

Centrales nucléaires de production d'électricité.

1- Bases de physique



F. Ravelet

Laboratoire d'Ingénierie des Fluides et Systèmes Energétiques - Arts et Metiers Institute of Technology

25 octobre 2022

1 Introduction

- Quelques données
- Différentes filières
- Problématique

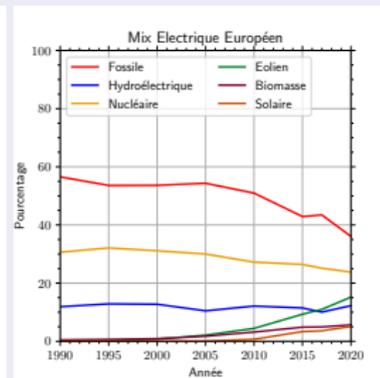
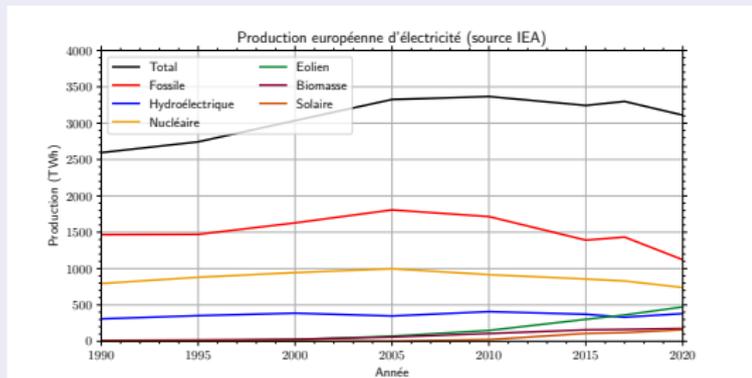
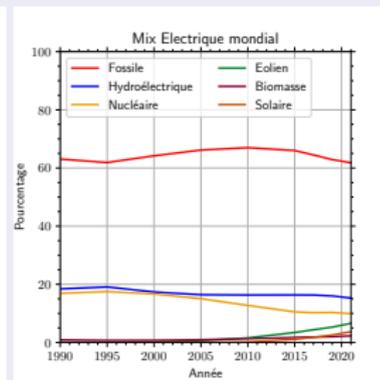
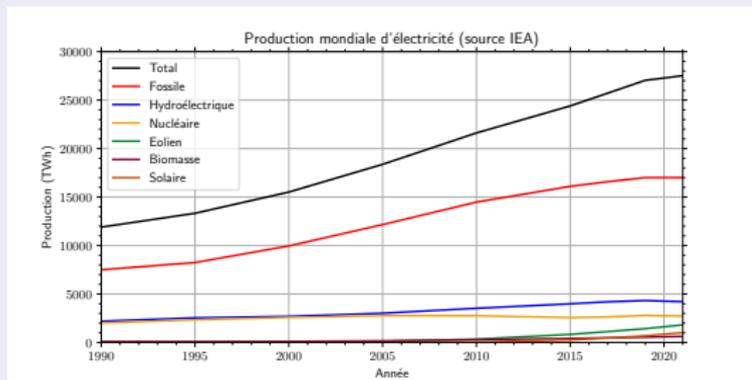
2 Bases de physique nucléaire

- Physique atomique
- Noyaux, éléments et isotopes
- Energie de liaison nucléaire
- Décroissance et radioactivité
- Fission nucléaire

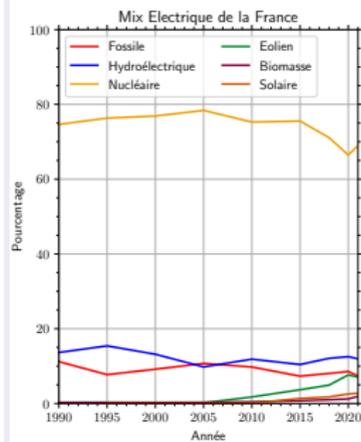
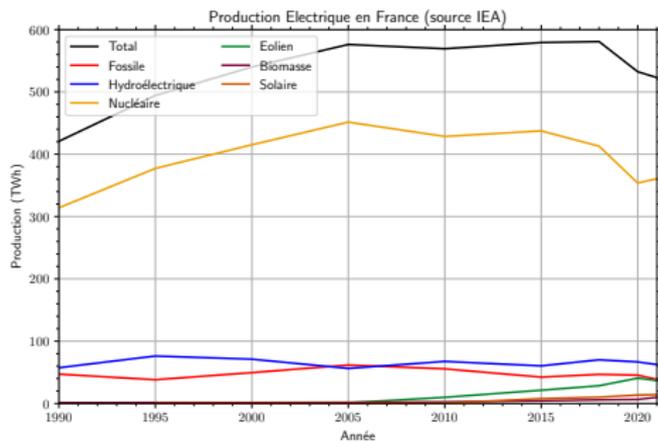
3 Bases de neutronique

- Sections efficaces, flux
- Réaction en chaîne, facteur de multiplication et criticité
- Cinétique
- Equation de Boltzman, taille critique

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



La part du nucléaire dans l'électricité en France



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

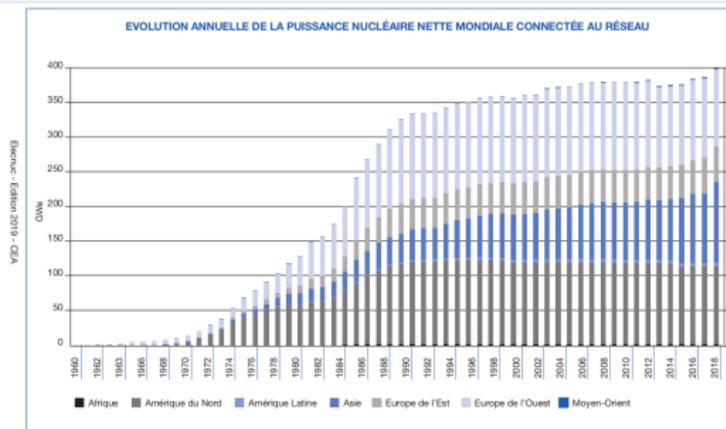
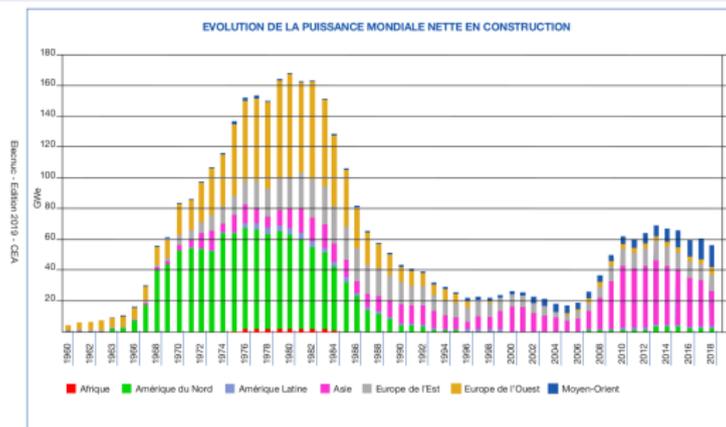
Pays	En marche (2022)			Construction (2022)		Arrêtés (1950-2022)	
	GWe	#	%	GWe	#	GWe	#
1. Etats-Unis	94.7	92	19.6	2.2	2	x	40
2. France	61.3	56	69.0	1.6	1	5.6	14
3. Chine (11è en 2010, 20è en 2000)	52.1	51	5.0	22.8	19	0	0
4. Japon	31.7	33	7.2 [†]	2.6	2	x	27
5. Russie	27.7	37	20.0	3.6	4	x	10
6. Corée du 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

% : 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)

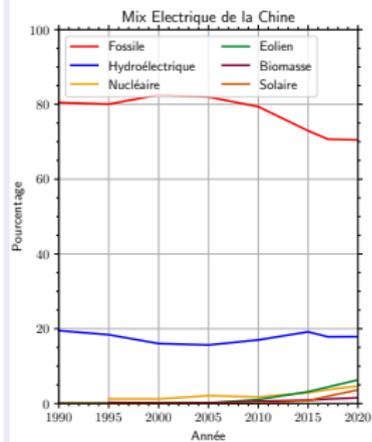
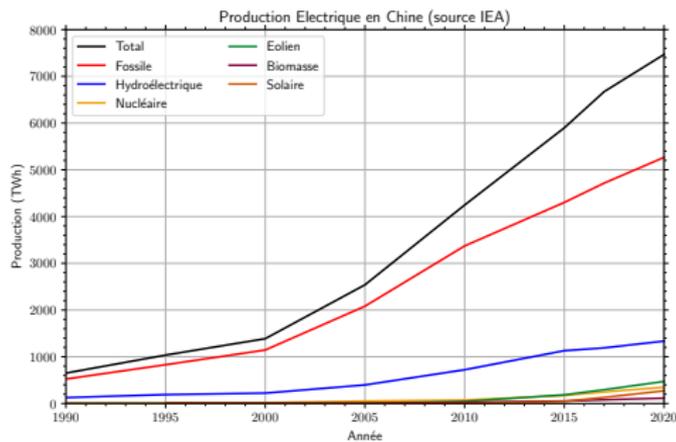
Faits marquants :

- En 2021-2022, 12 mises en service dont 6 en Chine et 2 au Emirats. Premiers réacteurs de Gén. III en 2018.
- 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

Historique du développement du nucléaire par région (source Elecnucl 2019, CEA)

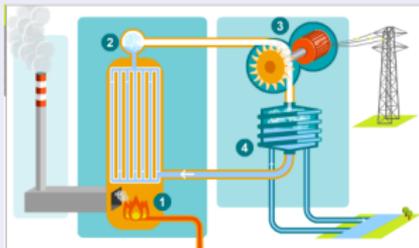


La part du nucléaire dans l'électricité en Chine



Centrale nucléaire de production d'électricité

- Une centrale électrique...



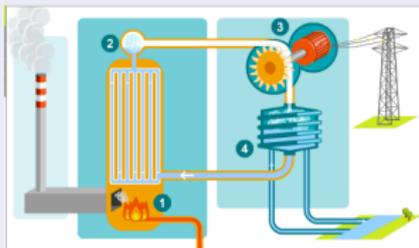
Centrale au charbon (Belgique)



Centrale nucléaire de Golfech (Tarn et Garonne)

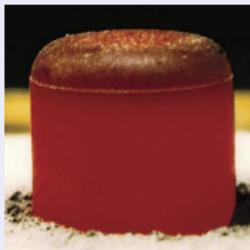
Centrale nucléaire de production d'électricité

- Une centrale électrique...



Centrale au charbon (Belgique)

- Avec une source chaude un peu particulière



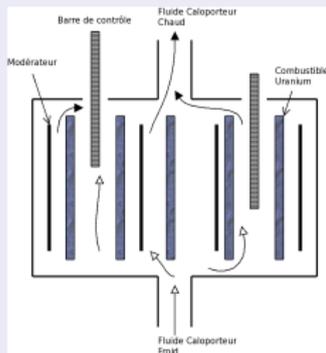
Lingot de Plutonium 238, rougeoyant sous l'effet de sa radioactivité naturelle



Centrale nucléaire de Golfech (Tarn et Garonne)

Notion de filière : combinaison Combustible / Caloporteur / Modérateur

Composants du cœur d'un réacteur nucléaire

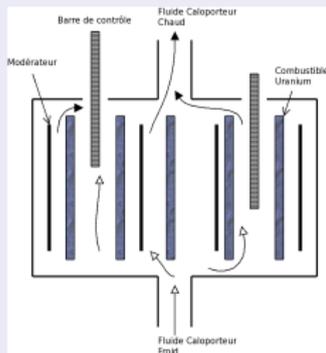


• « Combustible » (matières fissiles et fertiles)

- ▶ Uranium naturel (99.3% ^{238}U et 0.7% ^{235}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 $^{232}\text{Th} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{233}\text{U}$)

Notion de filière : combinaison Combustible / Caloporteur / Modérateur

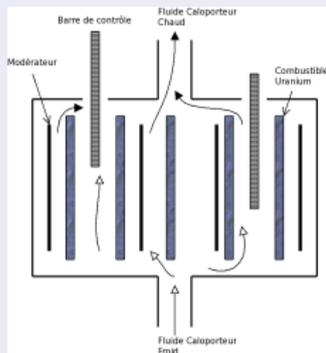
Composants du cœur d'un réacteur nucléaire



- « **Combustible** » (matières fissiles et fertiles)
 - ▶ Uranium naturel (99.3% ^{238}U et 0.7% ^{235}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

Notion de filière : combinaison Combustible / Caloporteur / Modérateur

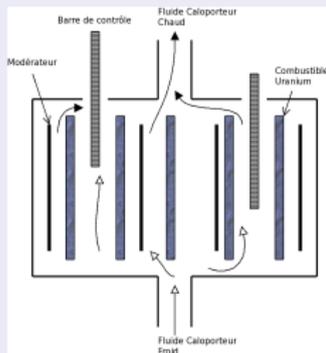
Composants du cœur d'un réacteur nucléaire



- « **Combustible** » (matières fissiles et fertiles)
 - ▶ Uranium naturel (99.3% ^{238}U et 0.7% ^{235}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)

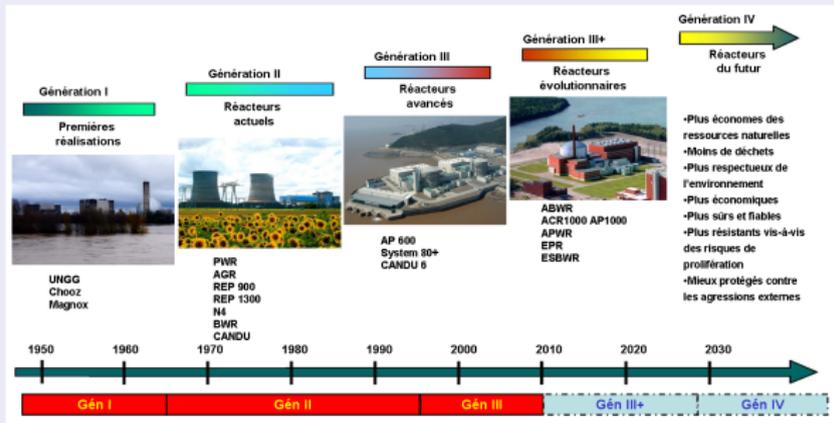
Notion de filière : combinaison Combustible / Caloporteur / Modérateur

Composants du cœur d'un réacteur nucléaire



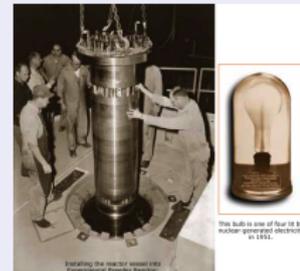
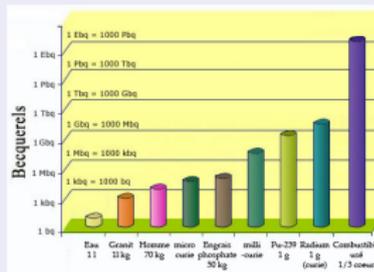
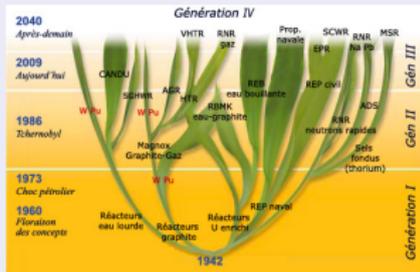
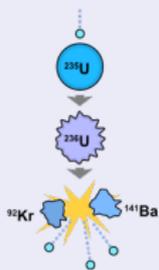
- « **Combustible** » (matières fissiles et fertiles)
 - ▶ Uranium naturel (99.3% ^{238}U et 0.7% ^{235}U)
 - ▶ Uranium enrichi ($^{235}\text{U} \geq 3\%$)
 - ▶ Plutonium (Artificiel : $^{238}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$)
 - ▶ Thorium (à convertir selon $^{232}\text{Th} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{233}\text{U}$)
- **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



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
CANDU	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
BWR	Uranium enrichi (3%)	Eau	Eau bouillante	61.8	61	2.6	2	30.6	52
PWR	Uranium enrichi (3%)	Eau	Eau liquide	293.7	307	54.2	50	43	65
FBR	Uranium/Plutonium $\geq 10\%$		Sodium liquide ou Plomb	1.4	2	1.9	4	1.9	8
Total				393.6	437	60.8	59	99.0	204

Problématique : concevoir un réacteur nucléaire



- 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 CO_2 mais des déchets, épuisement de $^{235}\text{U} \Rightarrow$ Filières du futur ?

1 Introduction

- Quelques données
- Différentes filières
- Problématique

2 Bases de physique nucléaire

- Physique atomique
- Noyaux, éléments et isotopes
- Energie de liaison nucléaire
- Décroissance et radioactivité
- Fission nucléaire

3 Bases de neutronique

- Sections efficaces, flux
- Réaction en chaîne, facteur de multiplication et criticité
- Cinétique
- Equation de Boltzman, taille critique

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
- Mendeleïev (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 »

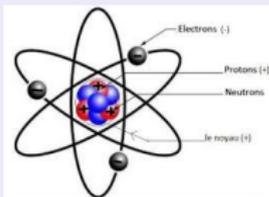


Tableau périodique des éléments chimiques

1	2											13	14	15	16	17	18									
1	2											13	14	15	16	17	18									
1 1 H 1,00784																		2 2 He 4,00260								
2 3 Li 6,941	4 4 Be 9,0121831											5 5 B 10,811	6 6 C 12,0107	7 7 N 14,00643	8 8 O 15,99903	9 9 F 18,998403	10 10 Ne 20,1797									
3 11 Na 22,98976928	12 12 Mg 24,304											13 13 Al 26,9815385	14 14 Si 28,0855	15 15 P 30,973761998	16 16 S 32,065	17 17 Cl 35,453	18 18 Ar 39,948									
4 19 K 39,0983	20 20 Ca 40,078	21 21 Sc	22 22 Ti	23 23 V	24 24 Cr	25 25 Mn	26 26 Fe	27 27 Co	28 28 Ni	29 29 Cu	30 30 Zn	31 31 Ga	32 32 Ge	33 33 As	34 34 Se	35 35 Br	36 36 Kr									
5 37 Rb 85,47	38 38 Sr 87,62	39 39 Y	40 40 Zr	41 41 Nb	42 42 Mo	43 43 Tc	44 44 Ru	45 45 Rh	46 46 Pd	47 47 Ag	48 48 Cd	49 49 In	50 50 Sn	51 51 Sb	52 52 Te	53 53 I	54 54 Xe									
6 55 Cs 132,905	56 56 Ba 137,327	Lanthanides 57-71										72 72 Hf	73 73 Ta	74 74 W	75 75 Re	76 76 Os	77 77 Ir	78 78 Pt	79 79 Au	80 80 Hg	81 81 Tl	82 82 Pb	83 83 Bi	84 84 Po	85 85 At	86 86 Rn
7 87 Fr [223]	88 88 Ra [226]	Actinides 89-103										104 104 Rf	105 105 Db	106 106 Sg	107 107 Bh	108 108 Hs	109 109 Mt	110 110 Ds	111 111 Rg	112 112 Cn	113 113 Nh	114 114 Fl	115 115 Mc	116 116 Lv	117 117 Ts	118 118 Og
			104 104 La	105 105 Ce	106 106 Pr	107 107 Nd	108 108 Pm	109 109 Sm	110 110 Eu	111 111 Gd	112 112 Tb	113 113 Dy	114 114 Ho	115 115 Er	116 116 Tm	117 117 Yb	118 118 Lu									
			89 89 Ac	90 90 Th	91 91 Pa	92 92 U	93 93 Np	94 94 Pu	95 95 Am	96 96 Cm	97 97 Bk	98 98 Cf	99 99 Es	100 100 Fm	101 101 Md	102 102 No	103 103 Lr									

--- nom de l'élément (ex. **Hydrogène** en **solide** à 0°C et 101,3 kPa)
 --- numéro atomique
 --- symbole chimique
 * masse atomique relative (ou celle de l'isotope le plus stable) (IUPAC "Atomic Weights 2013" + rev. 2015)

Métaux : Alcalins, Alcalino-terreux, Lanthanides, Actinides, Métaux de transition, Métaux pauvres, Métaux
Non métaux : Autres non-métaux, Halogènes, Gaz nobles, Non classés

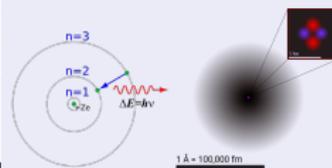
[] : données estimées
 [] : données théoriques
 [] : données expérimentales

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**)

Charge électron	$-e$	-1.6×10^{-19} C
Unité pratique : l'électronvolt	eV	1.6×10^{-19} J
Masse électron	m_e	9.109×10^{-31} kg
Masse proton	m_p	1.672×10^{-27} kg
Permittivité du vide	ϵ_0	8.854×10^{-12} F.m ⁻¹
Constante de Planck	h	6.626×10^{-34} J.s



• 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 λ (n un entier) :

$$2\pi a = n\lambda = \frac{nh}{m_e v}$$

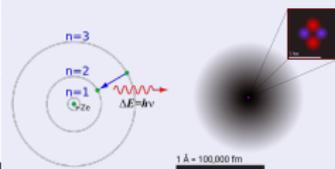
$$\frac{m_e v^2}{a} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 a^2}$$

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

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

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

Charge électron	$-e$	$-1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
Unité pratique : l'électronvolt	eV	$1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$
Masse électron	m_e	$9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Masse proton	m_p	$1.672 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Permittivité du vide	ϵ_0	$8.854 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$
Constante de Planck	h	$6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$



• 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 λ (n un entier) :

$$2\pi a = n\lambda = \frac{nh}{m_e v}$$

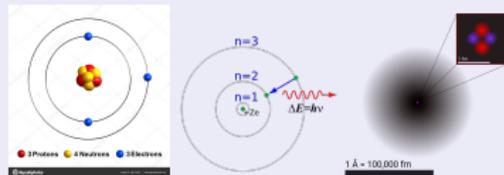
$$\frac{m_e v^2}{a} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 a^2}$$

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

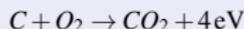
- ▶ Energie de l'électron (cinétique + potentielle) :

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

Charge électron	$-e$	$-1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
Unité pratique : l'électronvolt	eV	$1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$
Masse électron	m_e	$9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Masse proton	m_p	$1.672 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Permittivité du vide	ϵ_0	$8.854 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$
Constante de Planck	h	$6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$



- 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 » $\simeq \text{eV}$



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 λ (n un entier) :

$$2\pi a = n\lambda = \frac{nh}{m_e v}$$

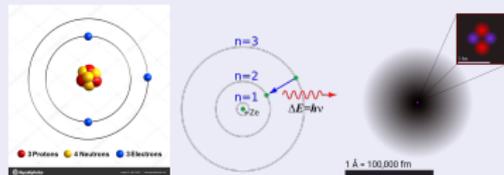
$$\frac{m_e v^2}{a} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 a^2}$$

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

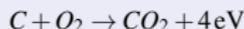
- ▶ Energie de l'électron (cinétique + potentielle) :

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

Charge électron	$-e$	$-1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
Unité pratique : l'électronvolt	eV	$1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$
Masse électron	m_e	$9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Masse proton	m_p	$1.672 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Permittivité du vide	ϵ_0	$8.854 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$
Constante de Planck	h	$6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$



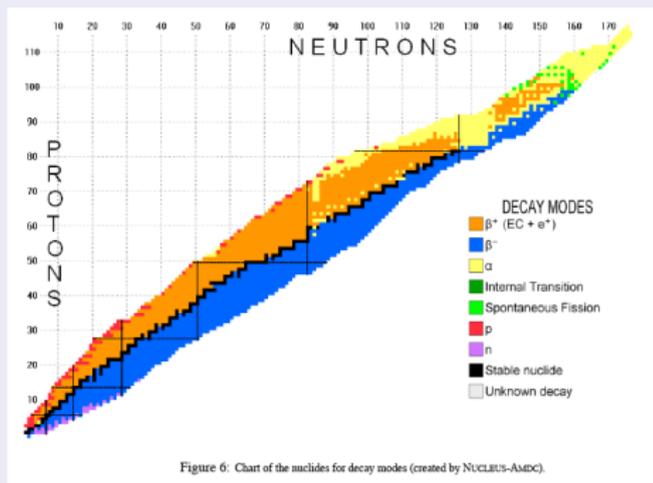
- **Dimension des atomes** : de $100 \times 10^{-12} \text{ m}$ (hydrogène) à $600 \times 10^{-12} \text{ m}$ (césium)
- **Dimension des noyaux** : de $1 \times 10^{-15} \text{ m}$ à $16 \times 10^{-15} \text{ m}$
- **Energies « chimiques »** $\simeq \text{eV}$



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 $1/4 \text{ } ^{37}\text{Cl}$)
- ▶ Il existe des atomes de masses atomiques différentes chimiquement indiscernables (Découverte rapportée par Soddy en 1913 en étudiant la radioactivité)



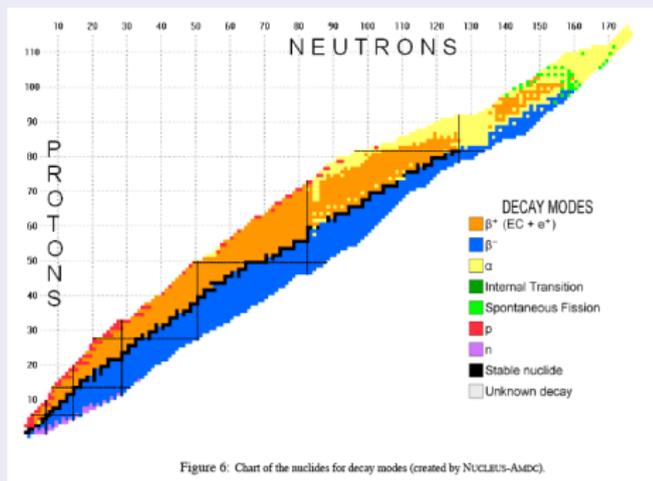
Constitution des noyaux

● 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 $1/4 \text{ }^{37}\text{Cl}$)
- ▶ 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**
- ▶ Deux noyaux de même Z et de A différents = **isotopes**
- ▶ Nombre d'isotopes observés à l'état naturel : 2 à 3 par élément
- ▶ Existence d'une « vallée de stabilité »



Constitution des noyaux

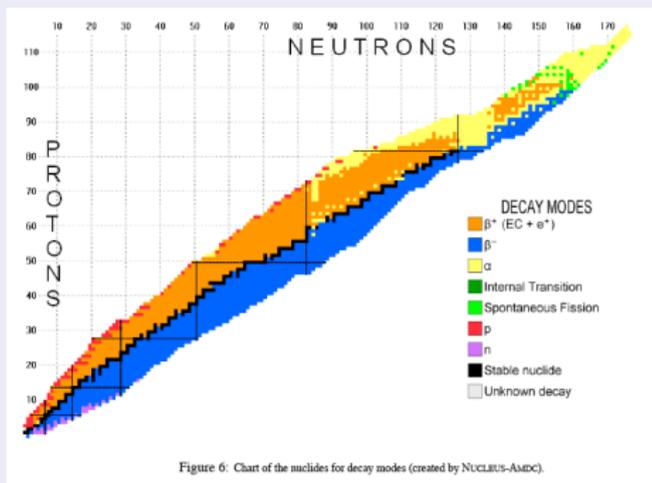
● Constats :

- ▶ 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 $1/4 \text{ }^{37}\text{Cl}$)
- ▶ 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**
- ▶ Deux noyaux de même Z et de A différents = **isotopes**
- ▶ Nombre d'isotopes observés à l'état naturel : 2 à 3 par élément
- ▶ Existence d'une « vallée de stabilité »

- protons et neutrons **liés par interaction forte**
- force à **très courte portée** (fm) et **très intense** (1000× électromagnétique)

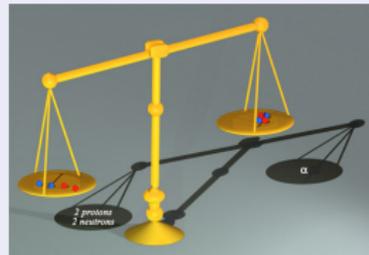


Energie de masse $E = m_0c^2$: une forme d'énergie potentielle

⇒ Energie de liaison : énergie à fournir pour briser une liaison.

⇒ Lien entre défaut de masse et énergie de liaison :

- Masse du proton : $m_p = 938.3 \text{ MeV}\cdot\text{c}^{-2}$
- Masse du neutron : $m_n = 939.6 \text{ MeV}\cdot\text{c}^{-2}$
- Masse de l'électron : $m_e = 511 \text{ keV}\cdot\text{c}^{-2}$
- Masse du noyau d'Hélium ${}^4_2\text{He}$ (particule α) : $m_\alpha = 3727.4 \text{ MeV}\cdot\text{c}^{-2}$



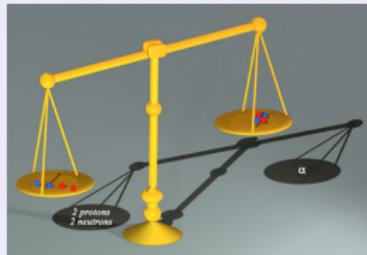
Energie de liaison

Energie de masse $E = m_0c^2$: une forme d'énergie potentielle

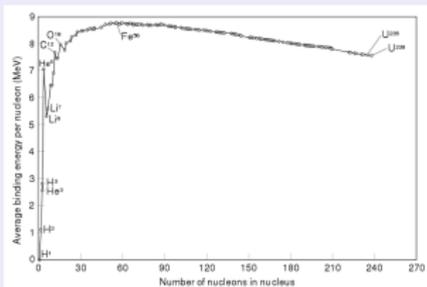
⇒ Energie de liaison : énergie à fournir pour briser une liaison.

⇒ Lien entre défaut de masse et énergie de liaison :

- Masse du proton : $m_p = 938.3 \text{ MeV}\cdot\text{c}^{-2}$
- Masse du neutron : $m_n = 939.6 \text{ MeV}\cdot\text{c}^{-2}$
- Masse de l'électron : $m_e = 511 \text{ keV}\cdot\text{c}^{-2}$
- Masse du noyau d'Hélium ${}^4_2\text{He}$ (particule α) : $m_\alpha = 3727.4 \text{ MeV}\cdot\text{c}^{-2}$



Modèle de la goutte



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

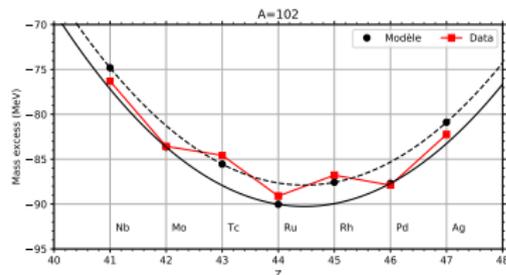
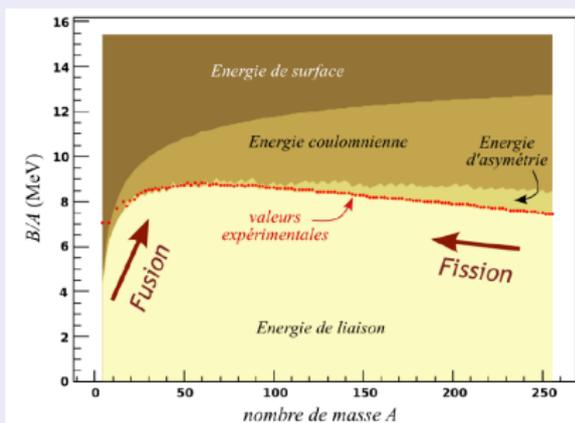
- 1 $a_v A$: terme de *volume* (liaison aux voisins)
- 2 $a_s A^{2/3}$: terme de *surface* (moins de voisins en surface)
- 3 $a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}}$: terme *coulombien* (répulsion entre protons)
- 4 $a_a \frac{(A - 2Z)^2}{A}$: terme d'*asymétrie* (effet quantique lié au spin 1/2 des nucléons)
- 5 $\delta \frac{a_p}{A^{1/2}}$: 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 :

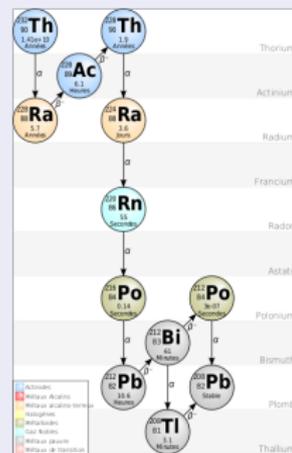
a_v	\mathcal{R}	15.4 Mev
a_s	\mathcal{R}	16.7 Mev
a_c	\mathcal{R}	0.7 Mev
a_a	\mathcal{R}	24 Mev
a_p	\mathcal{R}	12 Mev

- 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
- Par quel(s) processus un noyau instable regagne de la stabilité ?



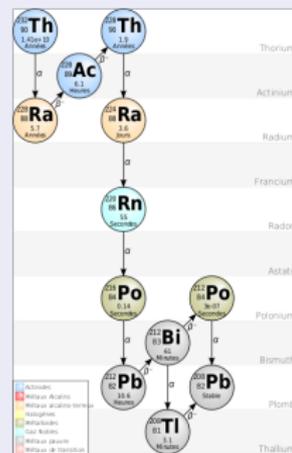
Principaux modes de désintégration

- ⇒ 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 :



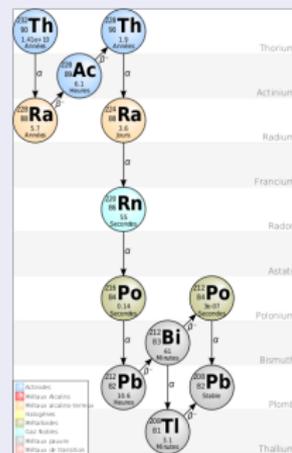
Principaux modes de désintégration

- ⇒ 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, ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + e^- + \bar{\nu}_e$
Energie typique 0.5 MeV (masse de l'électron)



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, ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + e^- + \bar{\nu}_e$
Energie typique 0.5 MeV (masse de l'électron)
 - ▶ **Mode α** : ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}_2^4He$
Energie typique 4/8 MeV, plutôt pour $A \gtrsim 209$



Principaux modes de désintégration

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

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

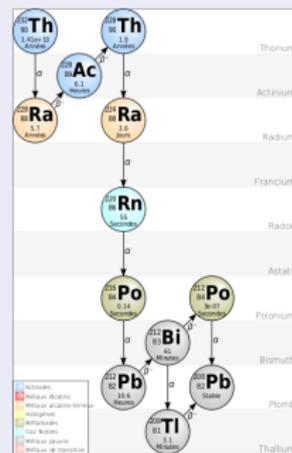
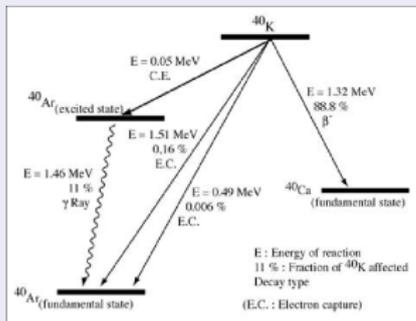
⇒ Il y a principalement deux modes :

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

⇒ Accompagnée ou non de rayons γ , seuil pour le mode β^+ , ...

⇒ Autres modes :

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



symbole	1_0n	1_1p	e^-	4_2He
masse	1.008665	1.007276	0.0005486	4.002603
symbole	${}^{211}_{86}Rn$	${}^{207}_{84}Po$	${}^{238}_{94}Pu$	${}^{234}_{92}U$
masse	210.990601	206.981593	238.049558	234.040950
symbole	${}^{235}_{92}U$	${}^{236}_{92}U$	${}^{238}_{92}U$	${}^{239}_{92}U$
masse	235.043928	236.045566	238.050787	239.054292

Masses atomiques au repos, dans l'état fondamental, en unité de masse atomique : $1u = 931.494 \text{ MeV} \cdot c^{-2}$. Données issues de l'Atomic Mass Data Center (<https://www.nds.iaea.org/amdc/>); il existe même une application pour smartphone...

Exercices : radioactivité α et β

- Comparer la masse d'un neutron à la masse d'un proton et d'un électron. Le neutron est-il stable ?
- Calculer l'énergie de cette désintégration
- On note c la vitesse de la lumière dans le vide. L'expression de l'énergie cinétique E_k d'une particule de masse au repos m_0 et de vitesse v est $E_k = m_0 c^2 (\gamma - 1)$ Avec le facteur relativiste
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
- Calculer la vitesse maximale des électrons émis par désintégration du neutron
- ${}^{211}_{86}Rn$ se désintègre par radioactivité α . L'énergie cinétique totale des éléments émis peut prendre pour valeurs 5.966 MeV, plus rarement 5.898 MeV et encore plus rarement d'autres valeurs
- Ecrire l'équation de la réaction, identifier le noyau formé
- Calculer l'énergie dégagée si le noyau fils est dans son état fondamental
- Que se passe-t-il dans le deuxième cas ? (rappel : $E = h\nu$ avec $h \simeq 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ la constante de Planck).

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

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 $\lambda = \text{cte}$:

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

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 $N_0/2$:

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

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 $N_0/2$:

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

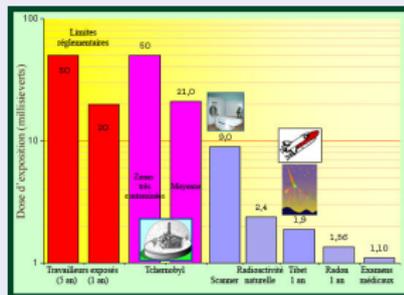
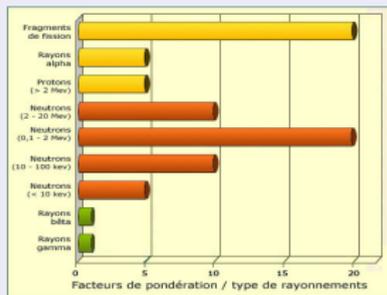
- Grande variabilité de T : de quelques ms à plusieurs milliards d'années.

- ▶ polonium 218 : 3.10 minutes
- ▶ radon 222 : 3.82 jours
- ▶ radium 226 : 1591 ans
- ▶ carbone 14 : 5730 ans
- ▶ potassium 40 : 1.25×10^9 ans
- ▶ uranium 238 : 4.5×10^9 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 ⁻¹	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 ⁴⁰K)
- 1 kg de minerai d'uranium : 25 × 10⁶ Bq
- 1 g de ²²⁶Ra : 37 × 10⁹ Bq
- 1 kg de déchets nucléaires de haute activité (vieux de 50 ans), vitrifiés : 10 × 10¹² Bq
- combustible usé déchargé d'un réacteur par an (23 tonnes) : 10 × 10¹⁸ Bq



UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATIONS

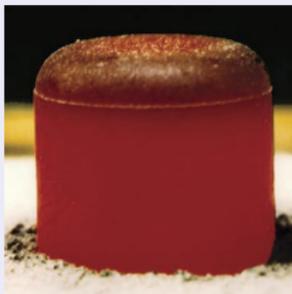
au delà de 10 Sv	très fortes doses
2 Sv à 10 Sv	fortes doses
200 mSv à 2000 mSv (2 Sv)	doses moyennes
20 à 200 mSv	faibles doses
0 à 20 mSv	très faibles doses

© OMBF 2014

Activité d'un échantillon contenant N noyaux radioactifs de constante de désintégration λ :

$$A(t) = \lambda N(t)$$

Exercice : production d'énergie avec du plutonium 238



Le plutonium 238 (${}^{238}_{94}\text{Pu}$) est un émetteur α de période de demi-vie 87.75 ans

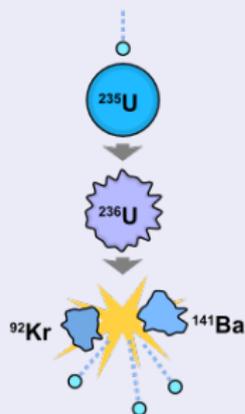
- 1 Compléter l'équation bilan de la décroissance α du ${}^{238}_{94}\text{Pu}$. Quel est le noyau formé ?
- 2 A partir de la table de masse, calculer l'énergie dégagée par une réaction de décroissance α du ${}^{238}_{94}\text{Pu}$, l'exprimer en MeV.
- 3 Donner la puissance dégagée par un kilogramme de plutonium 238 (en W.kg^{-1}).
- 4 En prenant pour le plutonium pur une densité de 19.8 g.cm^{-3} (c'est un métal très dense), donner la densité de puissance dégagée par un litre de plutonium 238 (en kW.L^{-1}).

Exercice : activité du radium 226

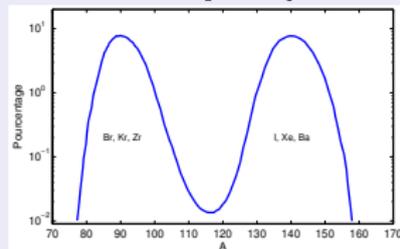
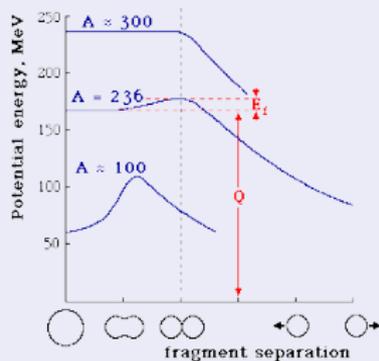
- 1 Combien reste-t-il aujourd'hui de masse de radium dans une crème de beauté préparée en 1932, qui contenait 0.25 mg de radium 226 (${}^{226}_{88}\text{Ra}$) ?
- 2 Quelle est son activité ?



Fission nucléaire



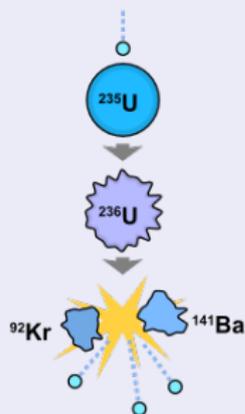
- Certains noyaux lourds et fragiles peuvent se casser en deux fragments
- Réaction exo-énergétique pour $A \gtrsim 100$



Distribution statistique des produits de fission pour



Fission nucléaire

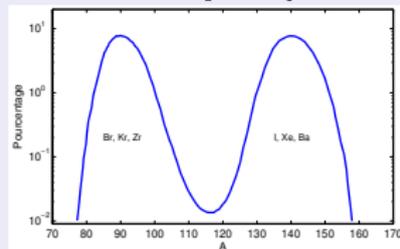
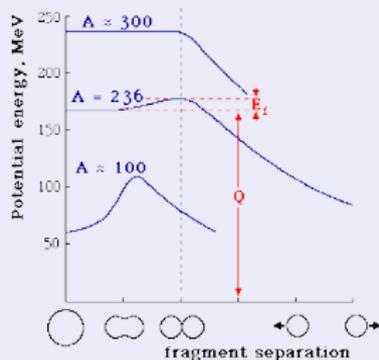


- Mais déformation initiale = barrière de fission

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

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

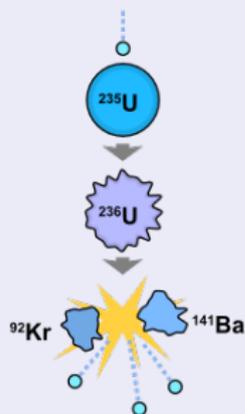
- Fission spontanée très rare (probabilité $\approx 10^{-6}$ par désintégration pour ^{238}U)



Distribution statistique des produits de fission pour

^{235}U .

Fission nucléaire

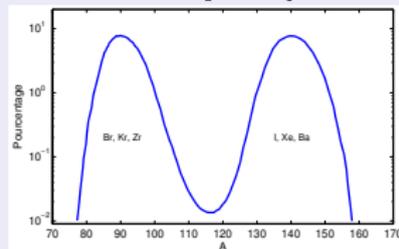
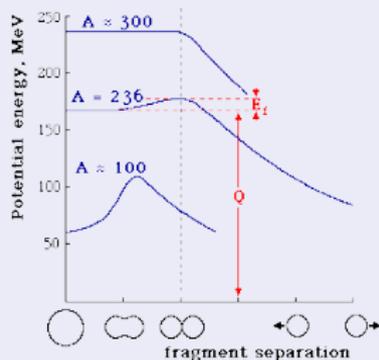


- Mais déformation initiale = barrière de fission

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

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

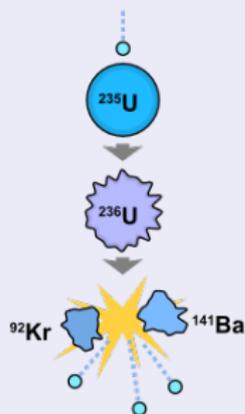
- Fission spontanée très rare (probabilité $\approx 10^{-6}$ par désintégration pour ^{238}U)
- Un neutron se liant à un noyau peut provoquer une fission : **calculs pour ^{238}U et ^{235}U**



Distribution statistique des produits de fission pour

^{235}U .

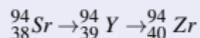
Fission nucléaire



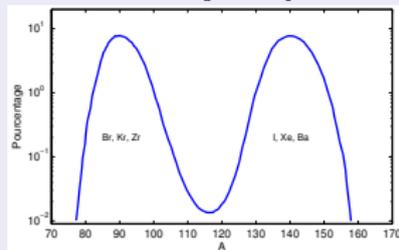
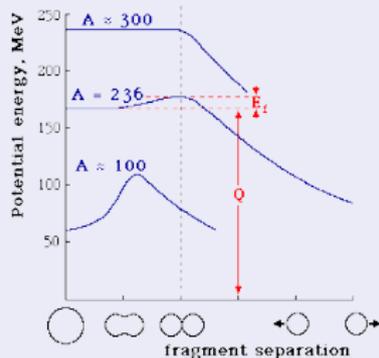
- Plusieurs centaines de réactions possibles. Exemple :



- Produits de fission radioactifs :



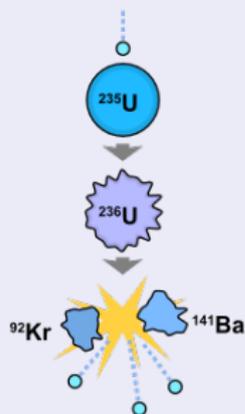
- Calcul de l'énergie de fission : $^{140}_{58}\text{Ce} = 139.905446 \text{ u}$
et $^{94}_{40}\text{Zr} = 93.906313 \text{ u}$



Distribution statistique des produits de fission pour



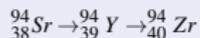
Fission nucléaire



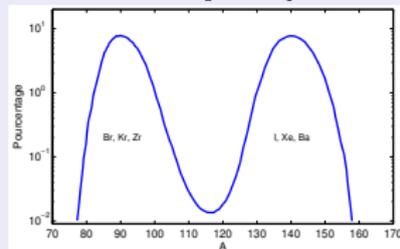
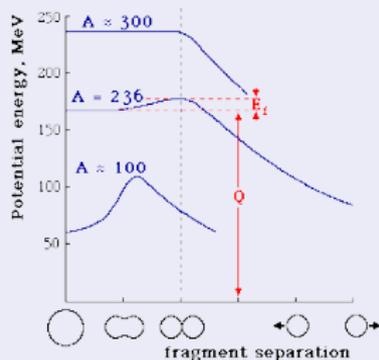
- Plusieurs centaines de réactions possibles. Exemple :



- 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 $\approx 2 \text{ MeV}$



Distribution statistique des produits de fission pour



1 Introduction

- Quelques données
- Différentes filières
- Problématique

2 Bases de physique nucléaire

- Physique atomique
- Noyaux, éléments et isotopes
- Energie de liaison nucléaire
- Décroissance et radioactivité
- Fission nucléaire

3 Bases de neutronique

- Sections efficaces, flux
- Réaction en chaîne, facteur de multiplication et criticité
- Cinétique
- Equation de Boltzman, taille critique

Neutronique

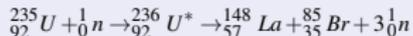
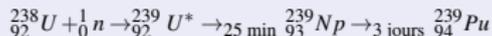
- Neutronique : étude du cheminement des neutrons dans la matière et des réactions induites
- Réaction nucléaire : interaction entre particule-projectile et noyau-cible
- Pour un neutron traversant un bloc de matière :

- ▶ Fuite

- ▶ Interaction

- ★ Diffusion : le neutron « rebondit » (en perdant de l'énergie)

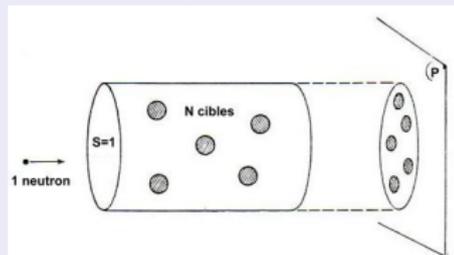
- ★ Absorption : ${}_Z^A X + {}_0^1 n \rightarrow {}_Z^{A+1} X^*$; noyau excité (émission γ), souvent radioactif (phénomène d'activation), ou provoque une fission :



Section efficace microscopique

- Section efficace microscopique σ : « 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 :

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

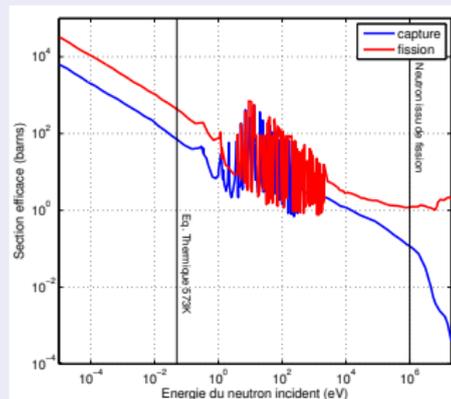


Section efficace microscopique

- Section efficace microscopique σ : « 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} cm²
- 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

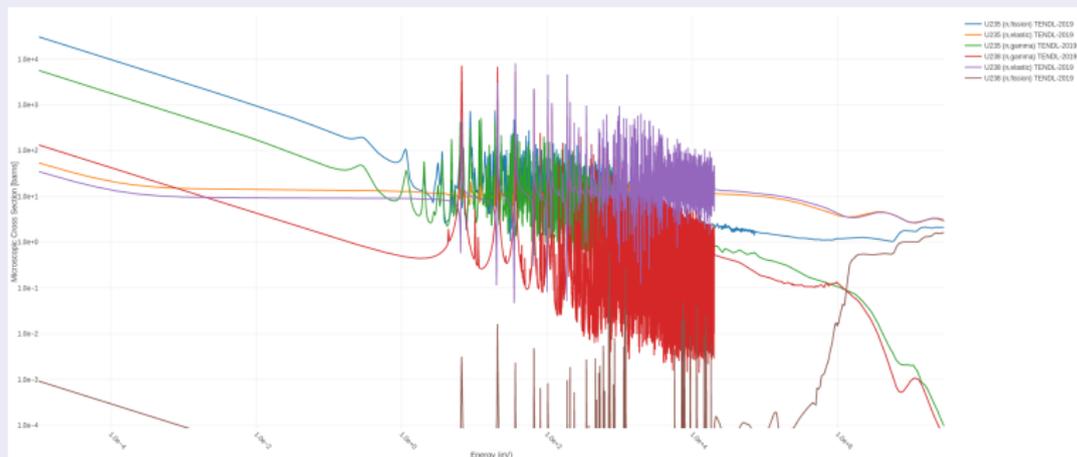


Section efficace microscopique, ${}_{92}^{235}\text{U}$

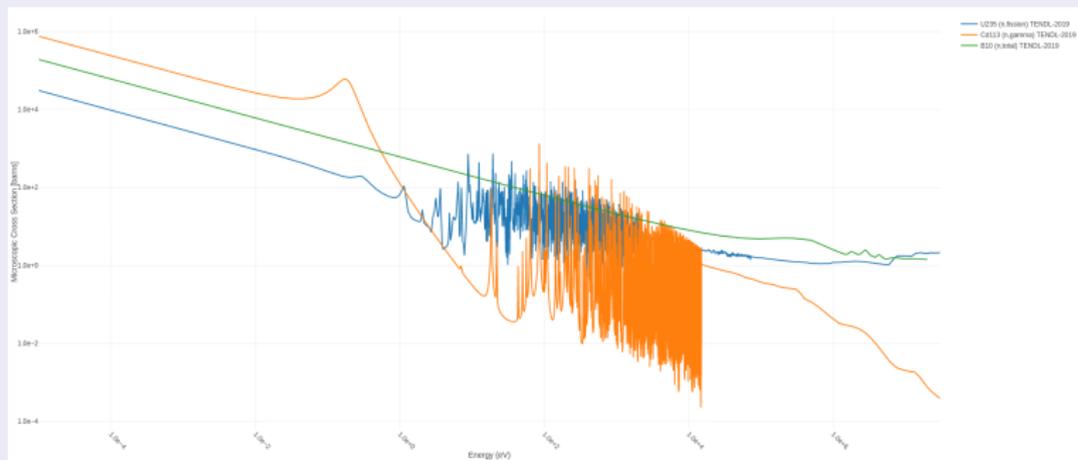
Quelques valeurs de section efficace microscopique

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

Sections efficaces de l'Uranium



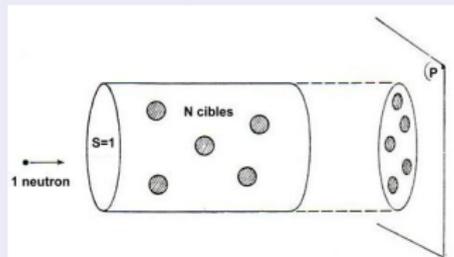
Sections efficaces Bore, Cadmium, Uranium



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 Σ en 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

- 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 :

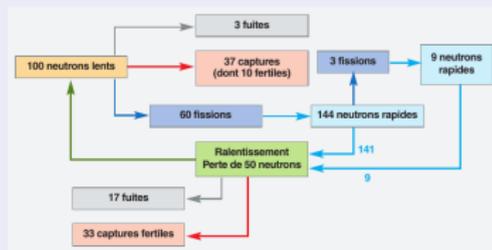
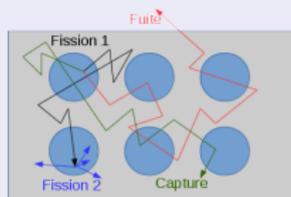
$$R = \Sigma\phi$$

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

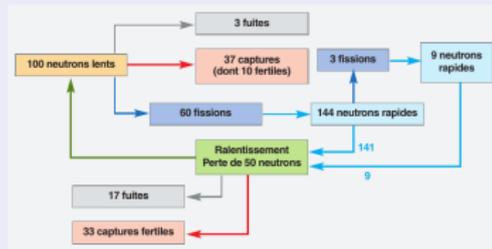
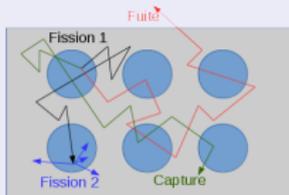


Condition de criticité

- 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) :

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

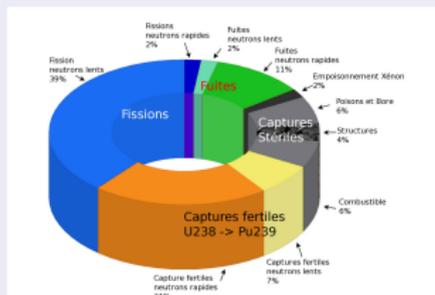
- Deux voies possibles pour un réacteur :

- ▶ **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**



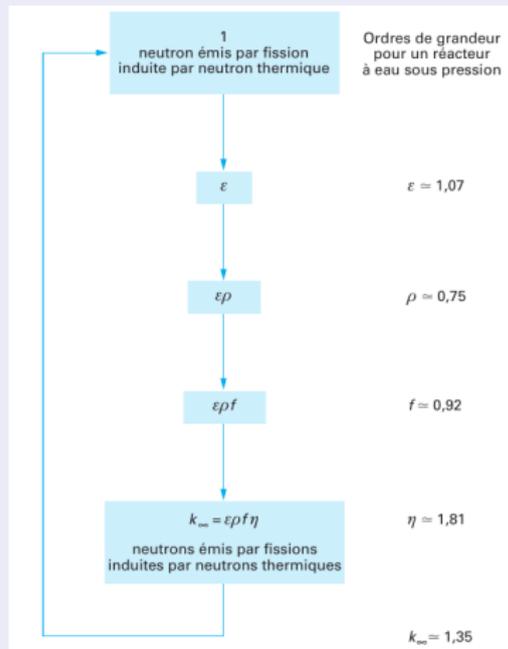
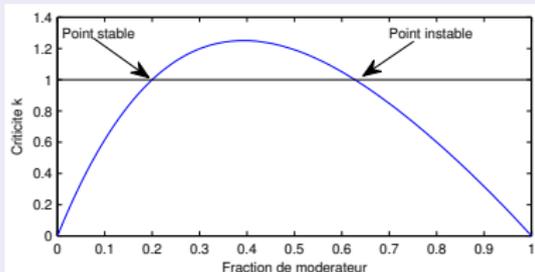
Formule des 4 facteurs

- Réacteurs à neutrons *thermiques* : k_{∞} en produit de 4 facteurs :

$$k_{\infty} = \varepsilon \rho f \eta$$

- ▶ ε : facteur de fission rapide
- ▶ ρ : 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*
- ▶ η : facteur *de reproduction*, nombre de neutrons émis par fission pour une absorption dans le combustible

- η augmente avec l'enrichissement
- f décroît avec le rapport de modération
- ρ croît avec le rapport de modération
- Optimum de modération



Cinétique des réacteurs

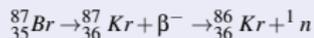
- **Réactivité** (en « pour cent mille » pcm) :

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

- **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* β : 1 « dollar » (\$). Pour ${}^{235}\text{U}$, $\beta \simeq 680$ pcm ($\simeq 0.7\%$)
- 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* :

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

Ordre de grandeur en REP :

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

- Evolution du nombre de neutrons en fonction du temps :

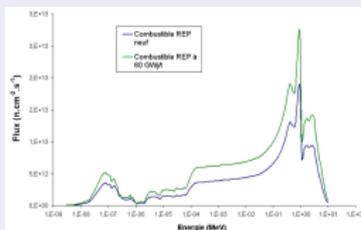
$$\text{si } \rho < \beta : n(t) = n_0 \exp\left(\frac{\rho}{l_{eff}} t\right)$$

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

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

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

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

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

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

- Avec Σ_{tr} la section efficace de transport :

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

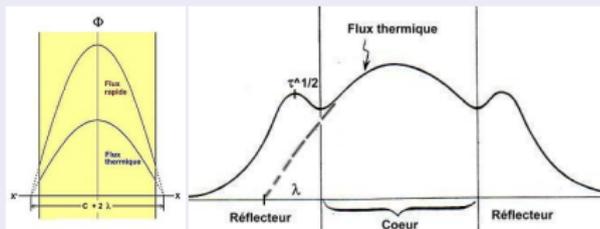
Equation de Boltzman, présentation qualitative

- Equation de la diffusion, monocinétique :

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

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

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



- Notion de taille critique : solution stationnaire ssi :

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

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

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

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