

# Centrales nucléaires de production d'électricité.

## 1- Bases de physique

Master IPE

Florent Ravelet<sup>1</sup>

Laboratoire d'Ingénierie des Fluides et des Systèmes Énergétiques

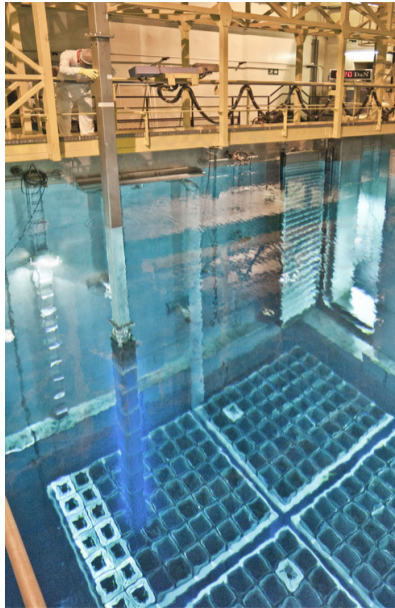
<sup>1</sup>Arts et Métiers - Sciences et Technologies

18 octobre 2023



LIFSE







# Introduction : quelques données sur la production d'électricité nucléaire, notion de filière

# Cartographie mondiale (CEA 2019 & WNA 2022)

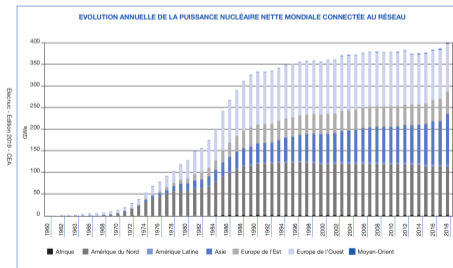
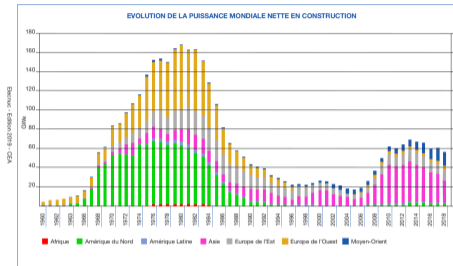


Pays	En marche (2022)			Construction (2022)		Arrêtés (1950-2022)	
	GWe	#	%	GWe	#	GWe	#
1. Etats-Unis	94.7	92	19.6	2.2	2	x	40
2. France	61.3	56	69.0	1.6	1	5.6	14
3. Chine (11è en 2010, 20è en 2000)	52.1	51	5.0	22.8	19	0	0
4. Japon	31.7	33	7.2 <sup>†</sup>	2.6	2	x	27
5. Russie	27.7	37	20.0	3.6	4	x	10
6. Corée du Sud	23.1	24	28.0	4.0	4	0.5	1
7. Canada	13.6	19	14.3	0	0	2.1	6
8. Ukraine	13.1	15	55.0	2.0	2	3.5	4
9. Espagne	7.1	7	20.8	0	0	1	3
10. Inde	6.9	23	3.2	6.0	8	0	0
11. Suède	6.9	6	30.8	0	0	2.3	7
12. Royaume-Uni	6.8	11	14.8	3.3	2	4.7	34
13. Belgique	5.9	7	50.8	0	0	0.01	1
14. Finlande	4.4	5	32.8	0	0	0	0
15. Allemagne (5è en 2010)	4.0	3	11.9	0	0	x	33
33 pays + 2 à venir	393.6	436	13.2 (10.5*)	60.8	59	99	204

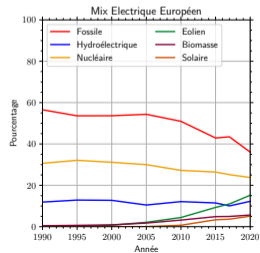
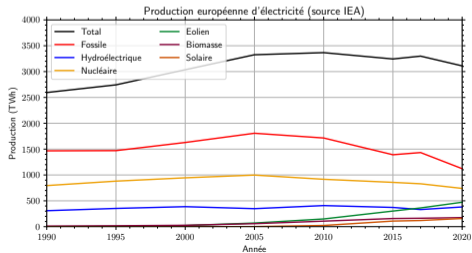
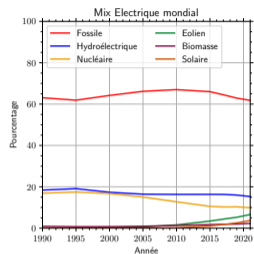
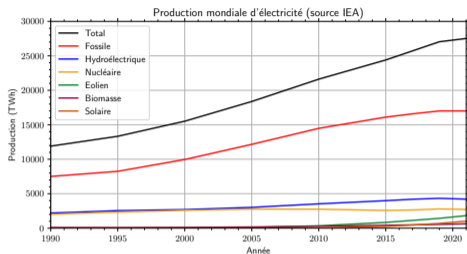
Table – % : pourcentage de l'électricité produite (2022). † : avant Fukushima, environ 18%. \* : ensemble de l'électricité mondiale (33 pays nucléaires produisent  $\simeq$  75% de l'électricité mondiale)



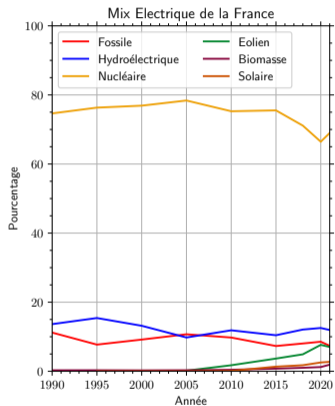
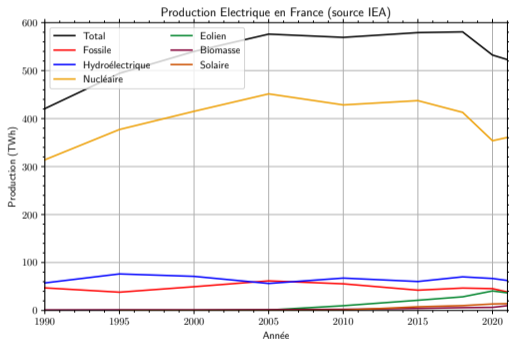
# Historique du développement (CEA 2019)



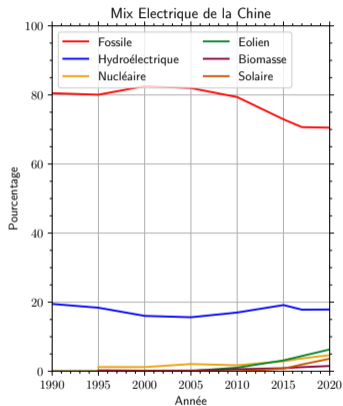
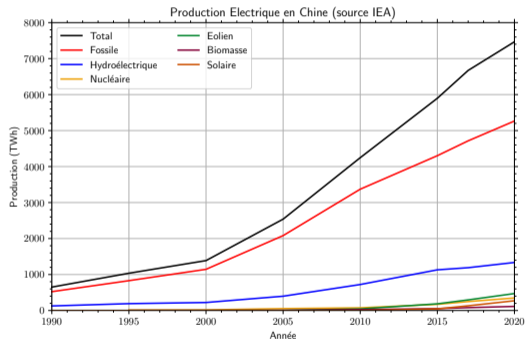
# La part du nucléaire dans l'électricité au niveau mondial et européen



# La part du nucléaire dans l'électricité en France



# La part du nucléaire dans l'électricité en Chine



# Cartographie mondiale (source Elecnuc 2019 (CEA) & World Nuclear Ass. 2022)



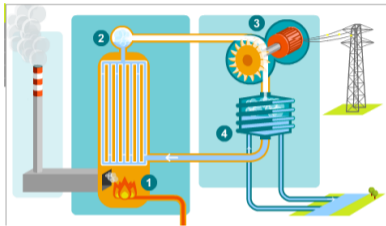
Faits marquants :

- En 2021-2022, 12 mises en service dont 6 en Chine et 2 aux Emirats Arabes Unis.
- Premiers réacteurs de Gén. III en 2018.
- Egypte : 4 réacteurs en construction, mise en service prévue 2026.
- Turquie : 4 réacteurs en construction, mise en service prévue 2024.
- Le Japon souhaite une part de 20% à horizon 2030.
- La Chine prévoit 120 GW en 2030.
- L'Inde prévoit une vingtaine de réacteurs en plus d'ici 2030.

# Centrale nucléaire de production d'électricité

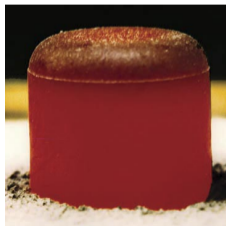


- Une centrale électrique...



Centrale au charbon (Belgique)

- Avec une source chaude un peu particulière

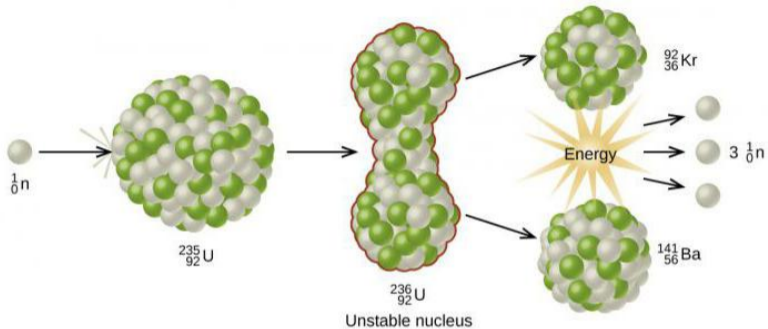


Lingot de Plutonium 238, rougeoyant sous l'effet de sa radioactivité naturelle



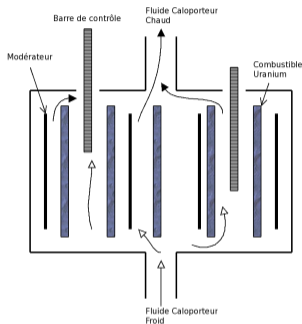
Centrale nucléaire de Golfech (Tarn et Garonne)

# Principe de la réaction en chaîne



But : initier, maitriser, entretenir des réactions de fission en chaîne

# Notion de filière : Combustible / Caloporteur / Modérateur

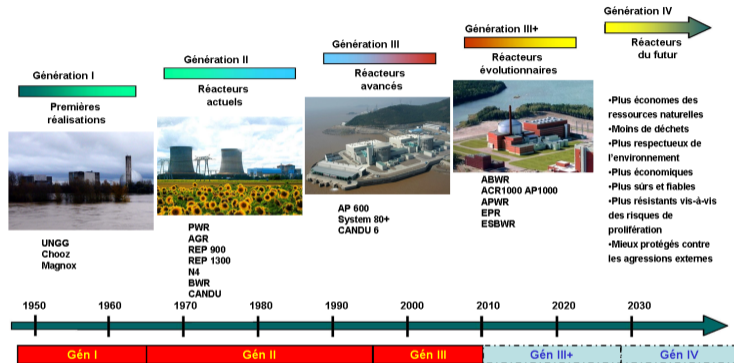


Composants du cœur d'un réacteur nucléaire

- « **Combustible** » (matières fissiles et fertiles)
  - Uranium naturel (99.3%  $^{238}\text{U}$  et 0.7%  $^{235}\text{U}$ )
  - Uranium enrichi ( $^{235}\text{U} \geq 3\%$ )
  - Plutonium (Artificiel :  $^{238}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$ )
  - Thorium (à convertir selon  $^{232}\text{Th} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{233}\text{U}$ )
- **Caloporteur** (évacuation de la chaleur)
  - Gaz sous pression
  - Eau lourde
  - Eau ordinaire
  - Métal liquide
  - Sel fondu
- **Modérateur** (ralentir les neutrons : favoriser les fissions)
  - Noyaux légers
  - Hydrogène (eau)
  - Deutérium (eau lourde)
  - Carbone (graphite)
- **Absorbant neutronique** (contrôle de la réaction en chaîne)
  - Bore
  - Cadmium
  - Gadolinium



# Principales filières

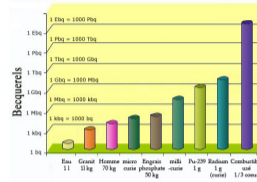
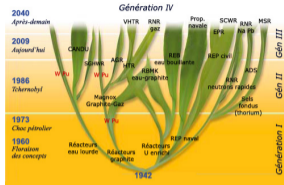
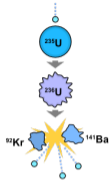


# Principales filières



Filières	Combustible	Modérateur	Caloporteur	En marche (2022)		Construction (2022)		Arrêtés (1950-2022)	
				GWe	#	GWe	#	GWe	#
UNGG, Magnox	Uranium naturel	Graphite	Gaz carbonique	0	0	0	0	7.2	37
HWGCR	Uranium naturel	Eau lourde	Gaz carbonique	0	0	0	0	0.2	5
<b>CANDU</b>	Uranium naturel	Eau lourde	Eau lourde	24.5	47	1.9	3	2.7	10
RBMK	Uranium enrichi (1.8%)	Graphite	Eau bouillante	7.4	11	0	0	8.9	13
AGR	Uranium enrichi (3%)	Graphite	Gaz carbonique	4.6	8	0	0	3.0	7
<b>BWR</b>	Uranium enrichi (3%)	Eau	Eau bouillante	61.8	61	2.6	2	30.6	52
<b>PWR</b>	Uranium enrichi (3%)	Eau	Eau liquide	293.7	307	54.2	50	43	65
<b>FBR</b>	Uranium/Plutonium $\geq$ 10%		Sodium liquide ou Plomb	1.4	2	1.9	4	1.9	8
<b>Total</b>				393.6	437	60.8	59	99.0	204

# Problématique : concevoir un réacteur nucléaire



This bulb is one of four lit by nuclear-generated electricity in 1951.

- D'où vient l'énergie dégagée?  $\Rightarrow$  Noyaux atomiques, radioactivité, fission
- Comment induire des réactions de fission?  $\Rightarrow$  Neutronique : sections efficaces
- Comment entretenir une réaction en chaîne?  $\Rightarrow$  Neutronique : flux, taux de réaction, criticité
- Comment garantir la sûreté?  $\Rightarrow$  Neutronique : effets de température,...
- Pas de  $\text{CO}_2$  mais des déchets, épuisement de  $^{235}\text{U} \Rightarrow$  Filières du futur?



# Bases de physique nucléaire : Atomes, noyaux, énergie de liaison, radioactivité

# Principales constantes <sup>1</sup>, unités, relations fondamentales



Célérité de la lumière dans le vide	$c$	$= 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$
Permittivité diélectrique du vide	$\epsilon_0$	$\simeq 8.854 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$
Charge électron	$-e$	$= -1.602176634 \times 10^{-19} \text{ A.s}$
Unité pratique d'énergie : l'électronvolt et le méga-électronvolt	eV	$\simeq 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$
	MeV	$= 10^6 \text{ eV}$
Equivalence masse-Energie		$E = \gamma m_0 c^2$
Facteur de Lorentz		$\gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}$
Unité pratique de masse	$\text{MeV.c}^{-2}$	
Unité de masse atomique unifiée	$u$	$\simeq 931.494 \text{ MeV.c}^{-2}$
Quantité de mouvement ou impulsion		$p = mv$
Masse au repos, énergie et impulsion		$E^2 - p^2 c^2 = m_0^2 c^4$
Constante de Planck	$h$	$= 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J.s}$
Relation de Planck-Einstein ( $\nu$ fréquence en Hz)		$E = h\nu$
Relation de de Broglie ( $\lambda$ longueur d'onde)		$p = \frac{h}{\lambda}$
Nombre d'Avogadro	$\mathcal{N}_A$	$= 6.02214076 \times 10^{23}$
Constante de Boltzmann	$k$	$= 1.380649 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$

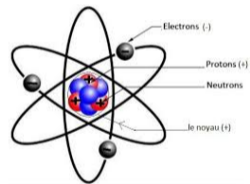
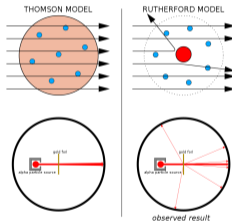
# Atomes : un concept clé pour la chimie et les matériaux



- Démocrite (460 - 370 av. J.-C.). Matière : particules minuscules et indivisibles s'accrochant entre elles
- Dalton (1803). « Element » & composés chimiques. Réaction chimique : réarrangement
- Mendeleiev (1869) : rangement par masse atomique, modèle prédisant propriétés d'éléments non découverts
- Rutherford (1911) & Bohr (1913) : modèle « planétaire ». Noyau entouré d'électrons + quantification
- Sur terre : 83 éléments « primordiaux »

Eléments simples de Dalton

Hydrogène	Azote	Carbone	Oxygène	Phosphore
Soufre	Magnesium	Lithium	Sodium	Potassium
Strontium	Baryum	Fer	Zinc	Cuivre
Plomb	Argent	Platine	Or	Mercure



# Atomes : un concept clé pour la chimie et les matériaux



## Tableau périodique des éléments chimiques

Groupe →	I A	II A											III B	IV B	V B	VI B	VII B	O		
Période	1	2											13	14	15	16	17	18		
1	Hydrogène 1 <b>H</b> 1,00795																		Hélium 2 <b>He</b> 4,002602	
2	Lithium 3 <b>Li</b> 6,9395	Béryllium 4 <b>Be</b> 9,0121831											Bore 5 <b>B</b> 10,8135	Carbone 6 <b>C</b> 12,0106	Azote 7 <b>N</b> 14,006855	Oxygène 8 <b>O</b> 15,9994	Fluor 9 <b>F</b> 18,9984031	Néon 10 <b>Ne</b> 20,1797 (6)		
3	Sodium 11 <b>Na</b> 22,98976928	Magnésium 12 <b>Mg</b> 24,3055											Aluminium 13 <b>Al</b> 26,9815385	Silicium 14 <b>Si</b> 28,085 (1)	Phosphore 15 <b>P</b> 30,97376208	Soufre 16 <b>S</b> 32,0675	Chlore 17 <b>Cl</b> 35,4515	Argon 18 <b>Ar</b> 39,948 (1)		
4	Potassium 19 <b>K</b> 39,0983 (1)	Calcium 20 <b>Ca</b> 40,078 (4)	Scandium 21 <b>Sc</b> 44,9559085	Titane 22 <b>Ti</b> 47,867 (1)	Vanadium 23 <b>V</b> 50,9415 (1)	Chrome 24 <b>Cr</b> 51,9961 (6)	Manganèse 25 <b>Mn</b> 54,938044	Fer 26 <b>Fe</b> 55,845 (2)	Cobalt 27 <b>Co</b> 58,933194	Nickel 28 <b>Ni</b> 58,6934 (4)	Cuivre 29 <b>Cu</b> 63,546 (3)	Zinc 30 <b>Zn</b> 65,38 (2)	Gallium 31 <b>Ga</b> 69,723 (1)	Germanium 32 <b>Ge</b> 72,630 (8)	Argent 33 <b>Ag</b> 74,921595	Sélénium 34 <b>Se</b> 78,971 (8)	Brome 35 <b>Br</b> 79,904	Krypton 36 <b>Kr</b> 83,798 (2)		
5	Rubidium 37 <b>Rb</b> 85,4678 (3)	Strontium 38 <b>Sr</b> 87,62 (1)	Yttrium 39 <b>Y</b> 88,90584	Zirconium 40 <b>Zr</b> 91,224 (2)	Niobium 41 <b>Nb</b> 92,90637	Molybdène 42 <b>Mo</b> 95,95 (1)	Technétium 43 <b>Tc</b> [98]	Ruthénium 44 <b>Ru</b> 101,07 (2)	Rhodium 45 <b>Rh</b> 102,90550	Palladium 46 <b>Pd</b> 106,42 (1)	Argent 47 <b>Ag</b> 107,8682 (2)	Cadmium 48 <b>Cd</b> 112,414 (4)	Indium 49 <b>In</b> 114,818 (1)	Étain 50 <b>Sn</b> 118,710 (7)	Antimoine 51 <b>Sb</b> 121,760 (1)	Tellure 52 <b>Te</b> 127,60 (3)	Iode 53 <b>I</b> 126,90447	Xénon 54 <b>Xe</b> 131,29 (8)		
6	Césium 55 <b>Cs</b> 132,905452	Baryum 56 <b>Ba</b> 137,327 (7)	Lanthanides 57-71			Hafnium 72 <b>Hf</b> 178,49 (2)	Tantale 73 <b>Ta</b> 180,94788	Tungstène 74 <b>W</b> 183,84 (1)	Rhénium 75 <b>Re</b> 186,207 (1)	Osmium 76 <b>Os</b> 190,23 (3)	Iridium 77 <b>Ir</b> 192,22 (3)	Platine 78 <b>Pt</b> 195,084 (8)	Or 79 <b>Au</b> 196,966569	Mercury 80 <b>Hg</b> 200,592 (3)	Thallium 81 <b>Tl</b> 204,3835	Plomb 82 <b>Pb</b> 207,2 (1)	Bismuth 83 <b>Bi</b> 208,98040	Polonium 84 <b>Po</b> [209]	Astato 85 <b>At</b> [210]	Radon 86 <b>Rn</b> [222]
7	Francium 87 <b>Fr</b> [223]	Radium 88 <b>Ra</b> [226]	Actinides 89-103			Rutherfordium 104 <b>Rf</b> [267]	Dubnium 105 <b>Db</b> [268]	Seaborgium 106 <b>Sg</b> [269]	Bohrium 107 <b>Bh</b> [270]	Hassium 108 <b>Hs</b> [277]	Métabohrium 109 <b>Mt</b> [278]	Darmstadtium 110 <b>Ds</b> [281]	Roentgenium 111 <b>Rg</b> [282]	Copernicium 112 <b>Cn</b> [285]	Nihonium 113 <b>Nh</b> [286]	Flerovium 114 <b>Fl</b> [289]	Moscovium 115 <b>Mc</b> [289]	Livermorium 116 <b>Lv</b> [293]	Tennessee 117 <b>Ts</b> [294]	Oganeson 118 <b>Og</b> [294]
			Lanthane 57 <b>La</b> 138,90547	Cérium 58 <b>Ce</b> 140,116 (1)	Prasodyme 59 <b>Pr</b> 140,90766	Néodyme 60 <b>Nd</b> 144,242 (3)	Prométhium 61 <b>Pm</b> [145]	Samarium 62 <b>Sm</b> 150,36 (2)	Europium 63 <b>Eu</b> 151,964 (1)	Gadolinium 64 <b>Gd</b> 157,25 (3)	Terbium 65 <b>Tb</b> 158,92535	Dysprosium 66 <b>Dy</b> 162,500 (1)	Holmium 67 <b>Ho</b> 164,93033	Erbium 68 <b>Er</b> 167,259 (3)	Thulium 69 <b>Tm</b> 168,93422	Ytterbium 70 <b>Yb</b> 173,045	Lutécium 71 <b>Lu</b> 174,9668			
			Actinium 89 <b>Ac</b> [227]	Thorium 90 <b>Th</b> 232,0377	Protactinium 91 <b>Pa</b> [231,03588]	Uranium 92 <b>U</b> 238,02891	Neptunium 93 <b>Np</b> [237]	Plutonium 94 <b>Pu</b> [244]	Americium 95 <b>Am</b> [243]	Curium 96 <b>Cm</b> [247]	Berkélium 97 <b>Bk</b> [247]	Californium 98 <b>Cf</b> [251]	Einsteinium 99 <b>Es</b> [252]	Fermium 100 <b>Fm</b> [257]	Mendélévium 101 <b>Md</b> [258]	Nobelium 102 <b>No</b> [259]	Lawrencium 103 <b>Lr</b> [266]			

Métaux							Non métaux						
Alcalins	Alcalino-terreux	Lanthanides	Actinides	Métaux de transition	Métaux pauvres	Métalloïdes	Autres non-métaux	Halogènes	Gaz nobles	Non classés	primordial	transmutation d'autres éléments	synthétique

# Rappels de physique atomique



- Atomes : noyau + cortège électronique
  - **Elément** chimique = **numéro atomique Z** (nombre de protons dans le noyau)
  - Atome neutre électriquement (nombre électrons = nombre de protons)
  - **Electrons** organisés en **couches** (effet photoélectrique, **liaisons chimiques**)

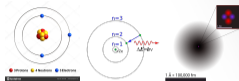
- Ordres de grandeur

- Relation de Planck-Einstein :  $E = h\nu$
- Relation de de Broglie (dualité onde-corpuscule) :  $\lambda = \frac{h}{p}$
- Loi de Coulomb (**interaction électrostatique**) :  $F = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r^2}$
- Postulat de Bohr : périmètre orbite multiple de  $\lambda$  ( $n$  un entier) :

$$2\pi a = n\lambda = \frac{nh}{m_e v}$$
$$\frac{m_e v^2}{a} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 a^2}$$
$$a = n^2 \frac{4\pi\epsilon_0}{m_e e^2} \left(\frac{h}{2\pi}\right)^2 \simeq n^2 \times 0.53 \times 10^{-10} \text{ m}$$

- Energie de l'électron (cinétique + potentielle) :

$$E_n = \frac{1}{2} m_e v^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 a} = -\frac{1}{n^2} \frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \simeq -\frac{1}{n^2} \times 13.6 \text{ eV}$$



- **Dimension des atomes** : de  $100 \times 10^{-12} \text{ m}$  (hydrogène) à  $600 \times 10^{-12} \text{ m}$  (césium)
- **Dimension des noyaux** : de  $1 \times 10^{-15} \text{ m}$  à  $16 \times 10^{-15} \text{ m}$
- **Energies « chimiques »**  $\simeq \text{eV}$





# Constitution des noyaux

- Constats :

- Masses molaires exprimées en  $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$  plutôt entières (rappels : définition de la mole)
- Mais pas tout à fait (exemple du Chlore :  $3/4 \text{ }^{35}\text{Cl}$  et  $1/4 \text{ }^{37}\text{Cl}$ )
- $\Rightarrow$  Il existe des atomes de masses atomiques différentes chimiquement indiscernables (Découverte rapportée par Soddy en 1913 en étudiant la radioactivité)

- Explications :

- Noyau de nombre de masse  $A$ ,  ${}^A_Z\text{X}$  formé de  $Z$  protons et  $(A - Z)$  neutrons
- protons et neutrons liés par interaction forte
- force à très courte portée (fm) et très intense ( $1000\times$  la force électromagnétique)
- $\Rightarrow$  Energie de liaison différente pour chaque combinaison
- Deux noyaux de même  $Z$  et de  $A$  différents = isotopes
- Nombre d'isotopes naturels : 2 à 3 par élément
- Existence d'une « vallée de stabilité »

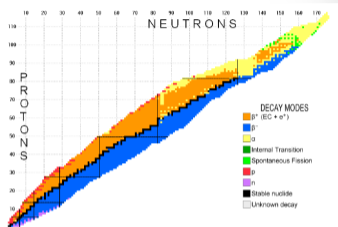


Figure 6: Chart of the nuclides for decay modes (created by NUCLEUS-ASIS)



# Energie de liaison



Energie de masse  $E = m_0 c^2$  : une forme d'énergie potentielle

- ⇒ Energie de liaison : énergie à fournir pour briser une liaison.
- ⇒ Lien entre défaut de masse  $\Delta m$  et énergie de liaison  $B$  :

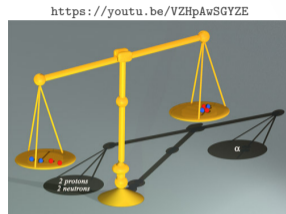
$$m \left( {}^A_Z X \right) = Z m_p + (A - Z) m_n - \Delta m$$

$$B = \Delta m c^2$$

- ⇒ Calculer l'énergie de liaison pour les noyaux suivants :

symbole	${}^1_0 n$	${}^1_1 p$	$e^-$	${}^4_2 He$
masse	1.008665	1.007276	0.0005486	4.002603
symbole	${}^{10}_5 B$	${}^{11}_5 B$	${}^{12}_6 C$	${}^{56}_{26} Fe$
masse	10.0129370	11.0093054	12.000000	55.934937

**Table** – Masses atomiques au repos, dans l'état fondamental, en unité de masse atomique. Données issues de l'Atomic Mass Data Center (<https://www-nds.iaea.org/amdc/>)



# Masses atomiques de quelques noyaux



symbole	${}^1_0n$	${}^1_1p$	$e^-$	${}^2_1D$	${}^3_1T$	${}^3_2He$
masse	1.008665	1.007276	0.0005486	2.014101	3.016049	3.016029
symbole	${}^4_2He$	${}^6_3Li$	${}^7_3Li$	${}^{10}_5B$	${}^{11}_5B$	${}^{12}_6C$
masse	4.002603	6.015122	7.016003	10.0129370	11.0093054	12.000000
symbole	${}^{234}_{90}Th$	${}^{234}_{92}U$	${}^{235}_{92}U$	${}^{236}_{92}U$	${}^{237}_{92}U$	${}^{237}_{91}Pa$
masse	234.043599	234.040950	235.043928	236.045566	237.048728	237.051023
symbole	${}^{238}_{92}U$	${}^{238}_{93}Np$	${}^{238}_{94}Pu$	${}^{239}_{92}U$	${}^{239}_{94}Pu$	${}^{252}_{98}Cf$
masse	238.050787	238.050944	238.049558	239.054291	239.052161	252.081626

**Table** – Masses atomiques au repos, dans l'état fondamental, en unité de masse atomique. Données issues de l'Atomic Mass Data Center (<https://www-nds.iaea.org/amdc/>)

# Modèle de la goutte



$$B(A, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_a \frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta \frac{a_p}{A^{1/2}}$$

1.  $a_v A$  : terme de *volume* (liaison aux voisins, énergie interne proportionnelle au nombre de nucléons liés)
2.  $a_s A^{2/3}$  : terme de *surface* (moins de voisins en surface : déficit d'énergie proportionnel à la surface)
3.  $a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}$  : terme *coulombien* (répulsion entre protons chargés, calculable analytiquement)
4.  $a_a \frac{(A-2Z)^2}{A}$  : terme d'*asymétrie* (effet quantique lié au spin 1/2 des nucléons : si il y a des neutrons en excès, ils doivent occuper des niveaux d'énergie plus élevés dans le noyau)
5.  $\delta \frac{a_p}{A^{1/2}}$  : terme de *parité* (formation de paires,  $\delta = 0$  pour  $A$  impair,  $\delta = -1$  pour  $N$  (nombre de neutrons) impair et  $Z$  impair, et  $\delta = +1$  pour  $N$  pair et  $Z$  pair.)

# Exploitation du modèle de la goutte

- Jeu de paramètres :

$$a_v \simeq 15.4 \text{ (15.56) MeV}$$

$$a_s \simeq 16.7 \text{ (17.23) MeV}$$

$$a_c \simeq 0.7 \text{ MeV}$$

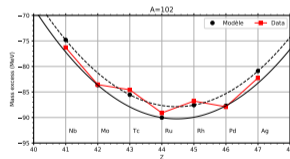
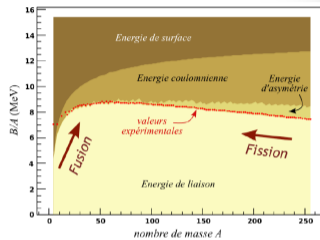
$$a_a \simeq 24 \text{ (23.6) MeV}$$

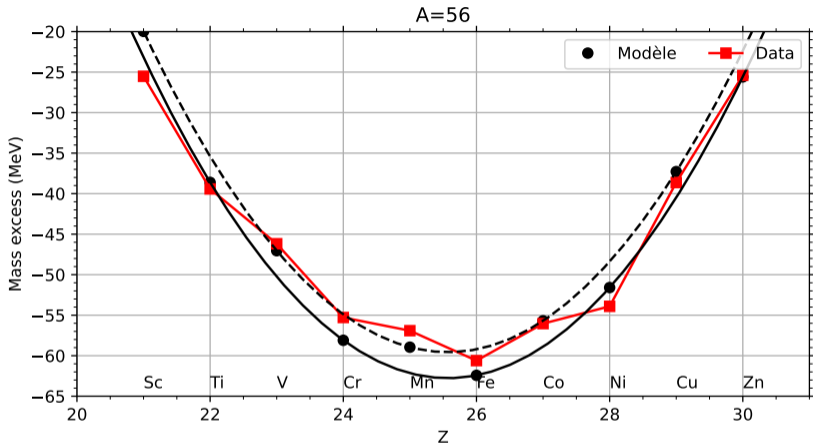
$$a_p \simeq 12 \text{ (11.2) MeV}$$

- Paraboles de stabilité : à  $A = \text{cte}$ , étude de  $B(Z)$
- Effet de parité : une parabole pour  $A$  impair, deux pour  $A$  pair
- Noyau de nombre de masse  $A$  le plus stable : le plus « léger », *i.e.* le plus lié

⇒ Equation de la vallée de stabilité

⇒ Essayer pour carbone 12, fer 56





$m_{\text{excess}} = m\left({}_Z^AX\right) - Au$  (l'unité de masse atomique  $u$  est la masse moyenne d'un nucléon lié dans le noyau de  ${}_{6}^{12}\text{C}$ )

# Principaux modes de désintégration

⇒ Un noyau instable se transforme en un noyau plus stable (transmutation)

⇒ Cette réaction s'accompagne d'un dégagement d'énergie

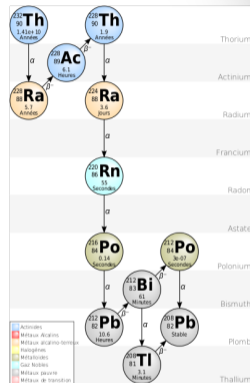
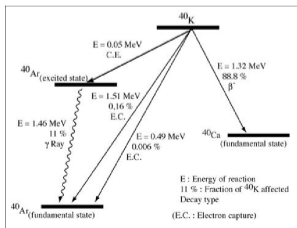
⇒ Il y a principalement deux modes :

- **Mode  $\beta(\pm)$**  : dans le noyau,  ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + e^- + \bar{\nu}_e$   
Energie typique 0.5 MeV (masse de l'électron)
- **Mode  $\alpha$**  :  ${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2He$   
Energie typique 4/8 MeV, plutôt pour  $A \gtrsim 209$

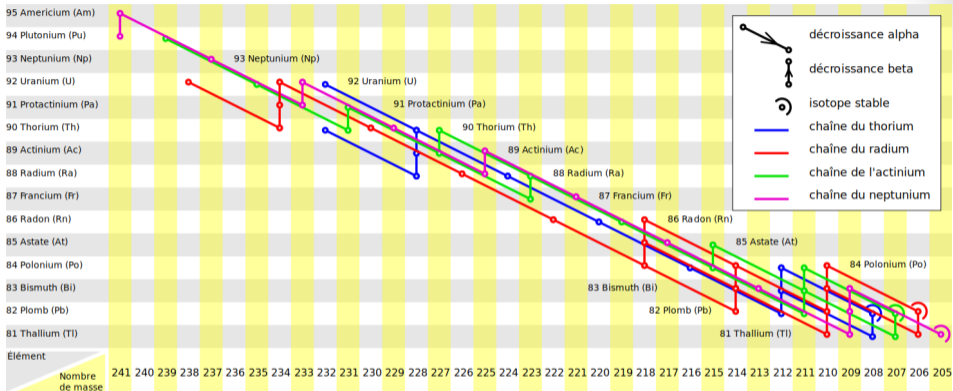
⇒ Accompagnée ou non de rayons  $\gamma$ , seuil pour le mode  $\beta^+$ , ...

⇒ Autres modes :

- Capture électronique (rare)
- **Emission de neutrons** : neutrons retardés dans les réacteurs
- **Fission spontanée** (très rare)



# 4 familles radioactives

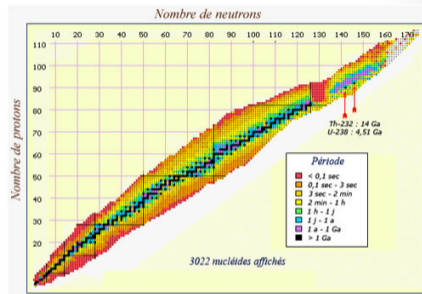
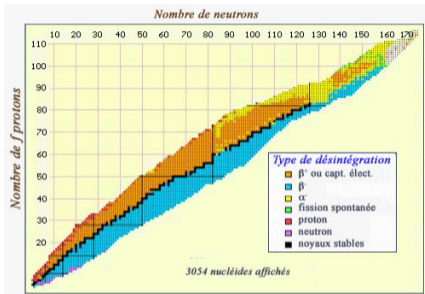


- $A = 4n$
- $A = 4n + 1$

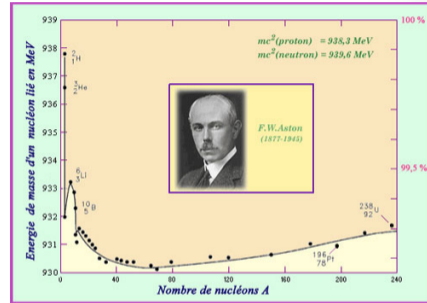
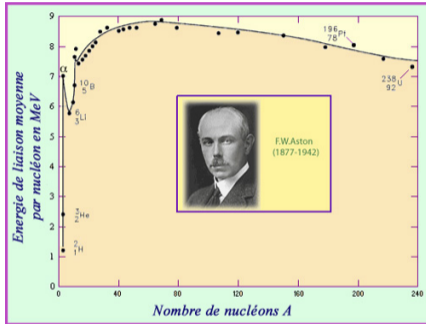
- $A = 4n + 2$
- $A = 4n + 3$



# Vallée de stabilité



# Courbe d'Aston



# Loi de décroissance radioactive



- Deux hypothèses :
  - Un noyau instable a autant de chances de se désintégrer à un moment donné qu'un autre noyau identique
  - Probabilité indépendante du temps (ne dépend pas de l'« âge »)

⇒ On a alors une loi de décroissance exponentielle, dont le temps caractéristique dépend du noyau considéré

- Démonstration :
  - $N(t)$  : nombre de noyaux radioactifs de même nature à  $t$
  - $\lambda(t)$  probabilité par unité de temps d'une désintégration
  - Variation  $dN$  pendant  $dt$  :  $dN = -\lambda(t)N(t)dt$
  - Solution avec  $\lambda = \text{cte}$  :

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t)$$

- Période  $T$  : temps au bout duquel on a  $N_0/2$  :

$$\exp(-\lambda T) = \frac{1}{2} \quad \text{donc} \quad T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

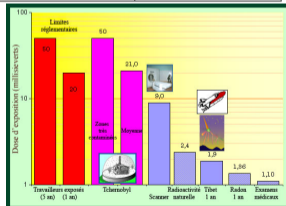
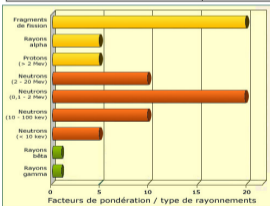
- Grande variabilité de  $T$  : de quelques ms à plusieurs milliards d'années.
  - polonium 218 : 3.10 minutes
  - radon 222 : 3.82 jours
  - radium 226 : 1591 ans
  - carbone 14 : 5730 ans
  - potassium 40 :  $1.25 \times 10^9$  ans
  - uranium 238 :  $4.5 \times 10^9$  ans

# Grandeurs et unités caractérisant les rayonnements ionisants



Grandeur	Unité	Définition	Remarque
Activité	Becquerel	1 dés. par seconde	Très petit
Dose	Gray	1 J.kg <sup>-1</sup>	indépendante type de rayonnement
Dose équivalente	Sievert	Pondération type de rayonnement	Pour le vivant
Dose efficace	Sievert	Pondération organe	Radioprotection
Débit de dose	mSv/h		

- Un litre de lait : 80 Bq
- Un humain : 8000 Bq (la moitié due au <sup>40</sup>K)
- 1 kg de minerai d'uranium : 25 × 10<sup>6</sup> Bq
- 1 g de <sup>226</sup>Ra : 37 × 10<sup>9</sup> Bq
- 1 kg de déchets nucléaires de haute activité (vieux de 50 ans), vitrifiés : 10 × 10<sup>12</sup> Bq
- combustible usé déchargé d'un réacteur par an (23 tonnes) : 10 × 10<sup>18</sup> Bq



**UNSCEAR**  
UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE  
ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATIONS

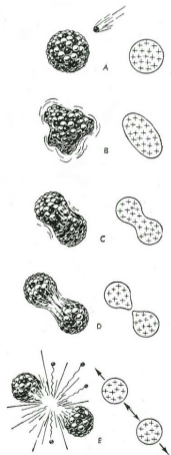
au delà de 10 Sv	très fortes doses
2 Sv à 10 Sv	fortes doses
200 mSv à 2000 mSv (2 Sv)	doses moyennes
20 à 200 mSv	faibles doses
0 à 20 mSv	très faibles doses

© OMRIS 2004

Activité d'un échantillon contenant  $N$  noyaux radioactifs de constante de désintégration  $\lambda$  :

$$\mathcal{A}(t) = \lambda N(t)$$

# Fission nucléaire

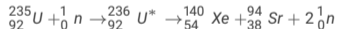


- Certains noyaux lourds et fragiles peuvent se casser en deux fragments
- Réaction exo-énergétique pour  $A \gtrsim 100$
- Mais déformation initiale = barrière de fission

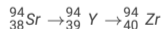
$$E_{\text{barriere}} = 19.0 - 0.36 \frac{Z^2}{A} + \epsilon \text{ MeV}$$

avec  $\epsilon = 0$  pour  $Z$  pair  $A - Z$  pair,  $\epsilon = 0.4$  pour pair/impair et  $\epsilon = 0.7$  pour impair/impair

- Fission spontanée très rare (probabilité  $\simeq 10^{-6}$  par désintégration pour  $^{238}\text{U}$ )
- Un neutron se liant à un noyau peut provoquer une fission : **calculs pour  $^{238}\text{U}$  et  $^{235}\text{U}$**
- Plusieurs centaines de réactions possibles. Exemple :

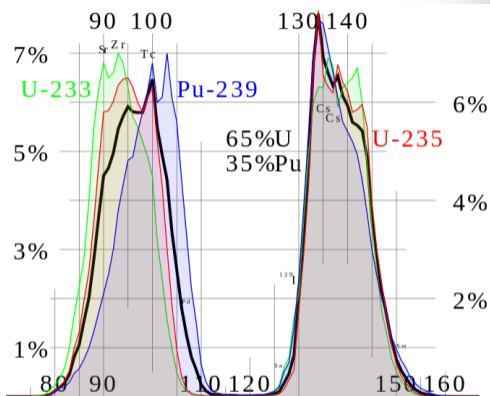
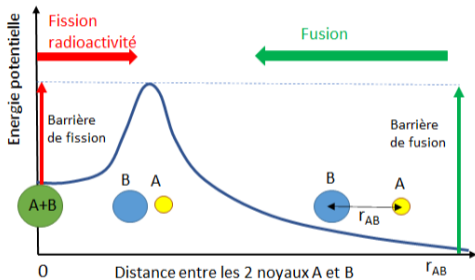


- Produits de fission radioactifs :



- **Calcul de l'énergie de fission** :  $^{140}_{58}\text{Ce} = 139.905446 \text{ u}$  et  $^{94}_{40}\text{Zr} = 93.906313 \text{ u}$
- **Deux à trois neutrons libres** : possibilité d'entretien des fissions (**réaction en chaîne**).  
Energie des neutrons  $\simeq 2 \text{ MeV}$

# Fission nucléaire



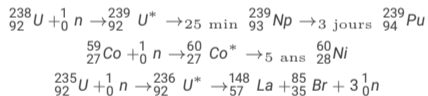


# Bases de neutronique

# Neutronique



- Neutronique : étude du cheminement des neutrons dans la matière et des réactions induites
- Réaction nucléaire : interaction entre particule-projectile et noyau-cible
- Pour un neutron traversant un bloc de matière :
  - Fuite
  - Interaction
    - Diffusion : le neutron « rebondit » (en perdant de l'énergie)
    - Absorption :  ${}^A_Z X + {}^1_0 n \rightarrow {}^{A+1}_Z X^*$  ;  
noyau excité (émission  $\gamma$ ),  
souvent radioactif (phénomène d'activation),  
ou provoque une fission :



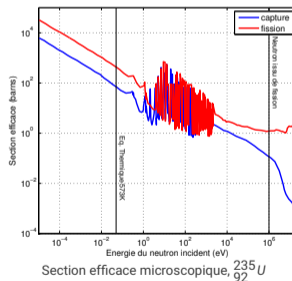
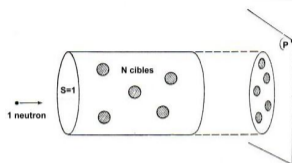


# Section efficace microscopique

- Section efficace microscopique  $\sigma$  : « surface effective du noyau vue par un neutron »
- **Physique classique** : cible de rayon  $r$ ,  $\sigma = \pi r^2$
- Avec  $n$  cibles projetées sur une surface  $S$ , probabilité d'interaction pour un neutron traversant  $S$  normalement :

$$\frac{n\sigma}{S}$$

- **Physique nucléaire** : se mesure en *barns*, 1 barn =  $10^{-24}$  cm<sup>2</sup>
- Dépend du noyau cible, de la réaction et de l'énergie du neutron incident
- Comportement générique : décroissance en  $1/v$
- Deux domaines d'intérêt :
  - $E \simeq 2$  MeV : énergie moyenne des neutrons émis par fission (**neutrons rapides**)
  - $E \simeq 50$  meV : énergie des neutrons en équilibre thermique avec la matière à 300°C (neutrons thermiques)
- Possibles résonances



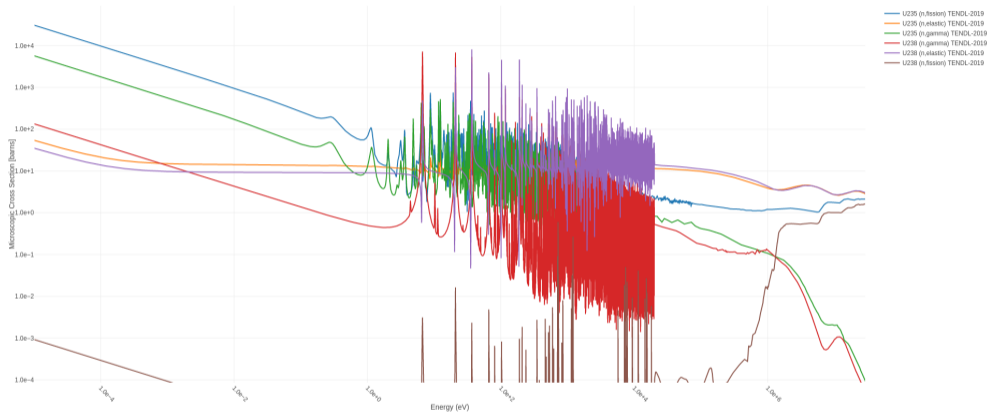
## Quelques valeurs de section efficace microscopique



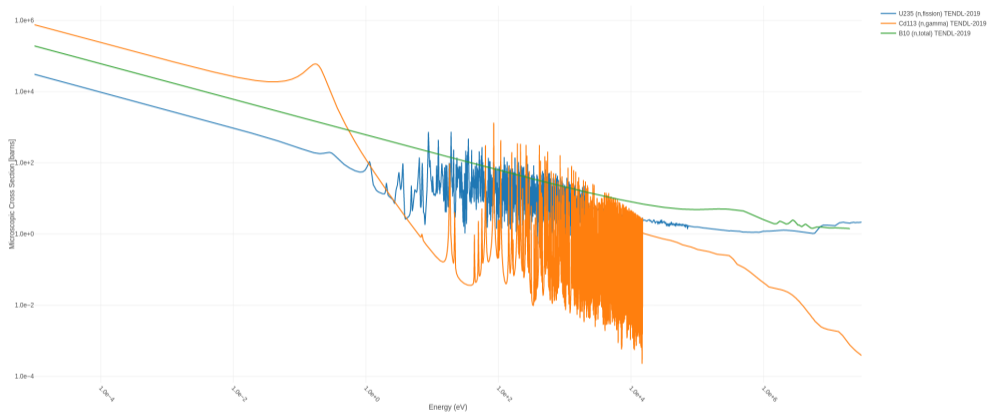
	$\sigma_a$ (barns) thermiques (25.3 meV)	$\sigma_a$ (barns) rapides (2 MeV)	$\sigma_f$ (barns) thermiques (25.3 meV)	$\nu$ nbre neutrons réémis	$\sigma_f$ (barns) rapides (2 MeV)	$\nu$ nbre neutrons réémis	$\sigma_s$ (barns) thermiques (25.3 meV)	$\sigma_s$ (barns) rapides (2 MeV)
$^{235}\text{U}$	681	1.37	582	2.47	1.27	2.46	13.8	3.5
$^{238}\text{U}$	2.7	0.7	0	0	0.52	2.88	8.9	4
$^{239}\text{Pu}$	1011	2.0	742	2.91	1.9	2.88	7.7	3.9
$^1\text{H}$	0.322						30.3	2
$^2\text{H}$	0.0005						4.3	
$^{10}\text{B}$	3840						4.5	
$^{12}\text{C}$	0.0034						4.9	
$^{16}\text{O}$	0.0002						3.8	

**Table** – Sections efficaces microscopiques pour différents processus (s : scattering, a : absorption, f : fission) sur différents noyaux, avec des neutrons de différentes énergies.

# Sections efficaces de l'Uranium



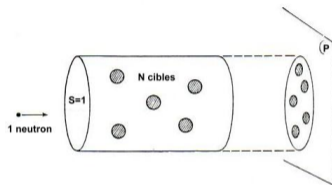
# Sections efficaces Bore, Cadmium, Uranium



## Section efficace macroscopique

- Donne la probabilité d'interaction par unité de distance parcourue  $dx$ . Avec  $N$  noyaux par unité de volume :

$$NSdx \frac{\sigma}{S} = N\sigma dx = \Sigma dx$$



- Section efficace macroscopique  $\Sigma$  en  $\text{cm}^{-1}$ . On note  $Q(x)$  la probabilité de *non-interaction* sur le trajet  $x$ . Alors :

$$Q(x + dx) = Q(x) \times (1 - \Sigma dx)$$

$$Q(x) = \exp(-\Sigma x)$$

- On note  $p(x)dx$  la densité de probabilité que la *première* interaction ait lieu en  $x$  à  $dx$  près :

$$p(x)dx = Q(x)\Sigma dx = \Sigma \exp(-\Sigma x) dx$$

- Libre parcours moyen :

$$\lambda = \langle x \rangle = \int_0^{\infty} xp(x)dx = \frac{1}{\Sigma}$$



# Taux de réaction

- Les sections efficaces microscopiques de processus indépendants s'ajoutent

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a = \sigma_s + \sigma_f + \sigma_c$$

- Les sections efficaces macroscopiques se combinent

$$\Sigma = \Sigma_1 + \Sigma_2 = N_1\sigma_1 + N_2\sigma_2$$

- Section efficace totale = somme des sections efficaces partielles (permet calcul de la section efficace d'un mélange de noyaux, du taux de réaction total)
  - Calculer le libre parcours moyen dans de l'eau pour des neutrons thermiques
  - Calculer le libre parcours moyen dans de l' $UO_2$  naturel, puis enrichi à 3.5% en  $^{235}U$ , en neutrons thermiques et rapides (densité  $\rho = 10.6 \text{ g.cm}^{-3}$ )
- Taux de réaction : avec  $n$  neutrons par unité de volume, de vitesse  $v$ , chaque neutron parcourt  $dx = vdt$  pendant  $dt$ . Le nombre d'interactions par unité de volume pendant  $dt$ , i.e. le **taux de réaction** est :

$$R = nv\Sigma$$

- On pose  $nv = \phi$  le flux neutronique. Donc :

$$R = \Sigma\phi$$

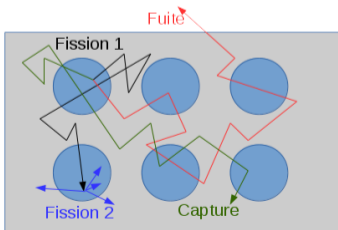


# Condition de criticité

- Facteur de multiplication  $k$  : nombre de neutrons produits par unité de temps / nombre de neutrons « disparaissant » par unité de temps (fuite + absorptions) :

$$k = \frac{\nu R_f}{R_a + F}$$

- Si  $k > 1$  (**sur-critique**) : le flux de neutrons et donc le taux de fission augmentent
- Si  $k = 1$  (**critique**) : le flux de neutrons et donc le taux de fission sont constants
- Si  $k < 1$  (**sous-critique**) : le flux de neutrons et donc le taux de fission diminuent



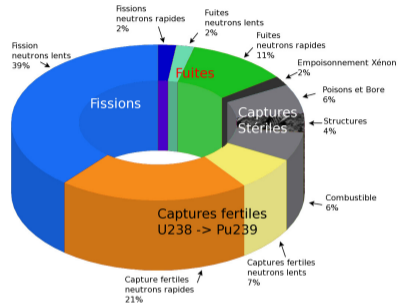
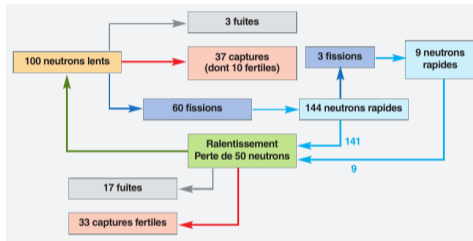
- Naïvement (milieu homogène infini, spectre monocinétique) :

$$k_{\infty} = \frac{\nu \Sigma_f}{\Sigma_a}$$

- Deux voies possibles pour un réacteur :
  - **neutrons rapides** (2 MeV) : réactions utiles favorisées, transmutations des actinides, possibilité de surgénération.  
**Mais faibles sections efficaces microscopiques : combustible fortement enrichi**
  - **neutrons lents** (0.1 eV) : plus d'interactions, possibilité d'employer un combustible peu ou pas enrichi  
**Nécessité d'un modérateur** (ralentisseur de neutron), **risque d'absorptions stériles pendant le ralentissement**



# Bilan neutronique en Réacteur à Eau sous Pression



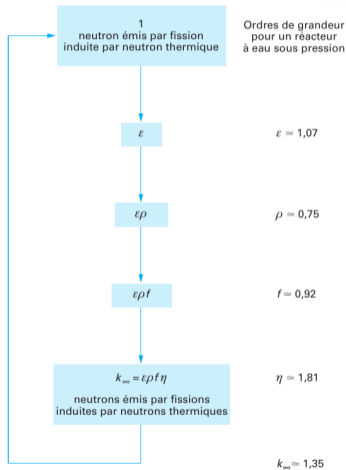
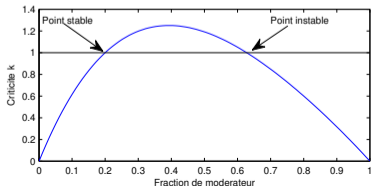


# Formule des 4 facteurs

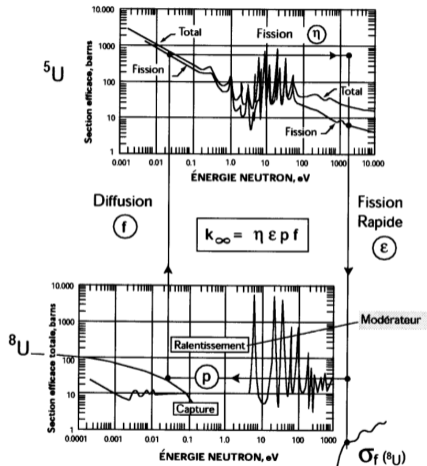
- Réacteurs à neutrons *thermiques* :  $k_{\infty}$  en produit de 4 facteurs :

$$k_{\infty} = \epsilon p f \eta$$

- $\epsilon$  : facteur de fission rapide
  - $p$  : facteur *antitrappe*, probabilité pour le neutron rapide d'atteindre le domaine thermique sans être absorbé
  - $f$  : facteur *d'utilisation thermique*, probabilité que le neutron thermique soit absorbé *par le combustible*
  - $\eta$  : facteur *de reproduction*, nombre de neutrons émis par fission pour une absorption dans le combustible
- $\eta$  augmente avec l'enrichissement
  - $f$  décroît avec le rapport de modération
  - $p$  croît avec le rapport de modération
  - Optimum de modération



# Les 4 facteurs sur leur cycle



# Cinétique des réacteurs



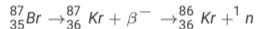
- **Réactivité** (en « pour cent mille » pcm) :

$$\rho = \frac{k - 1}{k}$$

- **Temps caractéristique** d'une génération (temps moyen qui sépare une fission de la fission suivante) :  $l$ . Lié au libre parcours moyen et à vitesse des neutrons. Ordre de grandeur en REP :

$$l \simeq 2 \times 10^{-5} \text{ s}$$

- Mais présence de **neutrons retardés**. Quelques produits de fission libèrent des neutrons. Exemple :



- Proportion de neutrons *retardés*  $\beta$  : 1 « dollar » (\$). Pour  ${}^{235}\text{U}$ ,  $\beta \simeq 680 \text{ pcm}$  ( $\simeq 0.7\%$ ). Pour  ${}^{239}\text{Pu}$ ,  $\beta \simeq 225 \text{ pcm}$
- Temps de vie moyen des précurseurs de neutrons retardés :  $\bar{\tau}$ . Ordre de grandeur en REP :

$$\bar{\tau} \simeq 11.3 \text{ s}$$

- **Temps effectif** d'une génération, *avec neutrons retardés* :

$$l_{\text{eff}} = l + \beta \bar{\tau}$$

Ordre de grandeur en REP :

$$l_{\text{eff}} \simeq 0.077 \text{ s}$$

- Evolution du nombre de neutrons en fonction du temps :

$$\text{si } \rho < \beta : n(t) = n_0 \exp\left(\frac{\rho}{l_{\text{eff}}} t\right)$$

$$\text{si } \rho > \beta : n(t) = n_0 \exp\left(\frac{\rho - \beta}{l} t\right)$$

# Equation de Boltzman, présentation qualitative

- **Equation de Boltzman** : bilan sur la densité de neutrons  $n$  ou le flux  $\phi = nv$ , fonctions de 7 variables

$$n(t, \vec{r}, \vec{v})$$

- Simplification : flux intégré sur les phases, monocinétique. Bilan sur volume infinitésimal :

variation pendant  $dt$  = neutrons produits par fission – neutrons absorbés – neutrons sortis par diffusion

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nu \Sigma_f \phi - \Sigma_a \phi - \nabla \cdot \vec{J}$$

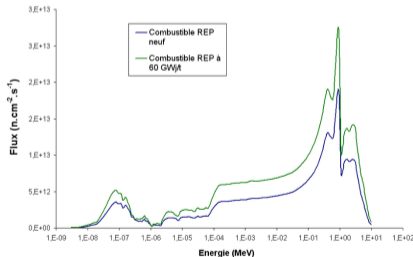
- Vecteur courant  $\vec{J}$ . Approximation de la diffusion, loi de Fick :

$$\vec{J} = -D \vec{\nabla} \phi$$

$$D = \frac{1}{3\Sigma_{tr}}$$

- Avec  $\Sigma_{tr}$  la section efficace de transport :

$$\Sigma_{tr} \simeq \Sigma_t - \frac{2}{3A} \Sigma_s$$





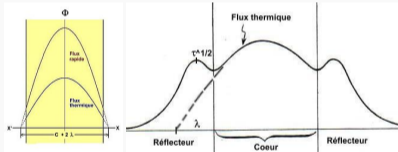
## Equation de Boltzman, présentation qualitative

- Equation de la diffusion, monocinétique :

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nu \Sigma_f \phi - \Sigma_a \phi + D \Delta \phi$$

- Conditions aux limites : continuité du flux et du courant aux interfaces, et pour un milieu extérieur absorbant, courant entrant nul :

$$J^- = -\frac{\partial \phi}{\partial n} = -\frac{1}{2D}$$



- Notion de taille critique : solution stationnaire ssi :

$$D \Delta \phi - \Sigma_a \phi + \nu \Sigma_f \phi = 0$$

$$D \Delta \phi + (k_\infty - 1) \Sigma_a \phi = 0$$

$$\frac{(k_\infty - 1) \Sigma_a}{D} = B^2 \text{ valeur propre du laplacien}$$

- Pour une sphère,  $B^2 = \frac{\pi^2}{R^2} \Rightarrow$  taille critique.