

Structure et stabilité des noyaux

Application de l'énergie nucléaire

Elias Khan

khan@ipno.in2p3.fr



Supports

- Fascicule dédié:
<http://ipnwww.in2p3.fr/Elias-KHAN>
- Le monde subatomique (L. Valentin) : chap 4
- Physique Nucléaire (Le Sech, Ngo) : chap 10
- www.laradioactivite.com
- <http://irfu.cea.fr/la-vallee-de-stabilite/>
- <http://www.cenbg.in2p3.fr/heberge/EcoleJoliotCurie/coursJC/Joliotcurie2006.pdf>

Une leçon particulière

- Pas (ou peu) de cours de physique nucléaire
 - Applications technologiques et sociétales
 - Elle ne s'intitule pas « énergies nucléaires »
-
- Nécessite une mise à niveau
 - Relier efficacement aux concepts académiques
 - Points physiques et non leçon de choses

Plan

- Structure du noyau atomique :
Interactions + structure en couches
- Stabilité et radioactivité
- Fission
- Fusion
- Résumé des points essentiels

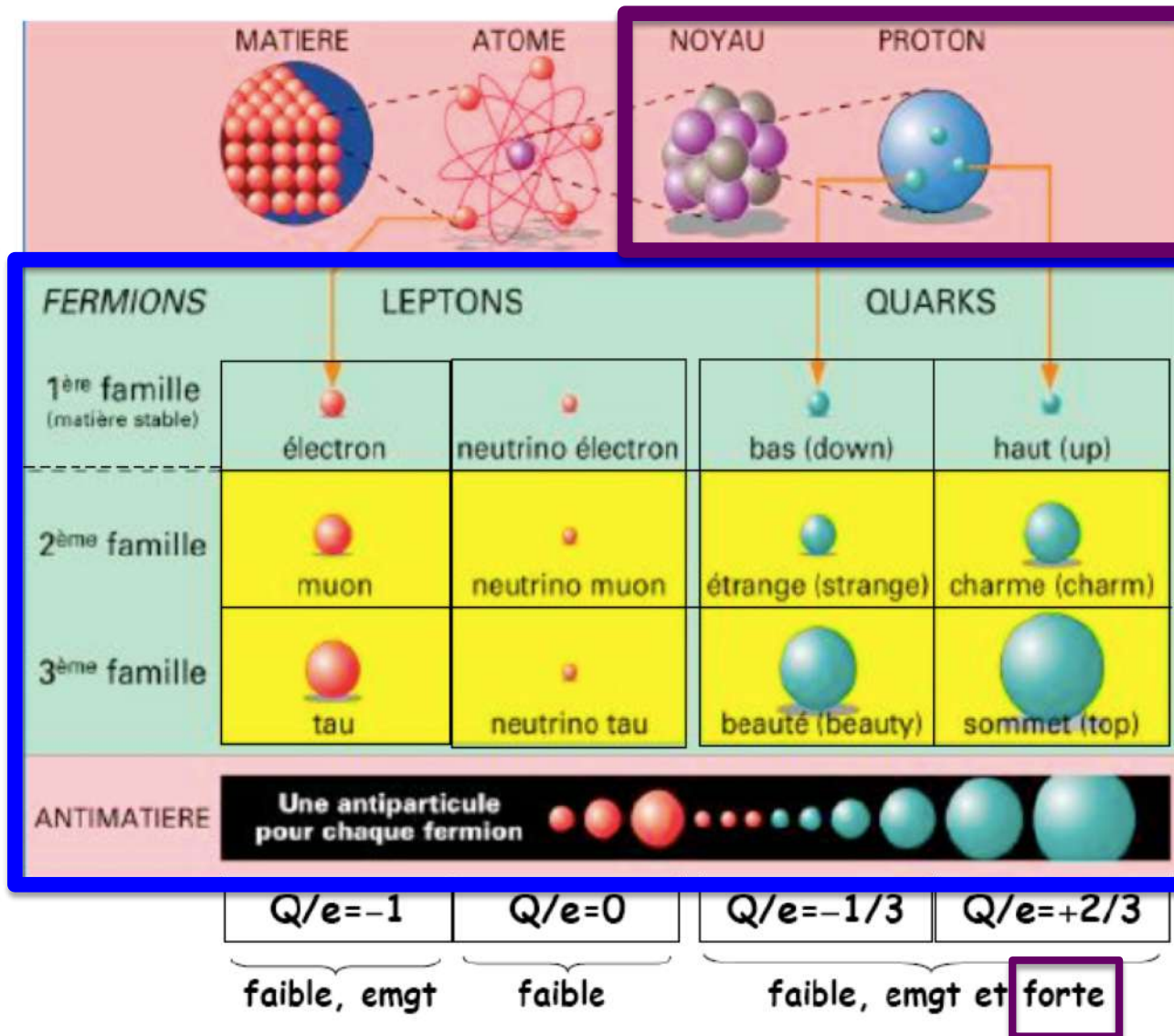
Première partie

Structure du noyau atomique

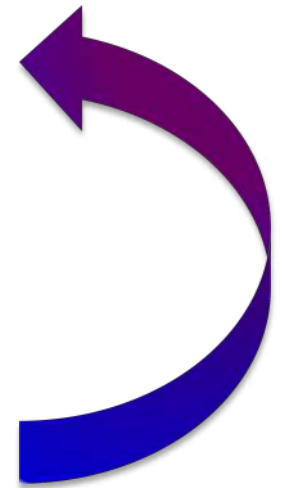
Les 4 interactions fondamentales

Nom	Intensité	Médiateur	Portée
Forte	1	8 gluons	1fm= 10^{-15} m
Electro-magnétique	10^{-2}	photon	infinie
Faible	10^{-6}	Z^0, W^+, W^-	Contact (10^{-18} m)
Gravitation	10^{-39}	Graviton ?	infinie

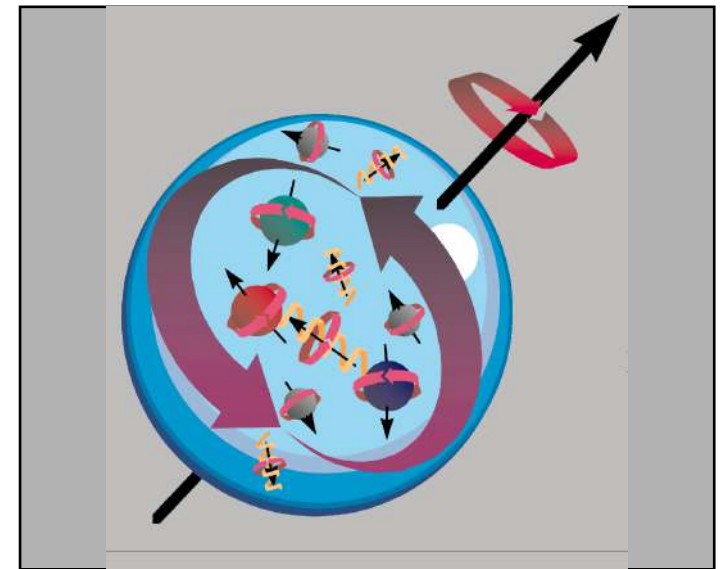
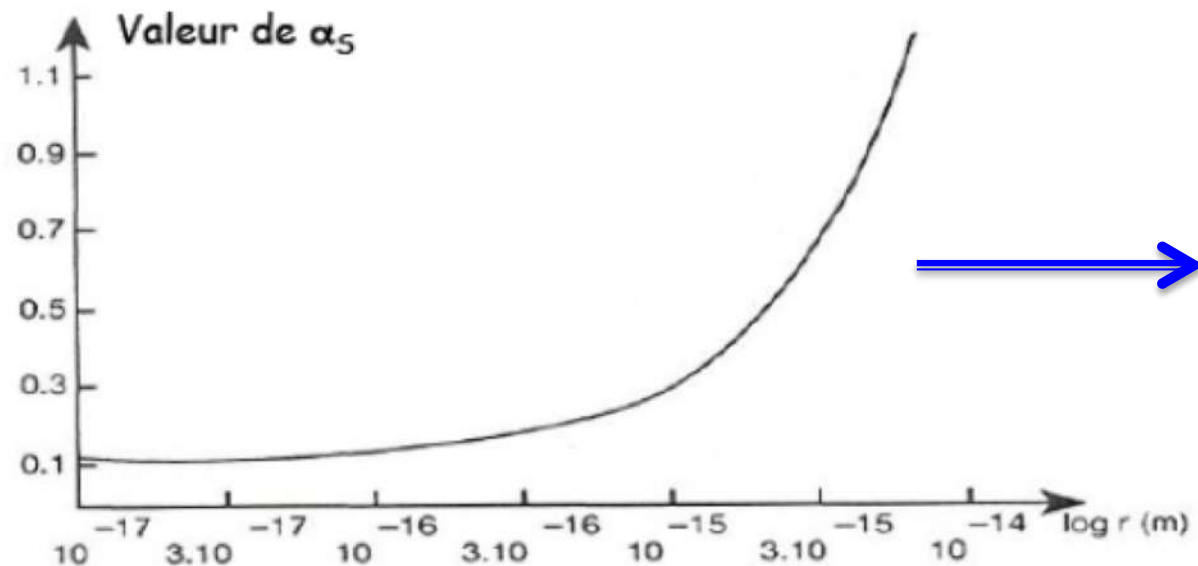
La structure primordiale de la matière



Complexe Élémentaire

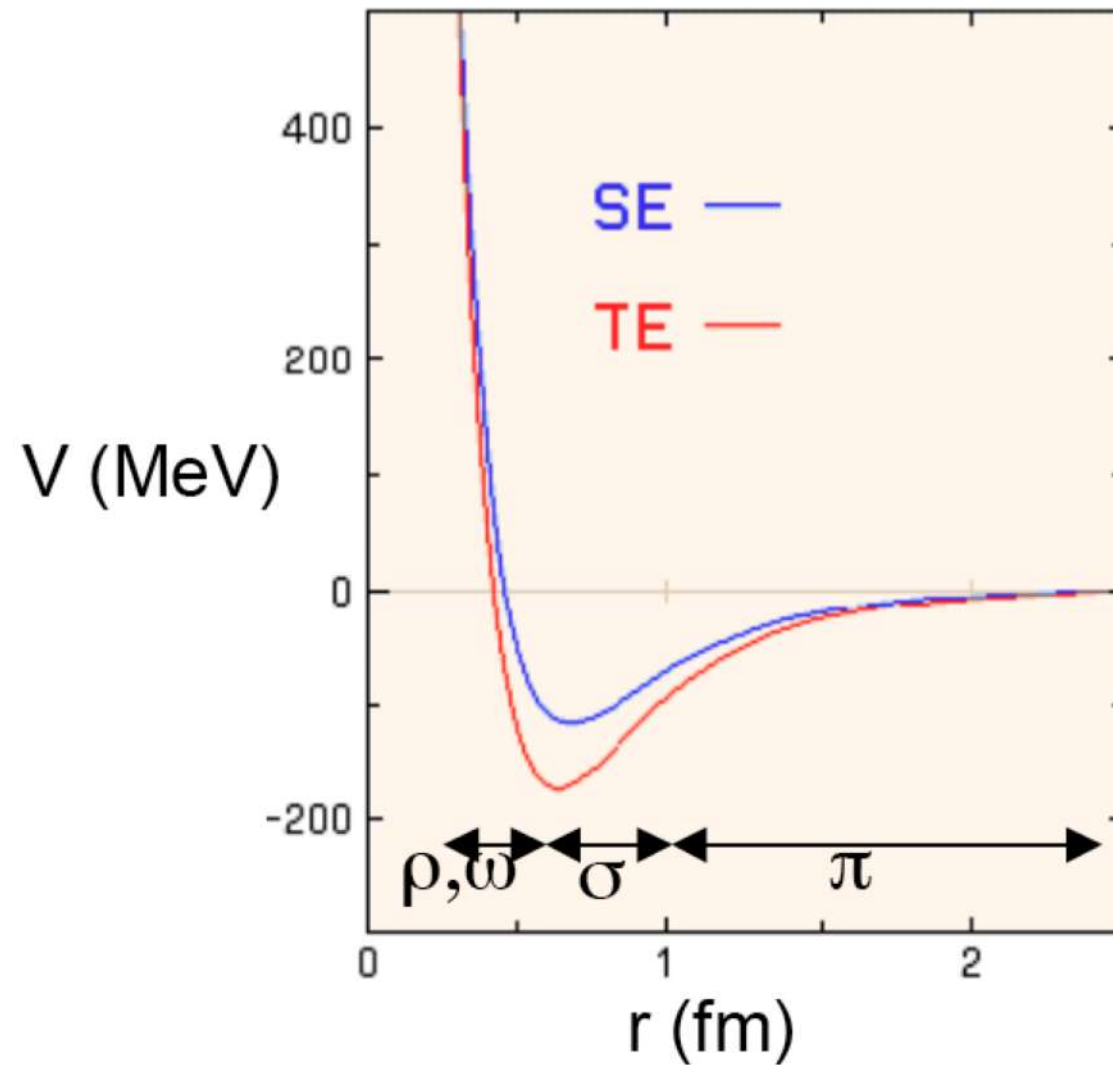


Le nucléon



98% de la masse du nucléon provient de la mer: q et g

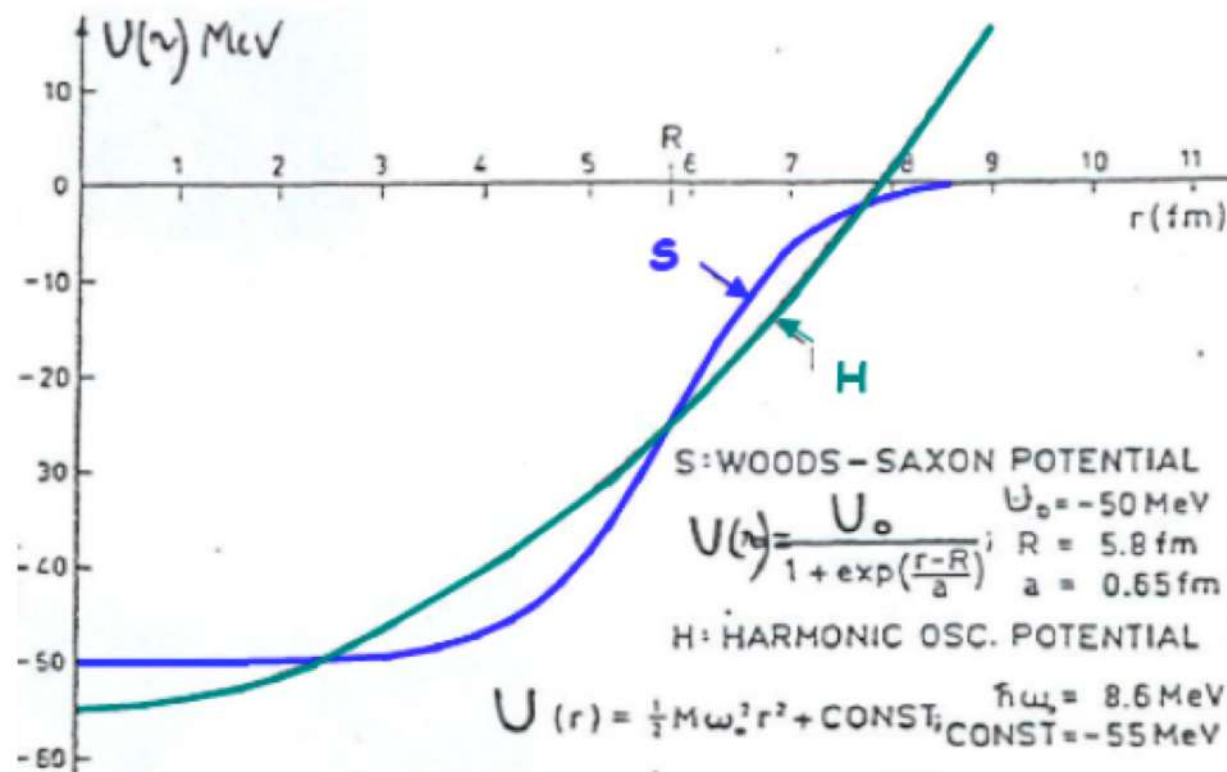
L'interaction nucléon-nucléon



Noyau=système à A corps

- Problème à N corps de nucléons
- Fermions liés -> structure en couche
- $L_{pm} \sim$ taille du noyau ($R=1,2\text{fm} \cdot A^{1/3}$) -> champ moyen OK
- Microscopique > Woods-Saxon > HO
- Spin-orbite important (\neq atomes)

Le champ moyen



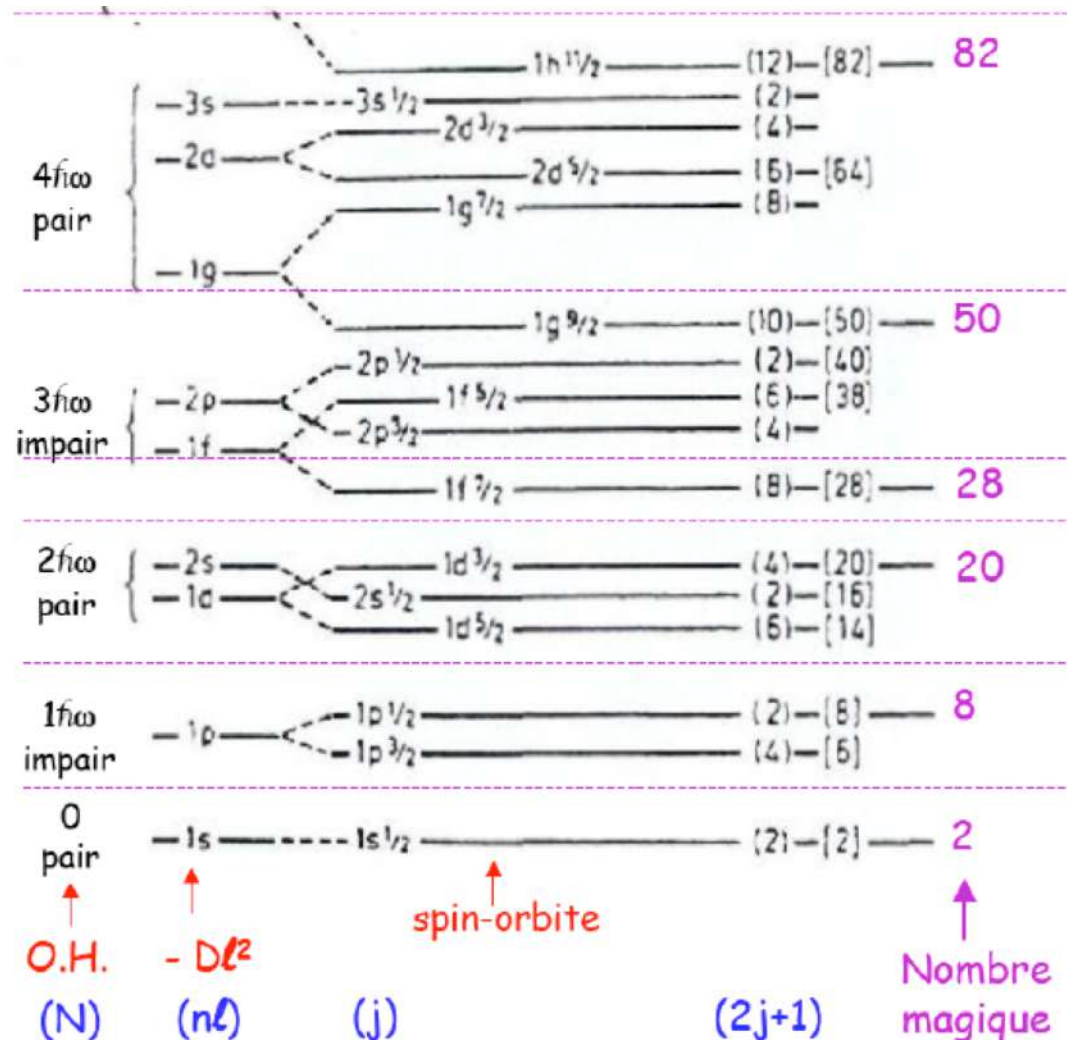
La structure en couches

N nbre quantique principal

n nbre quantique radial

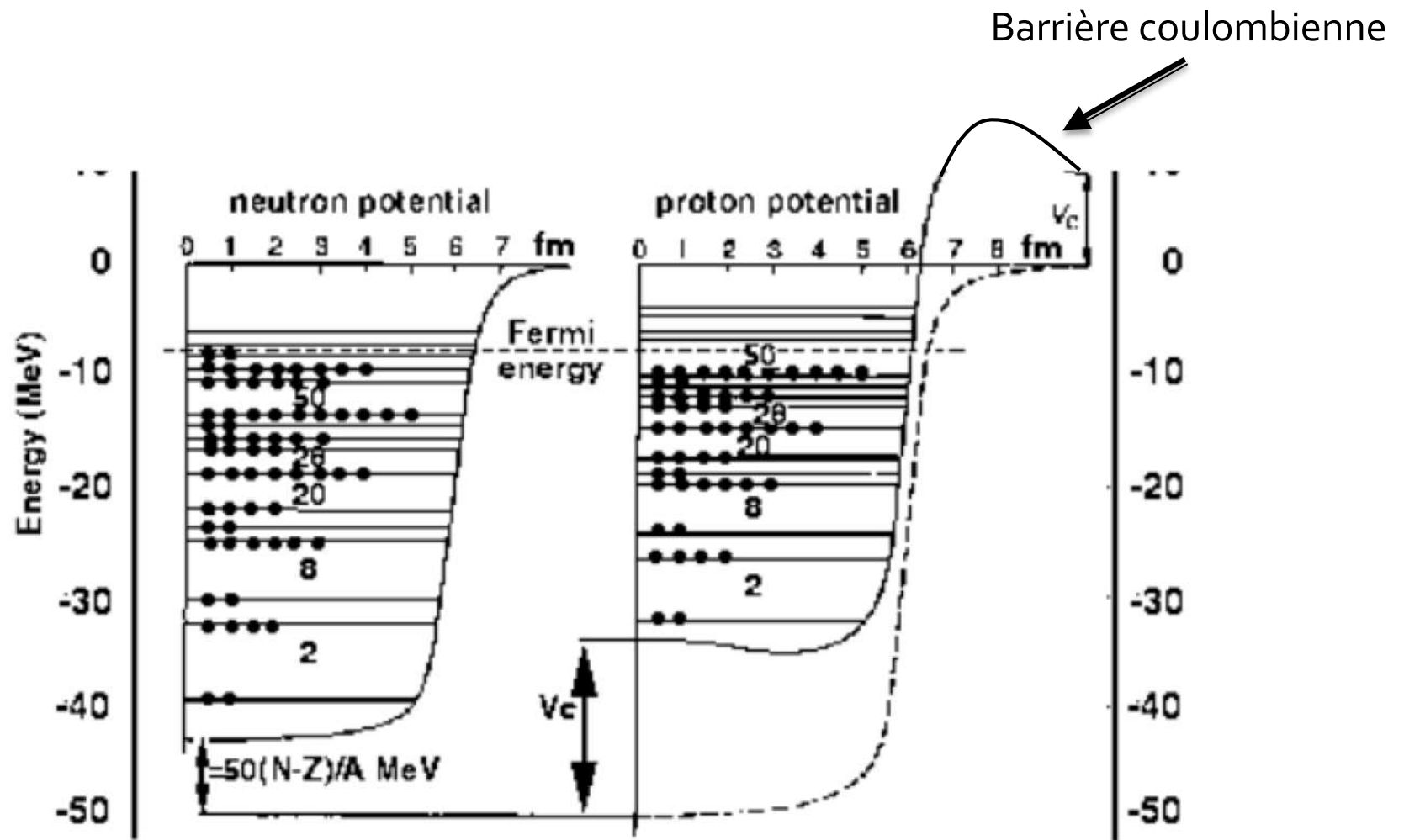
l nbre quantique orbital

j moment cinétique total
 $j = l \pm 1/2$



→ α est le noyau doublement magique le plus léger

La structure en couches



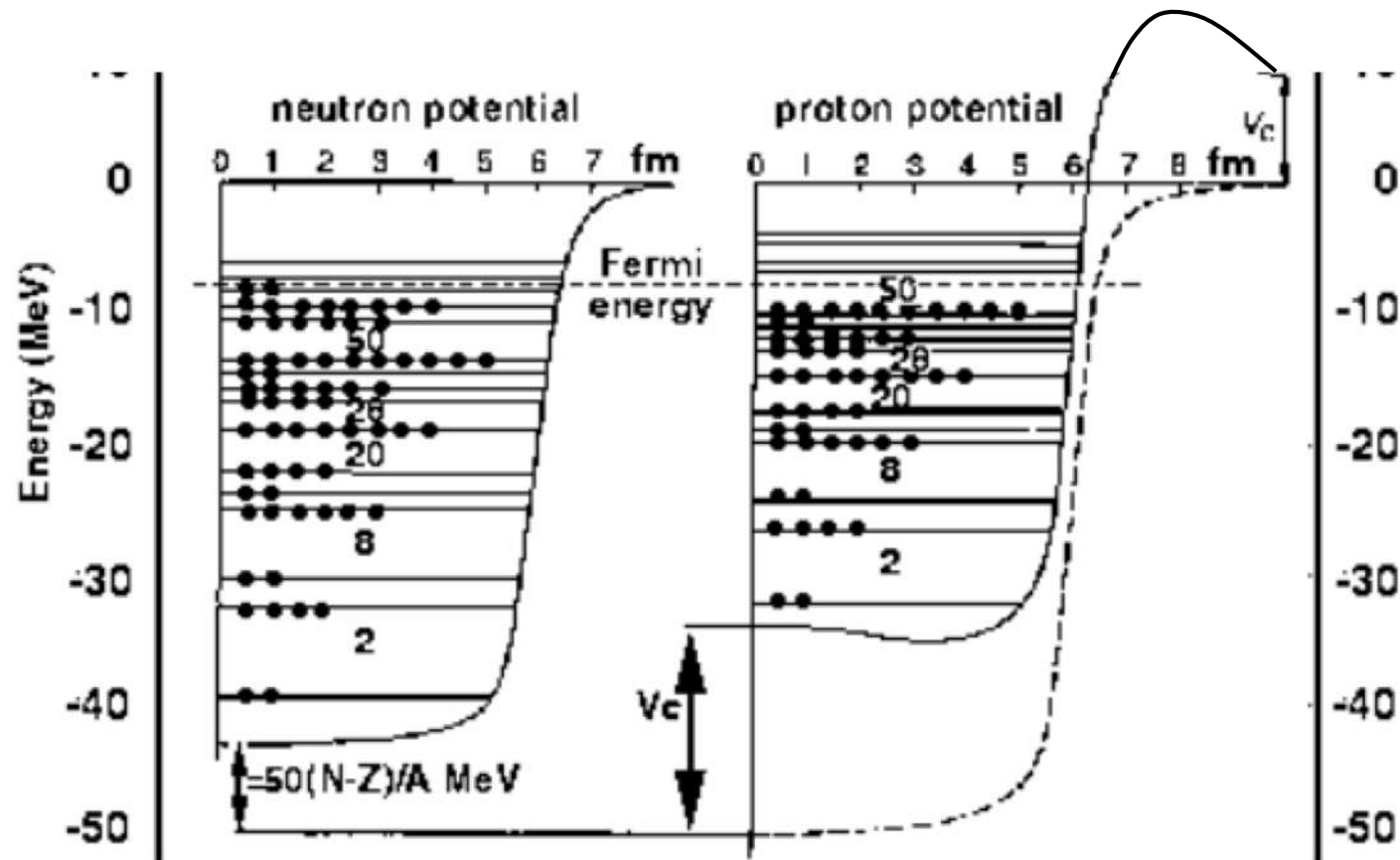
Deuxième partie

Stabilité et radioactivité du noyau

Les radioactivités

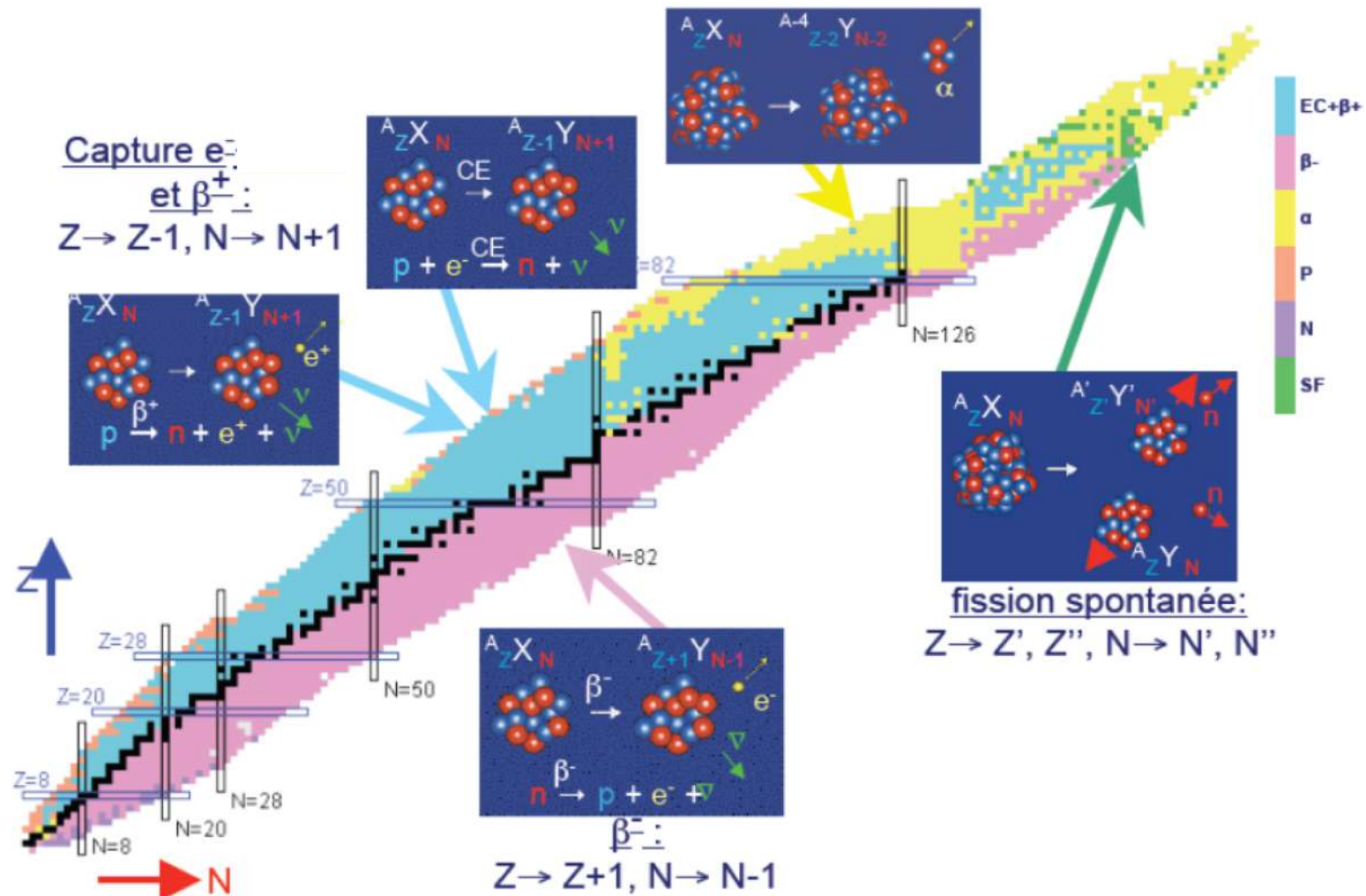
Interaction	Nom de la radioactivité (date de découverte)	Particule(s) émise(s) par le noyau
Electromagnétique	γ (1900)	photon
	Electron de conversion (1938)	e^-
Faible	β^- (1898)	$e^-, \bar{\nu}_e$
	β^+ (1933)	e^+, ν_e
	Capture électronique (1937)	ν_e
	Double β^- (1980)	$2e^-, 2\bar{\nu}_e$
	Double capture électronique (2001)	$2\nu_e$
	β^- Etat lié (1992)	$\bar{\nu}_e$
Forte (+ELM)	α (1896)	${}_2^4\text{He}$
	n, p (1970), 2p (2000), 2n (2012)	n ou p ou 2p ou 2n
	Clusters (1984)	${}^{14}\text{C}$ ou ${}^{24}\text{Ne}$ ou ${}^{32}\text{Si}$, ...
	Fission (1939)	n + 2 noyaux lourds (${}^{90}\text{Zr}$, ${}^{132}\text{Sn}$, ...)
	Fission ternaire (2010)	n + 3 noyaux lourds

La structure en couches

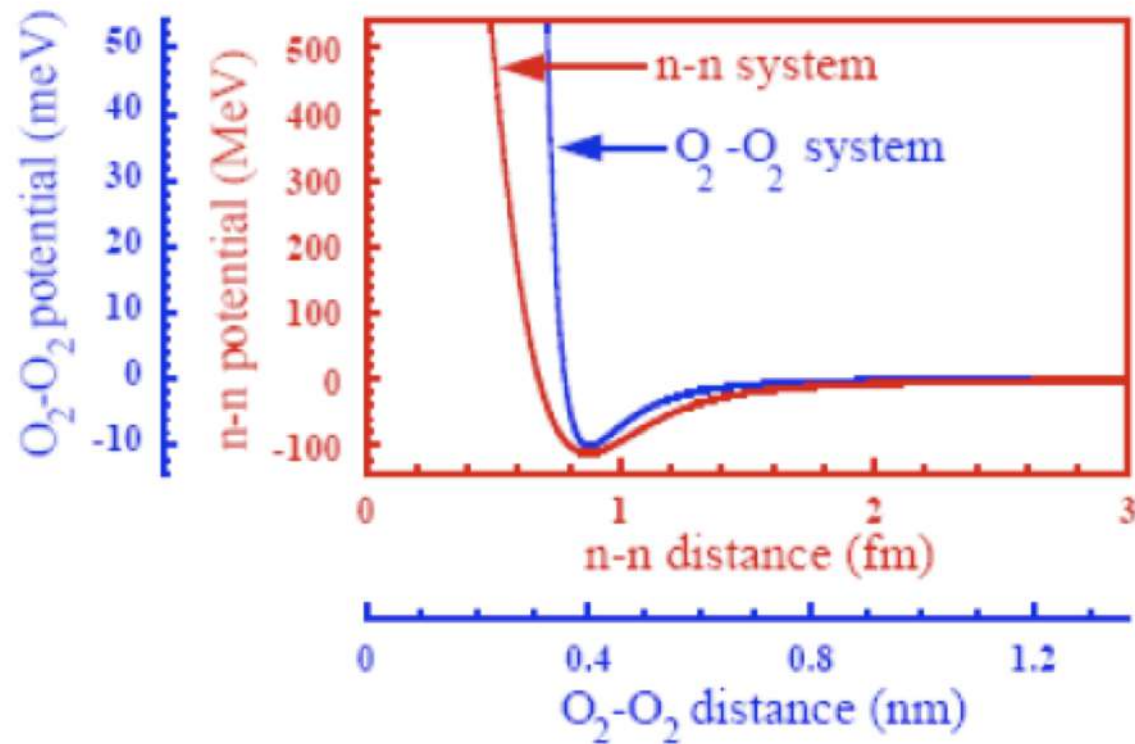


Application: (in)stabilité du p et du n

La carte des noyaux



Analogie noyau <-> fluide



$$\longrightarrow R = r_0 A^{1/3}$$

$$r_0 \simeq 1.2 \text{ fm}$$

Définitions

$$Mc^2 = Nm_n c^2 + Zm_p c^2 - B$$

↖ Energie de liaison

$$S_n \equiv B(A) - B(A - 1) = [m_n + M(A - 1)] c^2 - M(A)c^2$$

↖ Energie de séparation
(ici à 1 neutron)

La goutte liquide nucléaire

Formule semi-empirique de B.W.

$$B = \underbrace{a_V A - a_S A^{2/3} - a_C Z^2/A^{1/3}}_{\text{termes classiques}} - \underbrace{a_A (N-Z)^2/A + \boxed{\delta}}_{\text{termes quantiques}} \text{ (en MeV)}$$

Les constantes sont déterminées
expérimentalement

$$a_V \sim 16 \text{ MeV}, a_S \sim 17 \text{ MeV}$$

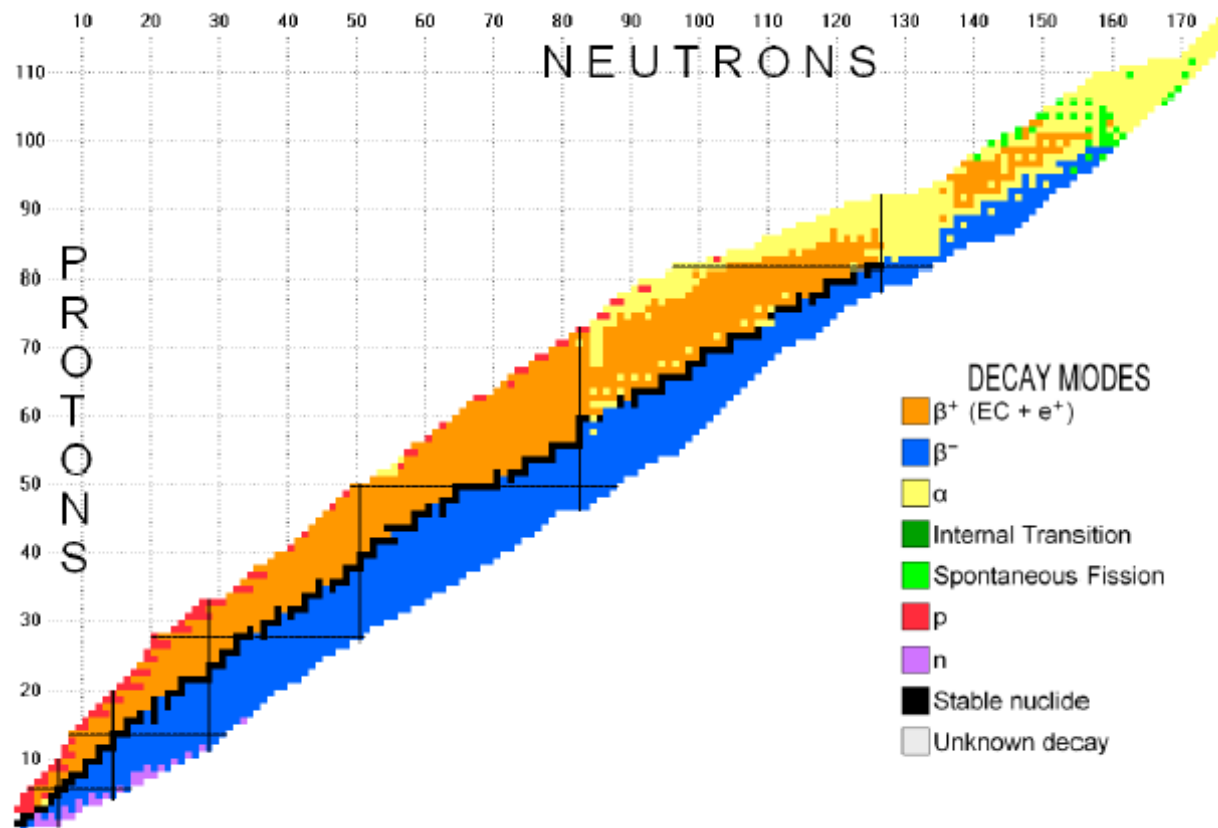
$$a_C \sim 0.7 \text{ MeV}, a_A \sim 23 \text{ MeV}$$

δ : Superfluidité nucléaire

$$\Rightarrow B/A = a_V - a_S / A^{1/3} - a_C Z^2/A^{4/3} - a_A (N-Z/A)^2 + \delta/A$$

Application à la stabilité β

$$\left. \frac{\partial B(A, Z)}{\partial Z} \right|_{A=\text{cst}} = 0 \longrightarrow Z = \frac{A}{2 + (a_C/2a_A)A^{2/3}} \simeq \frac{A}{2 + 0,015A^{2/3}}$$



Application à la fission et la fusion



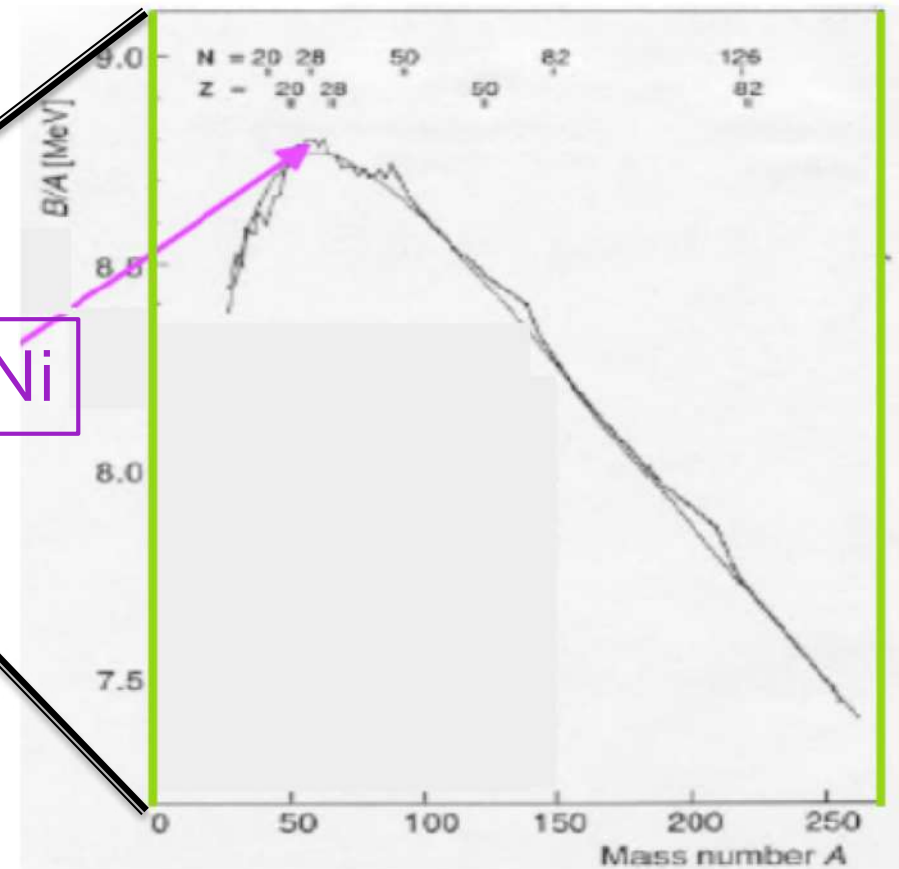
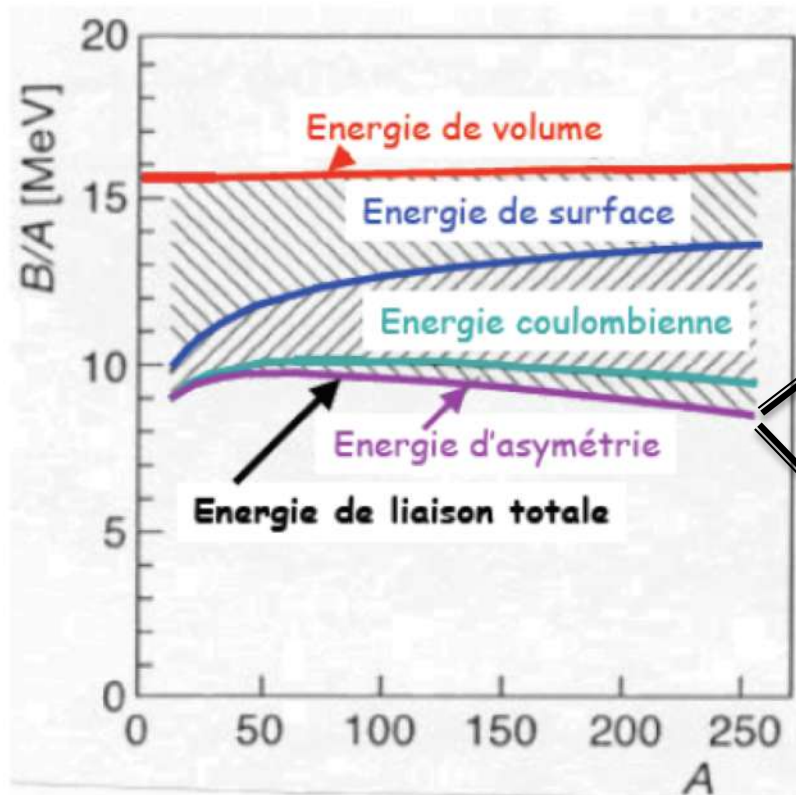
Chaleur de réaction : $Q = -B_1 - B_2 + B_3 + B_4$



$$\frac{Q}{A} = \frac{1}{A} \left[A_3 \cdot \left(\frac{B_3}{A_3} \right) + A_4 \cdot \left(\frac{B_4}{A_4} \right) \right] - \frac{1}{A} \left[A_1 \cdot \left(\frac{B_1}{A_1} \right) + A_2 \cdot \left(\frac{B_2}{A_2} \right) \right]$$

$$= \langle B/A \rangle_s - \langle B/A \rangle_e$$

La courbe d'Aston



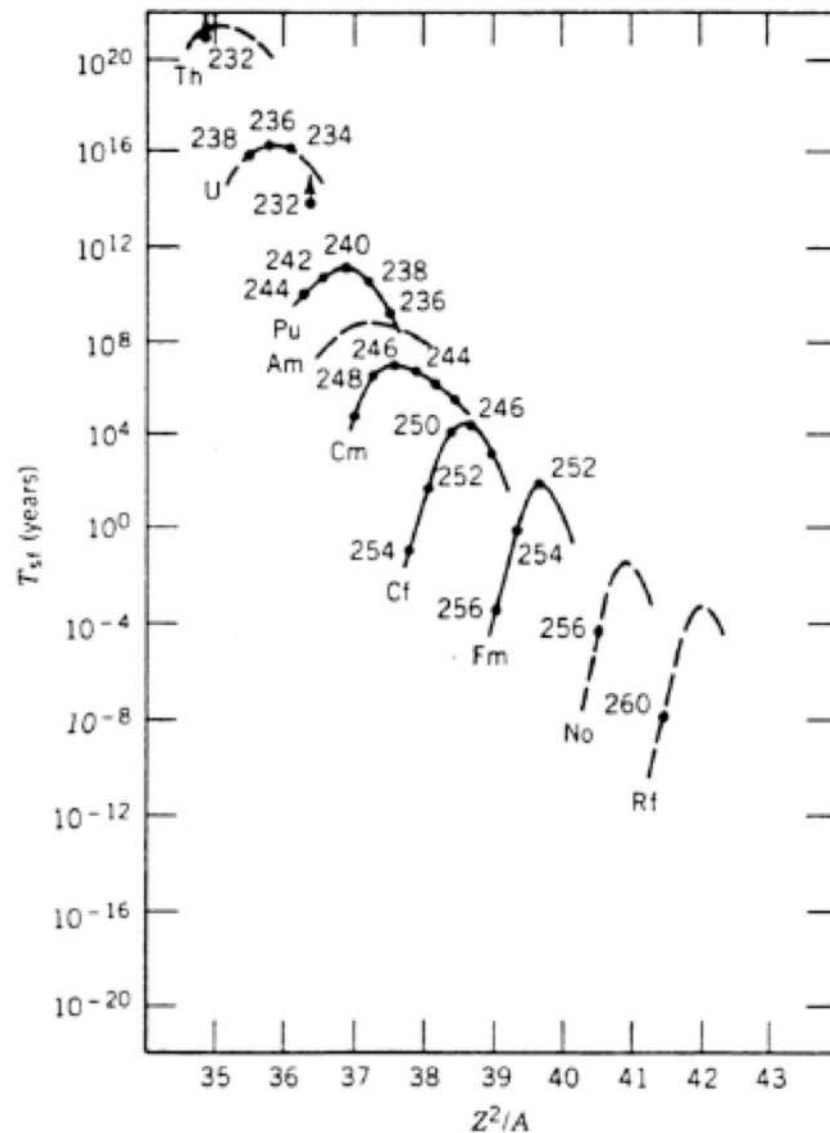
Fusion \longleftrightarrow Fission

$$B/A = a_V - a_S / A^{1/3} - a_C Z^2 / A^{4/3} - a_A (N-Z/A)^2 + \delta/A$$

Troisième partie

Fission

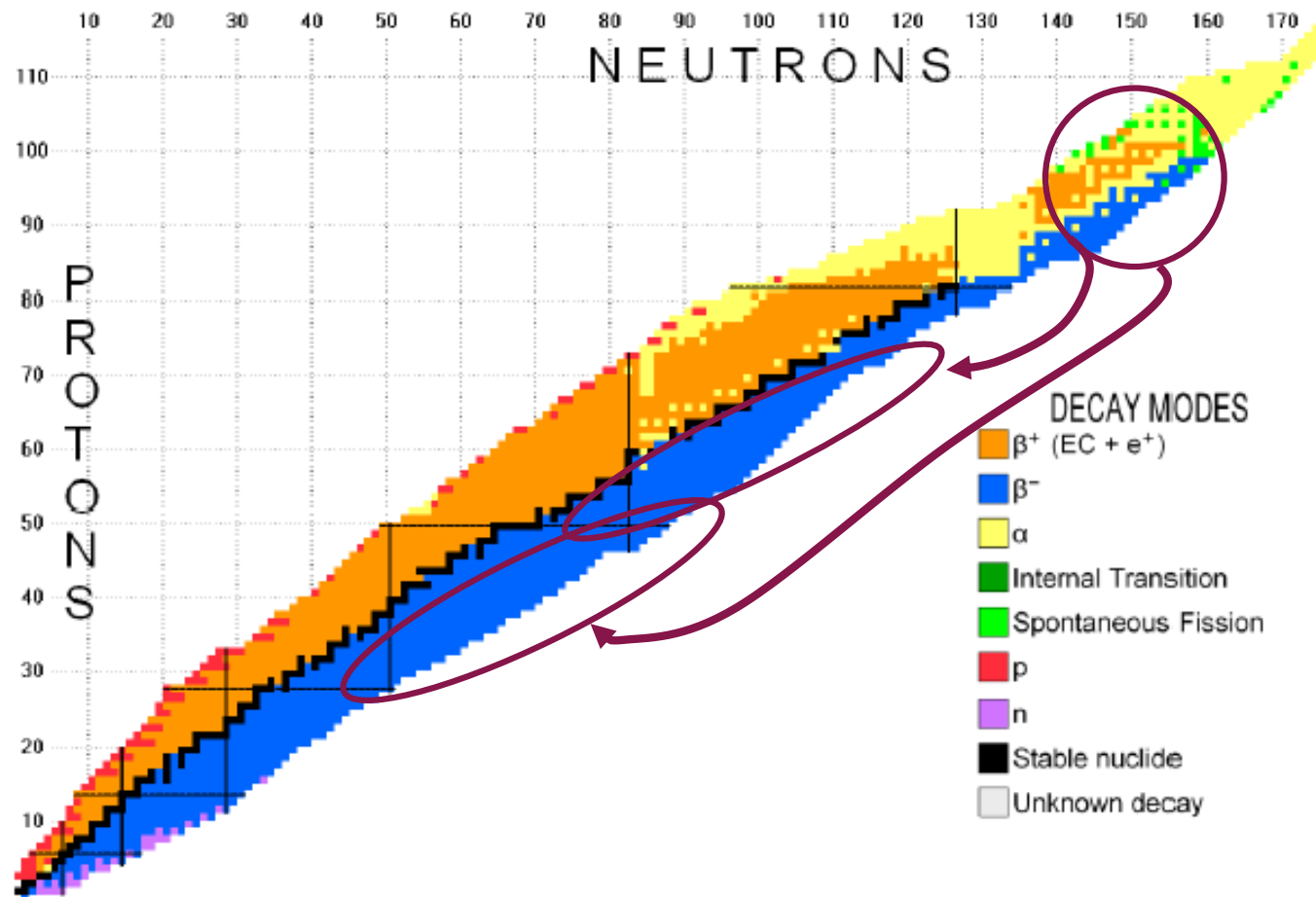
Le paramètre de fissilité



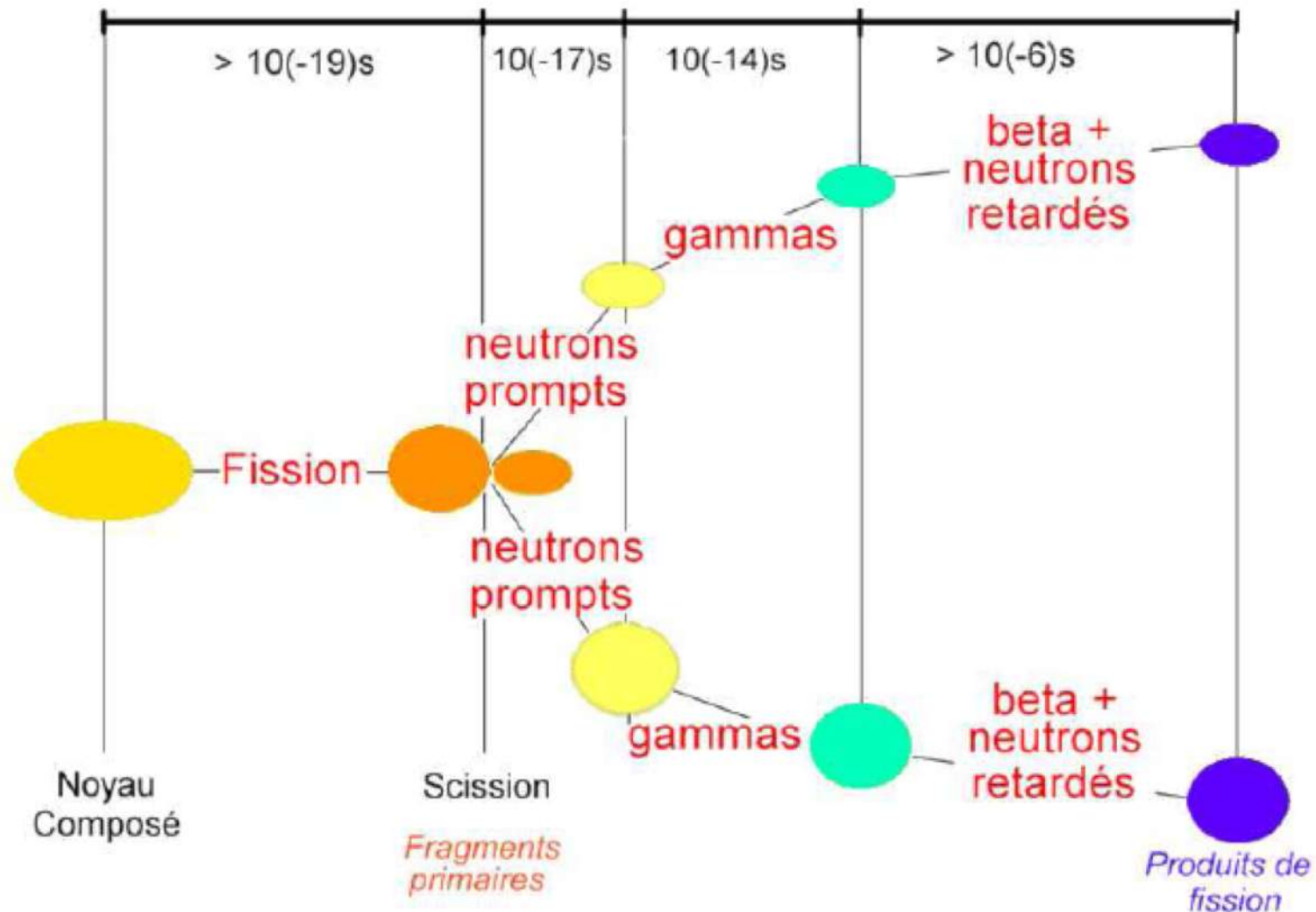
Fission **spontanée**
(~20 noyaux)

$$a \frac{Z^2}{A^{1/3}} > b A^{2/3} \longrightarrow \frac{Z^2}{A} \gtrsim 30$$

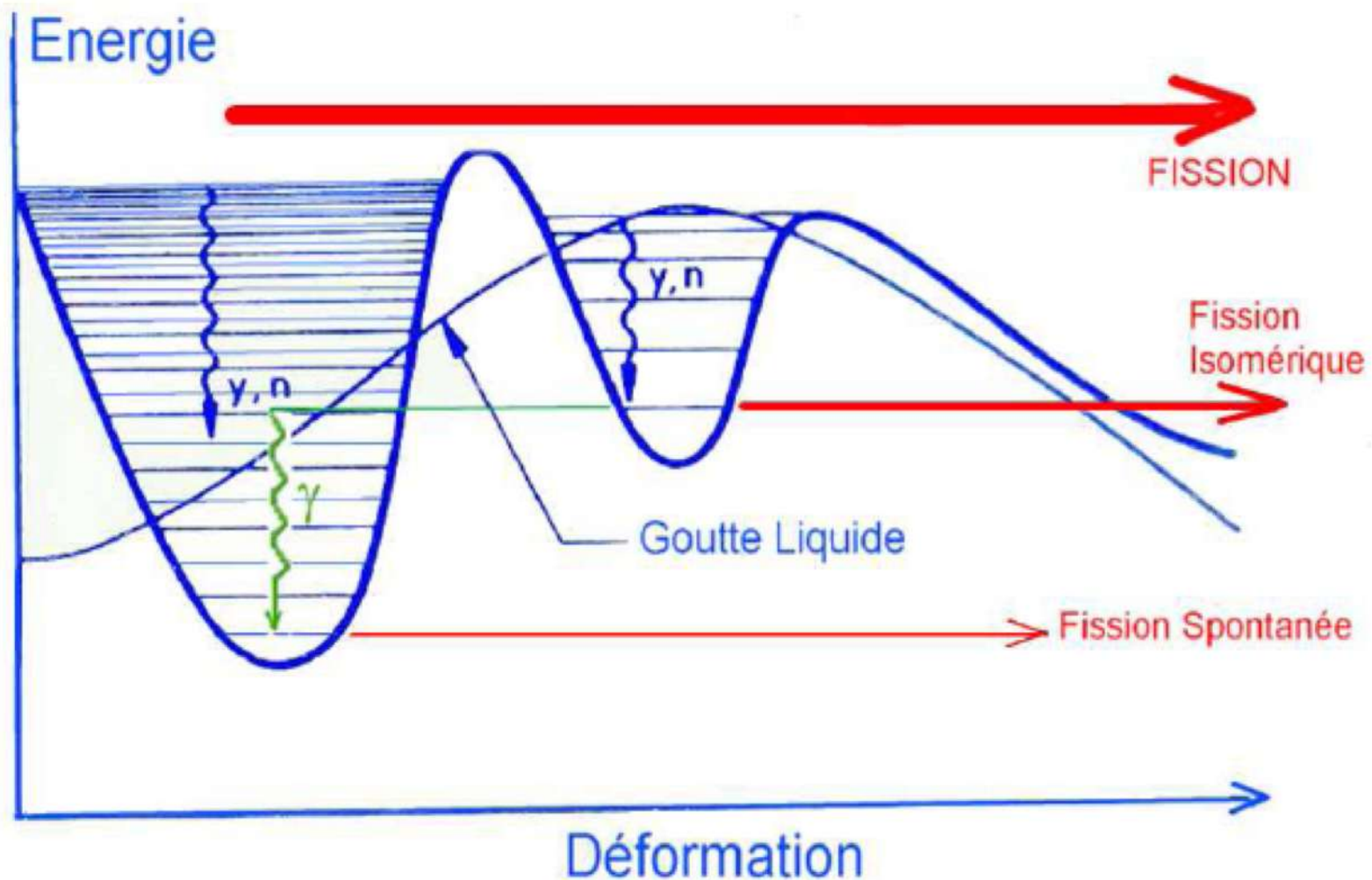
Variété de noyaux fils



La fission induite



La barrière de fission : déformation



Fission par neutron lent (=thermique)

- Energie des n: $kT=10^{-2}$ eV ($T=293$ K)

- Capture du n : $n + (A-1) \rightarrow A^*$

$$\Downarrow$$
$$m_n c^2 + M(A-1)c^2 = M(A)c^2 + E^*$$

$$\Downarrow$$
$$E^* = [m_n + M(A-1)] c^2 - M(A)c^2 = S_n$$

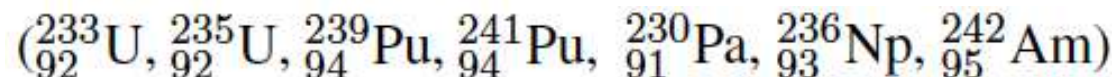
$$S_n(^{236}\text{U}) = 6,5 \text{ MeV.}$$



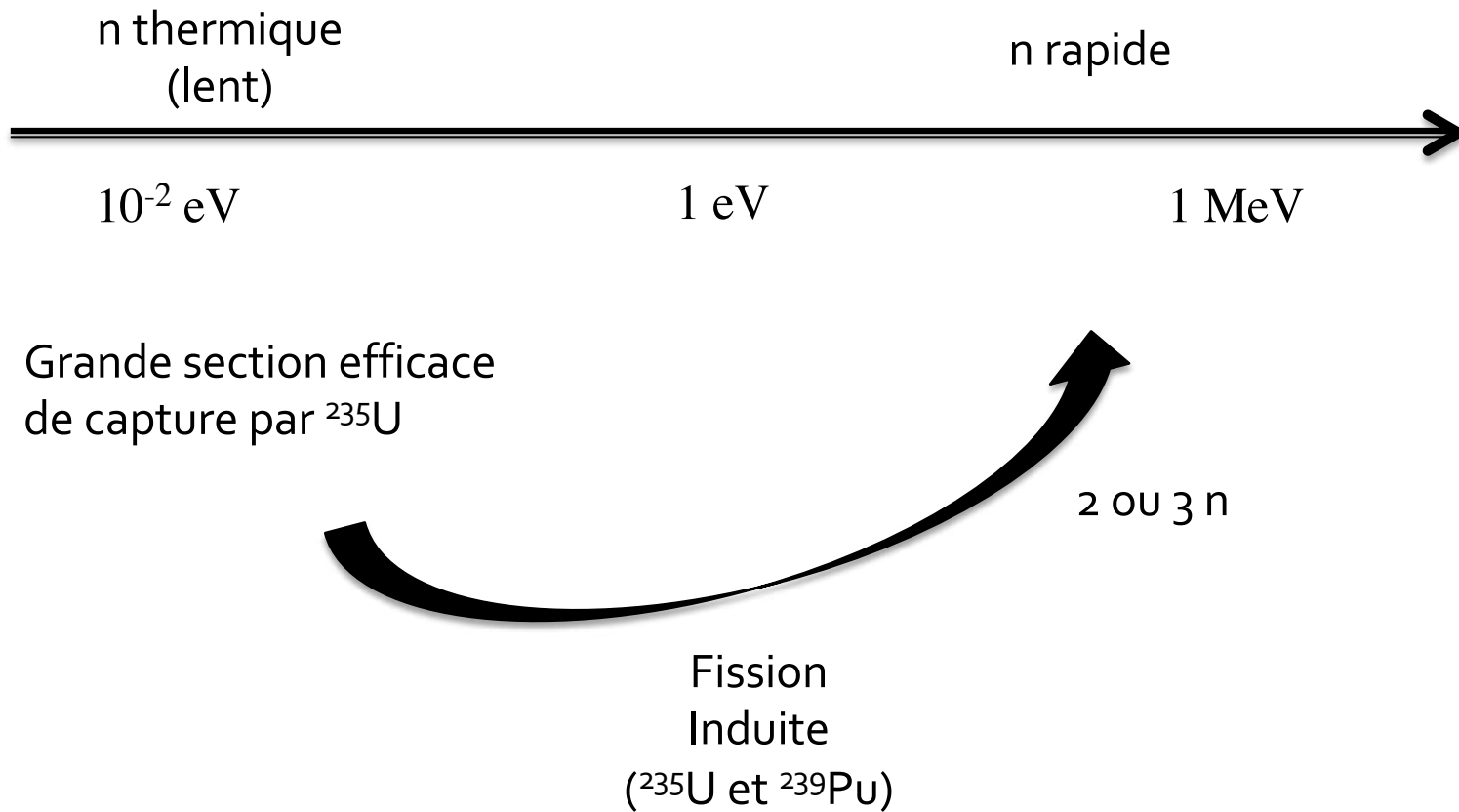
$$S_n(^{239}\text{U}) = 4,8 \text{ MeV}$$



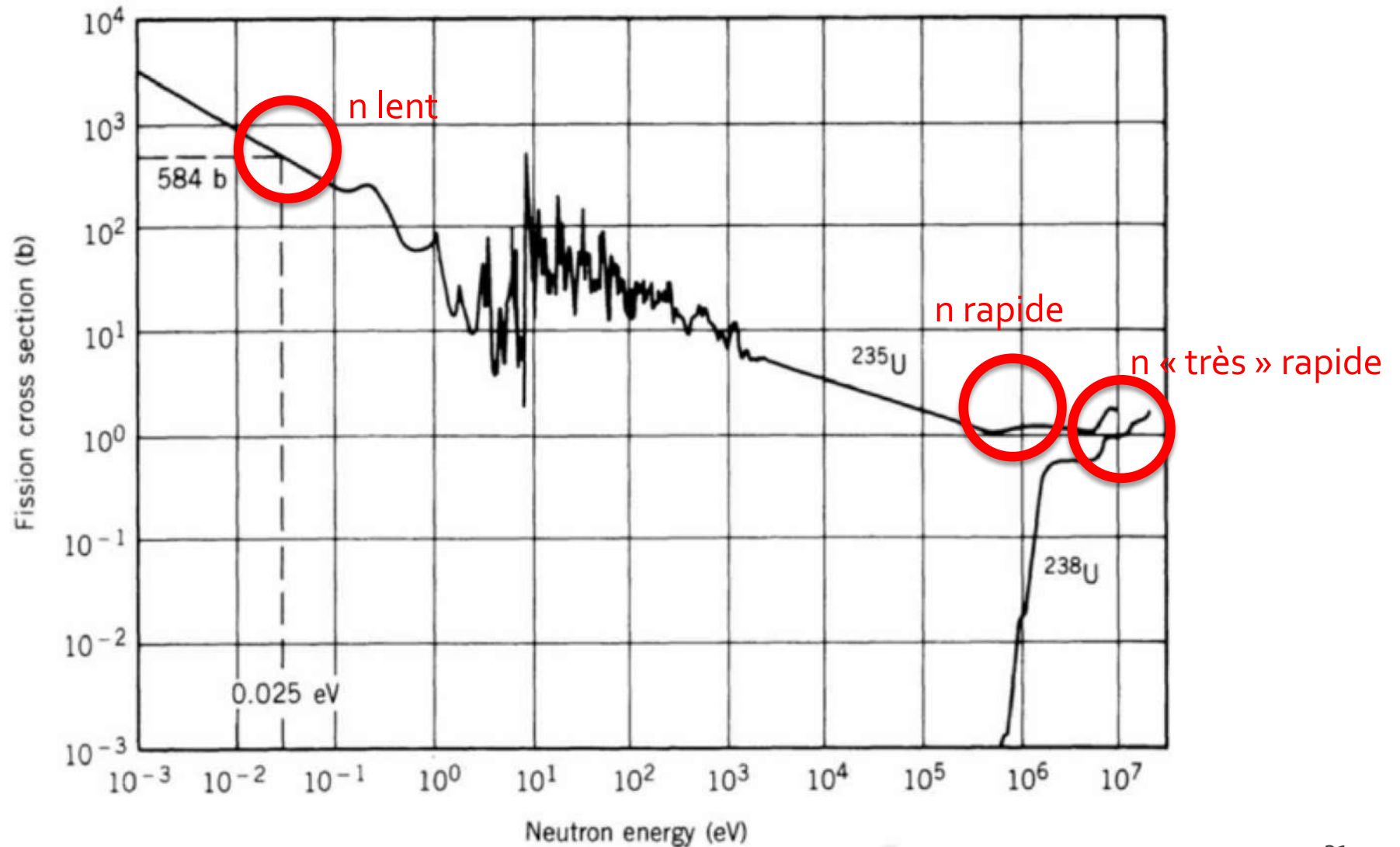
- Il existe 7 noyaux fissiles (= par capture de n lent) :



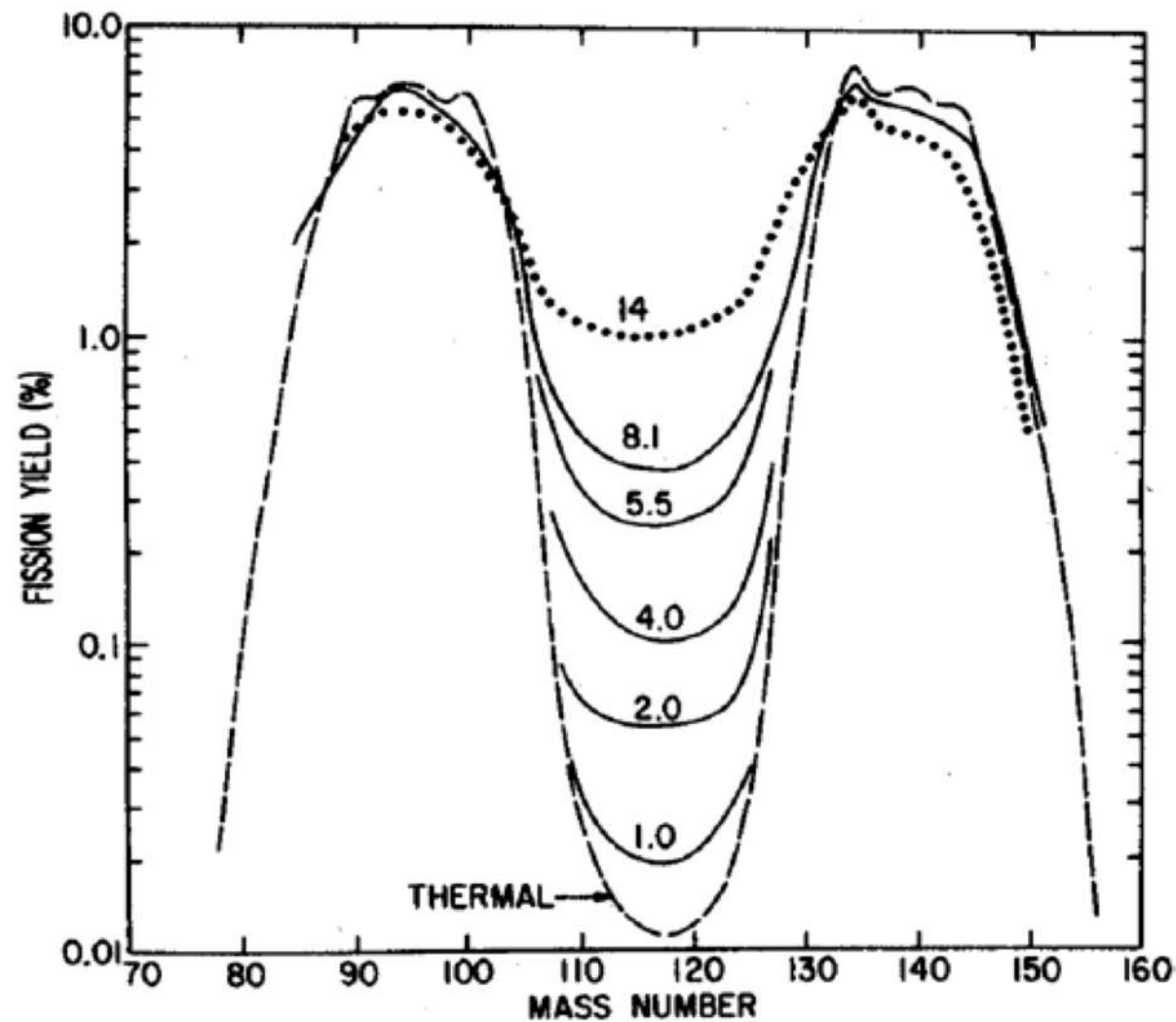
L'énergie du neutron



La section efficace de fission



Les fragments de fission



Principe d'un réacteur

□ Facteur de multiplication

- ▣ Nbre de nouvelles fissions

induites par fission

= nbre de neutrons produits par neutron absorbé

$$k = \frac{N_{fissions}(i+1)}{N_{fissions}(i)}$$

- ▣ Nombre total de neutrons produits par un neutron initial = $1+k+k^2+k^3+ \dots$
- ▣ $k < 1$: la réaction en chaîne s'éteint, le réacteur est sous-critique
- ▣ $K = 1$: la réaction s'entretient d'elle-même
- ▣ $K > 1$: diverge → réacteur sur-critique

□ Réacteur nucléaire: maîtrise de la réaction en chaîne

- ▣ Une fission donne une fission, en moyenne
- ▣ Evolution de la puissance: ~ nombre de neutrons → après n générations, $P = k^n$
- ▣ 40000 générations en une seconde → $P_{(t=1s)} = 55 P_{(t=0)}$ pour $k=1,0001$

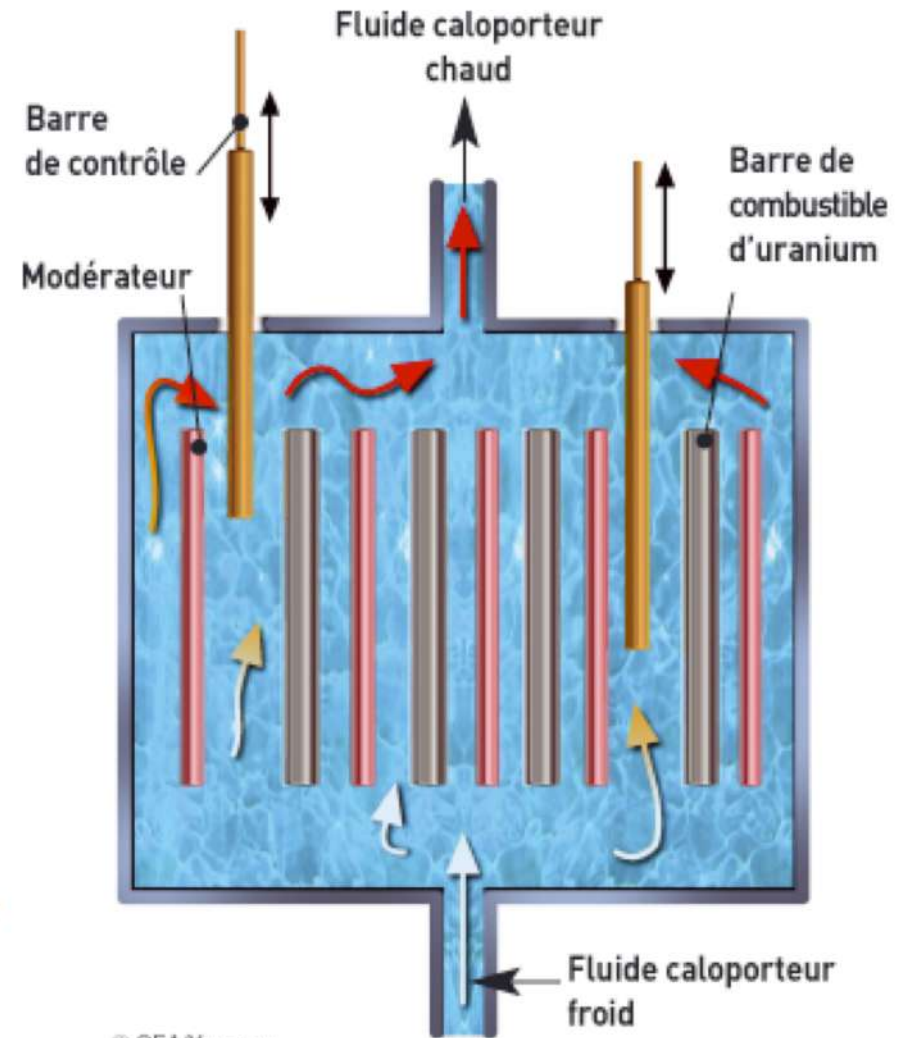
Composants d'un cœur de réacteur

- Combustible
- Caloporteur
- Modérateur
- Barre de contrôle (Cd)

1 kg de ^{235}U

↓

$$E \simeq \frac{200 \times 1,6 \cdot 10^{-13} \times 6,02 \cdot 10^{23} \times 1000}{235} \simeq 10^{14} \text{ J}$$



© CEA/Yuvano

Arrêt du réacteur et déchets

- Produits de fission variés et radioactifs (94%)
- Actinides n'ayant pas fissionné et radio. (6%)

$$P_{\text{arrêt}} = 6\% P_{\text{nominale}}$$

Réacteurs nucléaires

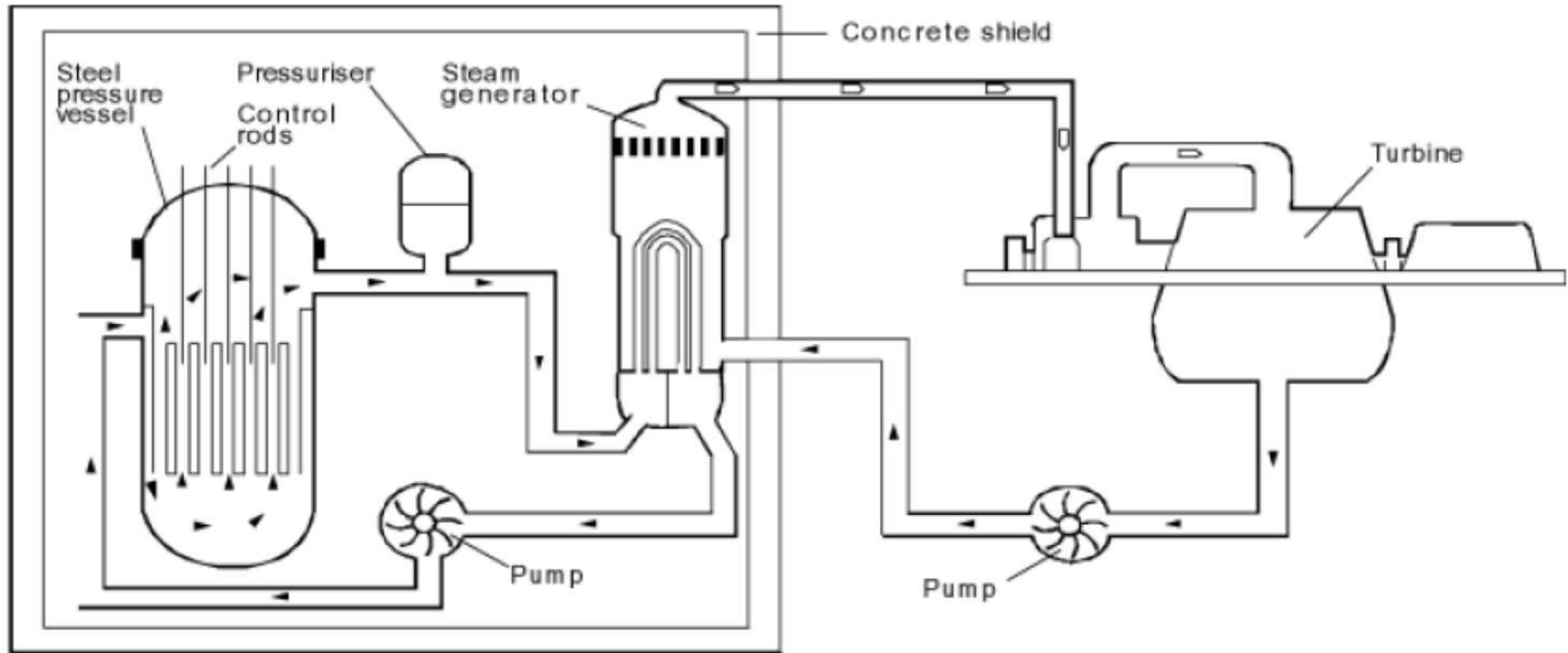
Reactor type	Main Countries	Number	GWe	Fuel	Coolant	Moderator
Pressurised Water Reactor (PWR)	US, France, Japan, Russia	252	235	enriched UO_2	water	water
Boiling Water Reactor (BWR)	US, Japan, Sweden	93	83	enriched UO_2	water	water
Gas-cooled Reactor (Magnox & AGR)	UK	34	13	natural U (metal), enriched UO_2	CO_2	graphite

Réacteurs nucléaires

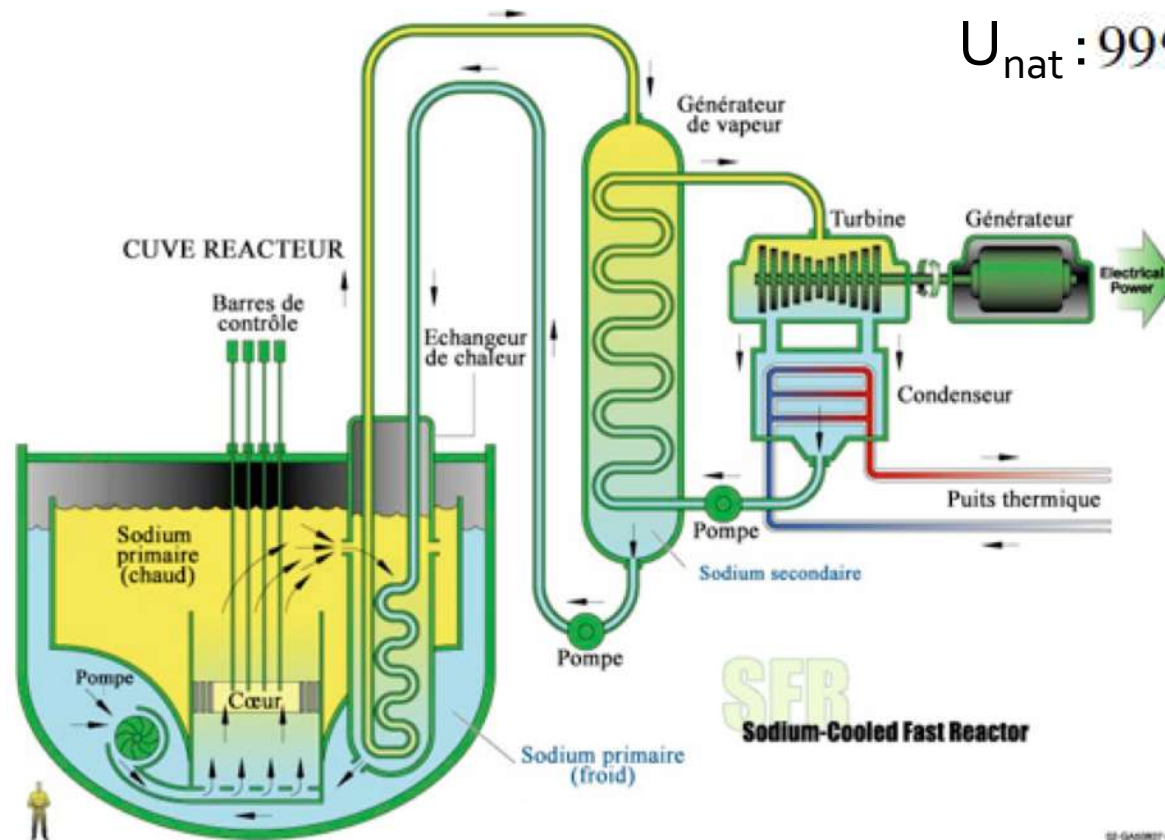
Pressurised Heavy Water Reactor "CANDU" (PHWR)	Canada	33	18	natural UO_2	heavy water	heavy water
Light Water Graphite Reactor (RBMK)	Russia	14	14	enriched UO_2	water	graphite
Fast Neutron Reactor (FBR)	Japan, France, Russia	4	1.3	PuO_2 and UO_2	liquid sodium	none
Other	Russia, Japan	5	0.2			
	TOTAL	435	364			

REP (GEN II)

EPR (GEN III)=super REP



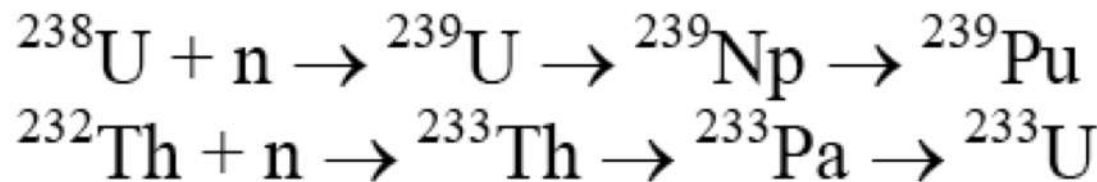
RNR (GEN IV)



U_{nat} : 99% de ^{238}U et 0,7% de ^{235}U

SFR
Sodium-Cooled Fast Reactor

Fertiles



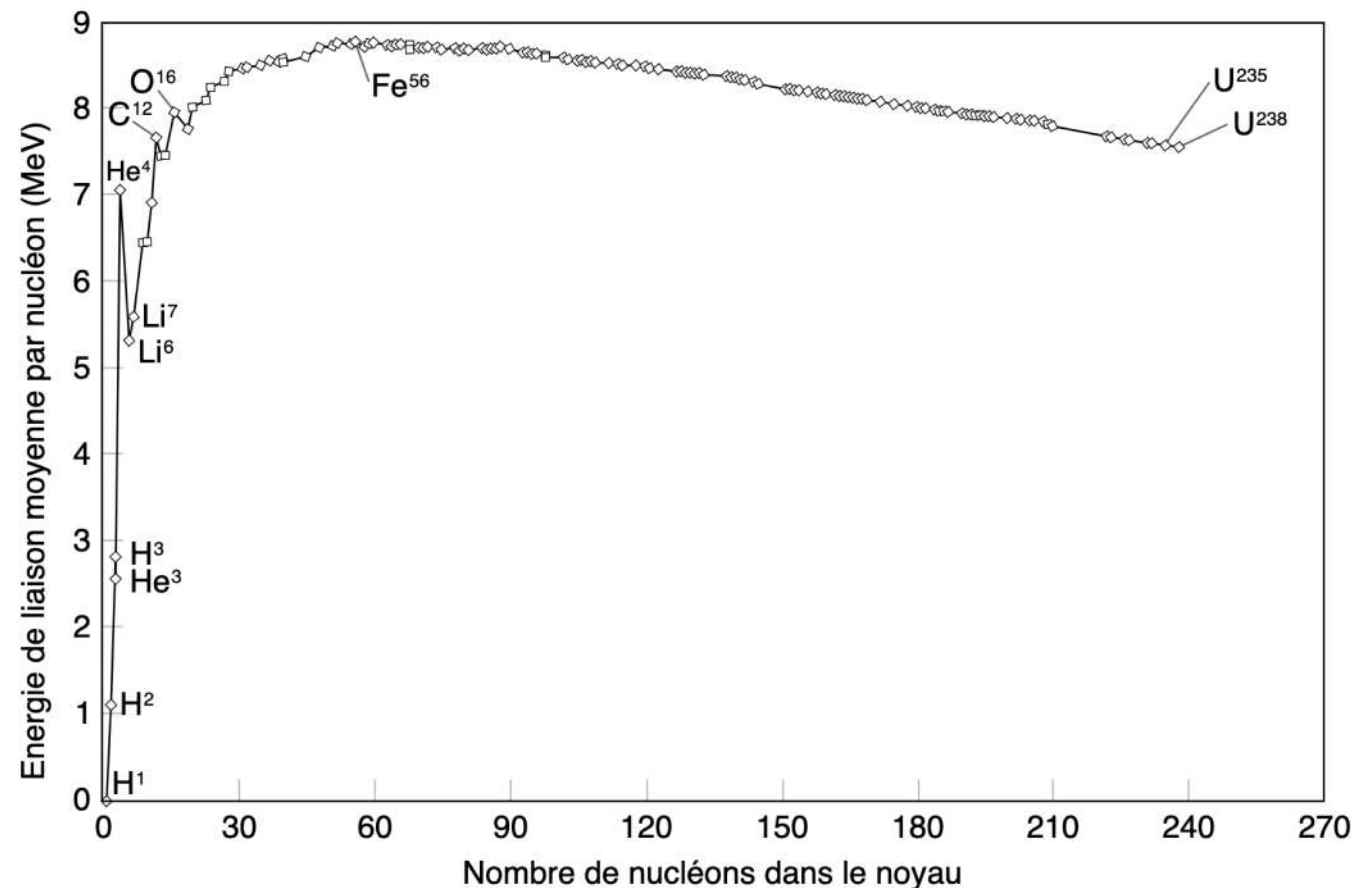
Fissiles

Quatrième partie

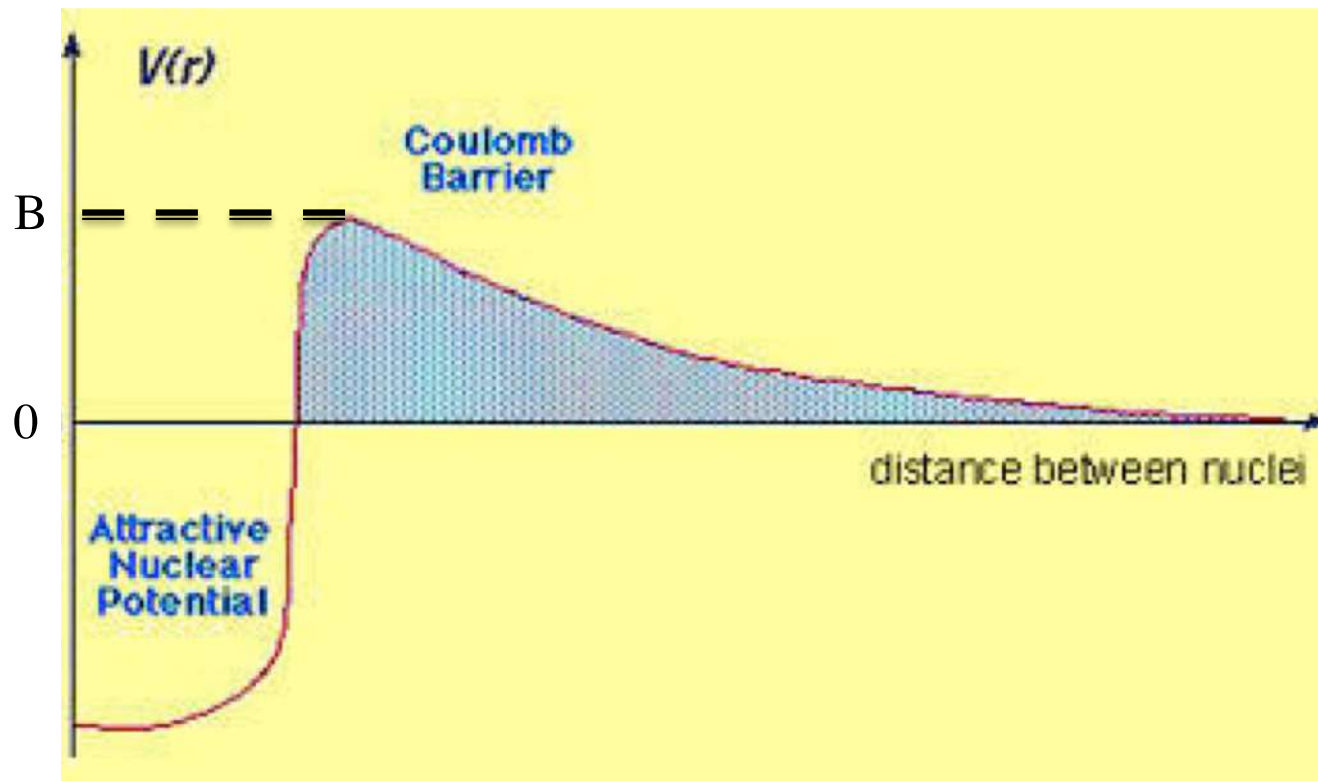
Fusion

Avantages de la fusion thermonucléaire

- Abondance des noyaux légers
- Absence de grande variété de déchets
- Energie libérée plus importante

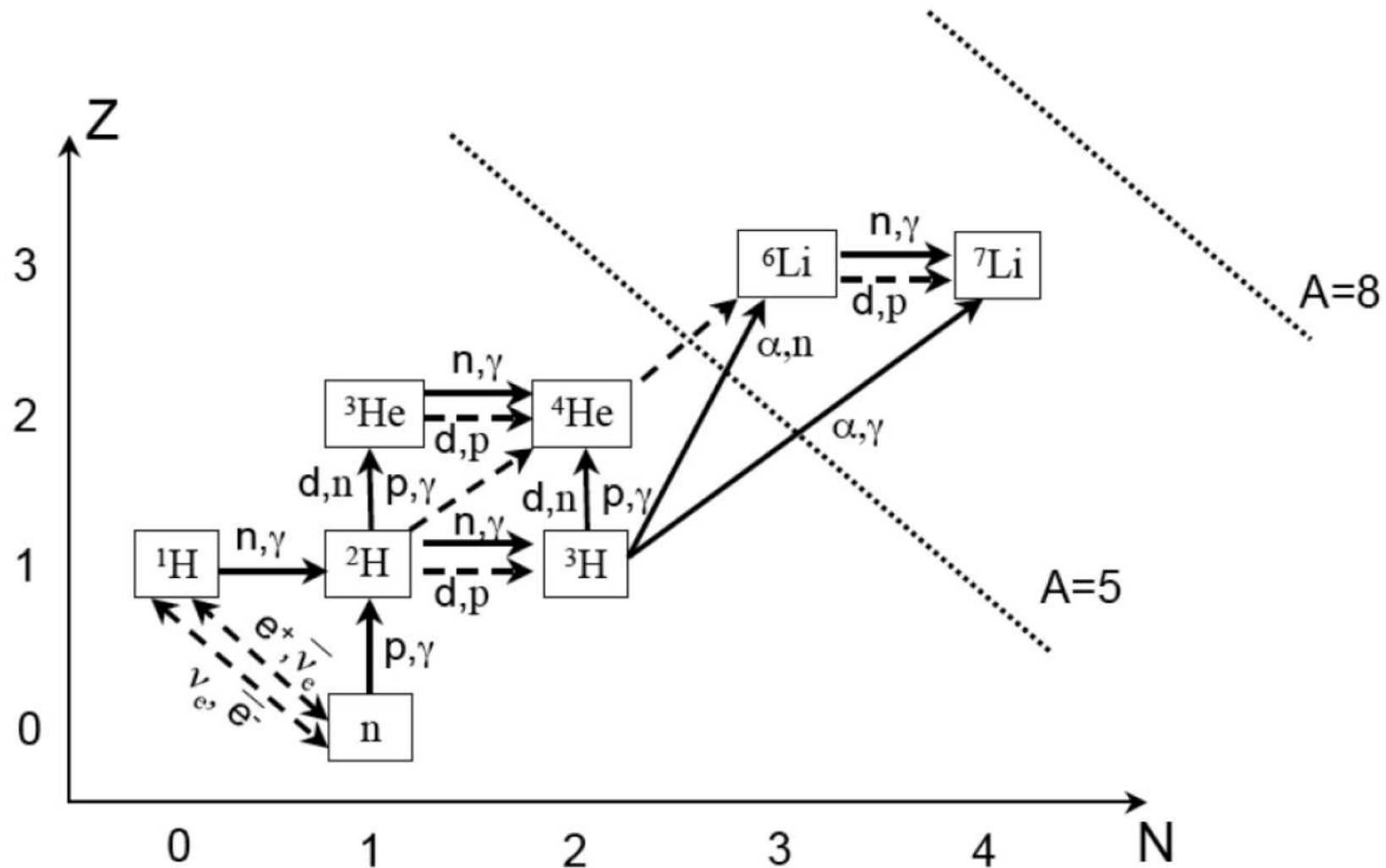


La barrière de fusion : Coulomb

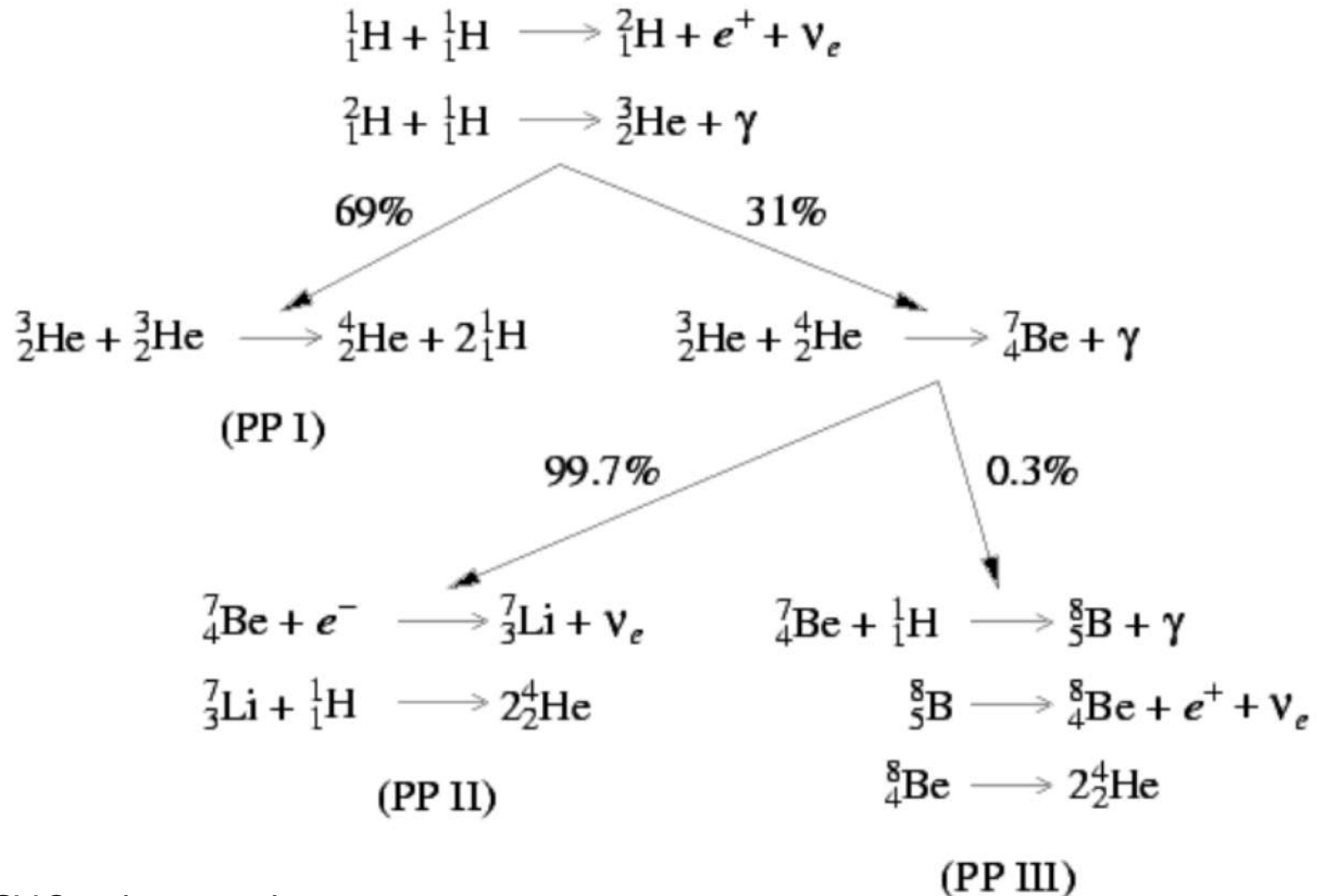


= inconvénient de la fusion thermonucléaire

La nucléosynthèse primordiale

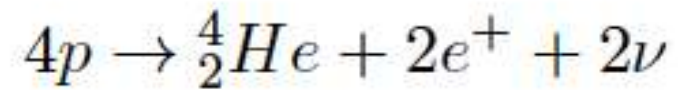


La nucléosynthèse stellaire



Le cycle CNO existe aussi

Résumé du cycle PP-I



$$Q=26,7 \text{ MeV}$$

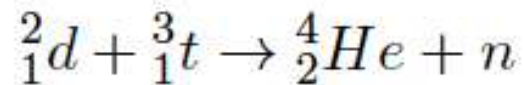
$$T=10^7 \text{ K}$$

$$\rho=10^2 \text{ g.cm}^{-3}$$

$$V=10^{26} \text{ m}^3$$

Fusion contrôlée

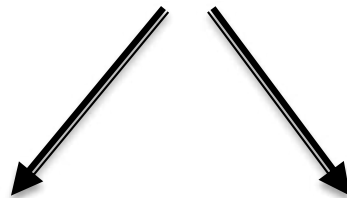
Réaction la plus énergétique ($Q/A=3,5$ MeV) et avec la plus gde section efficace :



Barrière coulombienne: $kT=500$ keV ($T=10^9$ K) !!

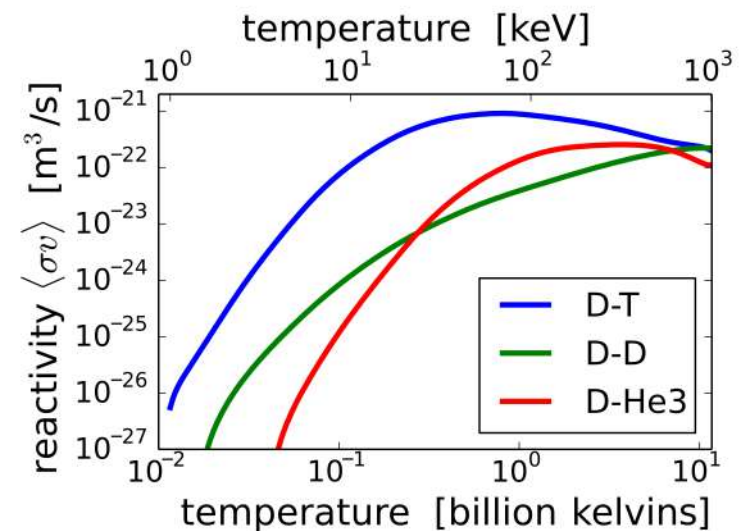


Fusion sous-coulombienne
par effet tunnel : $kT=10$ keV ($T=10^8$ K)



Confinement inertiel

Confinement magnétique



Combustible

- deutérium (33 mg/l eau de mer, 10^{10} années de stock)
- le tritium provient de ${}^6\text{Li} + n \rightarrow {}^4\text{He} + t + 4.78 \text{ MeV}$ (Li 2g/t de sel de mer, 10^7 années)

Pour produire 80 GJ (donné par la fission de 1g d' ${}^{235}\text{U}$) avec la réaction de fusion **d + t** avec un rendement de 30%, il faut 1mg de lithium et 0.32 mg de deutérium

→ Les perspectives se comptent en milliers d'années

Fusion inertielle par laser

Confinement inertielle par compression
Régime explosif

$$T=10^8 \text{ K} ; \rho=10^4 \text{ g.cm}^{-3}$$

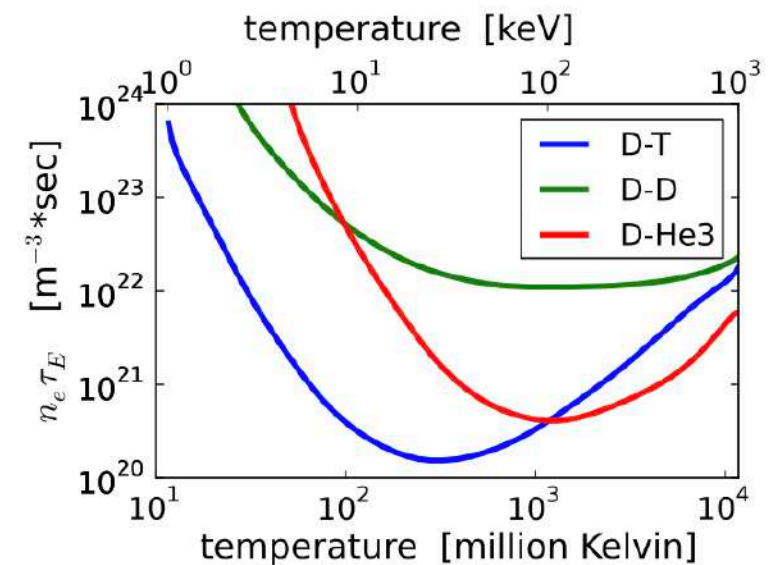
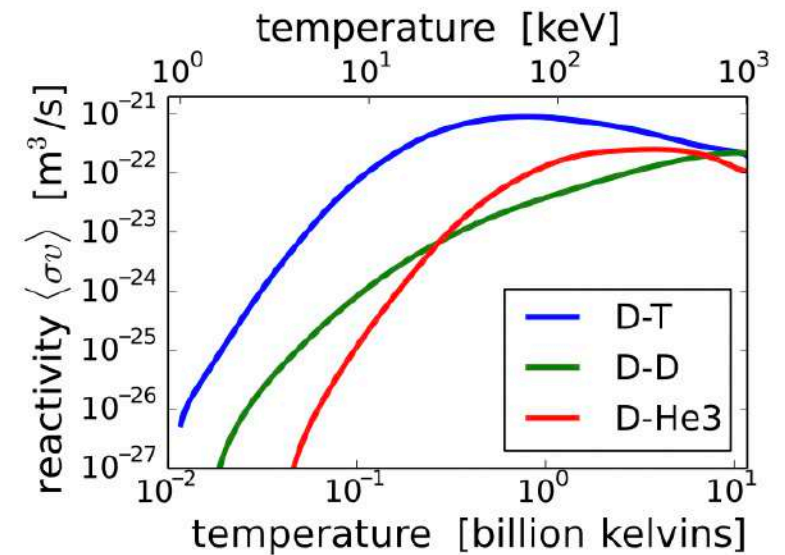
Cf Laser Mégajoule
($P \sim 10^6 \text{ J} / 10^{-8} \text{ s} = 10^{14} \text{ W}$)

Fusion par confinement magnétique

- Faible concentration d+t (plasma)
- Chauffage par effet Joule+rayonnement micro-onde
- $T = 10^8 \text{ K}$; $\rho = 10^{-9} \text{ g.cm}^{-3}$ (cf énergie libérée)
- Confinement par B :
e⁻ et noyaux doivent éviter les parois physiques
(refroidissement, impuretés)

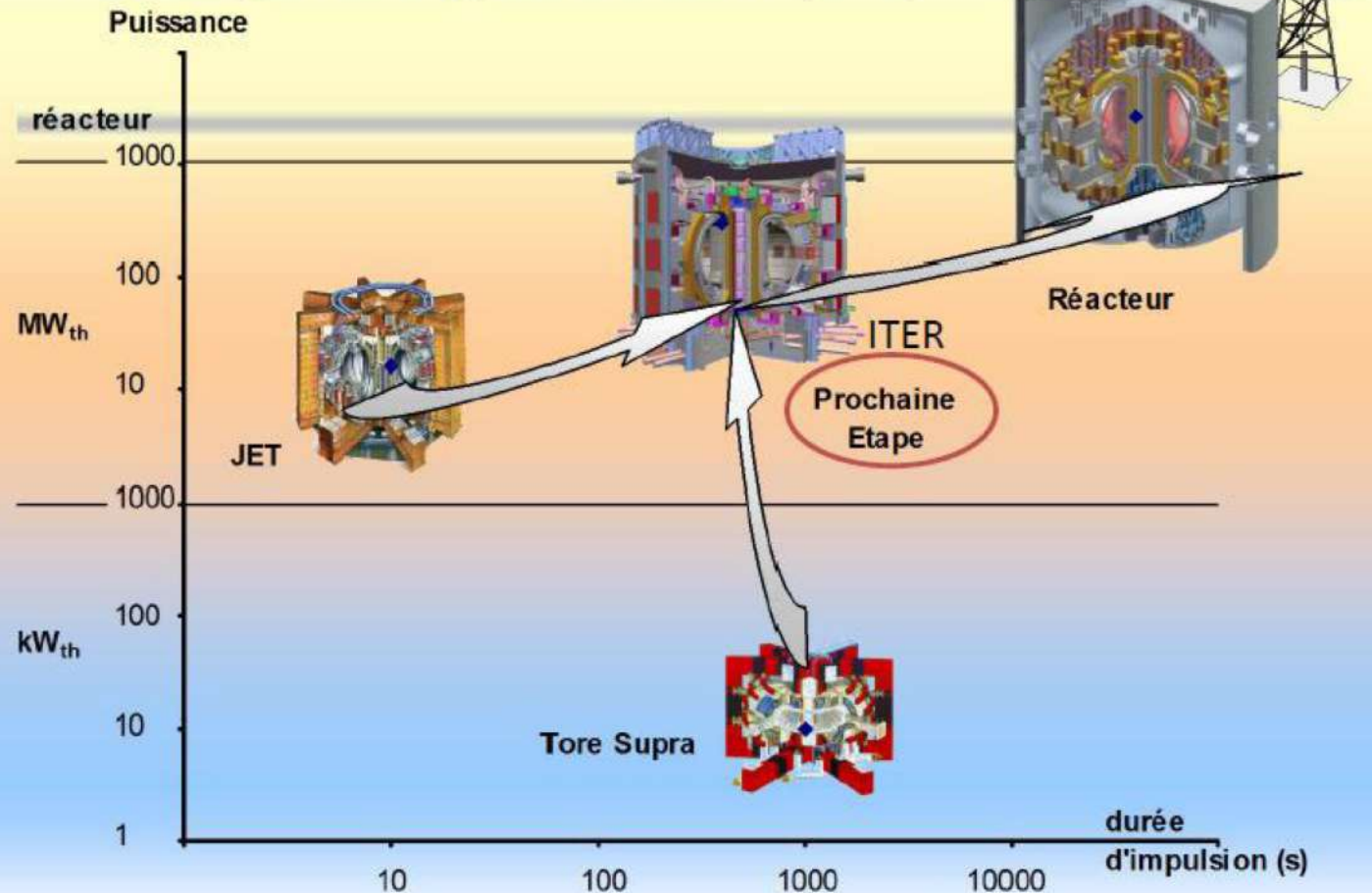
Critère de Lawson

$$\begin{aligned}
 & \underline{P_{\text{libérée}}} > \underline{P_{\text{perdue}}} \\
 & \downarrow \\
 & n^2 \langle \sigma v \rangle (Q/A) \gtrsim \frac{n k T}{\tau} \\
 & \begin{array}{l} \nearrow \text{Densité du plasma} \qquad \searrow \text{Temps de confinement} \end{array} \\
 & \downarrow \\
 & n\tau \gtrsim \frac{kT}{(Q/A)} \cdot \frac{1}{\langle \sigma v \rangle} \\
 & \downarrow \\
 & n\tau \gtrsim \frac{10 \text{ keV}}{3,5 \text{ MeV}} \cdot \frac{\text{s} \cdot \text{m}^{-3}}{10^{-22}} \simeq 10^{20} \text{ s} \cdot \text{m}^{-3}
 \end{aligned}$$



Le Tokamak

ITER *International Thermonuclear Experimental Reactor*
fusion contrôlée de la puissance et de la durée
démonstrateur pour 500MW pendant plus de 400s
avec une puissance apportée de 50MW ($Q=10$)



Les points essentiels

- Noyau=fermions appariés, 3 interactions, LS gd: couches
- 15 radios dont la fission (int. Forte+EM)
- Analogie noyau/fluide: attraction+cœur dur
- Effets Coulomb+surface: Fusion \rightarrow Fe \leftarrow Fission
- Fission: spontanée, induite(R,L), barrière, pair-impair
Tec: Combustible, modérateur, contrôle, caloporteur
Refroidissement, stockage; cycle fertile/fissile (Gen IV)
- Fusion: barrière Coulombienne, nucléosynthèse (BB+Stel)
Tec: inertielle vs. confinement
 $kT=10\text{keV}$ ($T=10^8\text{K}$)