

Structure et stabilité des noyaux

Application de l'énergie nucléaire

Elias Khan

khan@ipno.in2p3.fr



Laboratoire de Physique
des 2 Infinis



Supports

- Fascicule dédié (cf site de l'agrégation de Montrouge)
 - Le monde subatomique (L. Valentin) : chap IV (+annexe IV)
 - 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

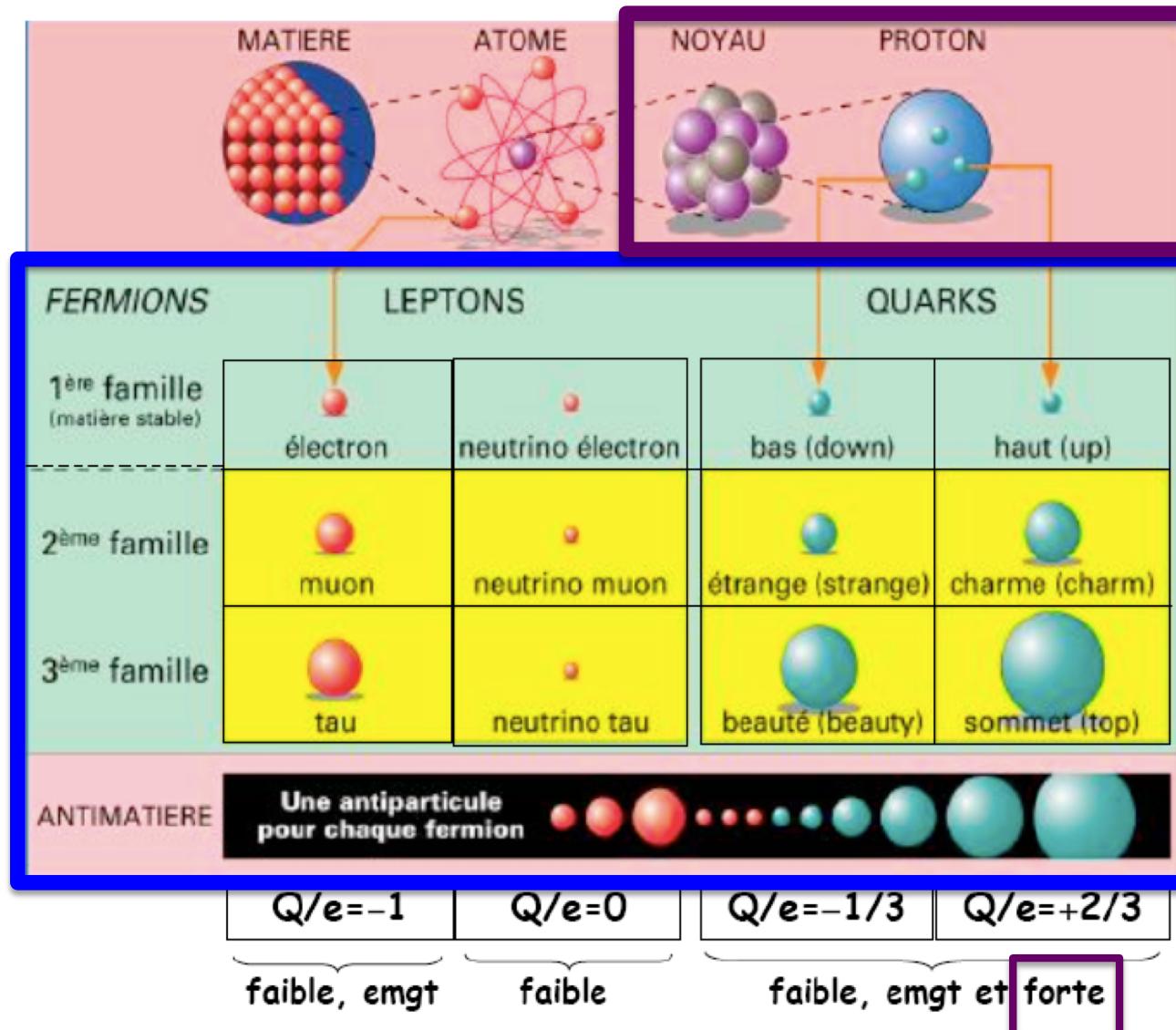
Structure du noyau atomique

Les 4 interactions fondamentales

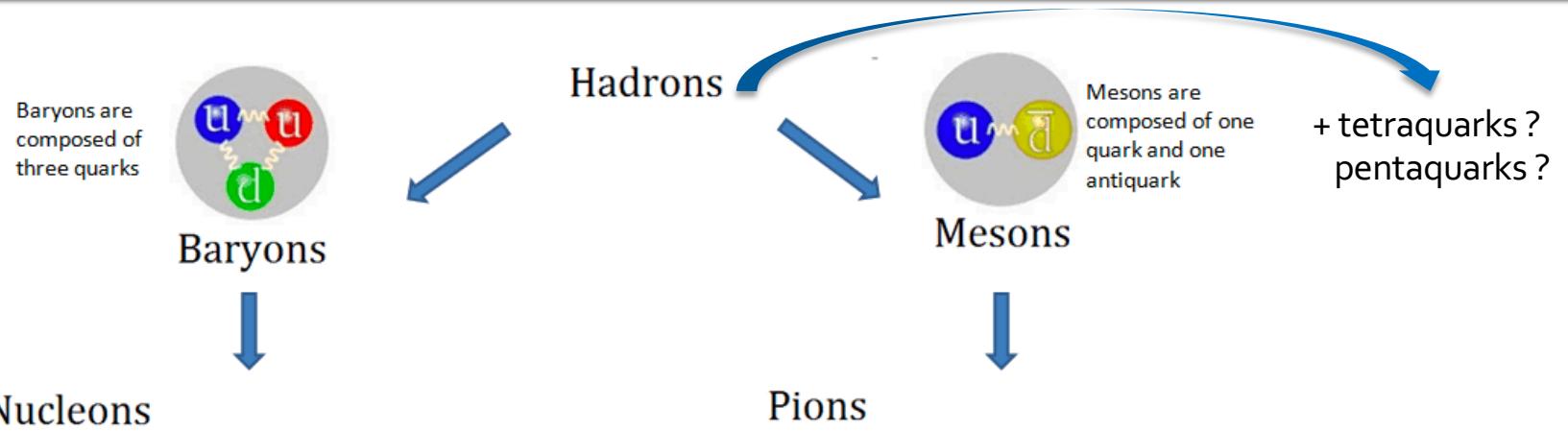
Nom	Intensité	Médiateur	Portée
Forte	1	8 gluons	$1\text{fm} = 10^{-15}\text{ m}$
Electro-magnétique	10^{-2}	photon	infinie
Faible	10^{-6}	Z^0, W^+, W^-	Contact (10^{-18} m)
Gravitation	10^{-39}	Graviton ?	infinie

La structure primordiale de la matière

Complexe Elémentaire



Hadrons : baryons et mésons



Particle	Mass (MeV/c^2)	τ (sec)
p	938.2	$> 10^{37}$
n	939.5	10^3

Particle	Mass (MeV/c^2)	τ (sec)
π^- , π^+	139	2.5×10^{-8}
π^0	135	1.8×10^{-16}

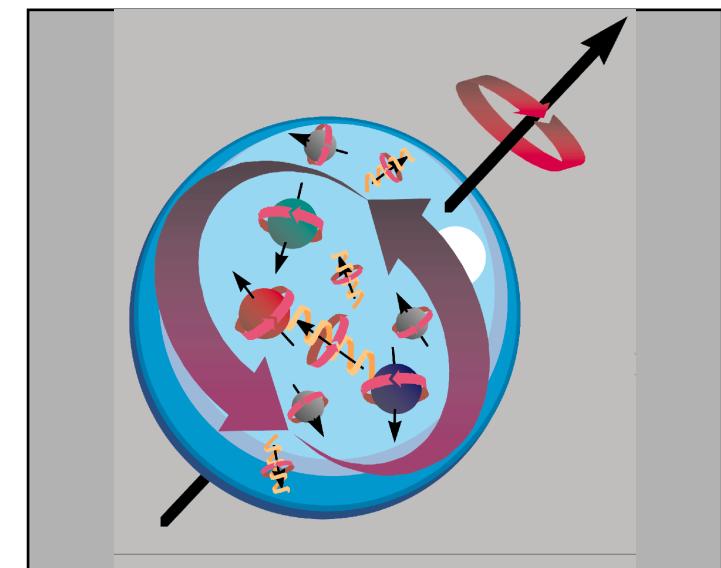
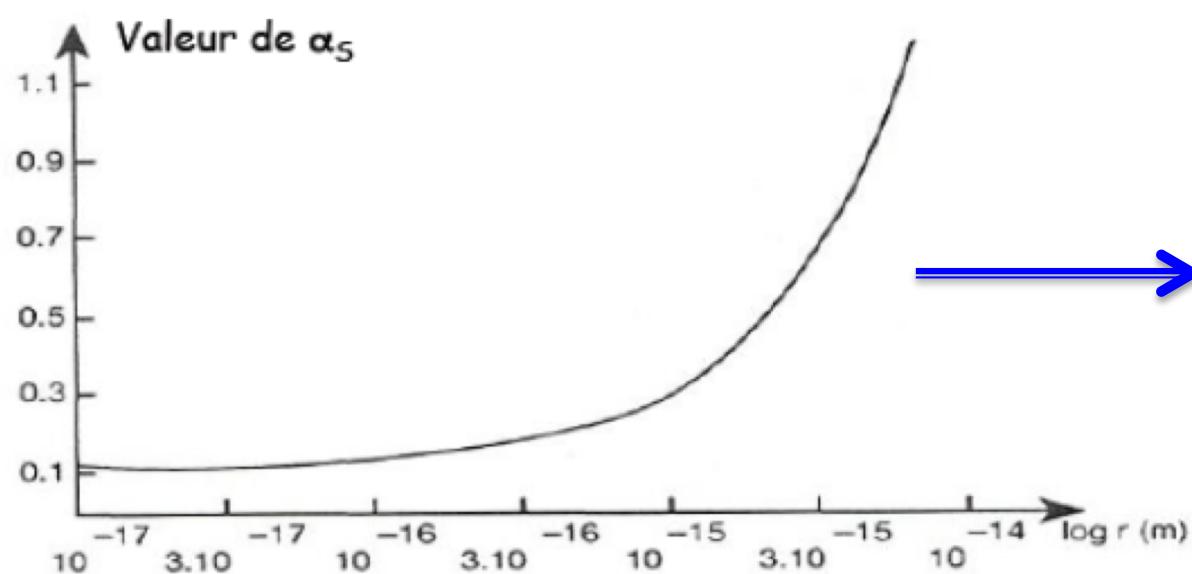
Hyperons

Particle	Mass (MeV/c^2)	τ (sec)
Λ	1115	2.6×10^{-10}
Σ^+	1189	0.8×10^{-10}
Σ^0	1192	10^{-19}
Σ^-	1197	1.6×10^{-10}
Ξ^0	1314	3×10^{-10}
Ξ^-	1321	1.8×10^{-10}
Ω^-	1675	1.3×10^{-10}

Kaons

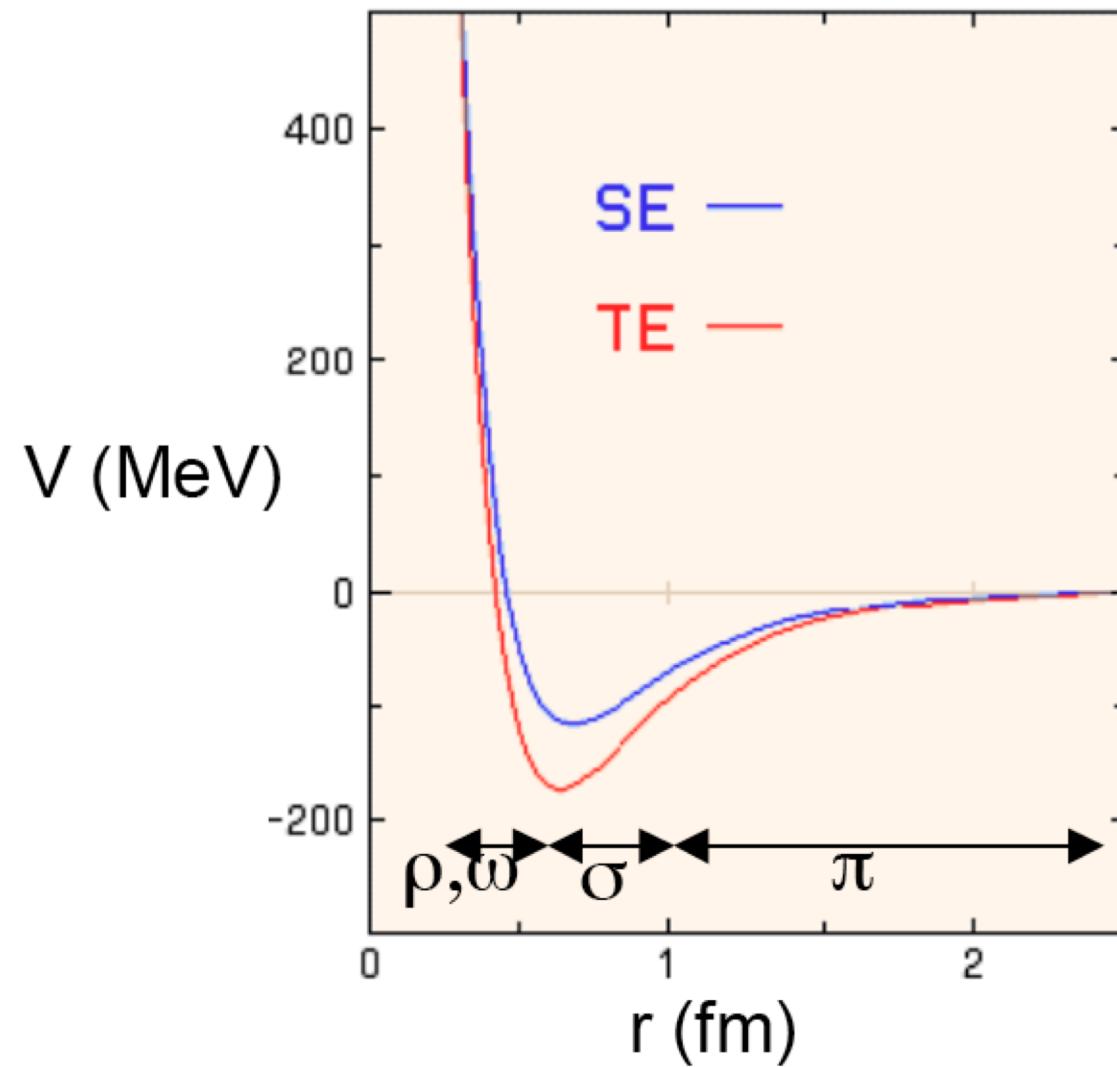
Particle	Mass (MeV/c^2)	τ (sec)
K^-, K^+	494	1.2×10^{-8}
K^0	498	
η	550	10^{-18}

Le nucléon



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

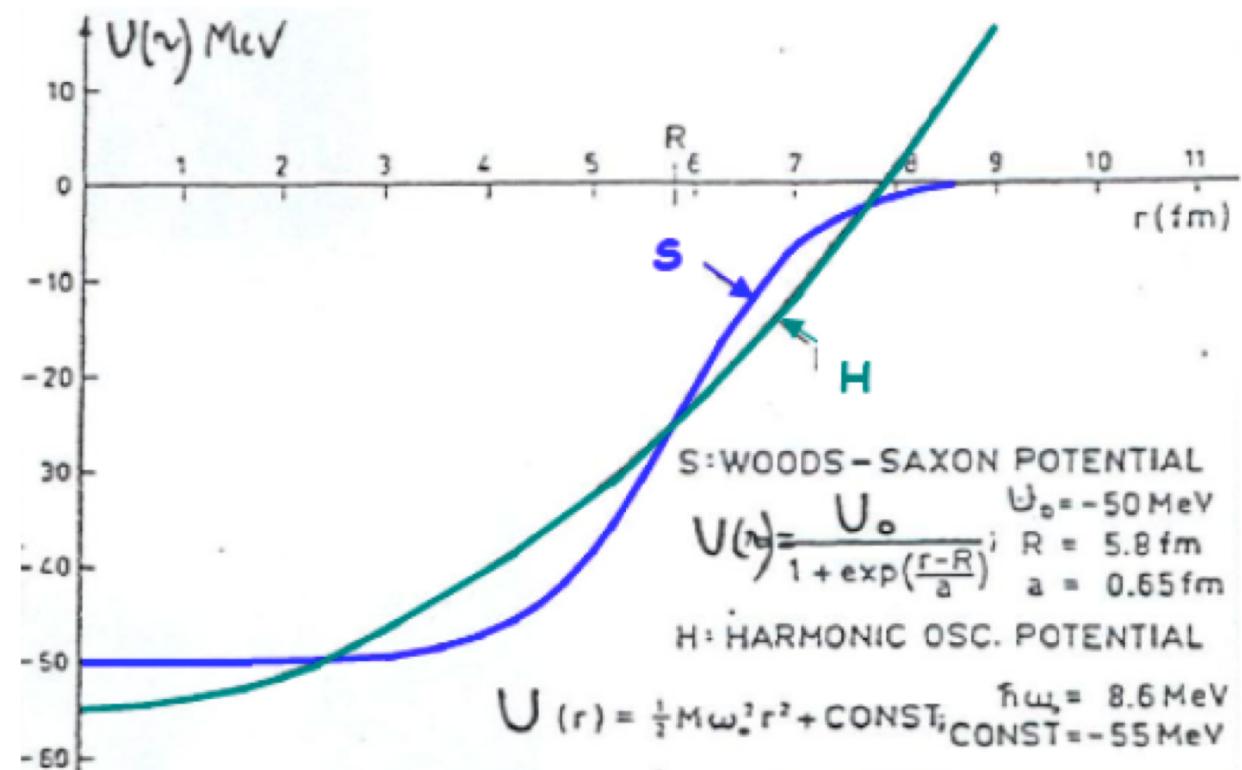
L'interaction nucléon-nucléon



Noyau=système à A corps

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

Le champ moyen



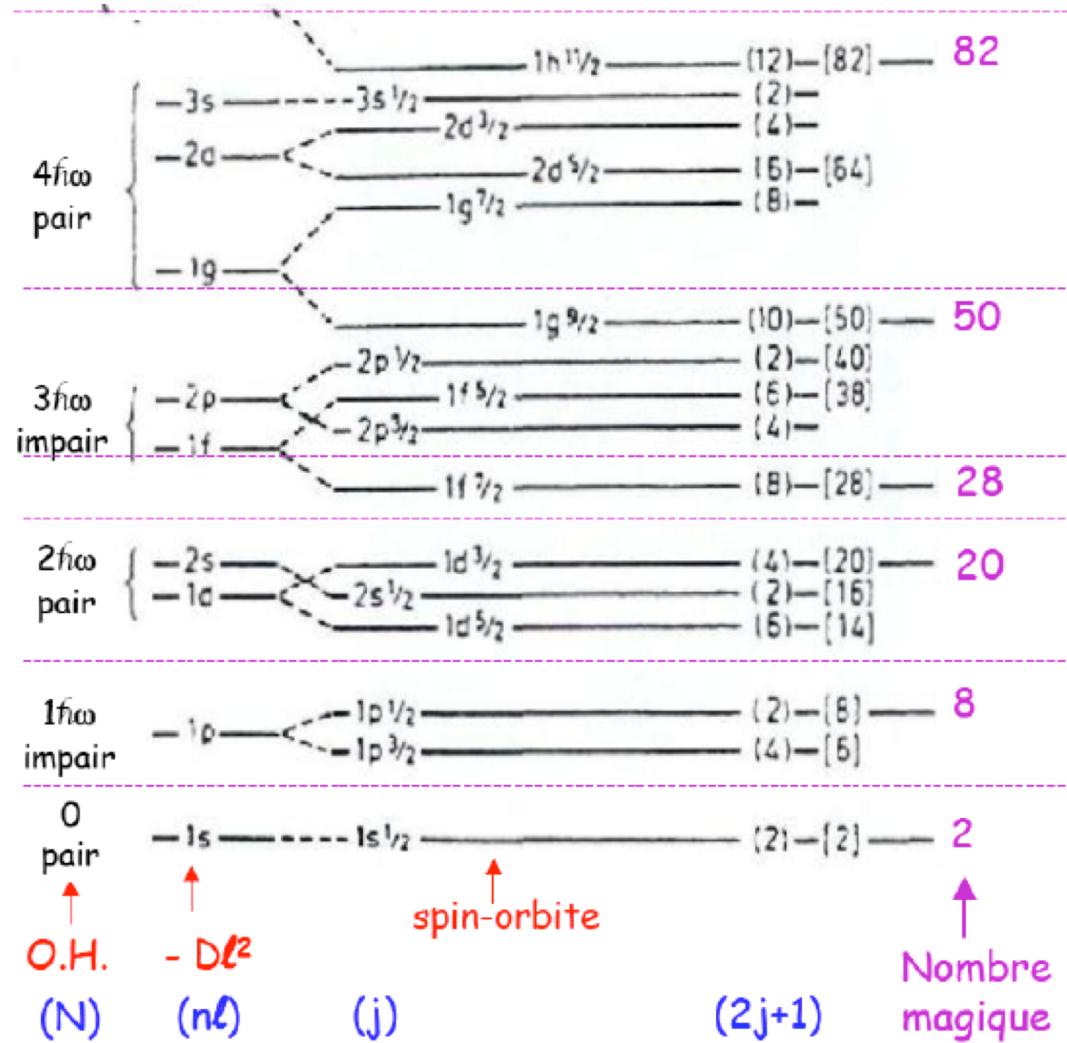
La structure en couches

N nbre quantique principal

n nbre quantique radial

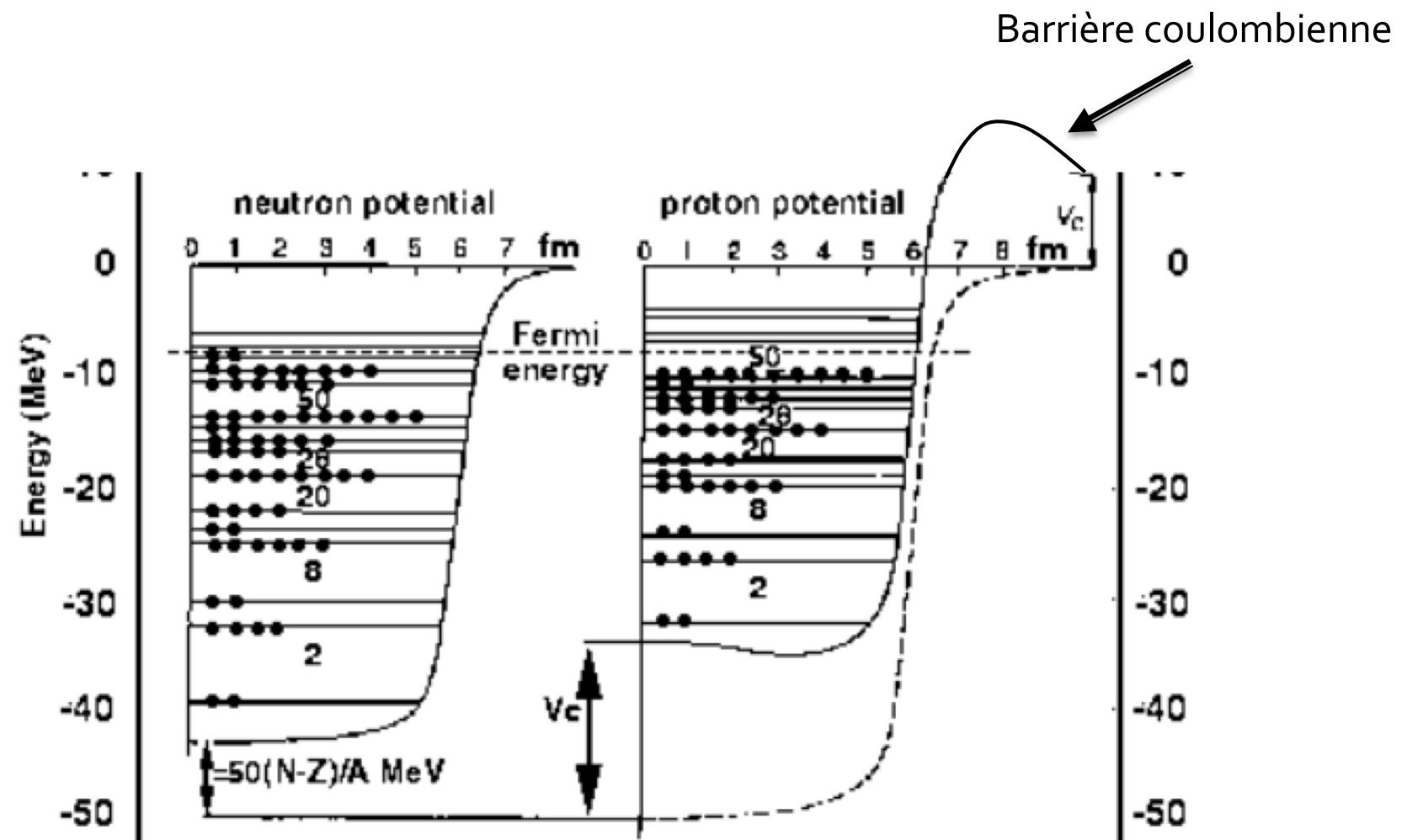
l nbre quantique orbital

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



→ α est le noyau doublement magique le plus léger

La structure en couches



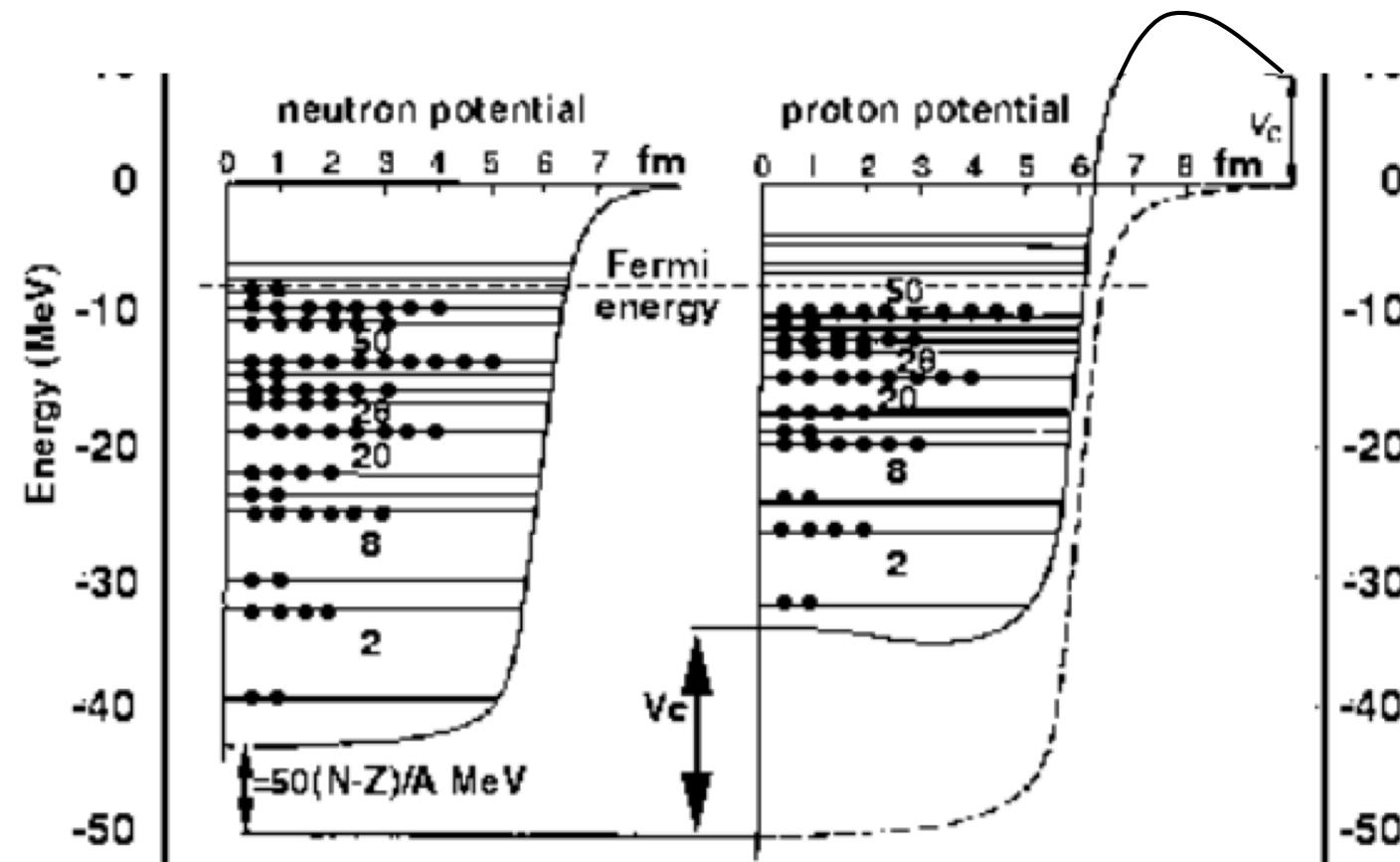
Deuxième partie

Stabilité et radioactivité du noyau

Les radioactivités

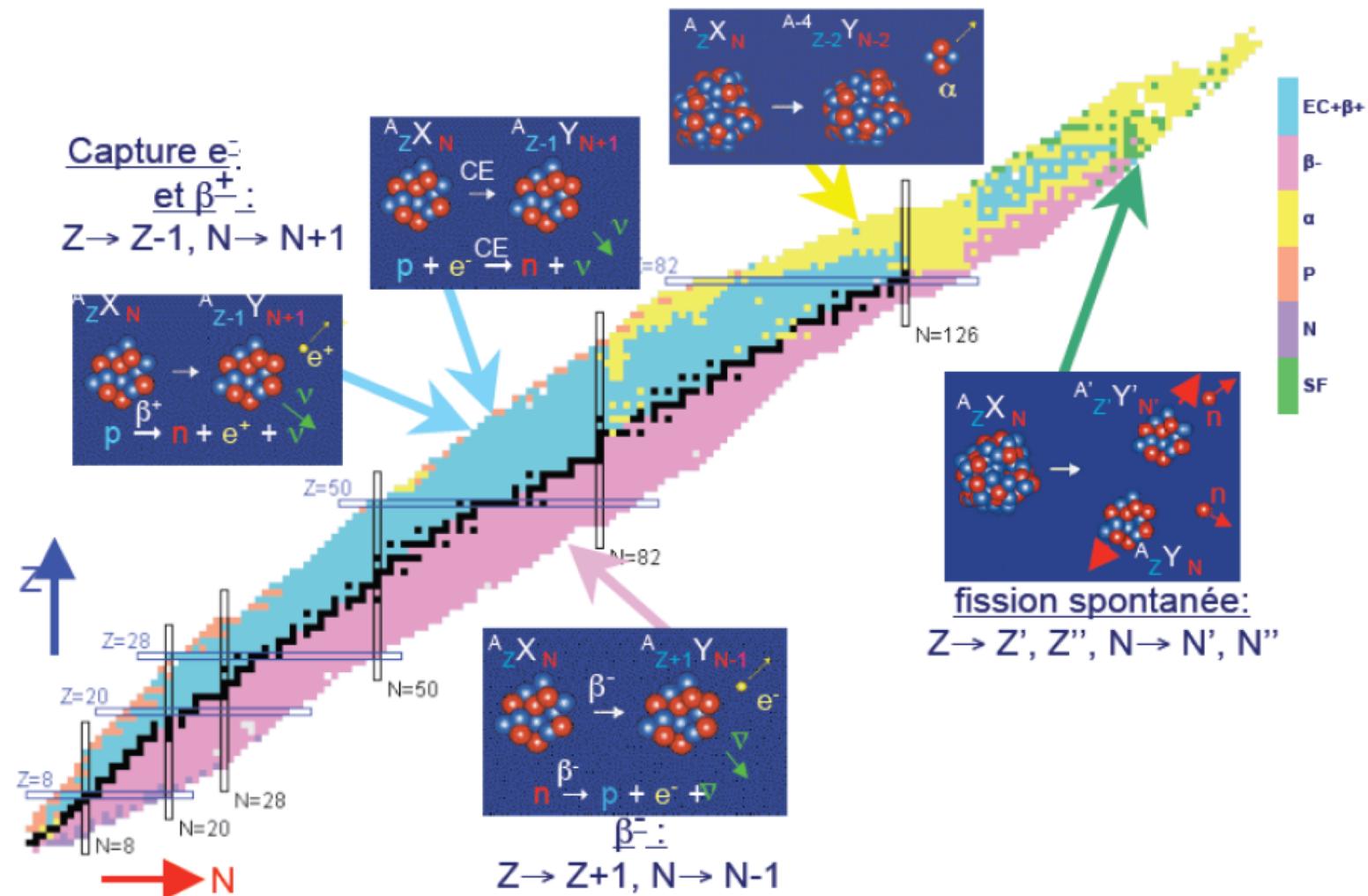
Interaction	Nom de la radioactivité (date de découverte)	Particule(s) émise(s) par le noyau
Electromagnétique	γ (1900)	photon
	Electron de conversion (1938)	e^-
Faible	β^- (1898)	$e^-, \bar{\nu}_e$
	β^+ (1933)	e^+, ν_e
	Capture électronique (1937)	ν_e
	Double β^- (1980)	$2e^-, 2\bar{\nu}_e$
	Double capture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

La structure en couches

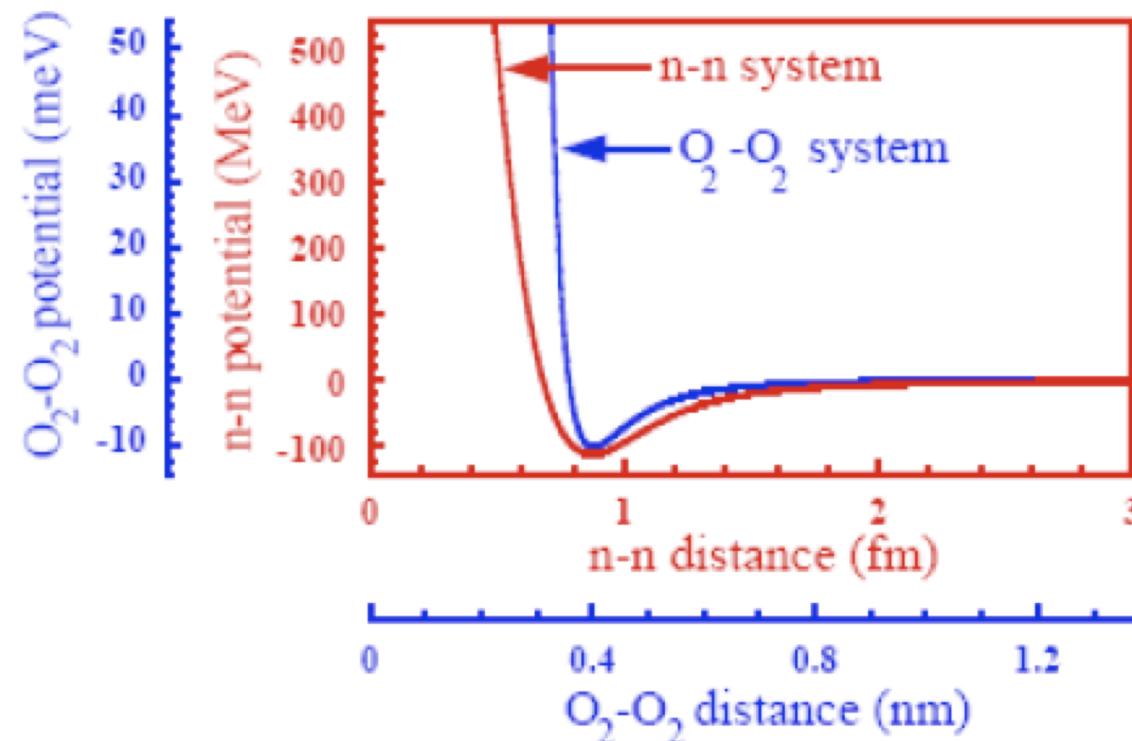


Application: (in)stabilité du p et du n

La carte des noyaux



Analogie noyau \leftrightarrow fluide



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

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

Définitions

$$Mc^2 = Nm_nc^2 + Zm_pc^2 - B$$



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.

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

termes quantiques

Les constantes sont déterminées
expérimentalement

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

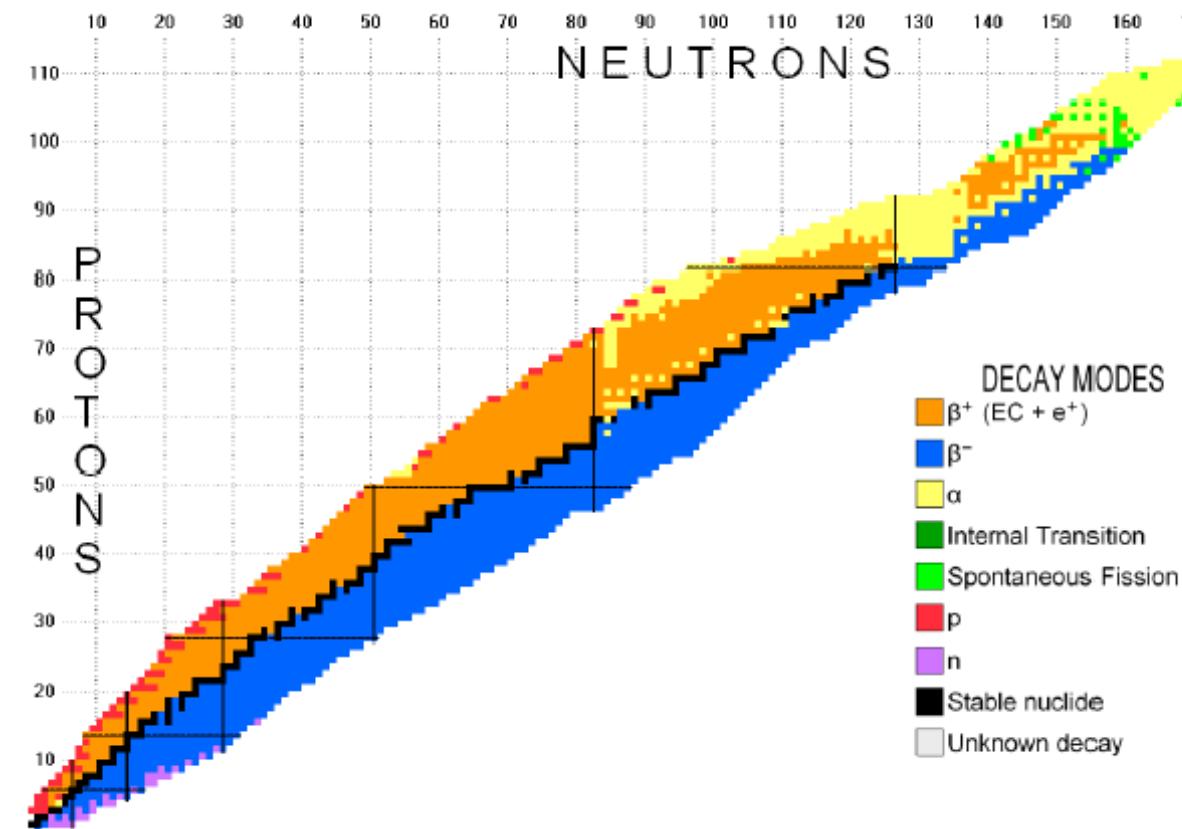
$a_C \sim 0.7 \text{ MeV}$, $a_A \sim 23 \text{ MeV}$

δ : Superfluidité nucléaire

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

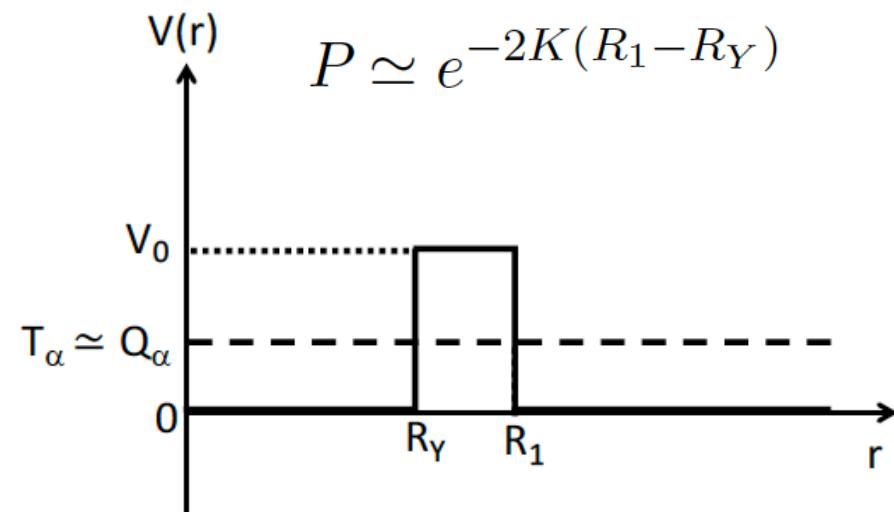
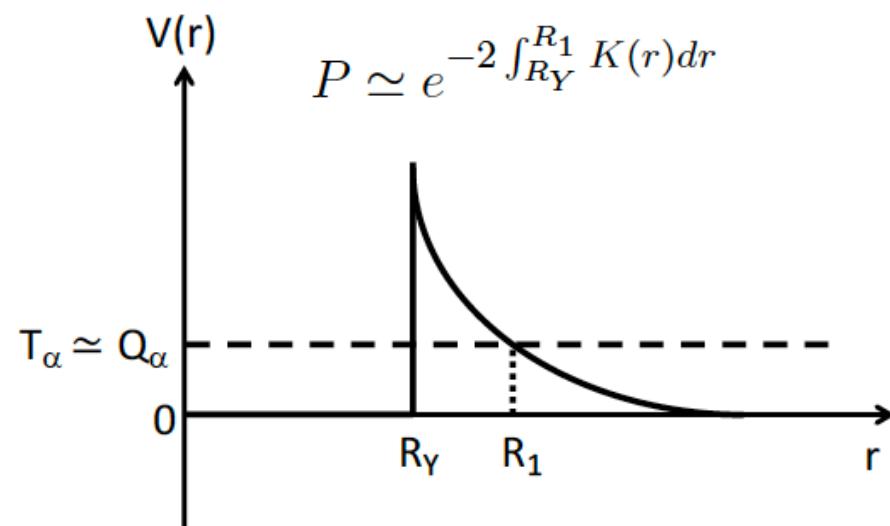
Application à la stabilité β

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



Application à la radioactivité α

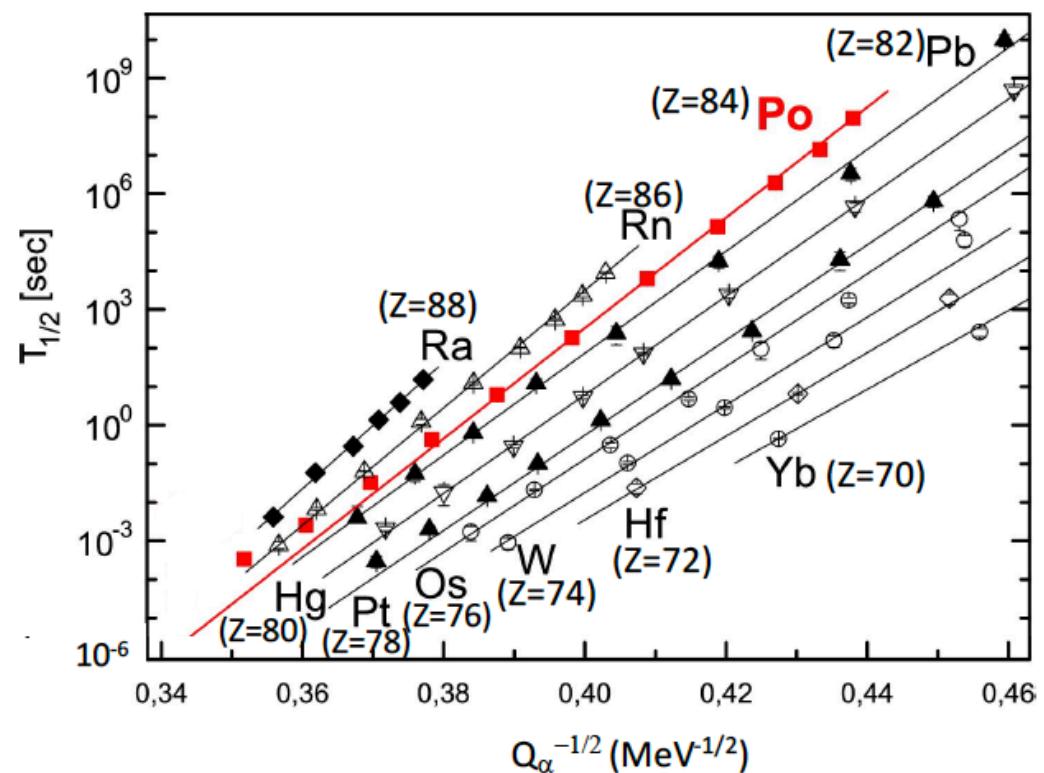
- Goutte liquide: $Q_\alpha > 0 \longrightarrow A > 150 \longrightarrow T_\alpha \simeq Q_\alpha$
- Effet tunnel à travers le potentiel Coulombien ($\alpha +$ noyau fils Y)



- $Q_\alpha \simeq 5 \text{ MeV}$
- $V_0 \simeq 15 \text{ MeV}$
- $R_Y \simeq 7 \text{ fm}$
- $R_1 \simeq 45 \text{ fm} \gg R_Y$

Application à la radioactivité α

- Probabilité d'émission : $\lambda(s^{-1}) = n \cdot P$
- Période (demi-vie) : $T_\alpha = (\ln 2)/\lambda$
- Loi de Geiger-Nuttall :
$$\log(T_\alpha) = \frac{a}{\sqrt{Q_\alpha}} + b$$



Refs web:

- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Nuclear/alpdec.html> (avec $n(Q)$ et non $n \simeq 7 \cdot 10^{21} s$)
- Mathematica: <https://demonstrations.wolfram.com/GamowModelForAlphaDecayTheGeigerNuttallLaw/>

Application à la fission et la fusion



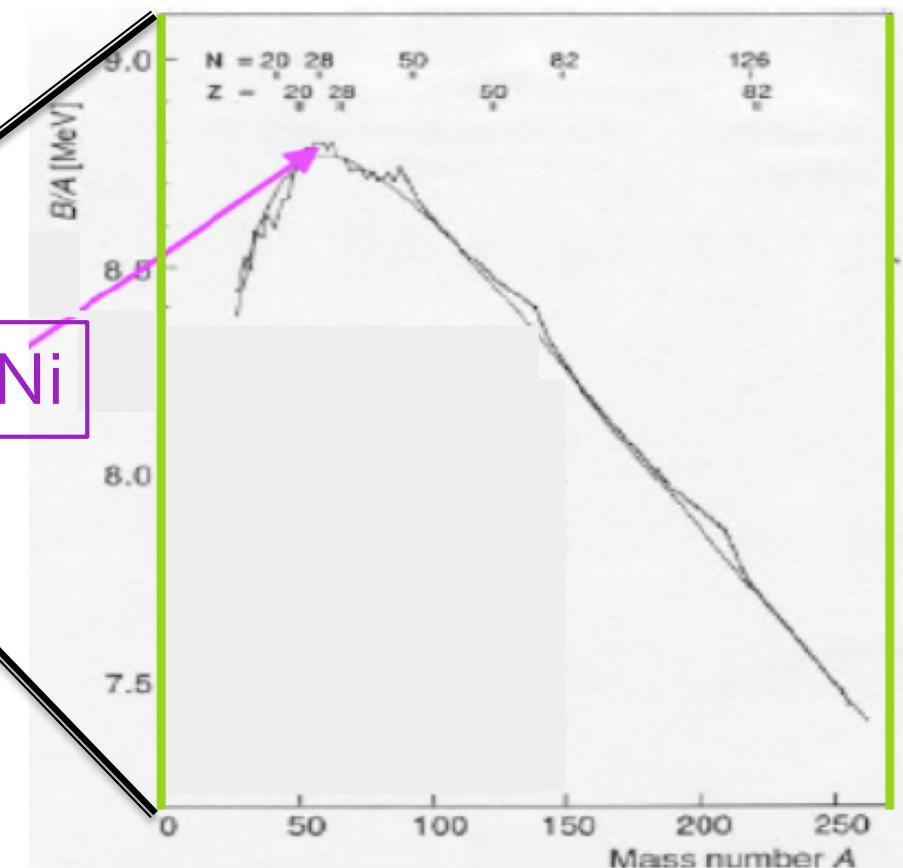
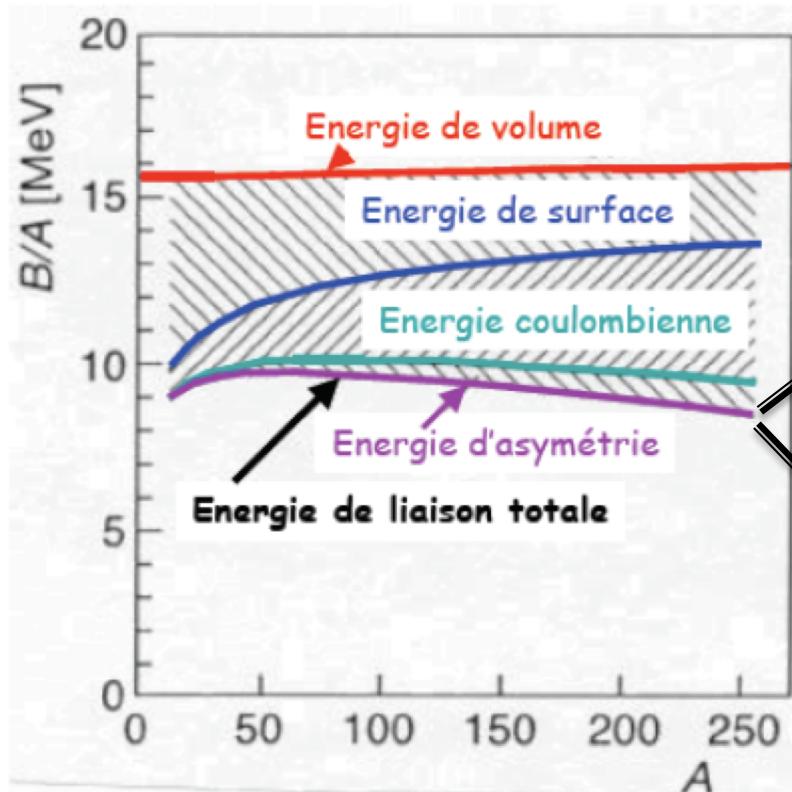
Chaleur de réaction : $Q = -B_1 - B_2 + B_3 + B_4$



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

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

La courbe d'Aston



Fe, Ni

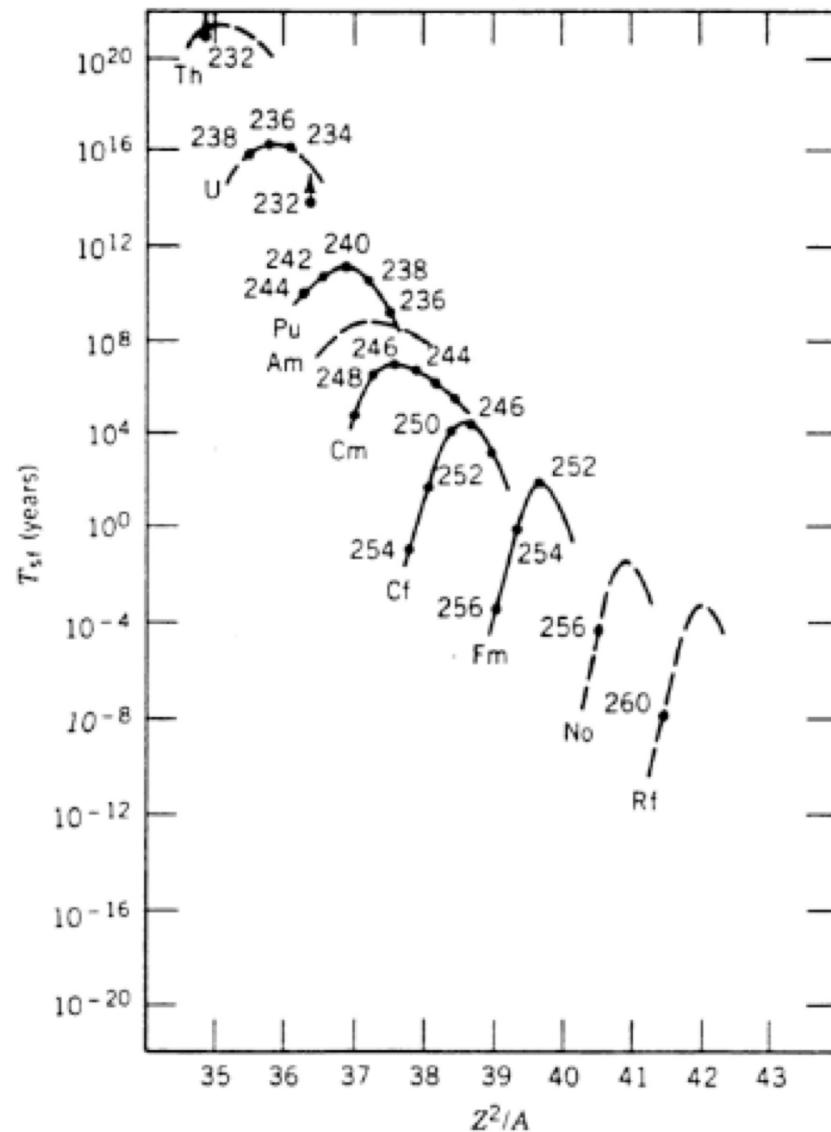
Fusion $\rightarrow \leftarrow$ Fission

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

Troisième partie

Fission

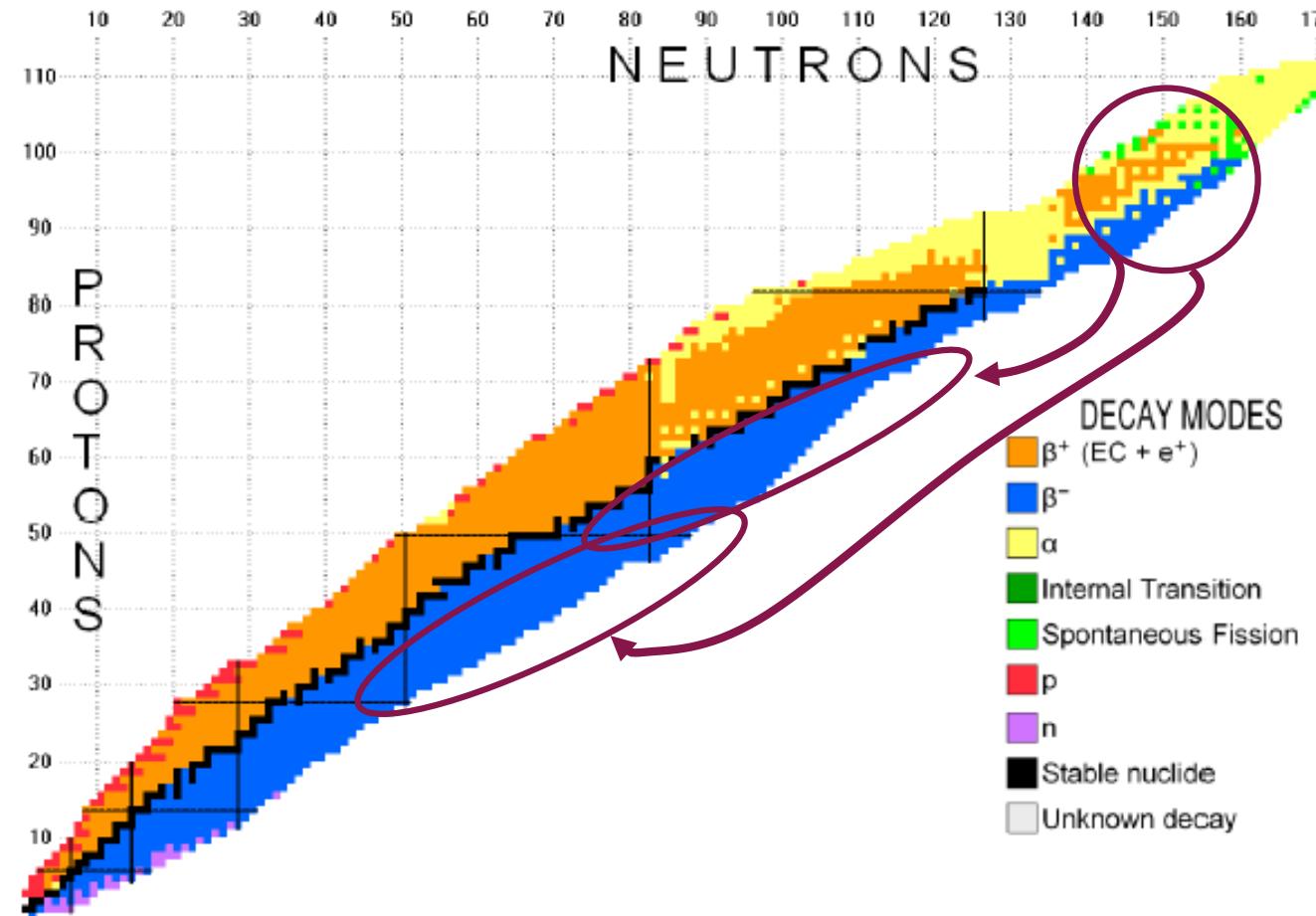
Le paramètre de fissilité



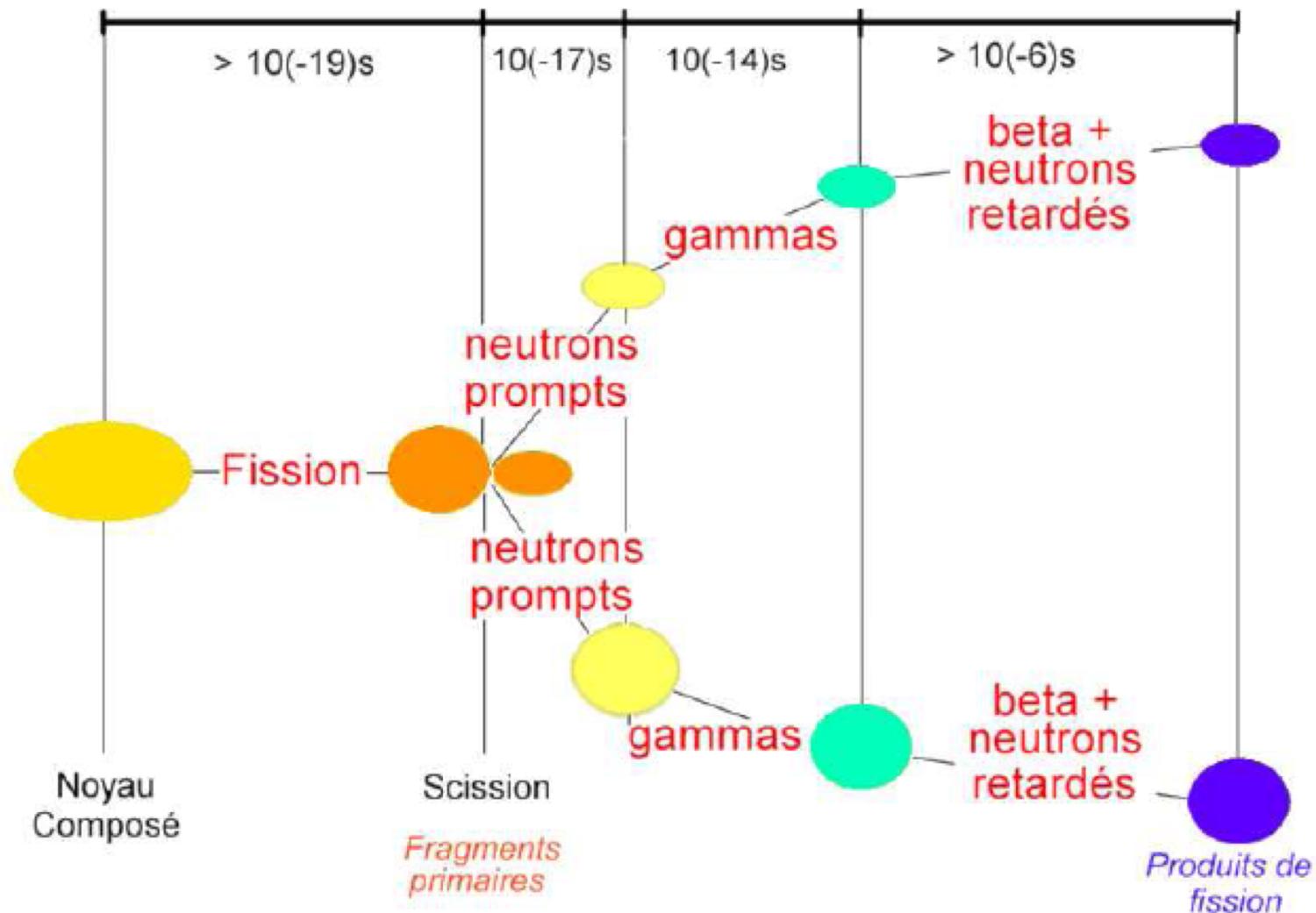
Fission spontanée
(~20 noyaux)

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

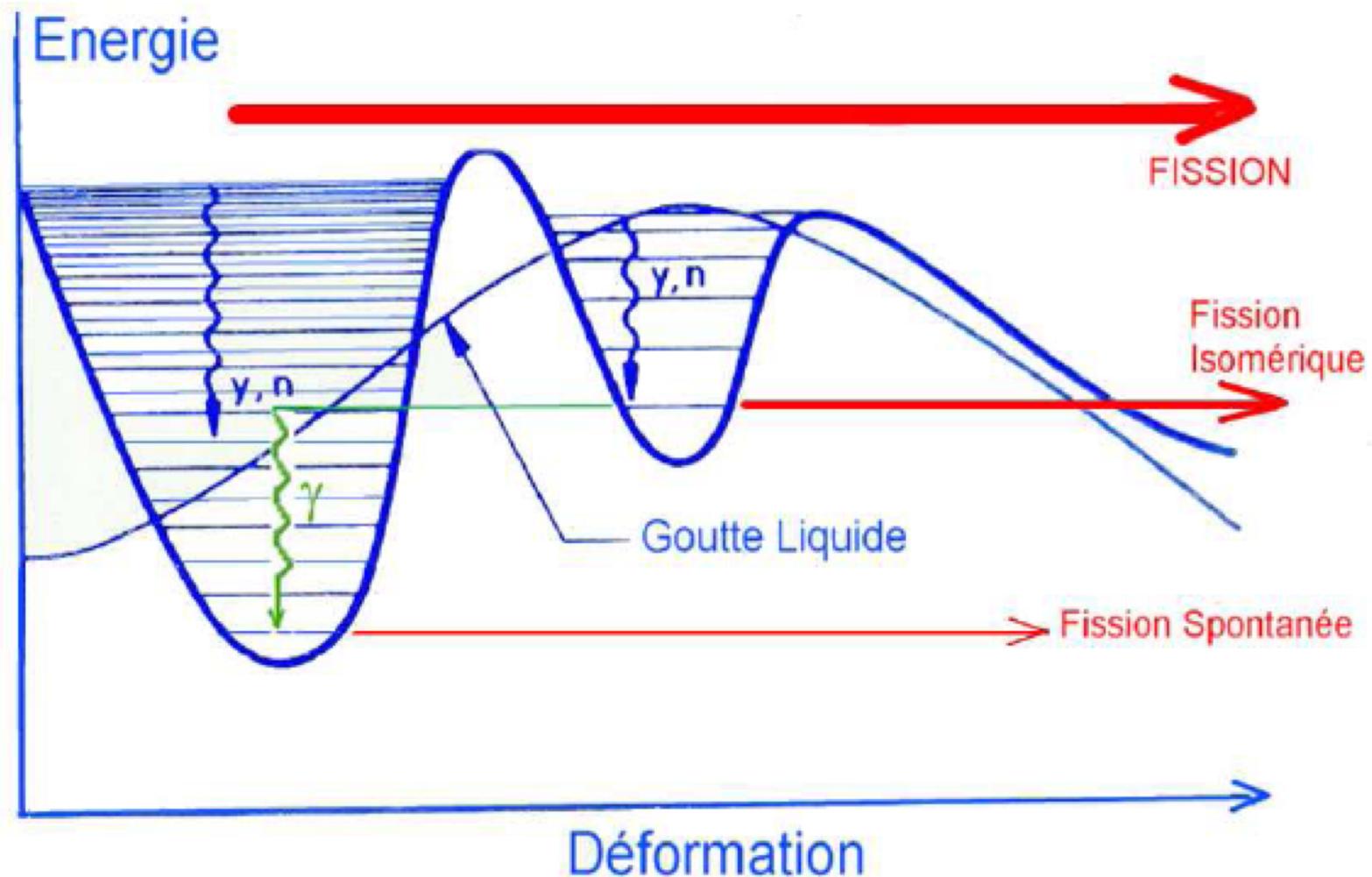
Variété de noyaux fils



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



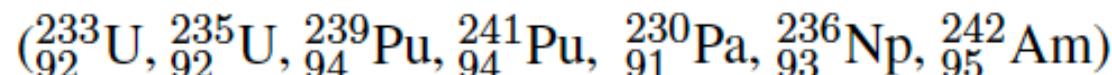
$$m_n c^2 + M(A-1)c^2 = M(A)c^2 + E^*$$



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



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



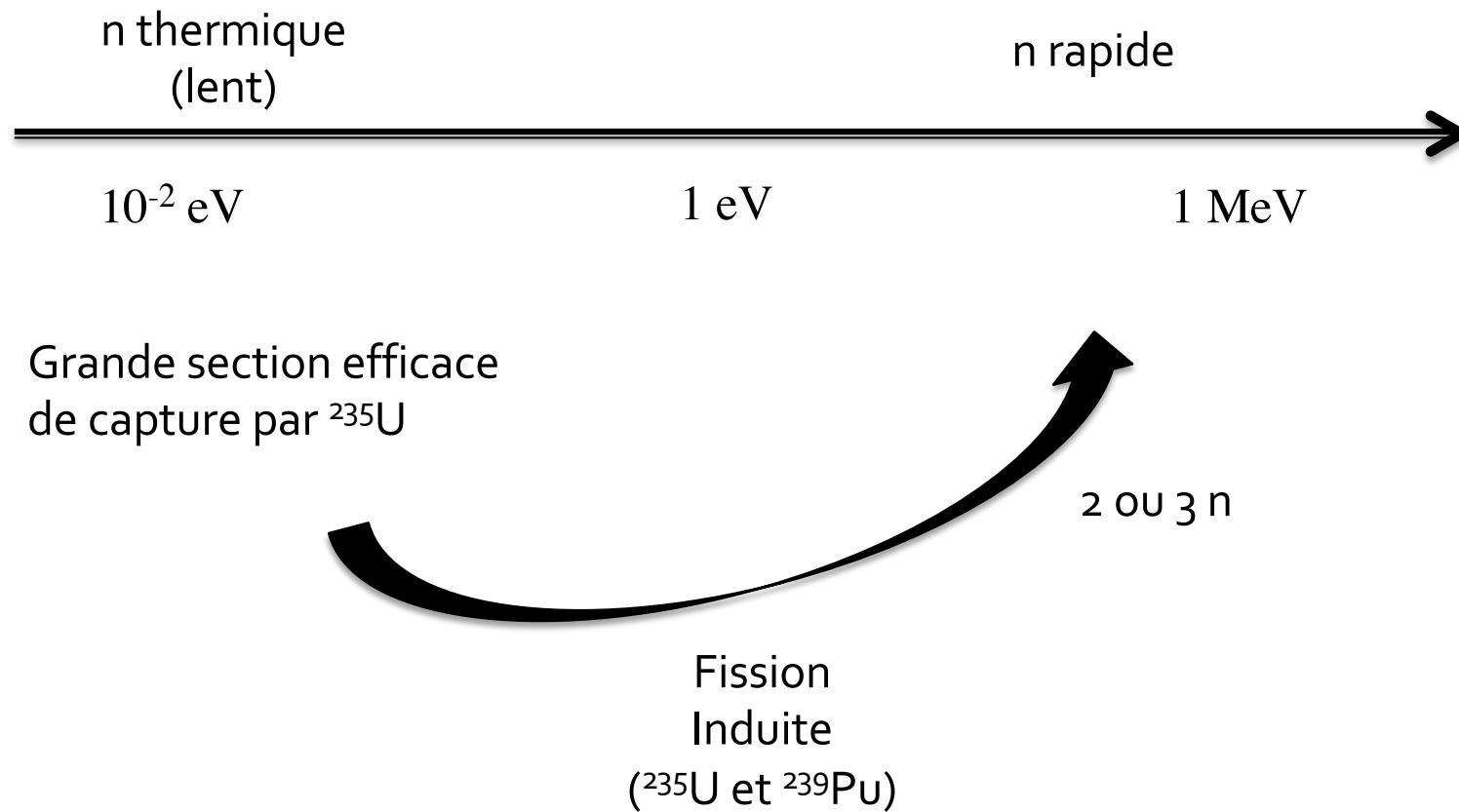
$S_n({}^{236}\text{U})=6,5$ MeV.



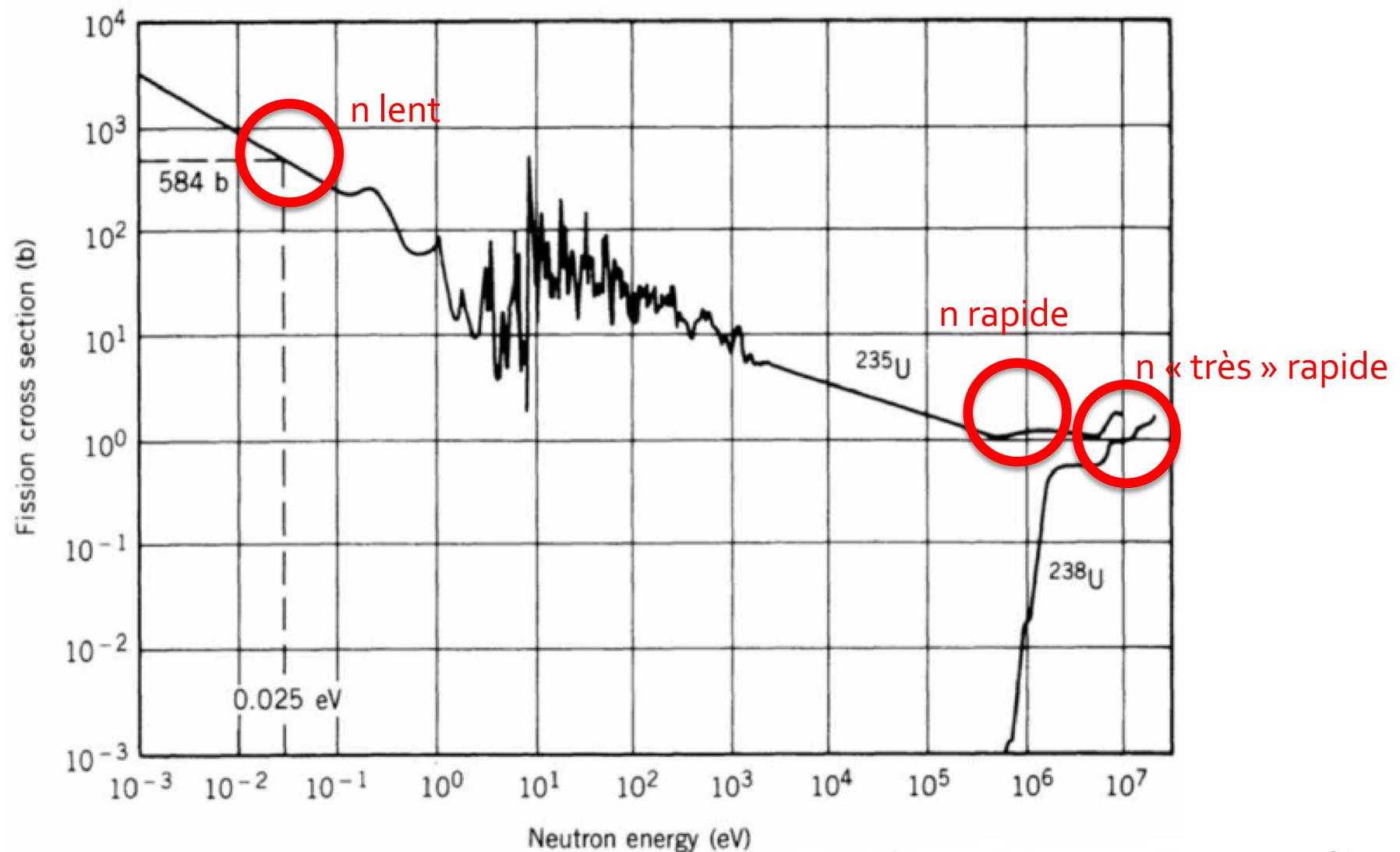
$S_n({}^{239}\text{U})=4,8$ MeV



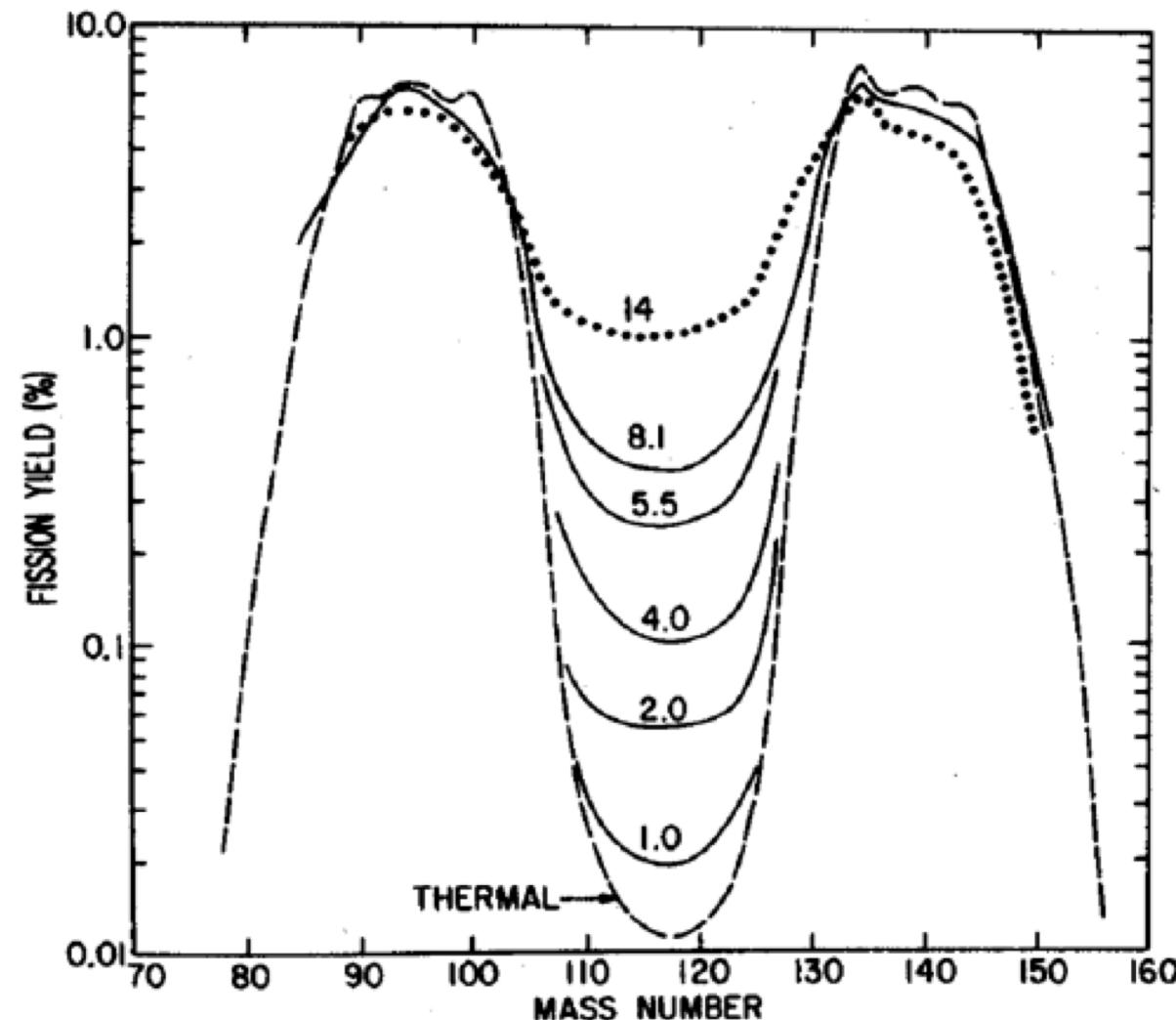
L'énergie du neutron



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
- 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

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

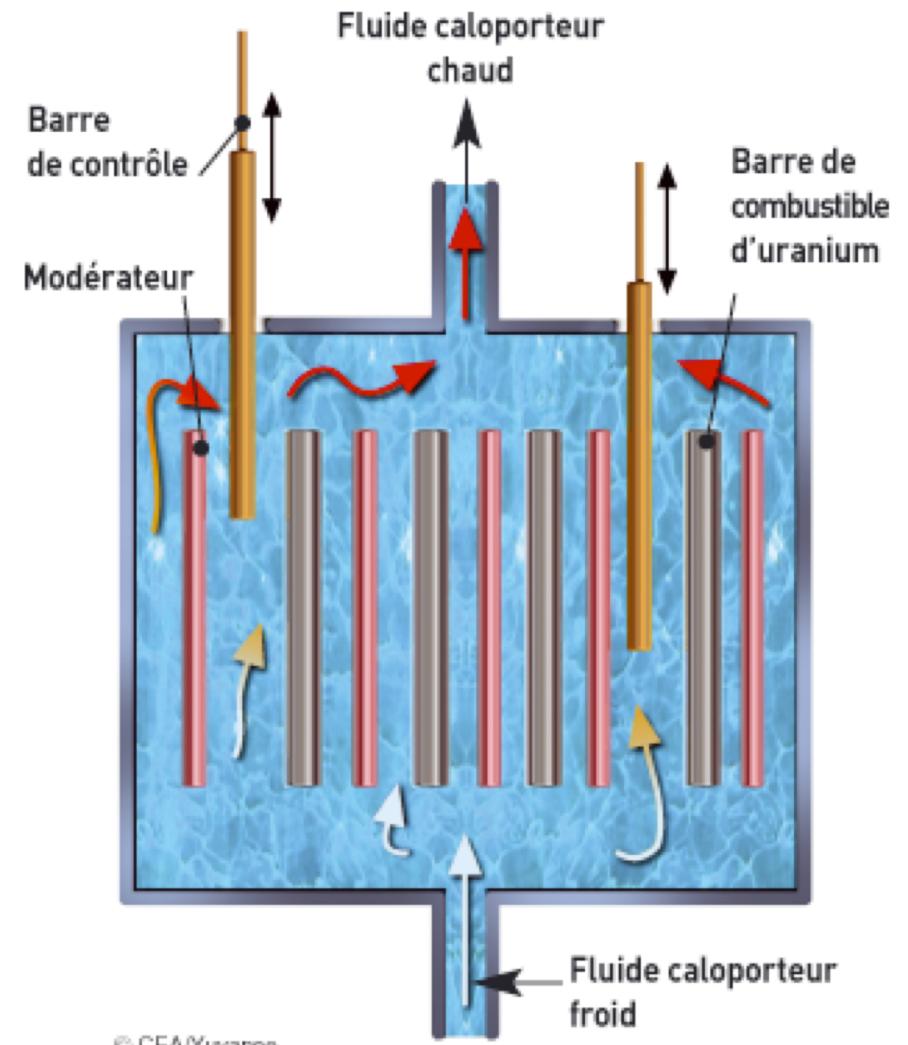
□ Réacteur nucléaire: maîtrise de la réaction en chaîne

- 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)

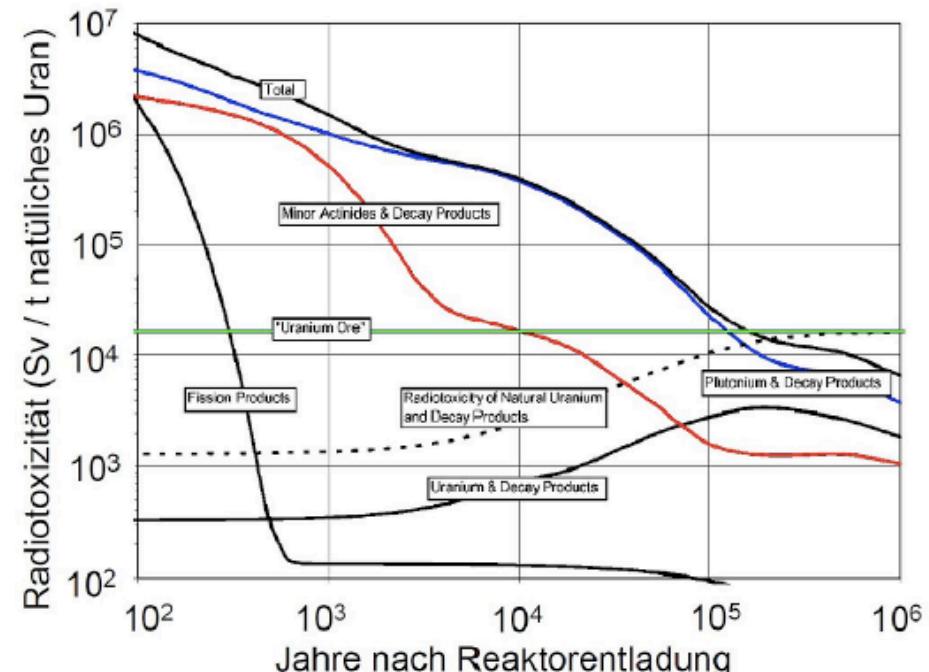
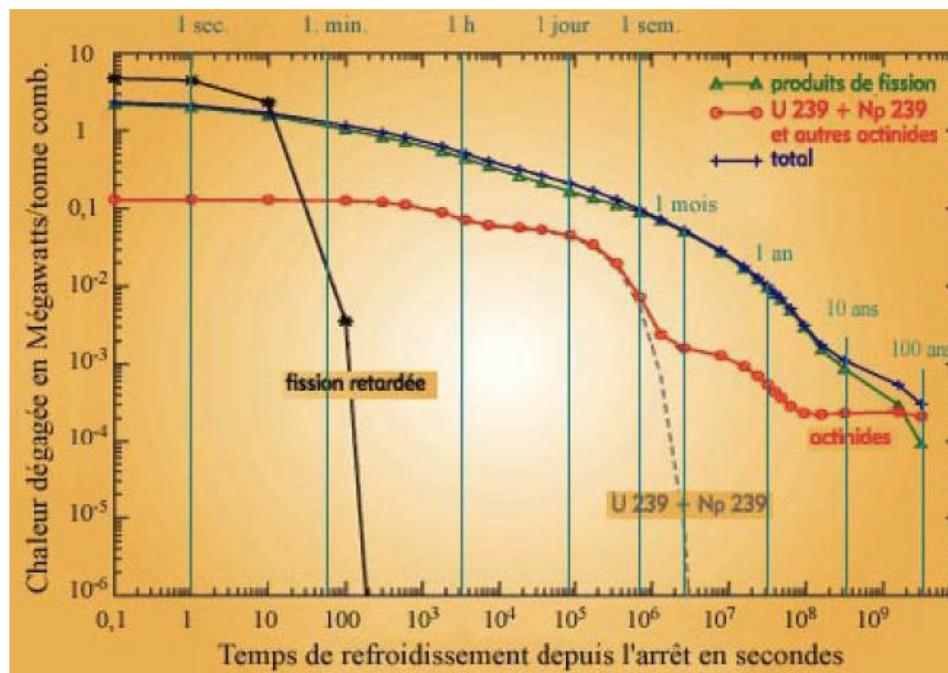
$$1 \text{ kg de } {}^{235}\text{U}$$
$$E \simeq \frac{200 \times 1,6 \cdot 10^{-13} \times 6,02 \cdot 10^{23} \times 1000}{235} \simeq 10^{14} \text{ J}$$



© CEA/Yuvance

Arrêt du réacteur et déchets

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



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

L'accident de Fukushima

- 1-
 - Le séisme provoque l'arrêt automatique du réacteur (sur sismomètres)
⇒ Les barres montent, le réacteur est éteint, la pression est libérée dans le tore
 - Le séisme détruit également les lignes électriques
⇒ Perte de l'alimentation électrique externe
 - Le raz-de-marée détruit les sources froides et les réservoirs de gasoil (les diesels ?)
⇒ Perte totale de l'alimentation électrique et des sources froides
 - ⇒ *Perte totale de tout moyen de refroidissement*
- 2-
 - Les réacteurs, non (ou mal) refroidis, fondent au moins partiellement
 - Vers 1200 °C, la couche de zircone (ZrO_2) en surface des crayons perd sa propriété d'étanchéité
⇒ Oxydation auto-catalytique de toute la gaine : $Zr + H_2O \rightarrow ZrO_2 + H_2$
 - Cet hydrogène est libéré lors des relâchements de pression des enceintes et explose au contact de l'air
 - Ces explosions provoquent des fuites avérées dans les enceintes de confinement
- 3-
 - Les explosions d'hydrogène détruisent les systèmes de refroidissement des piscines
 - L'explosion du réacteur 2 met le feu au réacteur 4, pourtant vide, et endommage sa piscine

Réacteurs nucléaires

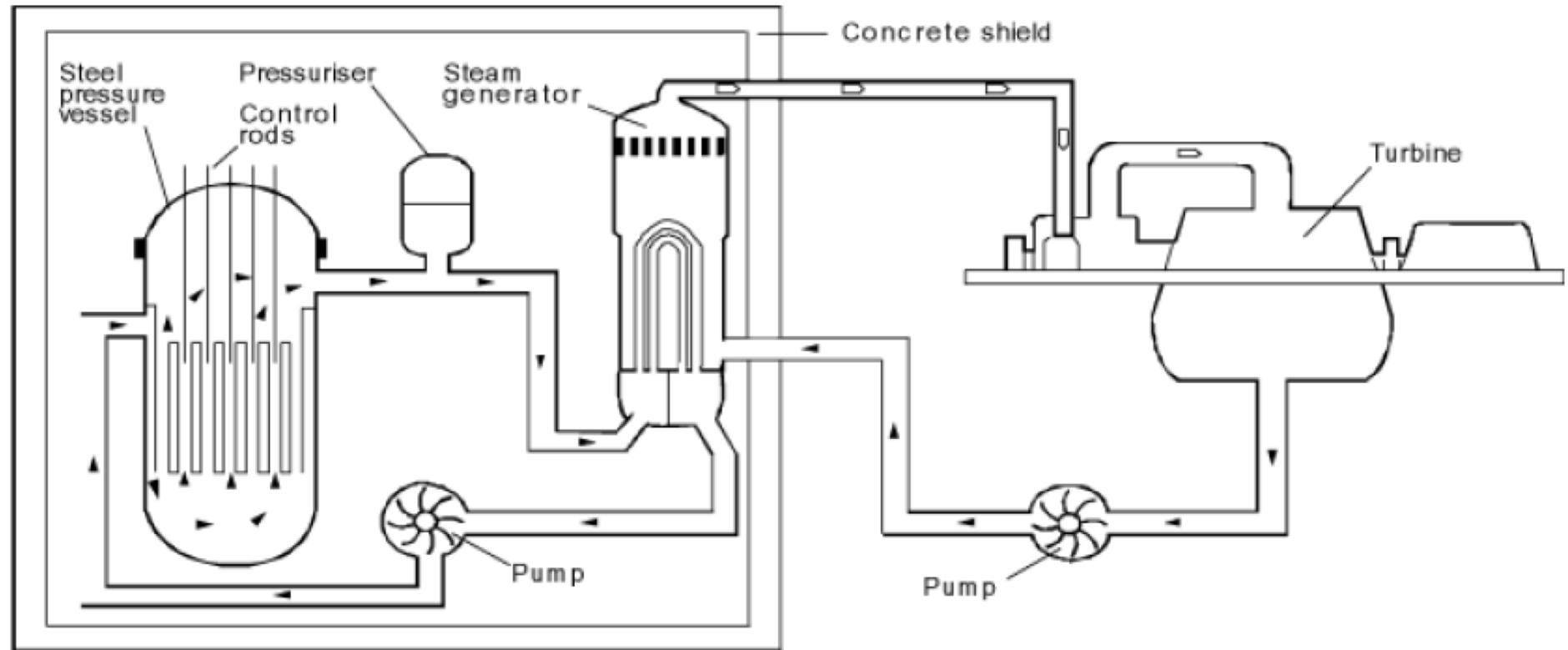
Reactor type	Main Countries	Number	GWe	Fuel	Coolant	Moderator
Pressurised Water Reactor (PWR)	US, France, Japan, Russia	252	235	enriched UO ₂	water	water
Boiling Water Reactor (BWR)	US, Japan, Sweden	93	83	enriched UO ₂	water	water
Gas-cooled Reactor (Magnox & AGR)	UK	34	13	natural U (metal), enriched UO ₂	CO ₂	graphite

Réacteurs nucléaires

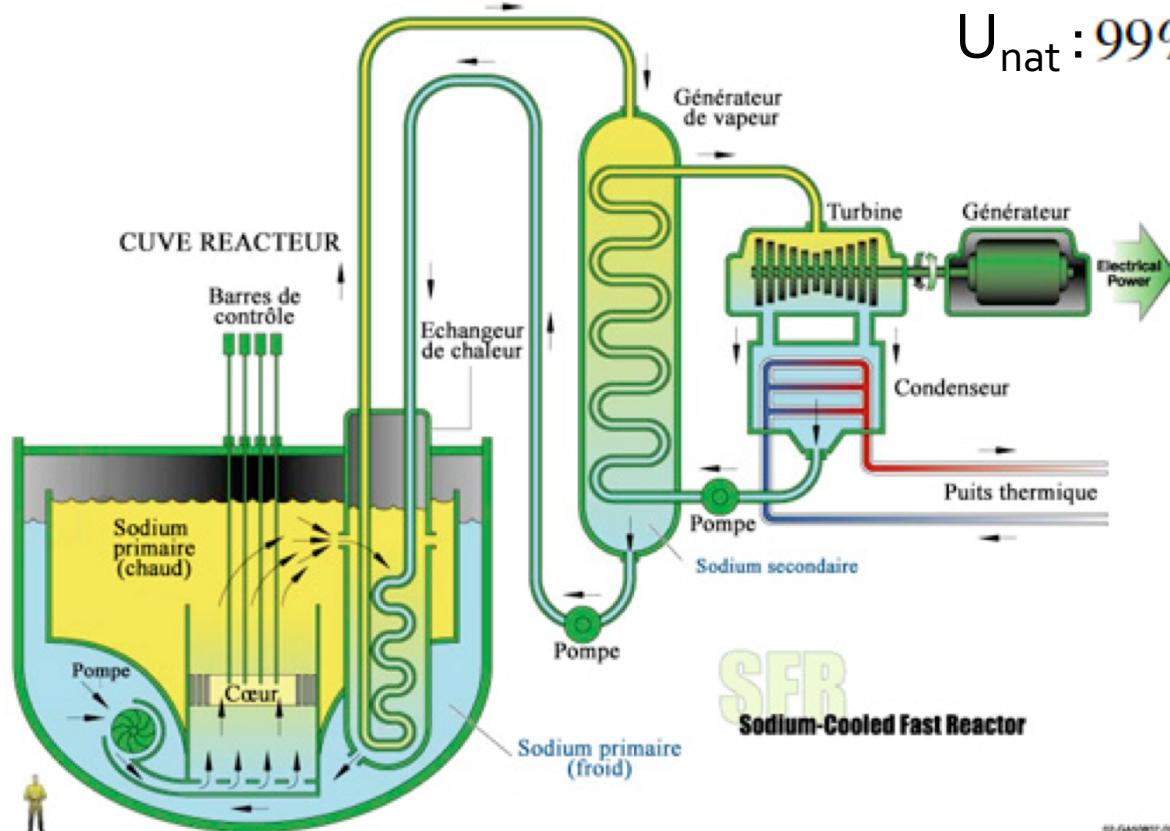
Pressurised Heavy Water Reactor "CANDU" (PHWR)	Canada	33	18	natural UO ₂	heavy water	heavy water
Light Water Graphite Reactor (RBMK)	Russia	14	14	enriched UO ₂	water	graphite
Fast Neutron Reactor (FBR)	Japan, France, Russia	4	1.3	PuO ₂ and UO ₂	liquid sodium	none
Other	Russia, Japan	5	0.2			
	TOTAL	435	364			

REP (GEN II)

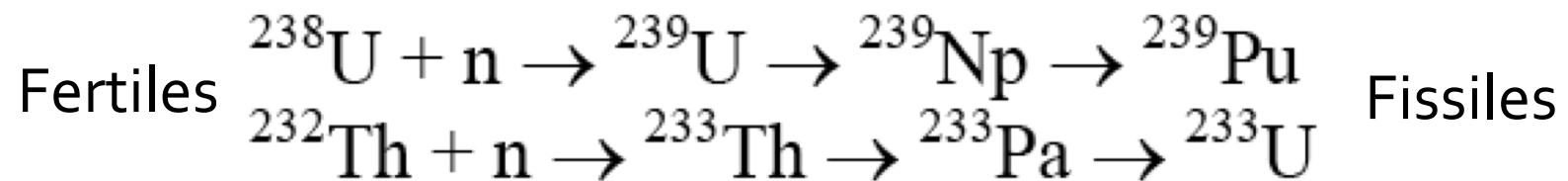
EPR (GEN III)=super REP



RNR (GEN IV)



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



La bombe A

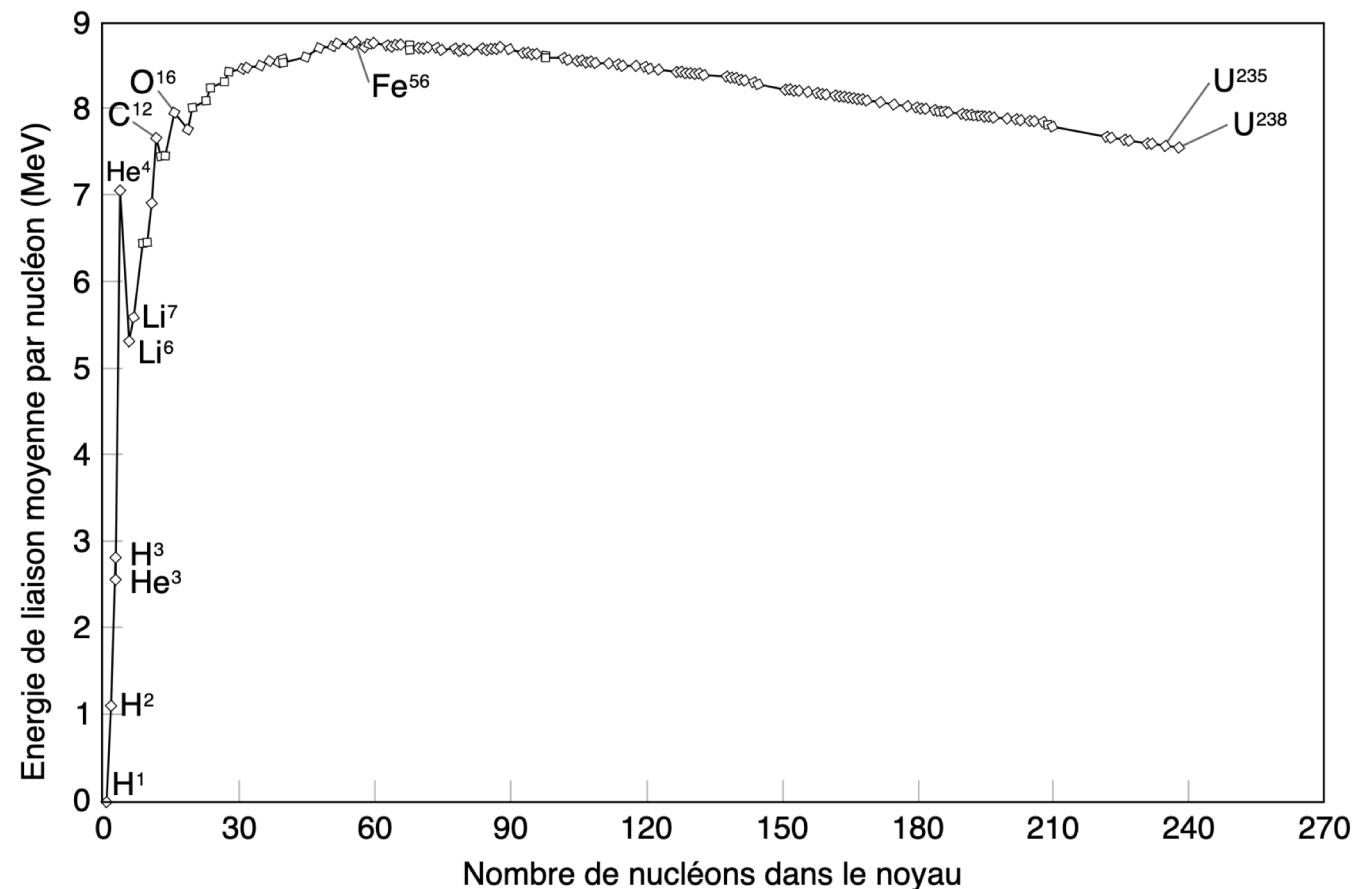
- Masse critique $^{235}\text{U}=50\text{kg}$; $^{239}\text{Pu}=16\text{kg}$
- Neutrons rapides
- $k>1$
- Réflecteurs de neutrons
- 1kg libère $7 \cdot 10^{13} \text{ J}$
- Stockage vs. réalisation de la masse critique

Quatrième partie

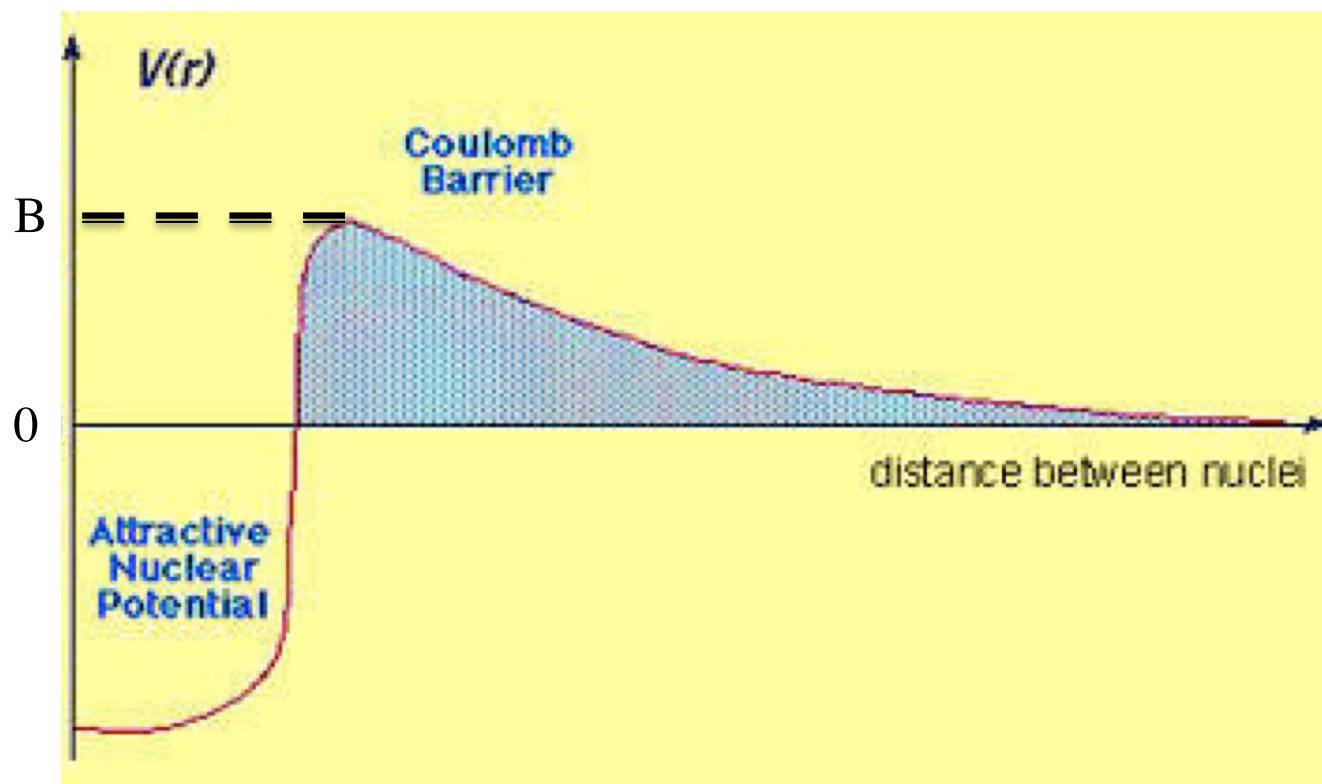
Fusion

Avantages de la fusion thermonucléaire

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

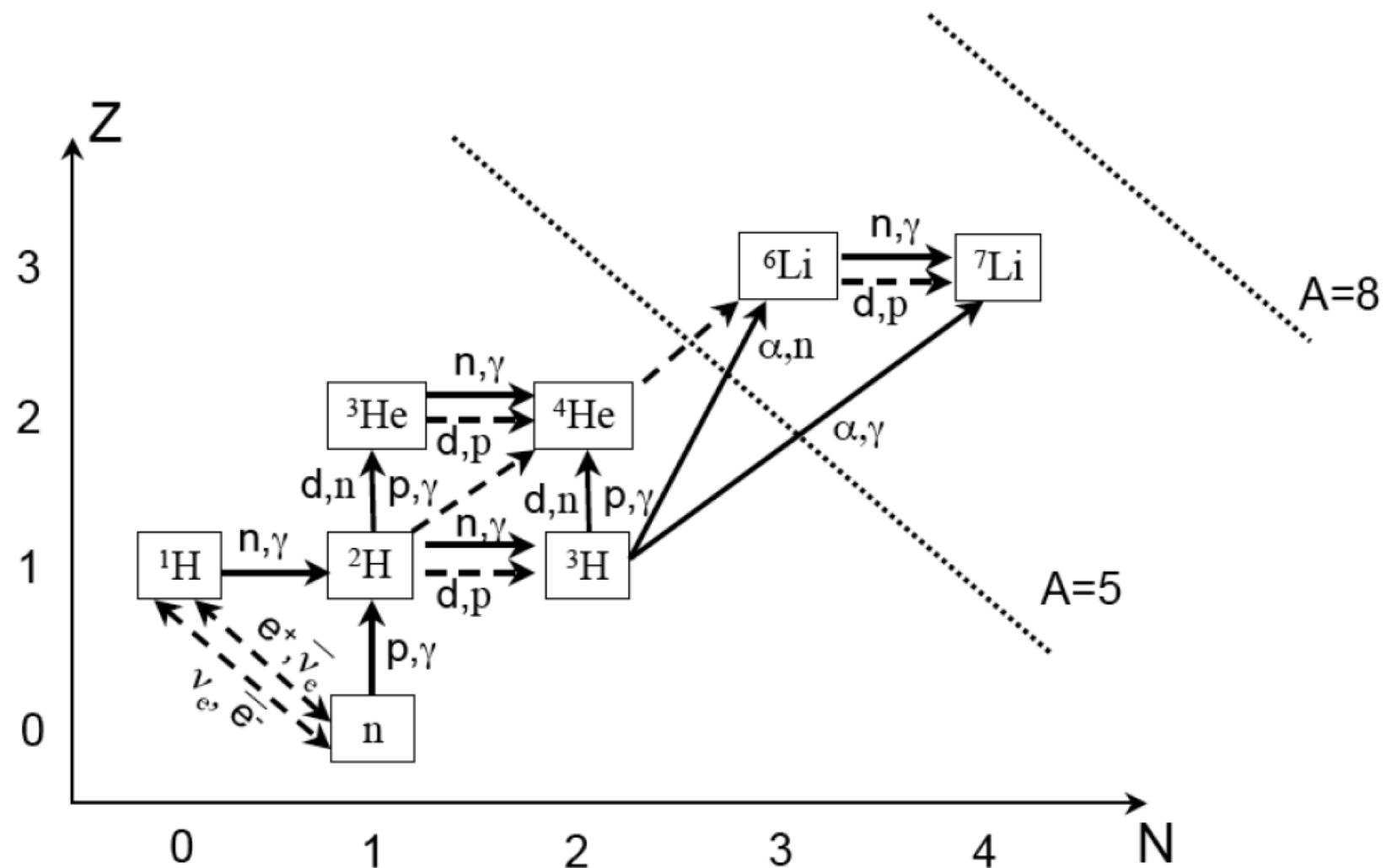


La barrière de fusion : Coulomb

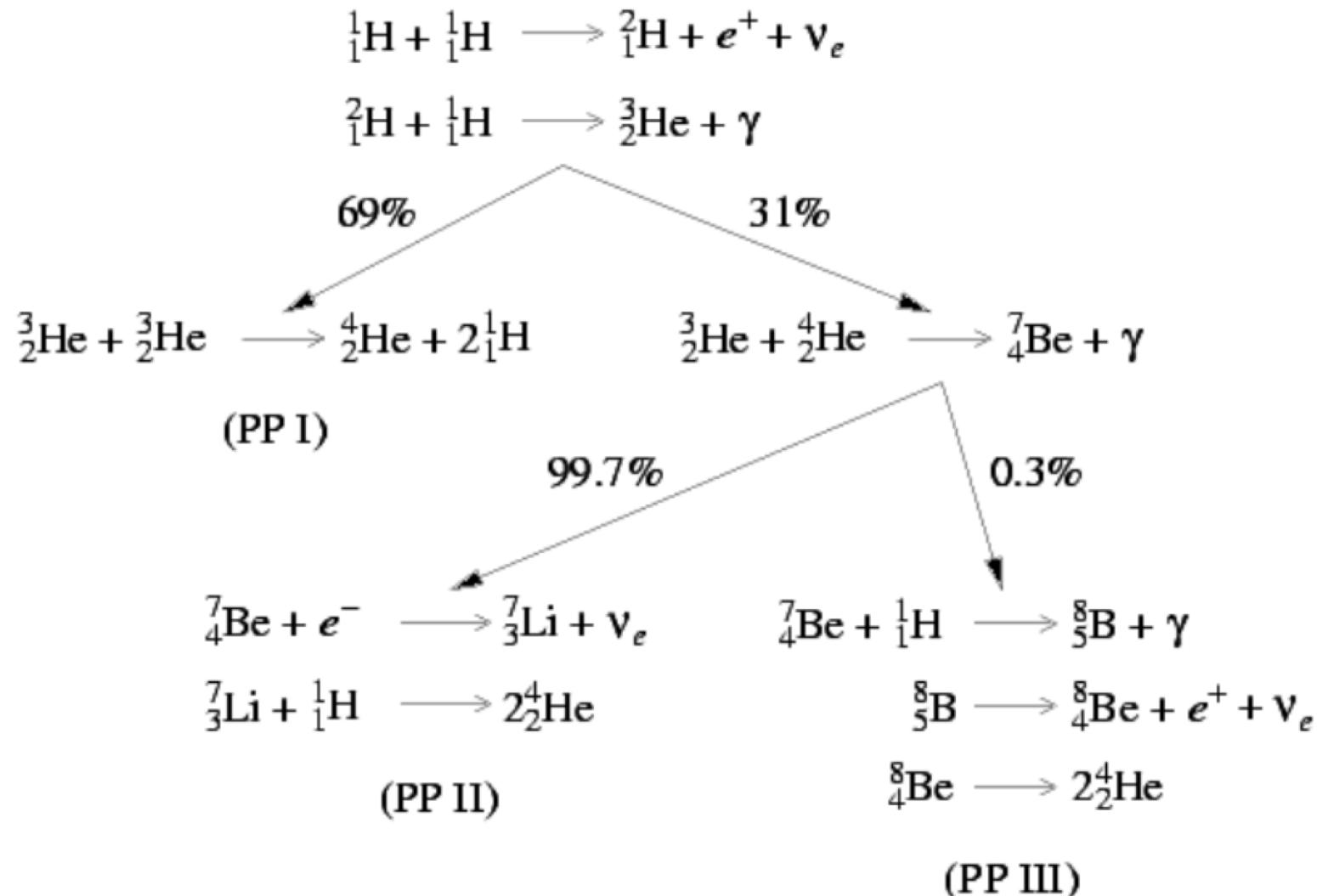


= inconvénient de la fusion thermonucléaire

La nucléosynthèse primordiale

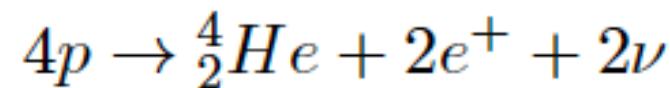


La nucléosynthèse stellaire



Le cycle CNO existe aussi

Résumé du cycle PP-I



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

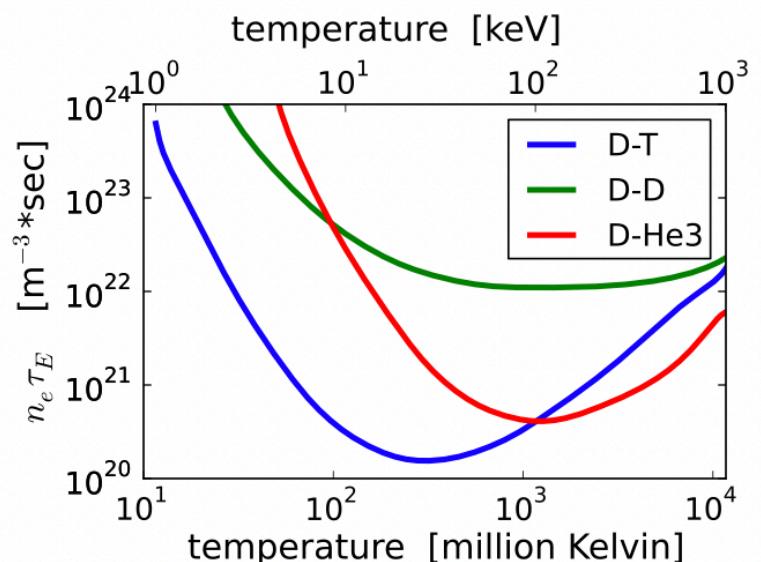
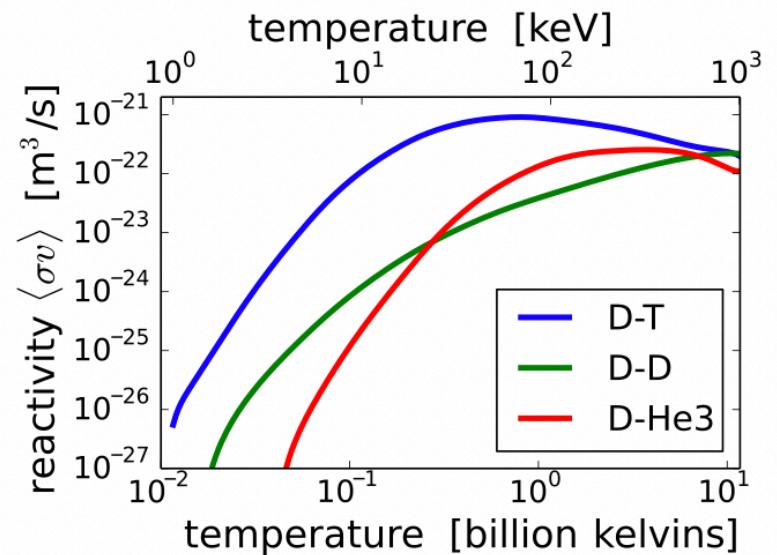
$$T=10^7 \text{ K}$$

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

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

Critère de Lawson

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



Combustible

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

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

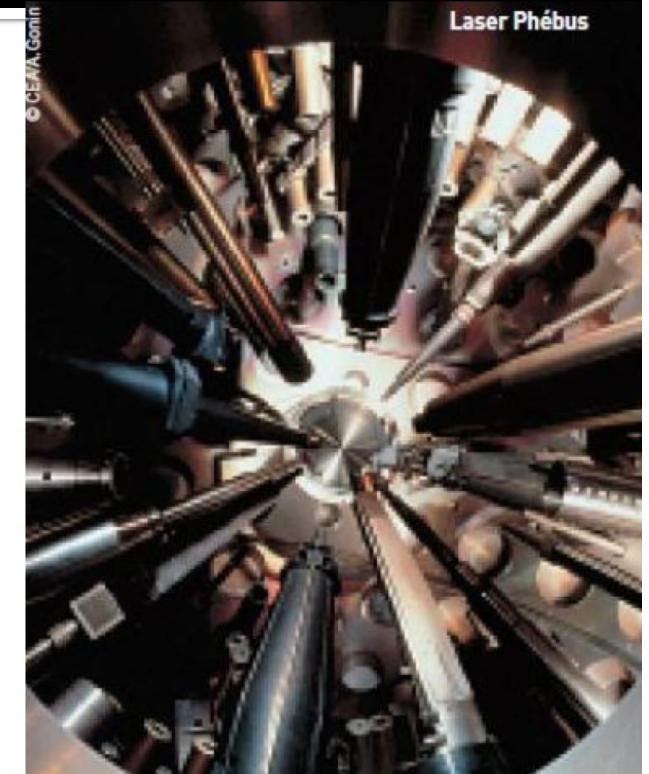
→ Les perspectives se comptent en milliers d'années

Fusion inertielle par laser



Confinement inertiel par compression
Régime explosif

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



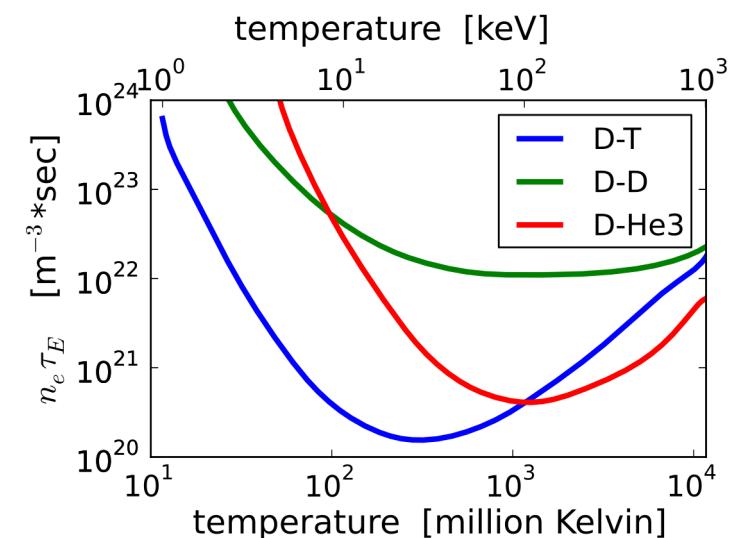
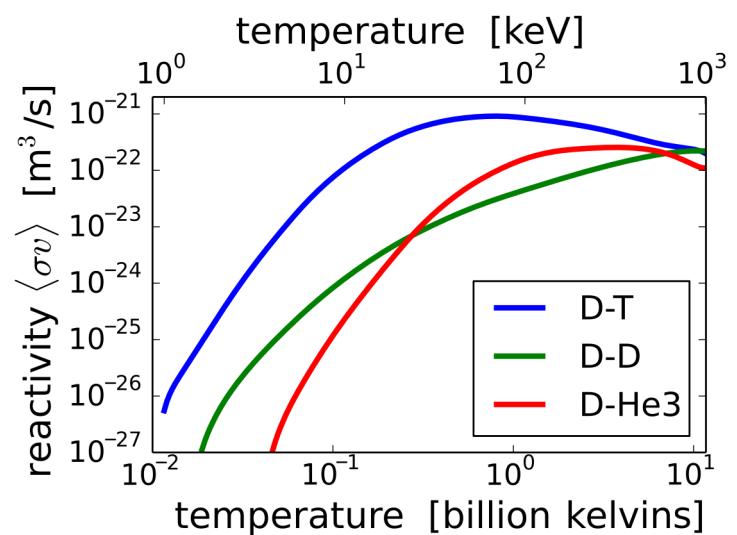
Cf Laser Mégajoule
($P \sim 10^6 \text{ J}/10^{-8} \text{ s} = 10^{14} \text{ W}$)

Fusion par confinement magnétique

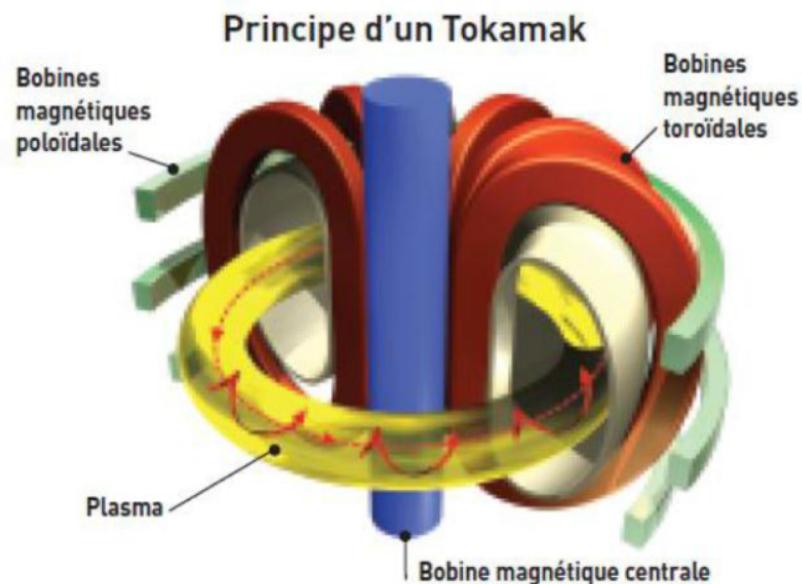
- Faible concentration d+t (plasma)
- Chauffage par effet Joule+rayonnement micro-onde
- $T = 10^8 \text{ K}$; $\rho = 10^{-9} \text{ g.cm}^{-3}$ (cf énergie libérée)
- Confinement par B :
 e^- et noyaux doivent éviter les parois physiques
(refroidissement, impuretés)

Critère de Lawson

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



Le Tokamak



Tore-Supra

1968 la configuration du Tokamak mis au point en Russie

1988 Ex de Tore-Supra à Cadarache

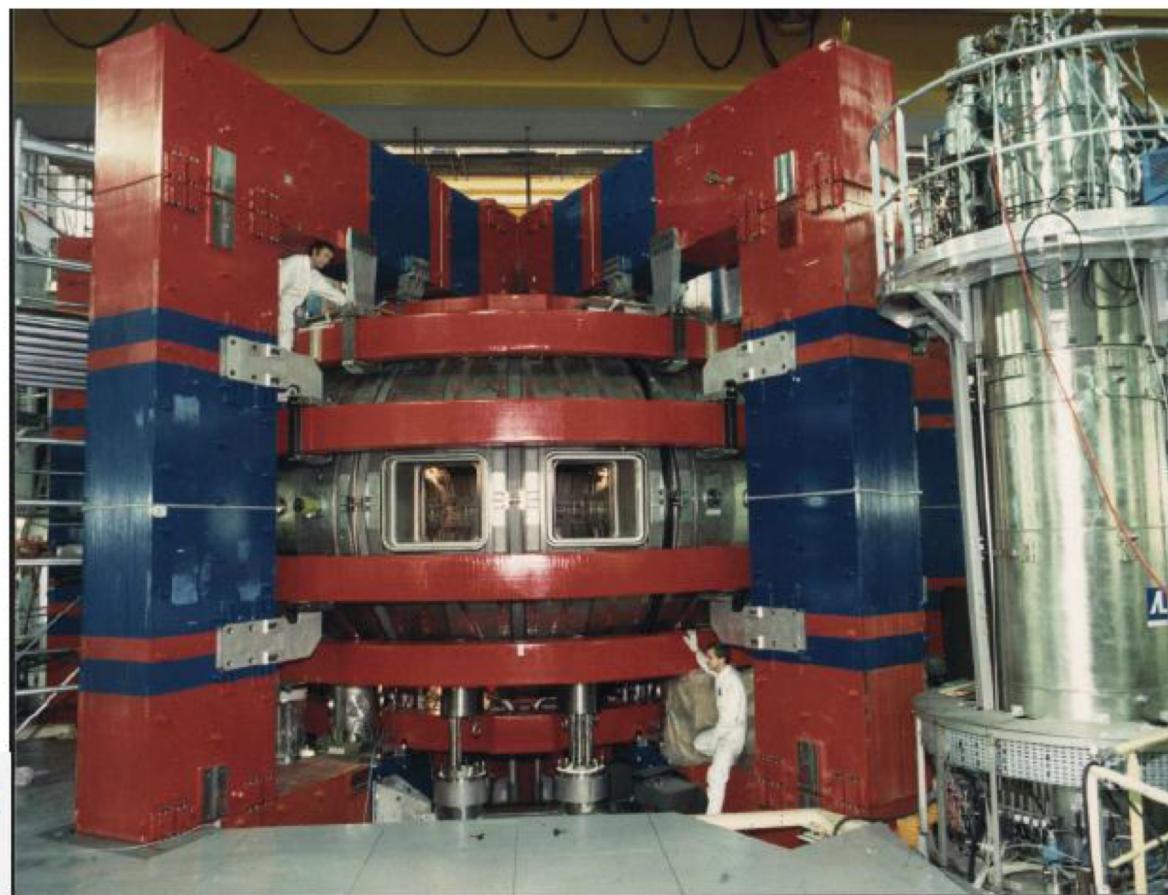
18 bobines supraconductrices
alliage Niobium-titan
refroidi par un bain d'helium
superfluide (1.8K, 1 bar)

circuit magnétique
de 830 tonnes

4.2Tesla

Tore
 $R= 2.4\text{m}$
 $a= 0.8\text{m}$
V plasma=25m³

2003: Temps de vie = 6mn30s
à 3 fois la température du
soleil (=15 10⁶ K)



Jet

JET le plus puissant actuellement

4.2Tesla

Tore

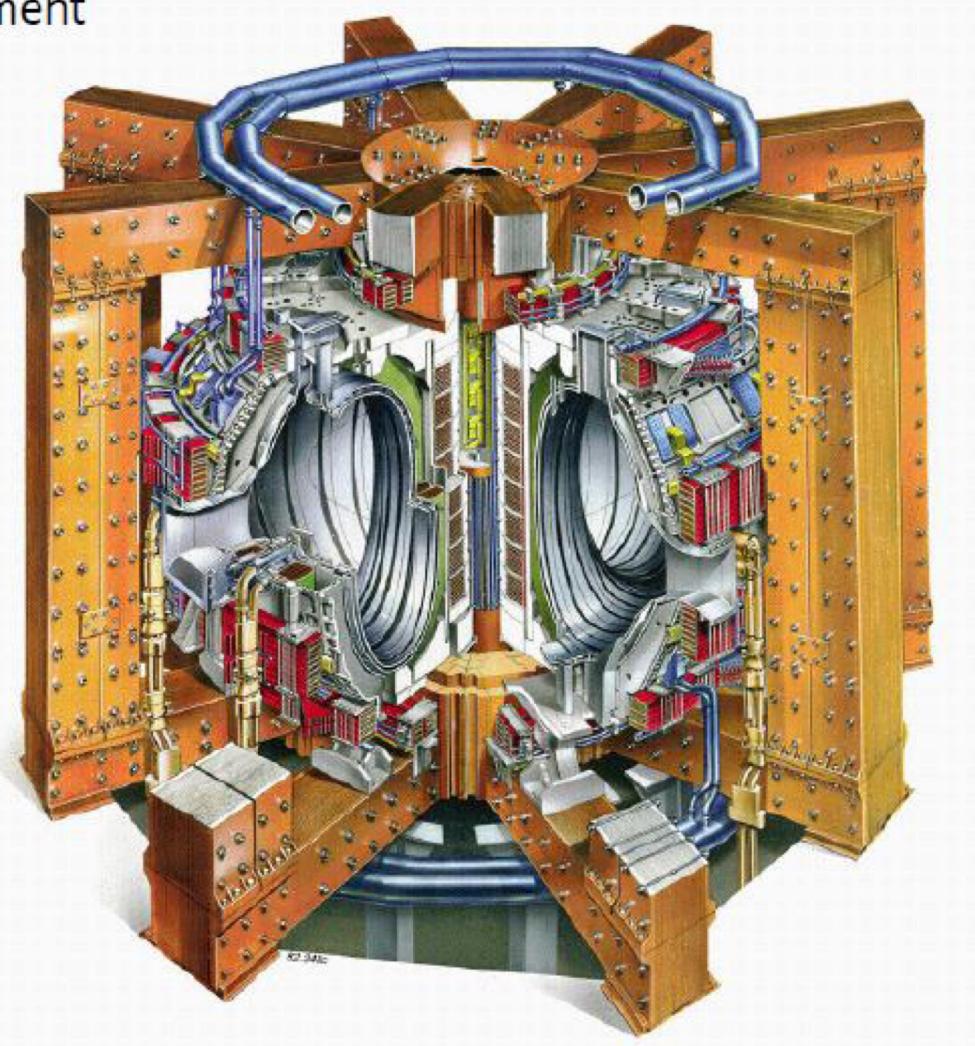
$R = 2.96\text{m}$

$a = 1\text{m}$

V plasma=80 m³

P_{fusion} ~ 16MW

P_{chauffage} ~ 23MW



ITER

1986: projet ITER démonstrateur
2001: fin du projet détaillé
installation expérimentale conçue
via une collaboration scientifique
à l'échelle planétaire

Volume de confinement= 830m^3

5.3Tesla

Tore

$R= 6.2\text{m}$

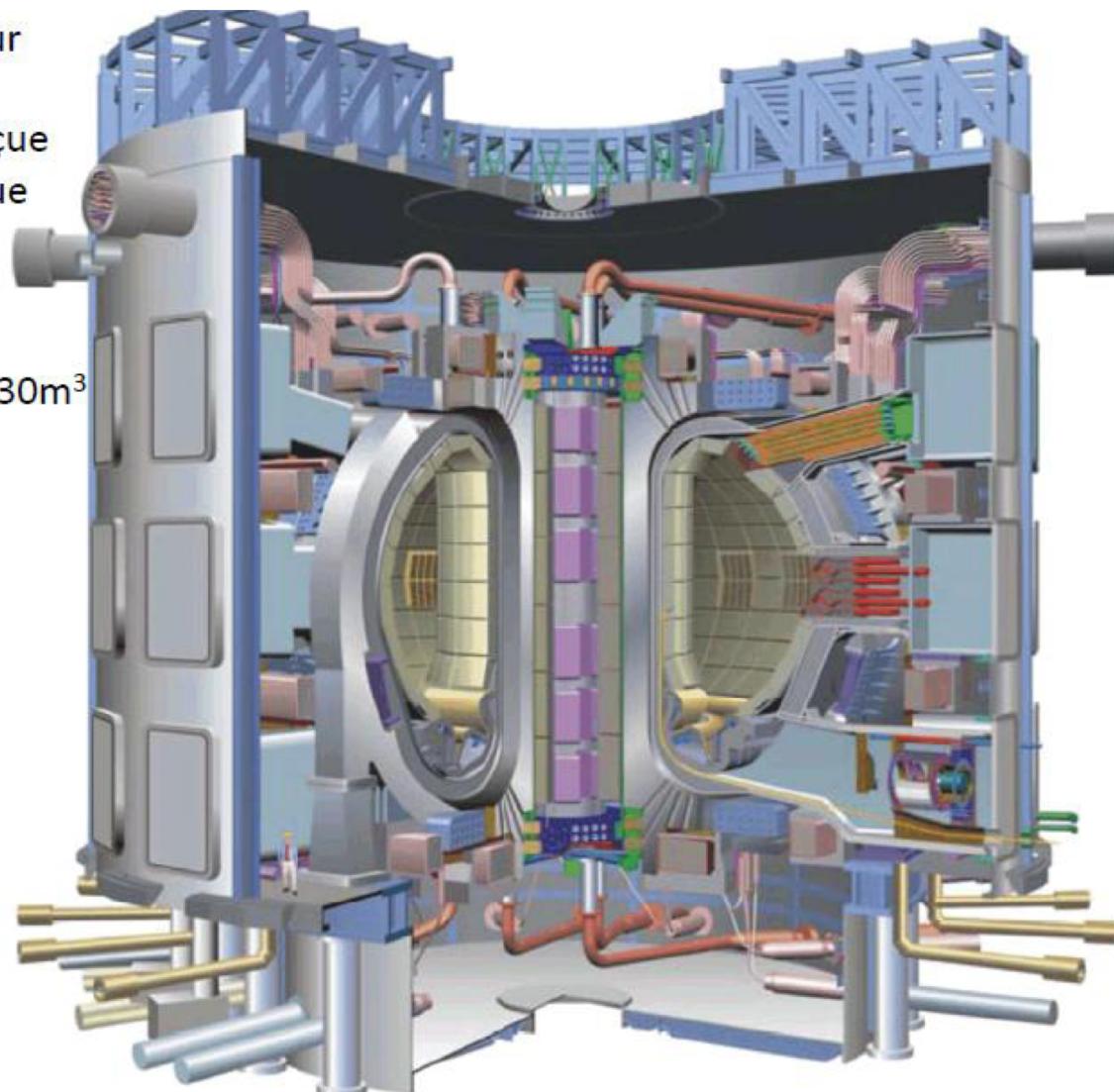
$a= 2.0\text{m}$

V plasma=830 m³

BUT: **Temps de vie = 400s**

$P_{\text{fusion}} \sim 500\text{MW}$

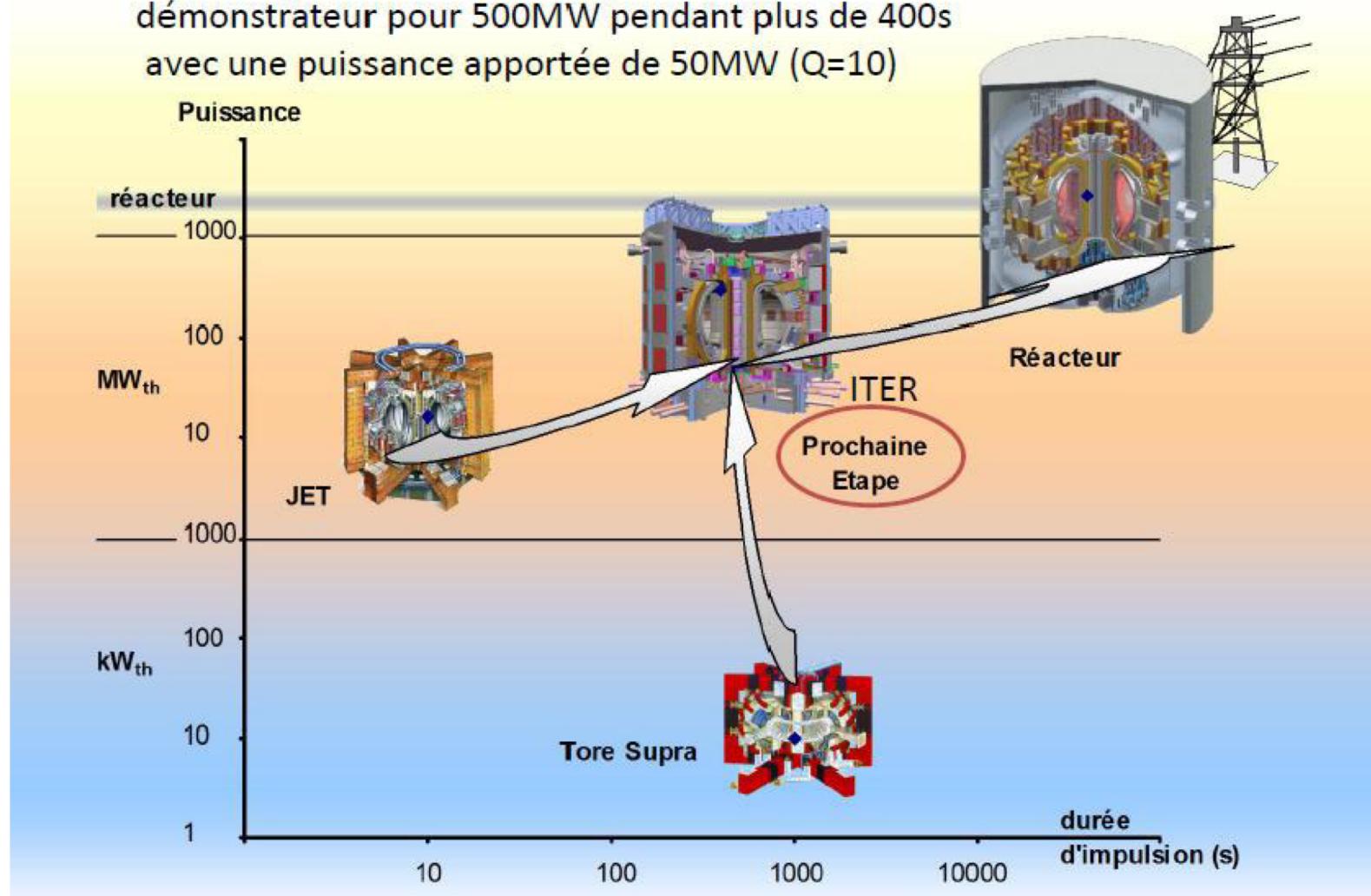
$P_{\text{chauffage}} \sim 50\text{MW}$



Production

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 ($Q=10$)



La bombe H

- Mélange d, t et ${}^6\text{Li}$
- 1kg libère $2 \cdot 10^{14} \text{ J}$ (un ordre de grandeur > A)
- Allumette à fission

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 -> Fe <- 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
 $kT=10\text{keV}$ ($T=10^8\text{K}$)