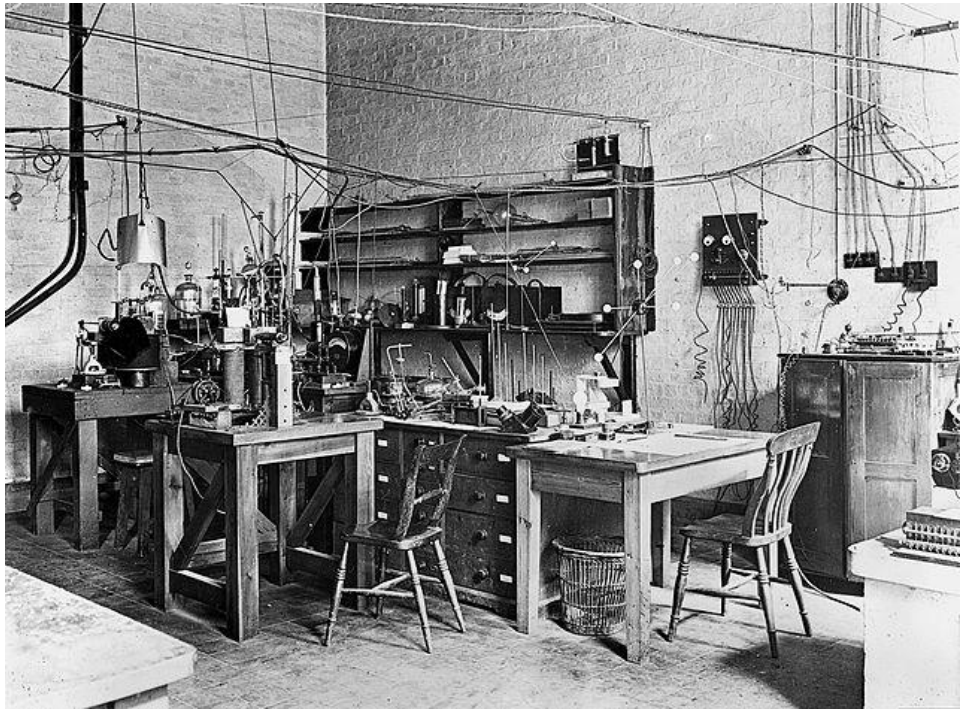
**1908: Confirmation que la radioactivité alpha émise par les noyaux lourds (Radium, Polonium, Uranium…) est essentiellement des noyaux d'Hélium (sans électrons).**

**1919: Rutherford réalise la première transmutation artificielle:**

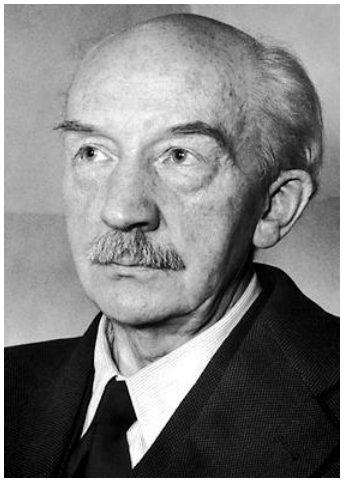
$$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{16}_{8}O + ^{2}_{1}H$$ **(1925)**



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



# Contexte historique



*Walther BOTHE*
*(1891-1957, Germany)*

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

$\alpha + Li;\ \alpha + Be; \alpha + B$

**Qu'on supposait comme étant des rayons gammas.**

**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.**

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

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

**1932: en utilisant la réaction nucléalire:**

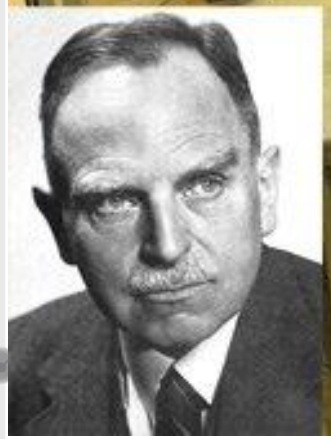
$$\alpha + Be \rightarrow {}^{12}_{6}C + {}^{1}_{0}n$$

**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

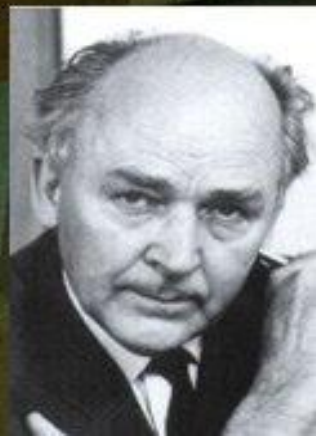
**1938: La découverte de la fission induite à Berlin, par O. HAHN et son équipe. Ils ont bombardé de l'uranium par des neutrons:**

$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow X + Y + k.^{1}_{0}n$$



*Otto HAHN*
*(1879-1968, Germany)*

*Lise Meitner*
*(1878-1968, Austria, Sweden)*



*Fritz STRASSMANN*
*(1902-1980, Germany)*

# Contexte historique

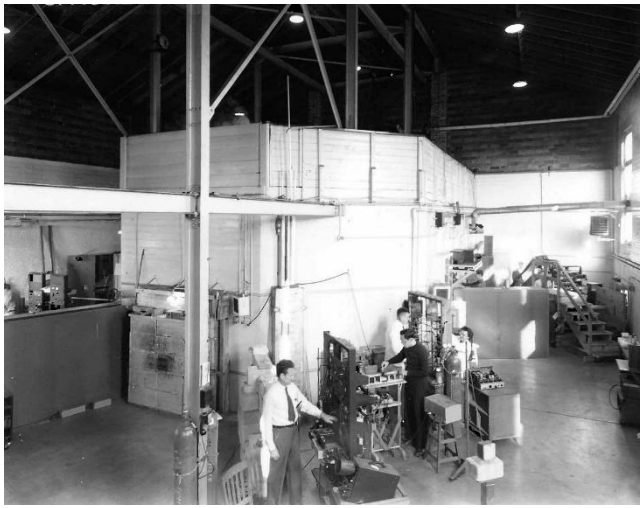
*Enrico FERMI*
*(1901-1954, Italy-USA)*

**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.**

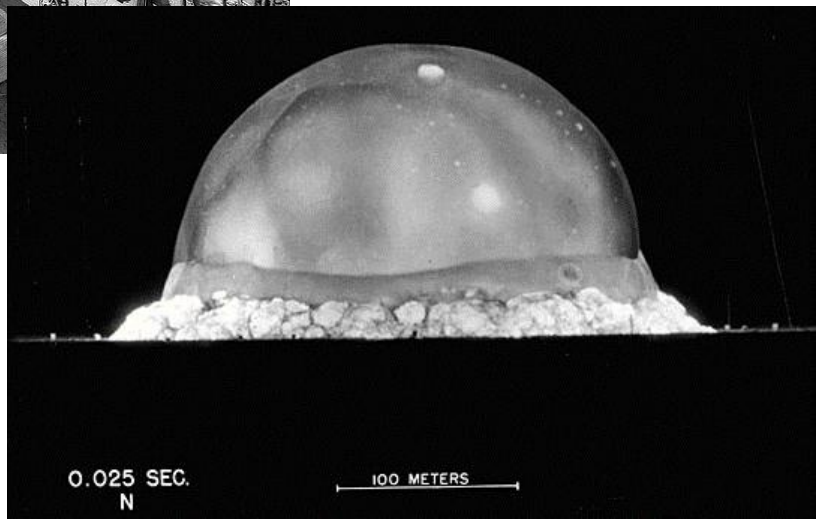
**Le réacteur sera utilisé par la suite pour produire du Plutonium pour la bombe A (Projet Manhattan)**



# Contexte historique

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

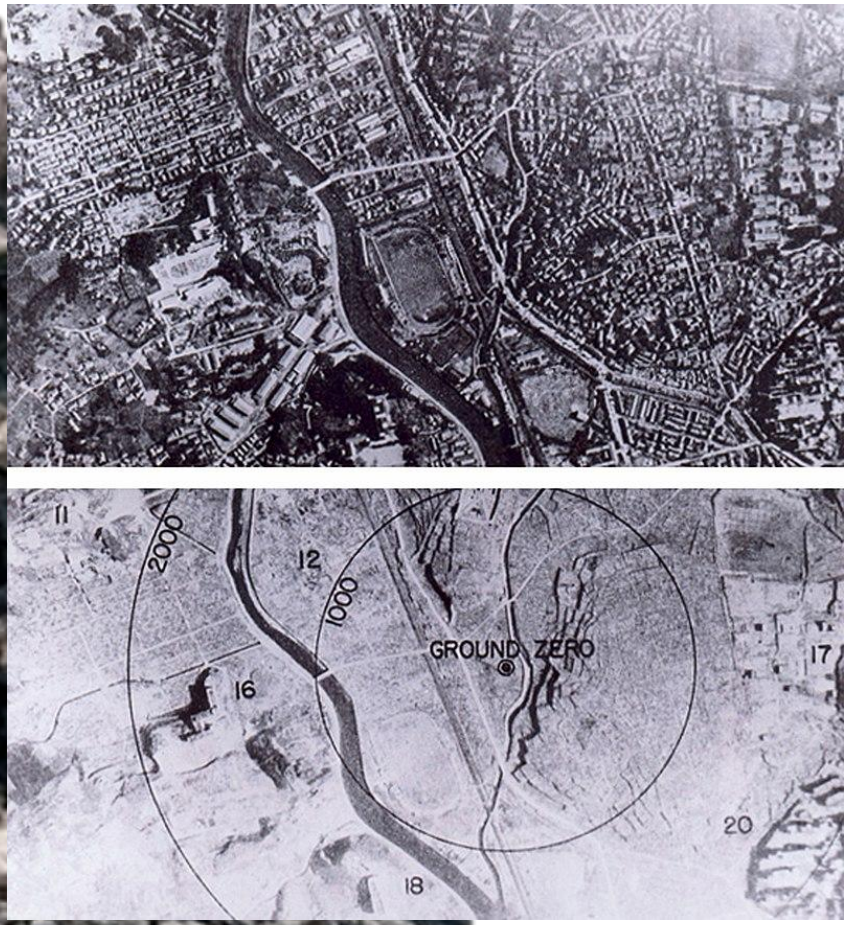
*Robert OPPENHEIMER*
*(1904-1967, USA)*
*Chef du Projet MANHATTAN,*
*Los Alamos, New Mexico, USA*



# Contexte historique

**06 août 1945: Bombardement de Hiroshima (Little Boy)**

**09 août 1945: Bombardement de Nagasaki (Fat Man)**



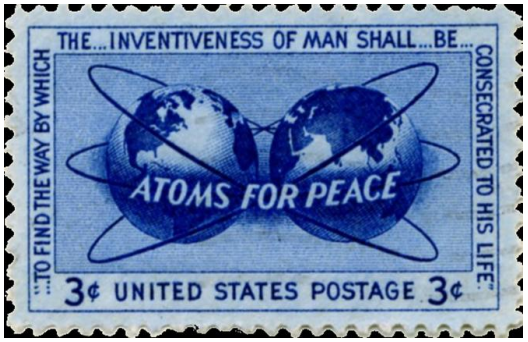

*Nagasaki avant et après le jour J*

# 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



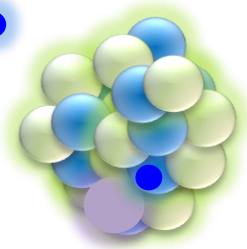
# Radioactivité des éléments

$\alpha$

$\beta^+$

$^{N-2}_{Z-2}X$

$^{N+1}_{Z-1}X$



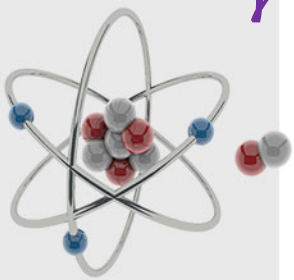
$^{N}_{Z}X$ *

$\gamma$

$^{N}_{Z}X$

$^{N-1}_{Z+1}X$

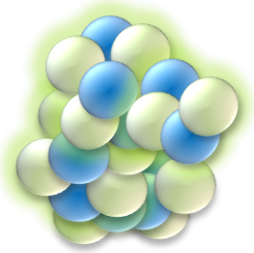
$\beta^-$



# Radioactivité des éléments

$^{N'}_{Z'}A$

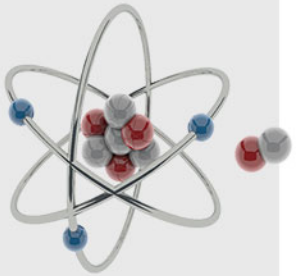
$n$



$^{N}_{Z}X*$

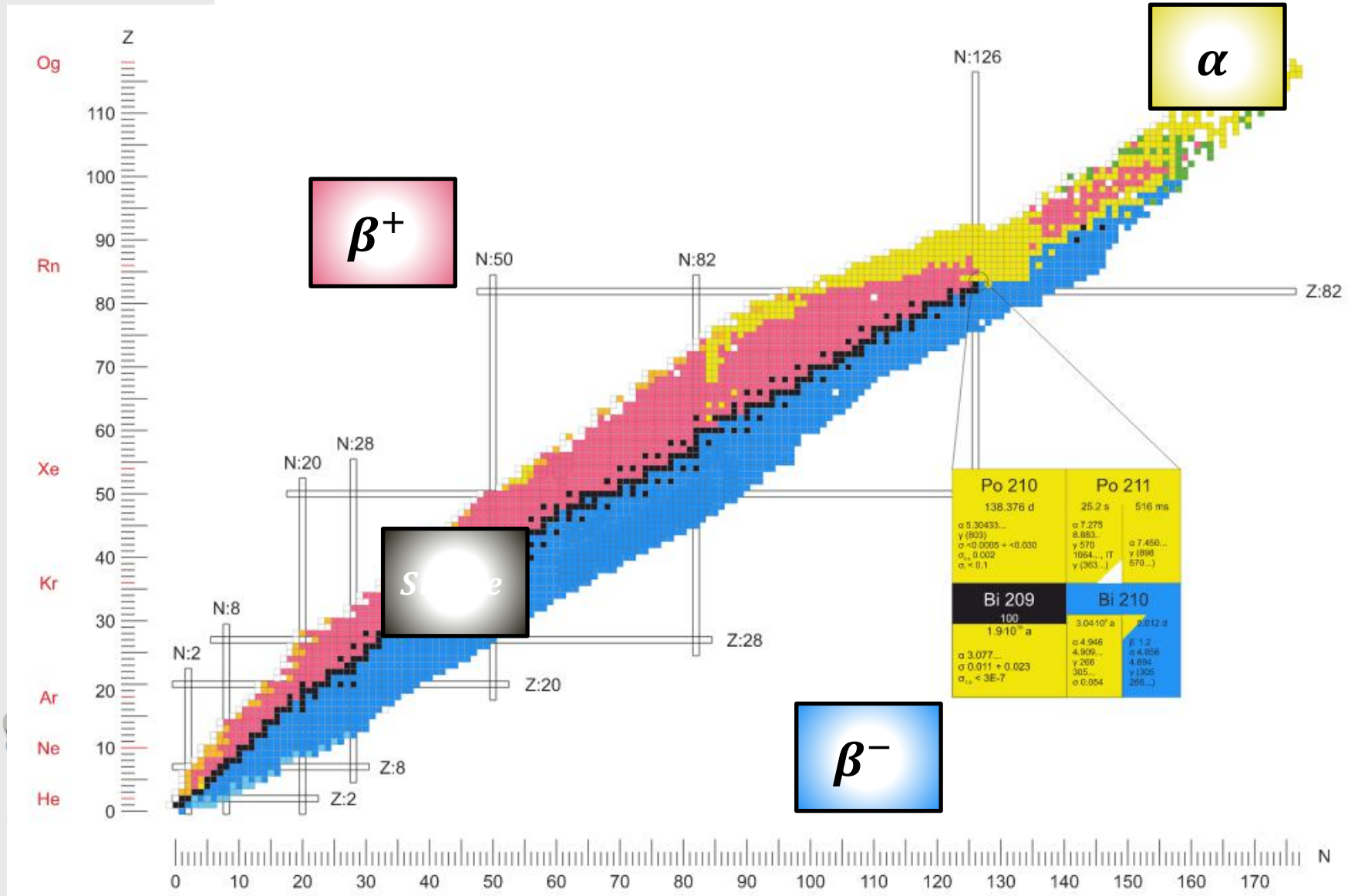
$n$

$^{N''}_{Z''}B$



# Éléments et Isotopes

## Radioactivité des isotopes



# Radioactivité des éléments

**Le processus radioactif:**

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

**Loi de la radioactivité:**

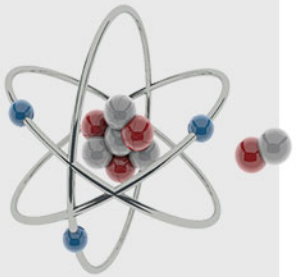
$$\int_{N_0}^{N} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_{0}^{t} dt \rightarrow N = N_0 e^{-\lambda t}$$

**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:**

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

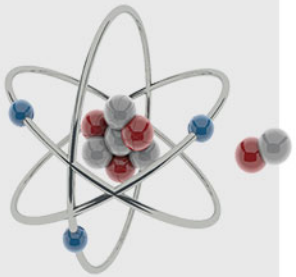
**Noyau fils radioactif:**

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

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

**Variation du noyau fils:**

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

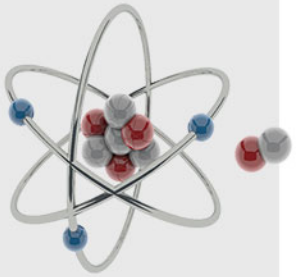


# Radioactivité des éléments

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

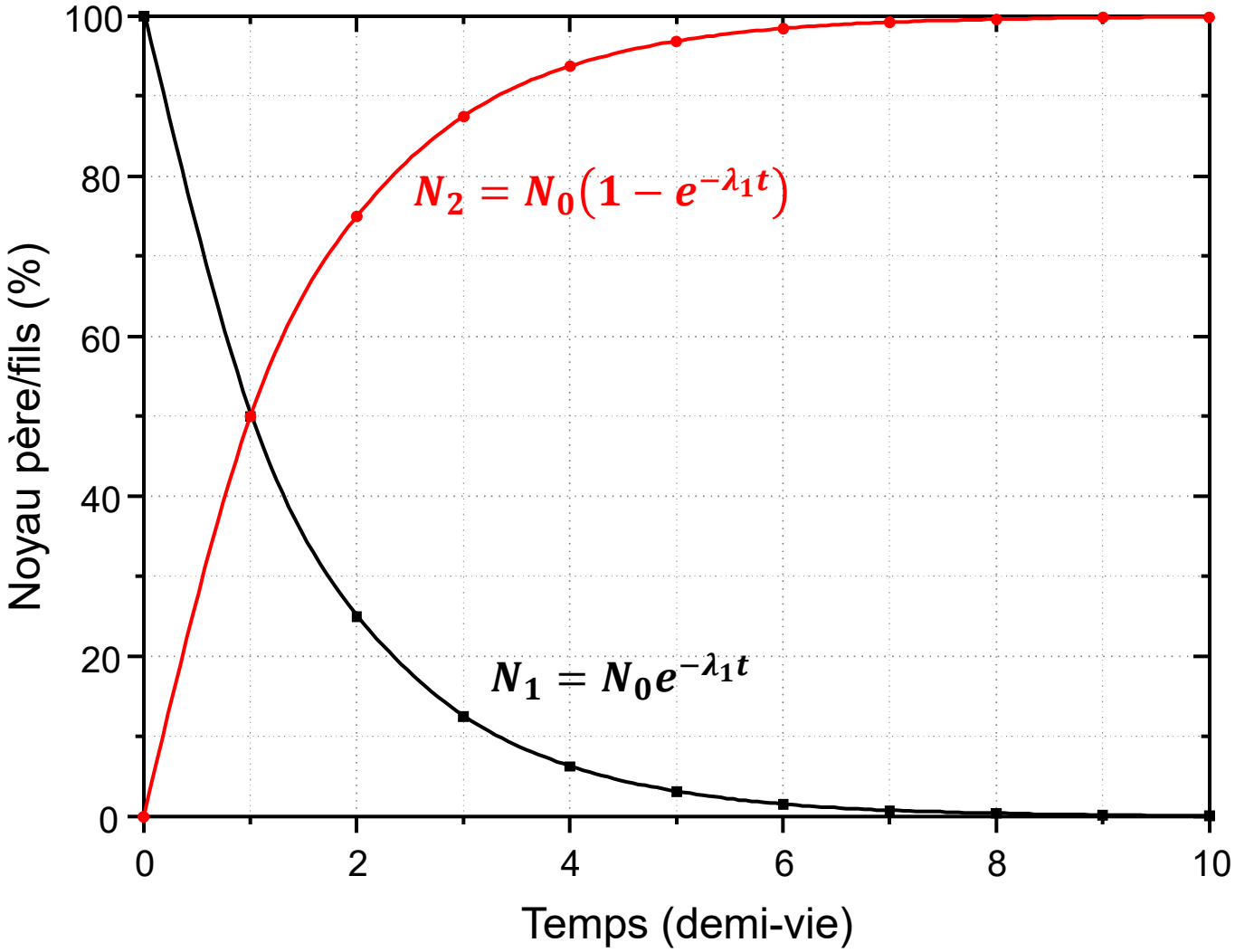
$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1}\left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right) = \frac{\lambda_1 N_0}{-\lambda_1}\left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-0}\right)$$

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



# Radioactivité des éléments

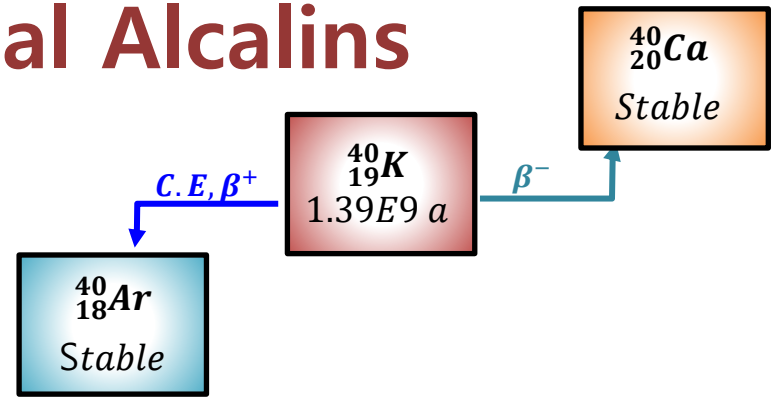
**Filière radioactive: Noyau fils stable ($\lambda_2 = 0$)**



# Cas du Potassium 40:

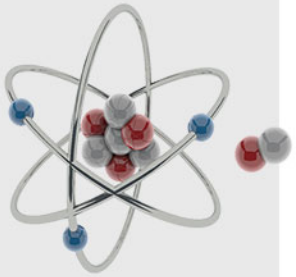
**Alcalino-terreux**

**Métal Alcalins**




**Gaz noble**

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



# Radioactivité des éléments

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

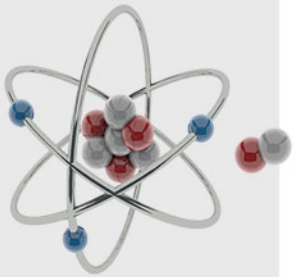
$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1}\left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right)$$

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

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

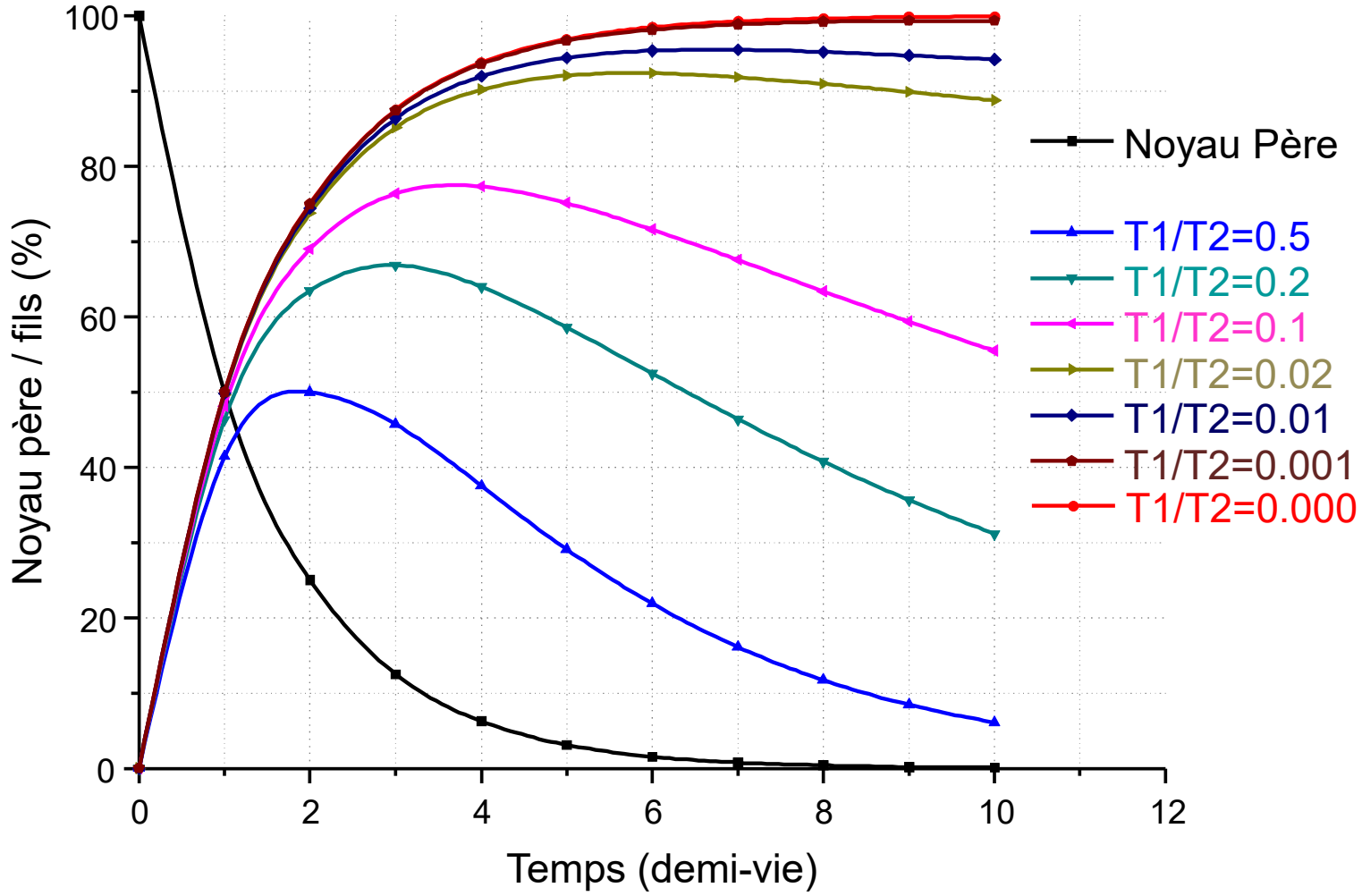
$$N_2 = \frac{N_0}{[T_1/T_2] - 1}\left(e^{-[\ln 2/T_1]nT_1} - e^{-[\ln 2/T_2]nT_1}\right)$$

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



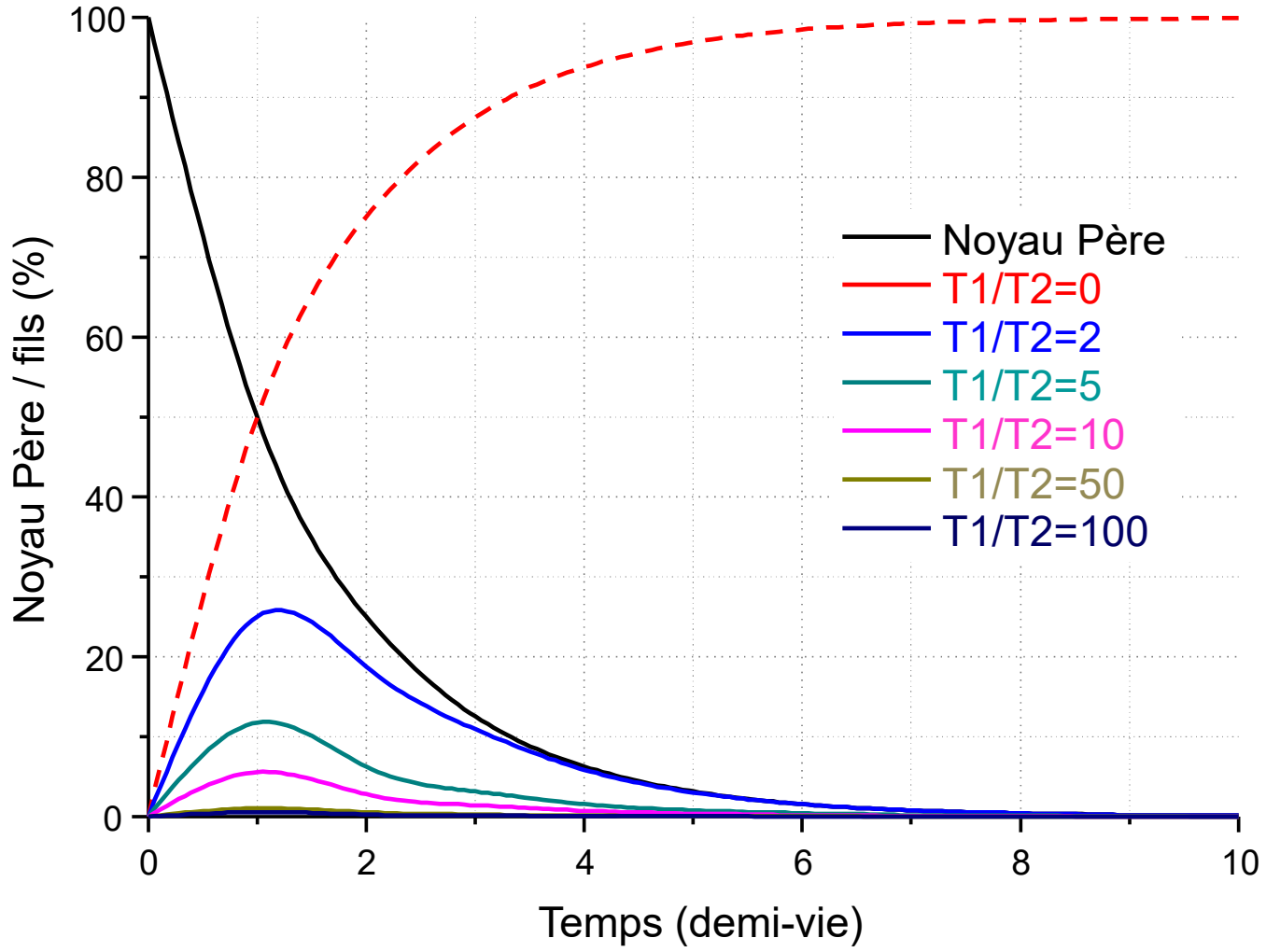
# Radioactivité des éléments

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

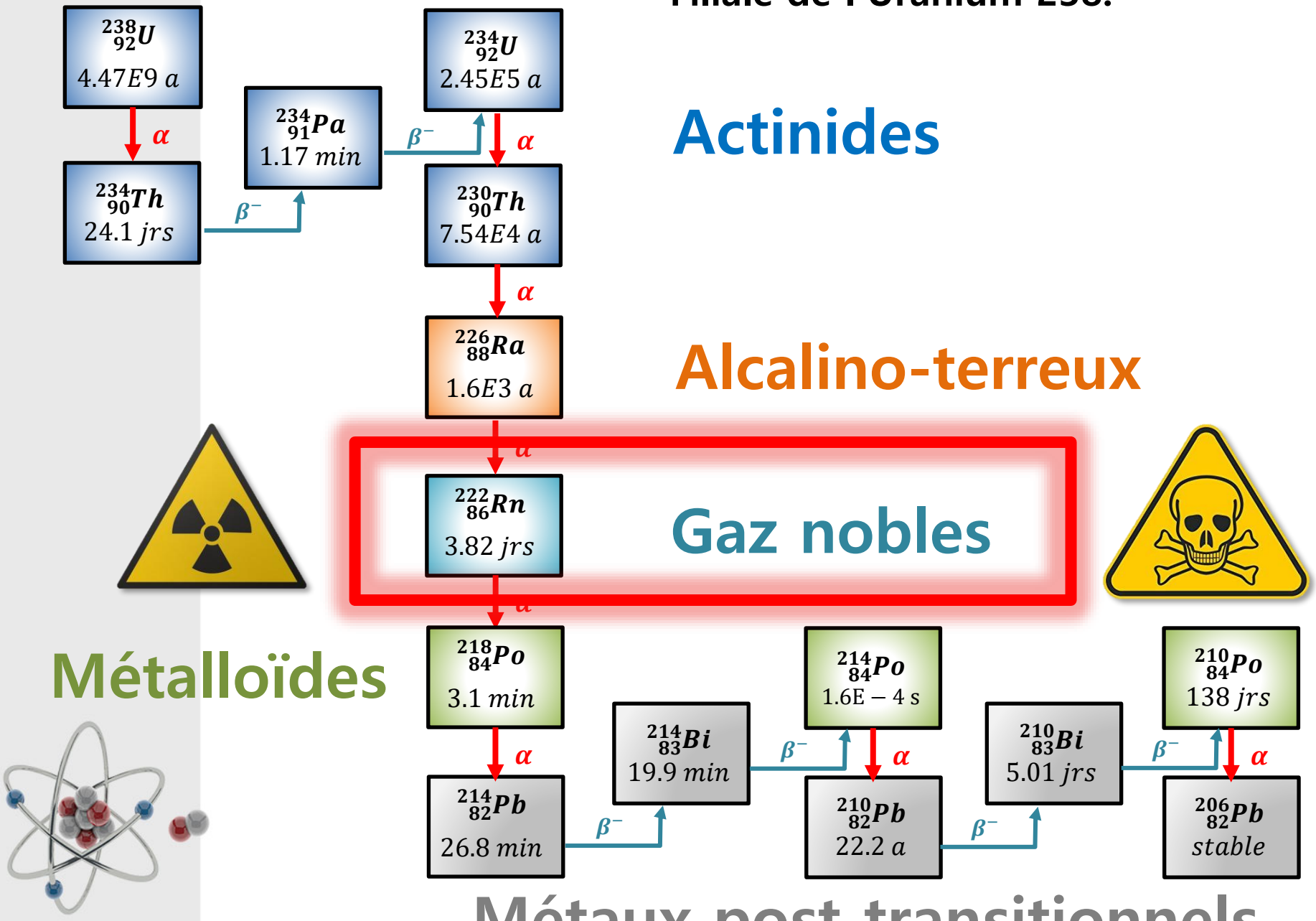


# Radioactivité des éléments

**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

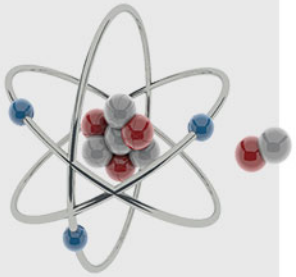
**Mesure de la radioactivité: Unités**

Les unités qui sont d'usage en prospection radionucléaire:

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

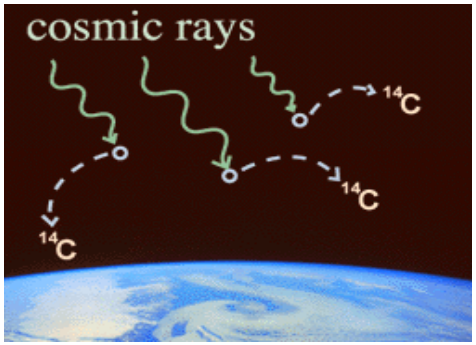
C'est l'équivalent de l'activité d'un gramme de $^{226}Rn$

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



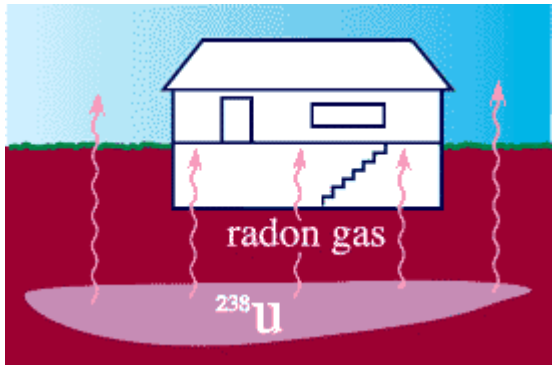

**atmosphère**

*rayonnements cosmiques*

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

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

⇨ molécules $^{14}CO_2$ absorbées par plantes ⇨ animaux ⇨ nous ..




**écorce terrestre**

*rayonnements telluriques*

radio-elements $^{40}K$, $^{32}P$, … + 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

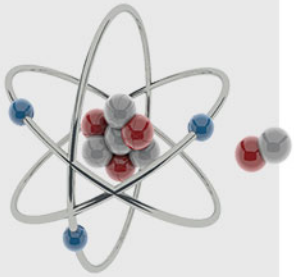
Historiquement, 1Ci = activité de 1 g radium : 1 Ci = 3,7 $10^{10}$ Bq

| 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 ($^{3}$H) |
| 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 |

minerai d'uranium à 10% (activité uranium) : 1,3 $10^{-4}$ 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 $10^{13}$GBq (1 min après l'explosion !)