

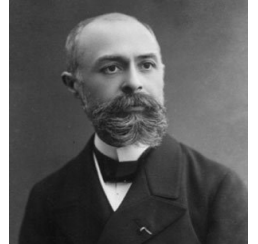
# Notions de physique et d'ingénierie nucléaires

## Cours I : Noyaux & Radioactivité

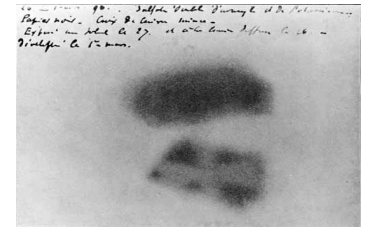
# Le phénomène

Un phénomène dont il faut se méfier **mais qu'il vaut mieux connaître et savoir quantifier !**

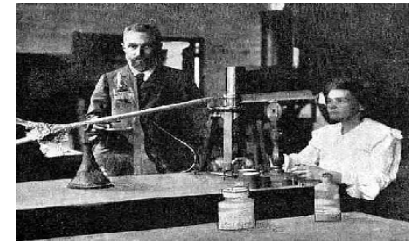
La radioactivité n'a **pas été inventée ! mais découverte** par Henri Becquerel en 1896, puis étudiée par Pierre et Marie Curie et bien d'autres par la suite ...



Les nuisances de la radioactivité ne sont apparues qu'au fil du temps et souvent au prix de la santé de celles et ceux qui firent ces découvertes.



À la base, c'est un phénomène qui résulte de l'**émission d'énergie sous la forme de particules subatomiques** (dimensions inférieures à celles d'un atome) lors de la **désintégration de noyaux atomiques instables**.



La **radioactivité naturelle** observable sur la Terre provient :

- 1) de la **désintégration de quatre noyaux radioactifs** (instables : durées de vie finies) :  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  et de leurs noyaux fils. Ces noyaux ont été synthétisés dans l'explosion d'étoiles massives (cas du potassium) ou dans la fusion d'étoiles à neutrons (kilonova) (cas de l'uranium et du thorium).
- 2) du **bombardement du globe terrestre** par des particules subatomiques d'origine cosmique : **les rayons cosmiques**.

La radioactivité naturelle de la Terre participe au maintien à haute température du manteau terrestre : **l'énergie dite géothermique est à 45% une énergie d'origine radioactive ou nucléaire** (le reste est principalement l'énergie de formation initiale de la Terre).

Lors d'éruptions volcaniques, cette énergie a contribué à la **formation de l'atmosphère terrestre primitive** et plus tard l'**apparition de la vie**.

Depuis l'apparition de la vie sur terre, la radioactivité naturelle a probablement joué un rôle dans la **mutation cellulaire et la diversification des formes de vie terrestre**.

La radioactivité n'est que l'une des multiples manifestations apparentes de l'immense énergie nucléaire contenue dans les noyaux atomiques.

L'exploitation de l'énergie nucléaire a conduit à de nombreuses applications civiles et hélas militaires :

- Bombes nucléaires à fusion ou à fission ;
- centrales électronucléaires ;
- production de traceurs radioactifs pour le diagnostic médical ;
- traitement des cancers par radiothérapie ;
- datation archéologique ;
- imagerie moléculaire par marquage à l'aide de traceurs radioactifs ;
- contrôles industriels non destructifs.

# Ordres de grandeur

Distances/tailles : atomes  $10^{-10}$  m ou 1 Å (angström)  
noyaux  $10^{-15}$  m ou 1 fm (fermi)

Masses : quasi totalité de la masse de la matière est concentrée dans les noyaux atomiques

Atomes : masse volumique atomique du fer :  $7,87 \text{ g/cm}^3$

Noyaux : masse volumique nucléaire du fer :  $2,125 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3$

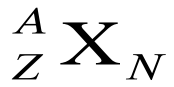
Les étoiles à neutrons ont la même masse volumique que celle d'un noyau.

Énergies :  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ , énergie acquise par une particule portant une charge  $e$  ( $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ) accélérée par une différence de potentiel de 1 V .

Atomes : liaisons atomiques : 0,1 eV - 100 keV

Noyaux : liaisons nucléaires : 1 - 10 MeV ( $\sim$  1 million de fois plus grandes)

# Notations nucléaires

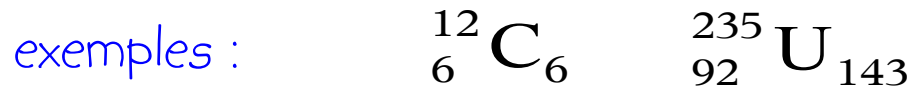


un noyau X (encore appelé un **nucléide**) portant **Z protons** et **N neutrons**.

**Z est le numéro atomique** - détermine le nombre d'électrons d'un atome neutre et donc sa chimie : numéro de l'élément dans le tableau de Mendeleïev

Les **nucléons désignent les protons et les neutrons**, lesquels ont des masses voisines mais pas strictement identiques : la masse d'un neutron libre est légèrement plus grande que celle d'un proton.

**A = Z + N**, est le nombre de nucléons, plus communément appelé le **nombre de masse**.



**Isotopes** : même nombre de protons  $Z$

Hydrogène  ${}^1_1\text{H}_0$     deutérium  ${}^2_1\text{H}_1$     tritium  ${}^3_1\text{H}_2$

**Isotones** : même nombre de neutrons  $N$

${}^{15}_7\text{N}_8$      ${}^{16}_8\text{O}_8$

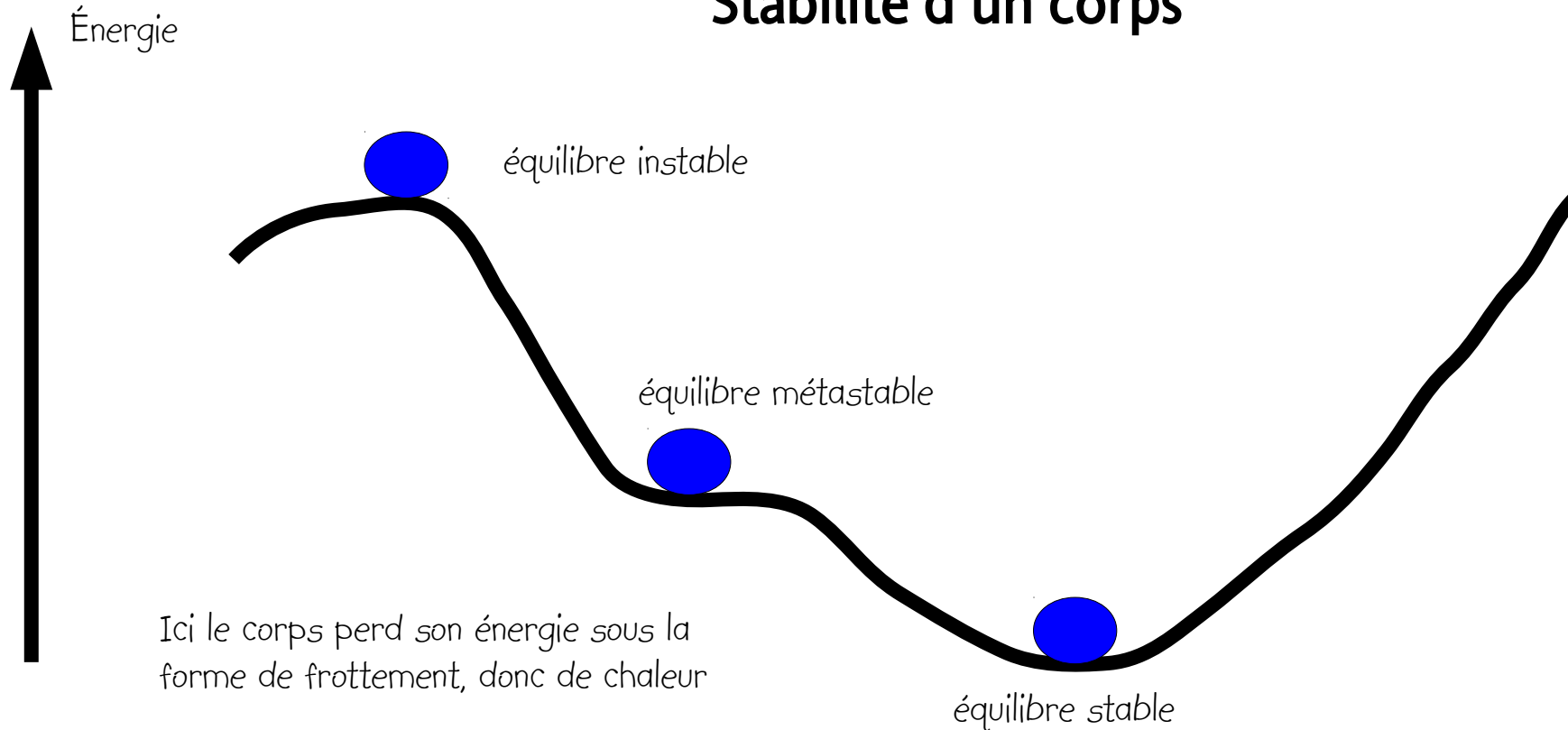
**Isobares** : même nombre de masse  $A$

${}^{40}_{18}\text{Ar}_{22}$      ${}^{40}_{20}\text{Ca}_{20}$

Plusieurs isotopes d'un même élément peuvent être présents à l'état naturel dans l'atmosphère :

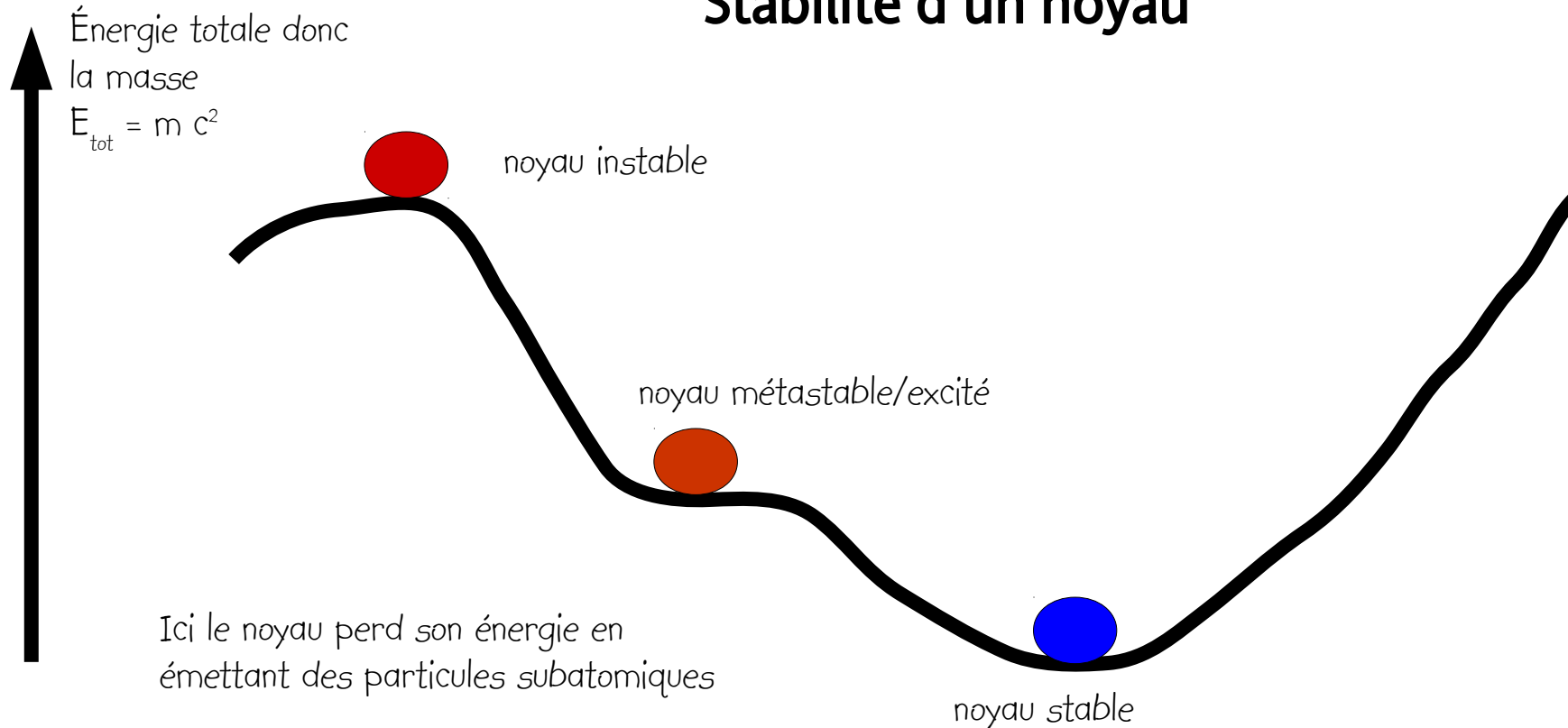
${}^{12}_6\text{C}_6$  stable     ${}^{13}_6\text{C}_7$  stable     ${}^{14}_6\text{C}_8$   $T_{1/2} = 5730$  ans  
98,89% de rapport isotopique    1,1%     $1,3 \cdot 10^{-12}$

# Stabilité d'un corps

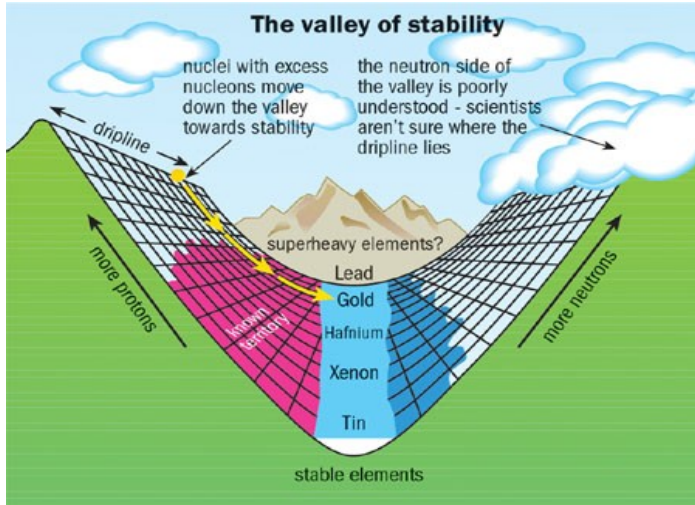




# Stabilité d'un noyau

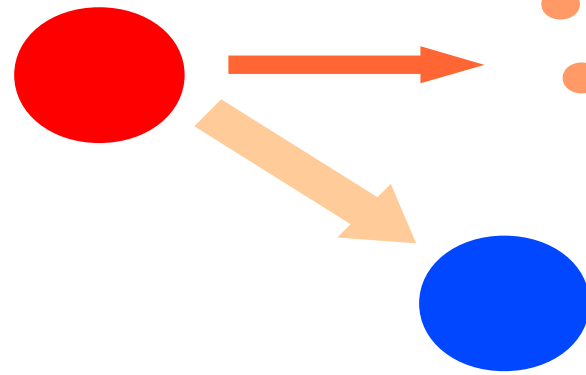


# Le paysage nucléaire : vallée de stabilité & désintégration



Un **noyau instable** (sur une pente de la vallée) devient **stable** (revient dans la vallée de stabilité) **en expulsant son surplus d'énergie (ou de masse)** par une suite de désintégrations radioactives.

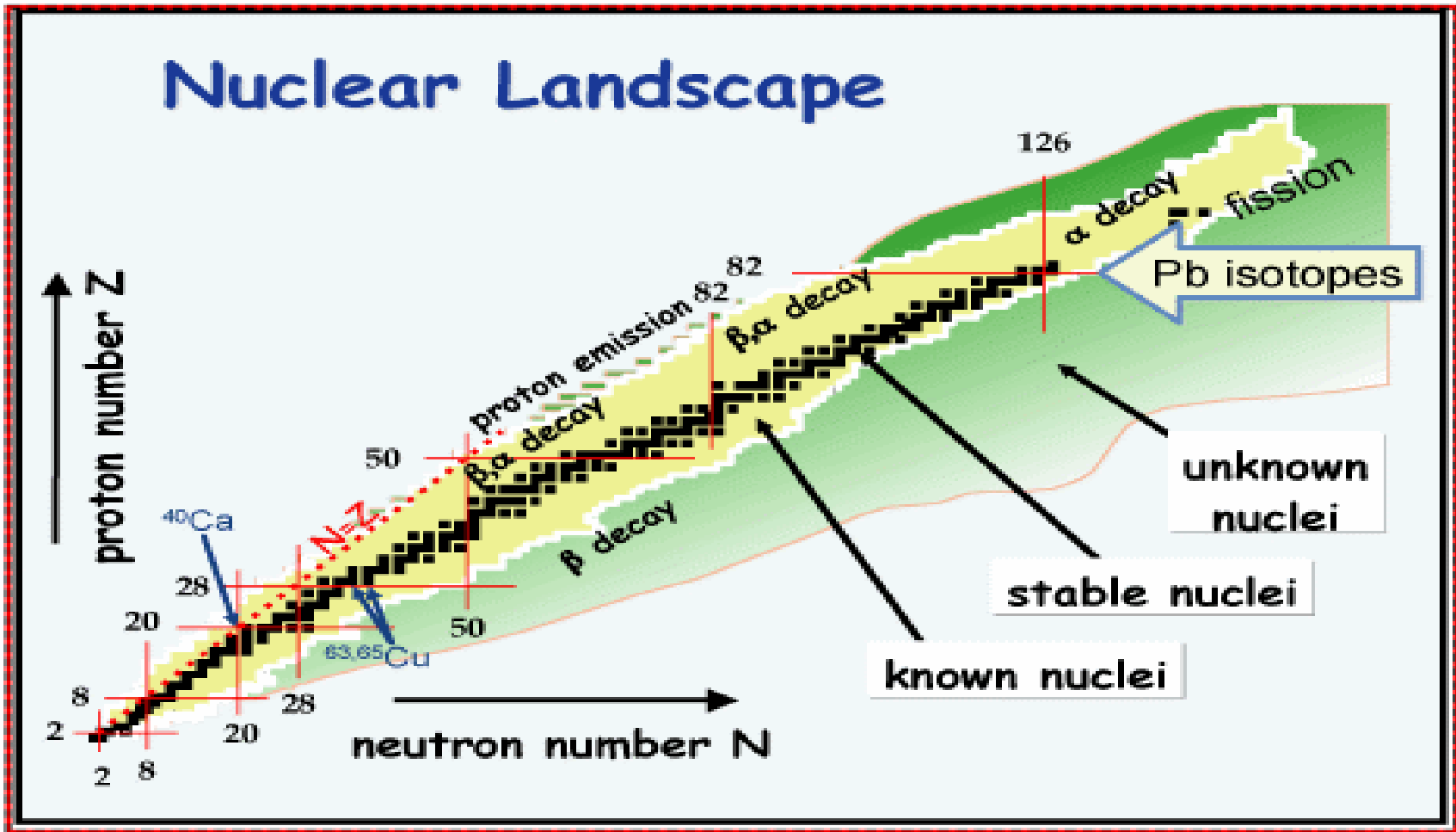
noyau instable



Particules  
subatomiques  
émises,  
emportant  
de l'énergie  
cinétique

noyau stable

# Nuclear Landscape



# Les désintégrations des noyaux radioactifs

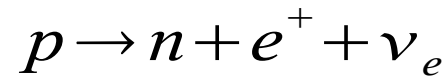
Les noyaux *instables trop riches en neutrons* transforment en leur sein un neutron en un proton :



La particule  $\beta^{-}$  est en fait un électron



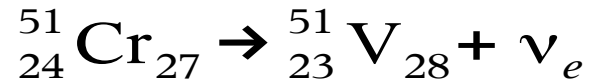
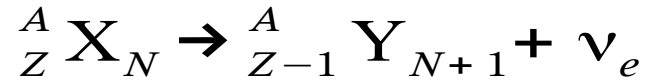
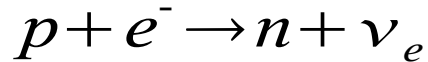
Les noyaux *légers instables trop riches en protons* transforment *préférentiellement* en leur sein un proton en un neutron :



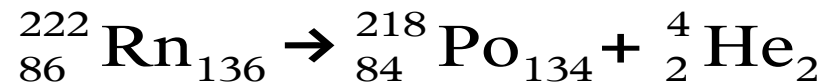
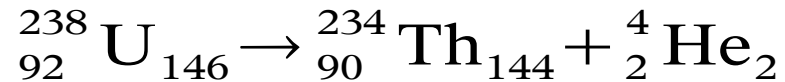
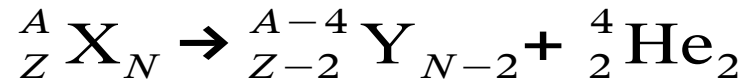
La particule  $\beta^{+}$  est en fait un antiélectron.



Les noyaux instables et *lourds, trop riches en protons* transforment *préférentiellement* en leur sein un proton en un neutron par *capture d'un électron atomique* :

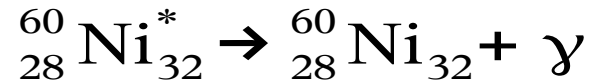


Les noyaux instables, *lourds et trop riches en protons* peuvent revenir vers la vallée de stabilité en émettant un *noyau d'hélium*, encore appelée particule *alpha* :

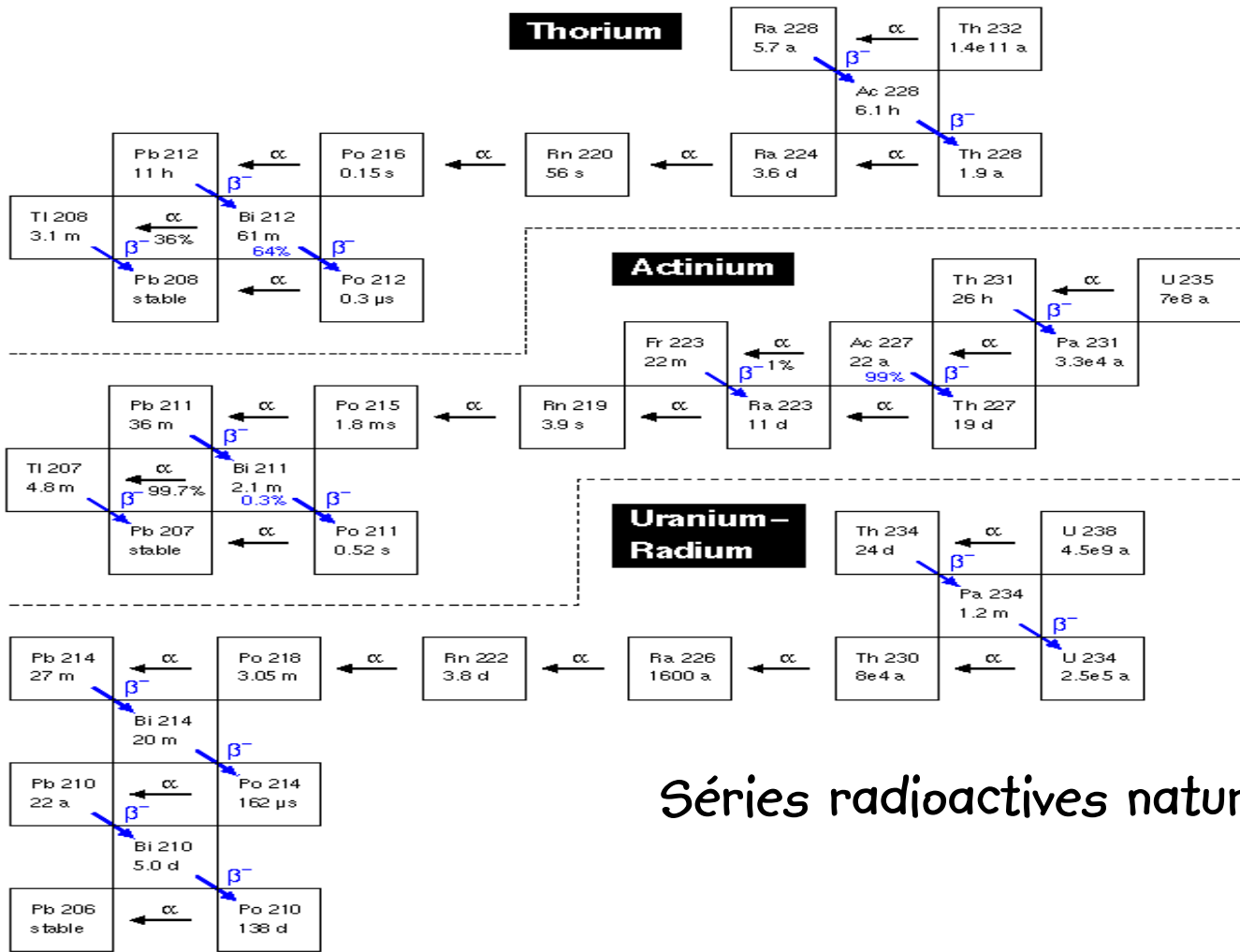


Les noyaux instables, *très lourds* peuvent fissionner spontanément en deux ou trois noyaux plus légers : exemple  $^{252}\text{Cf}$

Dans l'immense majorité des cas, chaque désintégration bêta ou alpha d'un noyau instable donne naissance à un *noyau se trouvant dans un état excité*. Il revient alors à son état fondamental par émission d'un ou de plusieurs photons gamma :



Si l'énergie du photon est assez petite ( $< 100 \text{ keV}$ ), celui-ci peut être *converti directement en un électron* par effet photoélectrique au sein de l'atome : *électron de conversion interne*.



## Séries radioactives naturelles

# Bilan d'énergie de masse

$E = mc^2$  avec  $c = 299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$ , vitesse de la lumière dans le vide

La masse d'un objet n'est rien d'autre que son énergie interne totale mesurée au repos et divisée par  $c^2$ .

La différence entre la masse du noyau initial (ou des différentes particules initiales) et la somme des masses des produits de la désintégration est à l'origine de l'énergie nucléaire.

Bilan d'énergie de masse de la désintégration :

$$Q = \Delta m \cdot c^2 = \left( \sum m_i - \sum m_f \right) \cdot c^2$$

Cette énergie est emportée par les produits de la désintégration sous la forme d'énergie de vitesse, c-à-d d'énergie cinétique.

Dans toute désintégration nucléaire spontanée (sans action externe sur le noyau),  $Q$  est toujours positif.



# Définitions et unités de mesure de masse et d'énergie nucléaire

Unité de masse atomique : u.m.a

Les masses atomiques et nucléaires sont très petites : ex. proton,  $m_p = 1,67252 \cdot 10^{-27}$  kg

Il est plus commode de les exprimer dans une unité appropriée plus commode à utiliser.

Définition : 1 u.m.a =  $\frac{1}{12}$  x masse d'un atome neutre de  $^{12}\text{C}$  =  $1,66054 \cdot 10^{-27}$  kg

Énergie de masse correspondant à une 1 u.m.a :  $1 \text{ u.m.a} \times c^2 = 931,494 \text{ MeV}$

Le nombre d'Avogadro est le nombre d'entités (atomes, molécules ...) contenues dans une mole.

$N_A = 6,02214076 \cdot 10^{23}$  C'est une constante SI sans incertitude depuis 2019.

Une bonne approximation de la masse d'un atome neutre  ${}^A_Z\text{X}$  est donnée par :  $A \text{ u.m.a}$

$$\text{ex : } M({}^{12}\text{C}) = 12 \text{ u.m.a} \quad \text{et} \quad M({}^{235}\text{U}) \simeq 235 \text{ u.m.a}$$

Masse molaire d'un isotope =  $N_A M({}^A_Z\text{X}) \simeq N_A A \text{ u.m.a} = A N_A \text{ u.m.a}$

$$A N_A \frac{1}{12} M({}^{12}\text{C}) = A \frac{1}{12} N_A M({}^{12}\text{C}) \simeq A \frac{1}{12} 12 \text{ g} = A \text{ g}$$

L'excès de masse ( $\Delta$ ) d'un atome est l'écart entre sa masse réelle et cette approximation :

$$\Delta = M(\text{atome neutre}) - A$$

$$\Delta({}^{12}\text{C}) = 0 \text{ par définition}$$

$\Delta$  peut être positif ou négatif .

Défaut de masse  $D_m$  d'un noyau : masse des composants du noyau ( $Z$  protons et  $N$  neutrons) pris séparément moins la masse du noyau :

$$D_m({}^A_Z\text{X}_N) = Z m_p + N m_n - m({}^A_Z\text{X}_N)$$

$D_m$  est toujours positif pour un noyau formé.

Les excès de masse sont souvent tabulés en énergie d'excès de masse ( $\Delta c^2$ ) et exprimés en KeV

L'énergie de liaison d'un noyau est alors l'énergie libérée par la formation d'un noyau à partir de ses nucléons pris séparément.

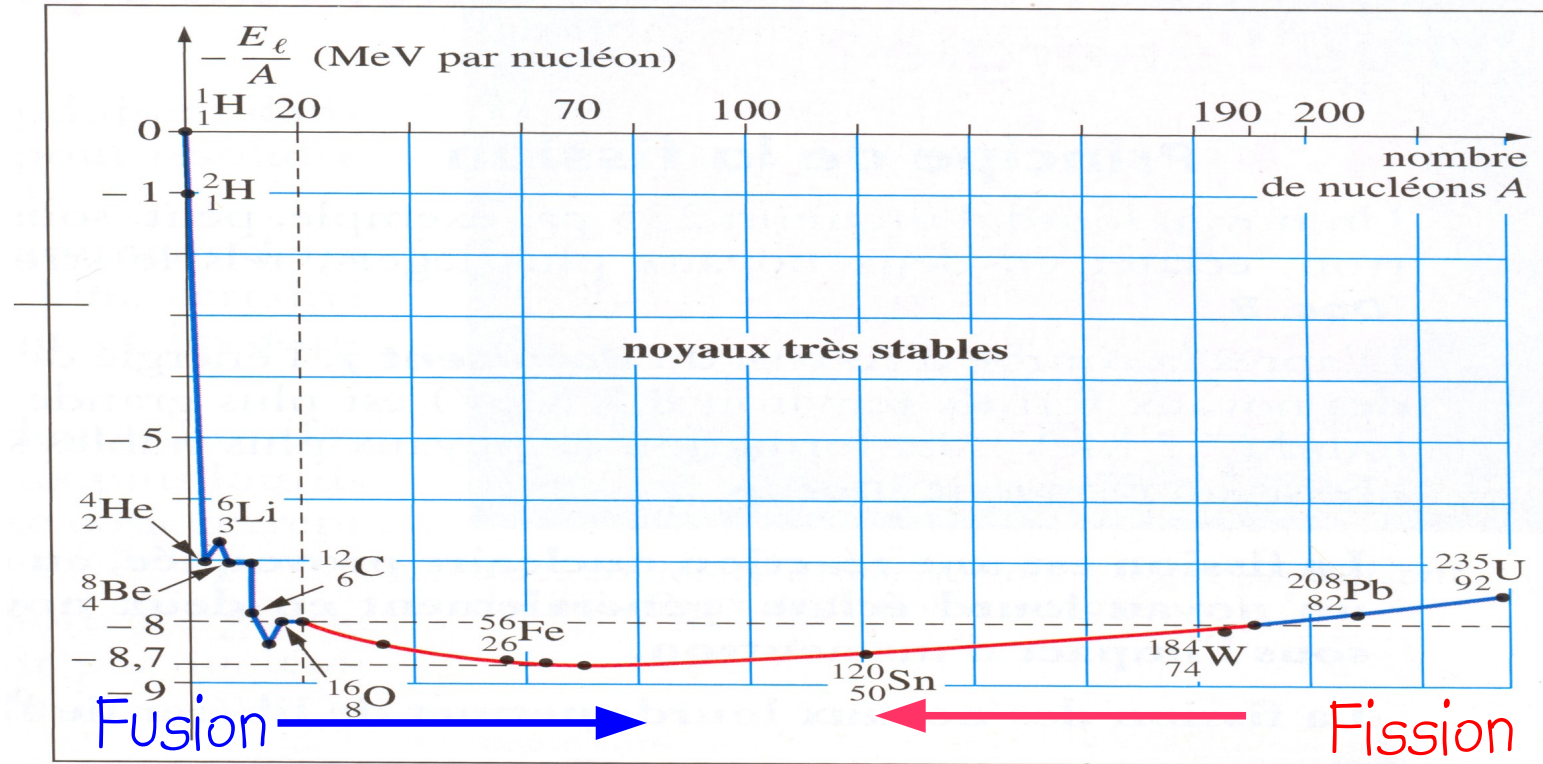
$$E_l({}^A_Z\mathbf{X}_N) = D_m({}^A_Z\mathbf{X}_N) \times c^2$$

Énergie de liaison par nucléon d'un noyau :

$$\frac{E_l({}^A_Z\mathbf{X}_N)}{A} = \frac{D_m({}^A_Z\mathbf{X}_N)}{A} \times c^2$$

Plus l'énergie de liaison par nucléon d'un noyau est grande, plus celui-ci est stable.

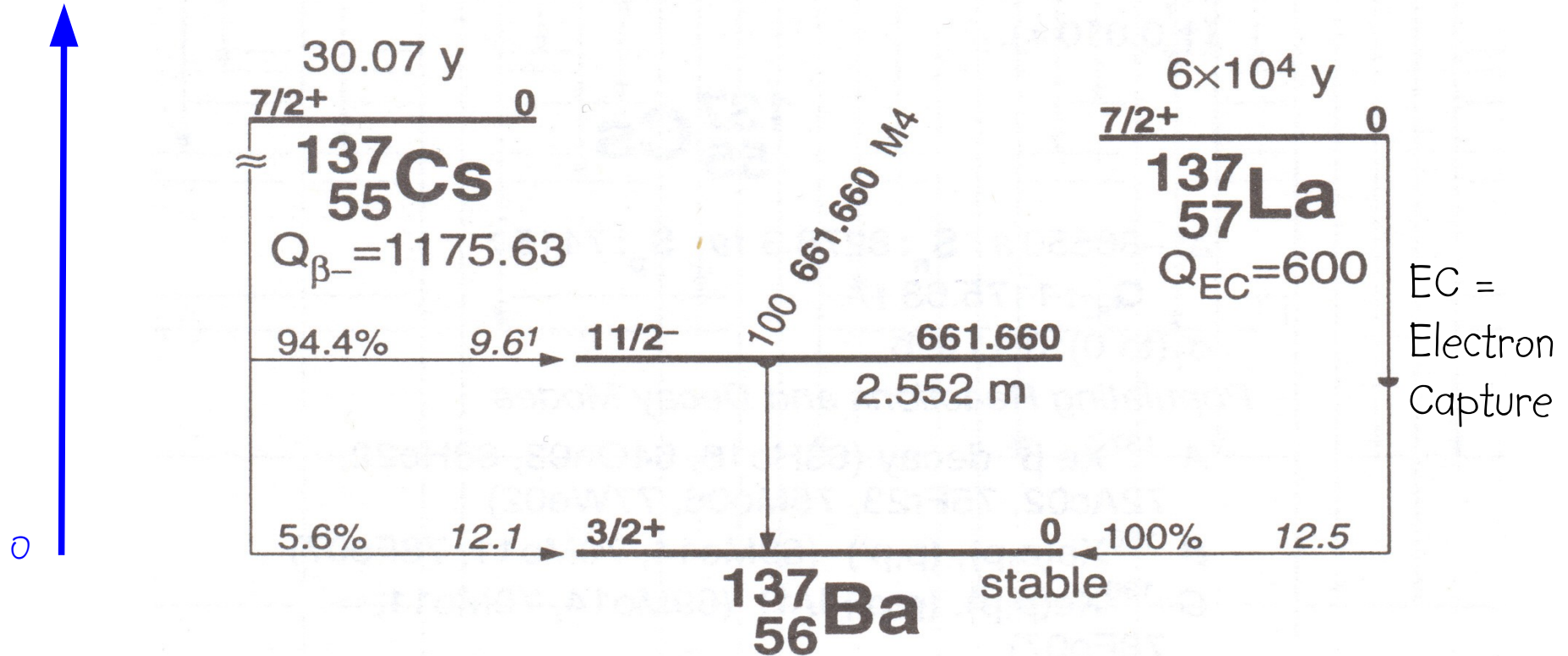
# Courbe d'Aston : - E<sub>l</sub> / A

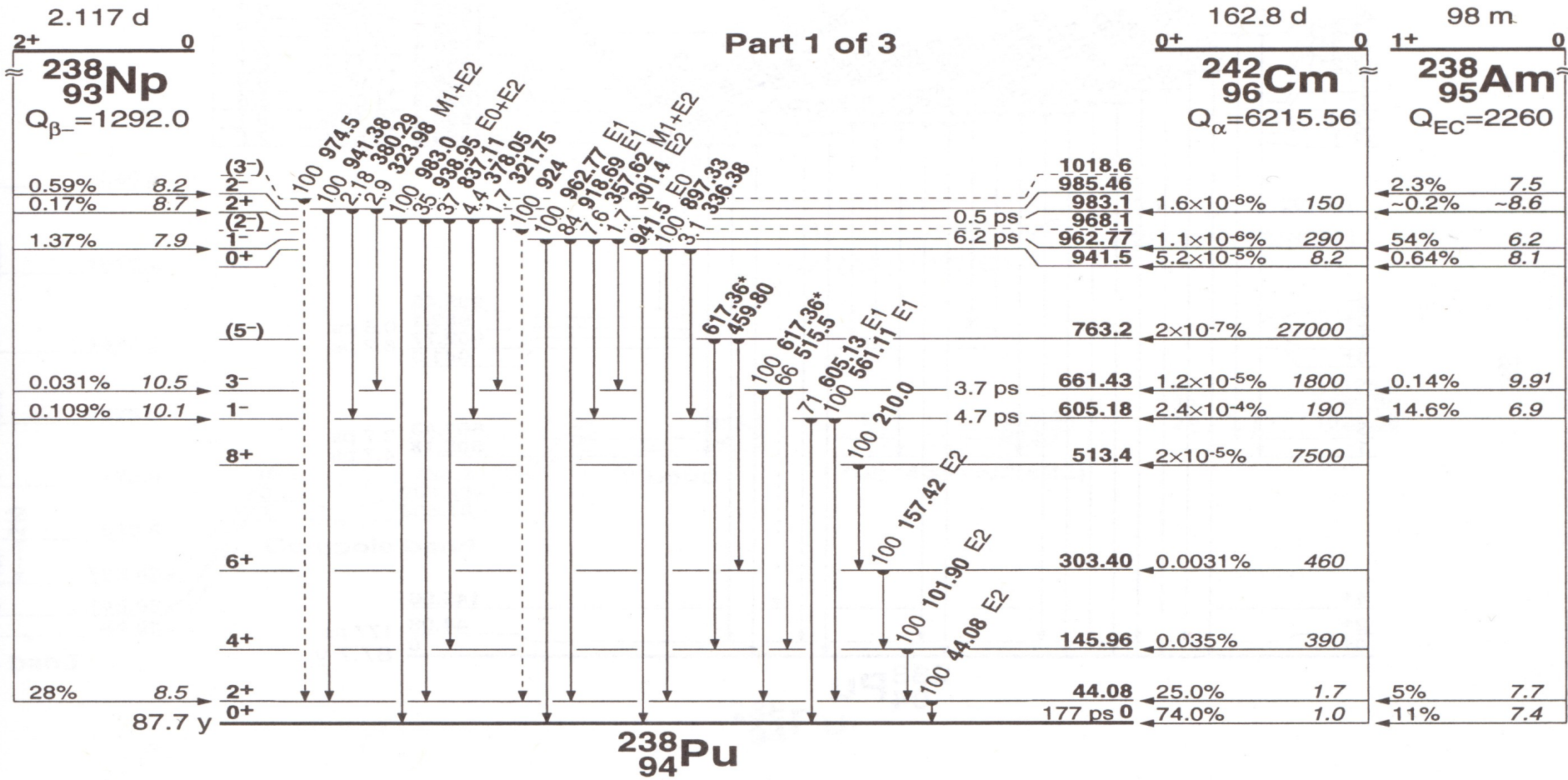


**Doc. 5** Courbe d'ASTON. Les points situés sur la partie rouge de la courbe concernent les noyaux les plus stables.

# Diagrammes de désintégrations nucléaires

énergie en keV ( $[M(X) - M(^{137}\text{Ba})] \times c^2$ )







# Loi de décroissance radioactive

Un noyau est un objet quantique, ce qui lui confère un mode d'évolution probabiliste.

Un noyau radioactif (instable) a une probabilité constante de désintégration par unité de temps, que l'on désigne par *constante de décroissance radioactive*  $\lambda$ . Cette probabilité ne dépend que de l'identité du radioisotope. Elle ne dépend d'aucun facteur externe : température, pression, densité ...

Ainsi sur un intervalle de temps infinitésimal (petit mais non nul)  $dt$ , la probabilité de décroissance d'un radioisotope unique est donnée par :  $dP = \lambda dt$

Si à l'instant  $t$ , une population comprend  $N(t)$  radioisotopes du même type, le nombre de désintégrations parmi cette population durant l'intervalle de temps infinitésimal  $dt$  est alors :  $N(t)\lambda dt$

Sur le même intervalle de temps  $dt$ ,  $N(t)$  diminue d'autant. Sa variation infinitésimale (sa différentielle) est alors négative :  $dN(t) = -N(t)\lambda dt$

$$dN(t) + N(t)\lambda dt = 0 \quad \text{Soit encore :} \quad \frac{dN(t)}{dt} + \lambda N(t) = 0$$

C'est une équation différentielle horaire, qui admet pour solution générale :

$$N(t) = C e^{-\lambda t}$$

Mais à  $t=0$ ,  $N(t=0) = N_0$  d'où :  $N_0 = C$

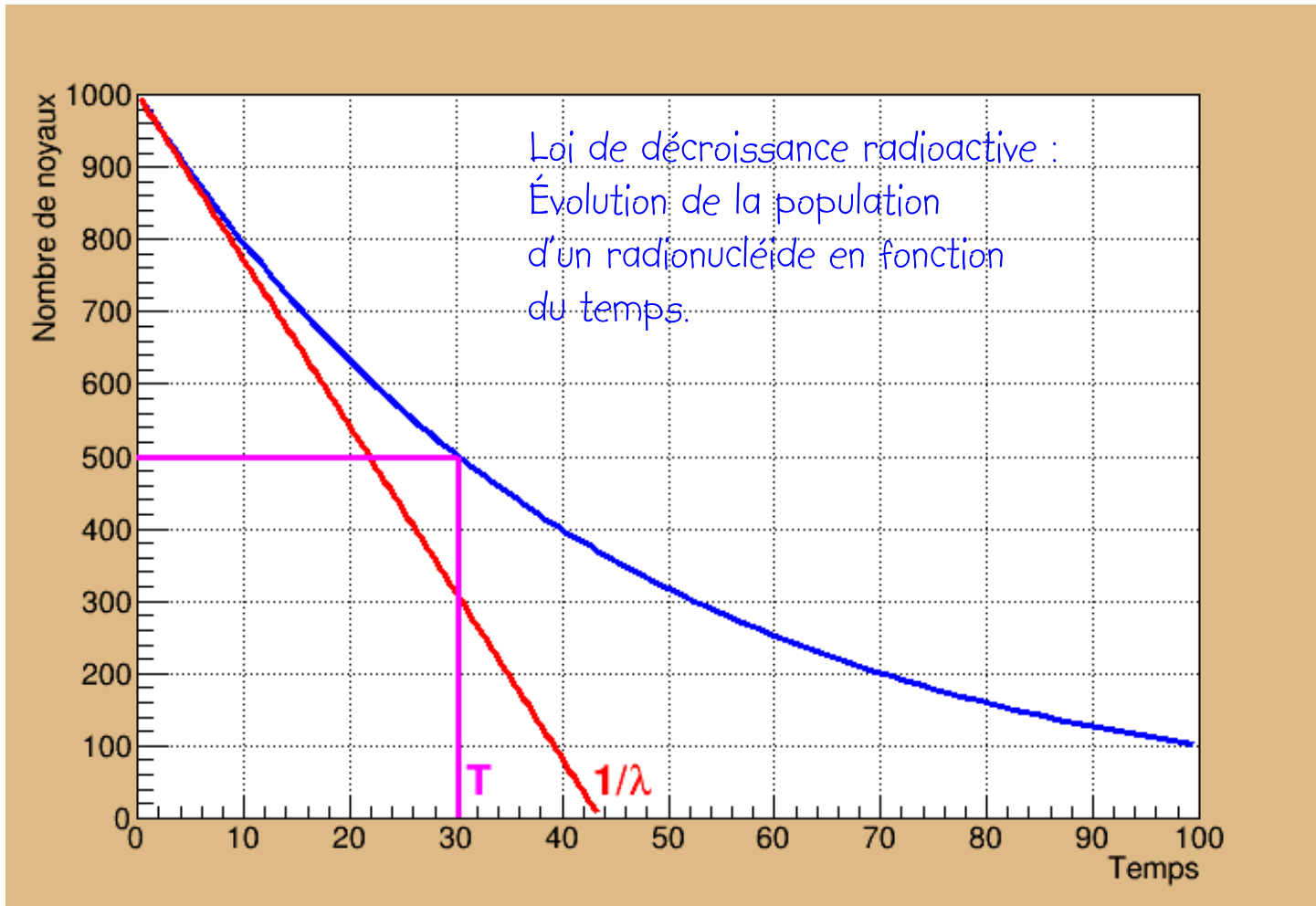
Il vient donc finalement :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{avec} \quad [\lambda] = s^{-1}$$

Au bout d'une période  $T$ , la population d'un radionucléide est divisée par deux.

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda T} \Rightarrow T = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$





L'activité  $A(t)$  d'une source radioactive - qui contient une population d'un seul radionucléide - correspond au nombre de désintégrations par unité de temps au sein de cette source.

$$A(t) = N(t)\lambda = N_0 e^{-\lambda t} \lambda = A_0 e^{-\lambda t} \quad \text{avec :} \quad A_0 = N_0 \lambda$$

$[A] = \text{Bq}$  ( Becquerel ) = 1 désintégration par seconde (unité SI) .

On utilise également le Curie (Ci) qui est l'activité d'un gramme de radium 226 -  $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$  .

tableau-periodique.fr

**Légende:**

- Non-métaux
- Métaux alcalins
- Métaux alcalino-terreux
- Métaux de transition
- Métaux pauvres
- Métalloïdes
- Halogènes
- Gaz nobles
- Lanthanides
- Actinides

PERIODE	1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	Hydrogène 1 <b>H</b>																		Hélium 2 <b>He</b>
2	Lithium 3 <b>Li</b>	Béryllium 4 <b>Be</b>											Bore 5 <b>B</b>	Carbone 6 <b>C</b>	Azote 7 <b>N</b>	Oxygène 8 <b>O</b>	Fluor 9 <b>F</b>	Néon 10 <b>Ne</b>	
3	Sodium 11 <b>Na</b>	Magnésium 12 <b>Mg</b>											Aluminium 13 <b>Al</b>	Silicium 14 <b>Si</b>	Phosphore 15 <b>P</b>	Soufre 16 <b>S</b>	Chlore 17 <b>Cl</b>	Argon 18 <b>Ar</b>	
4	Potassium 19 <b>K</b>	Calcium 20 <b>Ca</b>	Scandium 21 <b>Sc</b>	Titane 22 <b>Ti</b>	Vanadium 23 <b>V</b>	Chrome 24 <b>Cr</b>	Manganèse 25 <b>Mn</b>	Fer 26 <b>Fe</b>	Cobalt 27 <b>Co</b>	Nickel 28 <b>Ni</b>	Cuivre 29 <b>Cu</b>	Zinc 30 <b>Zn</b>	Gallium 31 <b>Ga</b>	Germanium 32 <b>Ge</b>	Arsenic 33 <b>As</b>	Sélénium 34 <b>Se</b>	Brome 35 <b>Br</b>	Krypton 36 <b>Kr</b>	
5	Rubidium 37 <b>Rb</b>	Strontium 38 <b>Sr</b>	Yttrium 39 <b>Y</b>	Zirconium 40 <b>Zr</b>	Niobium 41 <b>Nb</b>	Molybdène 42 <b>Mo</b>	Technétium 43 <b>Tc</b>	Ruthénium 44 <b>Ru</b>	Rhodium 45 <b>Rh</b>	Palladium 46 <b>Pd</b>	Argent 47 <b>Ag</b>	Cadmium 48 <b>Cd</b>	Indium 49 <b>In</b>	Étain 50 <b>Sn</b>	Antimoine 51 <b>Sb</b>	Tellure 52 <b>Te</b>	Iode 53 <b>I</b>	Xénon 54 <b>Xe</b>	
6	Césium 55 <b>Cs</b>	Baryum 56 <b>Ba</b>	Lanthanides		Hafnium 72 <b>Hf</b>	Tantale 73 <b>Ta</b>	Tungstène 74 <b>W</b>	Rhénium 75 <b>Re</b>	Osmium 76 <b>Os</b>	Iridium 77 <b>Ir</b>	Platine 78 <b>Pt</b>	Or 79 <b>Au</b>	Mercur 80 <b>Hg</b>	Thallium 81 <b>Tl</b>	Plomb 82 <b>Pb</b>	Bismuth 83 <b>Bi</b>	Polonium 84 <b>Po</b>	Astate 85 <b>At</b>	Radon 86 <b>Rn</b>
7	Francium 87 <b>Fr</b>	Radium 88 <b>Ra</b>			Rutherfordium 104 <b>Rf</b>	Dubnium 105 <b>Db</b>	Seaborgium 106 <b>Sg</b>	Bohrium 107 <b>Bh</b>	Hassium 108 <b>Hs</b>	Meitnerium 109 <b>Mt</b>	Darmstadtium 110 <b>Ds</b>	Roentgenium 111 <b>Rg</b>	Copernicium 112 <b>Cn</b>	Ununtrium 113 <b>Uut</b>	Ununquadium 114 <b>Uuq</b>	Ununpentium 115 <b>Uup</b>	Ununhexium 116 <b>Uuh</b>	Ununseptium 117 <b>Uus</b>	Ununoctium 118 <b>Uuo</b>
		Actinides		Lanthane 57 <b>La</b>	Cérium 58 <b>Ce</b>	Praséodyme 59 <b>Pr</b>	Néodyme 60 <b>Nd</b>	Prométhium 61 <b>Pm</b>	Samarium 62 <b>Sm</b>	Europium 63 <b>Eu</b>	Gadolinium 64 <b>Gd</b>	Terbium 65 <b>Tb</b>	Dysprosium 66 <b>Dy</b>	Holmium 67 <b>Ho</b>	Erbium 68 <b>Er</b>	Thulium 69 <b>Tm</b>	Ytterbium 70 <b>Yb</b>	Lutécium 71 <b>Lu</b>	
				Actinium 89 <b>Ac</b>	Thorium 90 <b>Th</b>	Protactinium 91 <b>Pa</b>	Uranium 92 <b>U</b>	Neptunium 93 <b>Np</b>	Plutonium 94 <b>Pu</b>	Américium 95 <b>Am</b>	Curium 96 <b>Cm</b>	Berkélium 97 <b>Bk</b>	Californium 98 <b>Cf</b>	Einsteinium 99 <b>Es</b>	Fermium 100 <b>Fm</b>	Mendélévium 101 <b>Md</b>	Nobélium 102 <b>No</b>	Lawrencium 103 <b>Lr</b>	

Pour en savoir plus :

- site web : [www.laradioactivite.com](http://www.laradioactivite.com)
- Introduction au génie nucléaire, Jacques Ligou, Presses polytechniques et universitaires romandes
- Physique nucléaire appliquée, Frédéric Mayet, de boeck
- Introduction à la physique nucléaire – H.A. Enge – Masson
- Physique nucléaire, particules, D. Blanc - Masson
- La Naissance de la vie, Marie-Christine Maurel , UniverSciences