

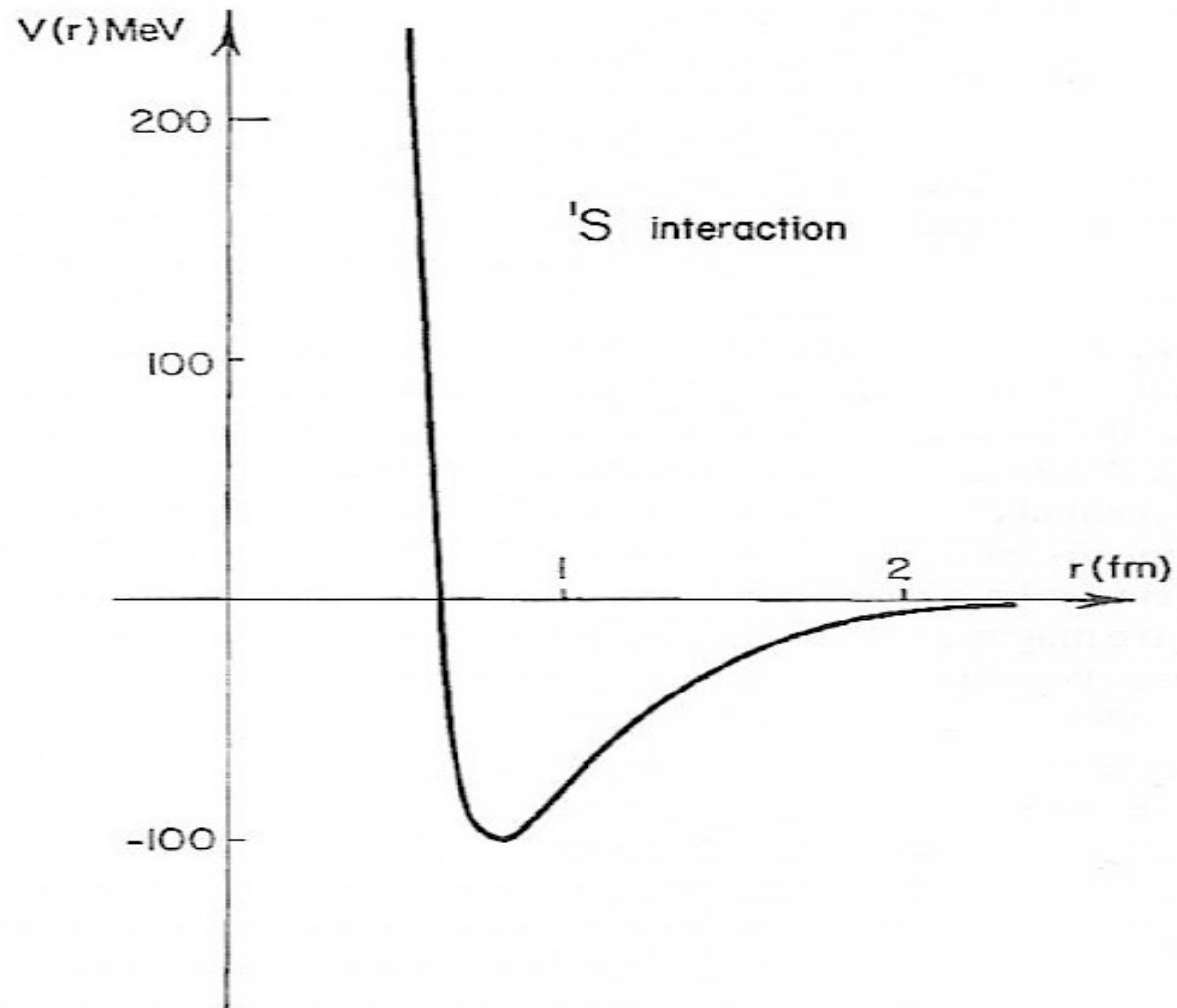
Eléments de Physique Nucléaire

- Particules élémentaires
- Noyaux
- Radioactivité
- Fission
- Réactions
- Sections efficaces

Unités

- 1 eV énergie gagnée par une charge de
 $e=1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb sous 1 V = $1,6 \cdot 10^{-19}$ J
- Et 1 J = $6,25 \cdot 10^{12}$ MeV 1 kWh = $2,25 \cdot 10^{19}$ MeV
- Unité de longueur : 1 Fermi = 1 fm = 10^{-13} cm
- Unité de surface : 1 barn = $10 \text{ fm} \times 10 \text{ fm} = 10^{-24}$ cm²

Interaction nucléaire



Incertitude

Relation d'incertitude

$$\Delta p_x \times \Delta x = \hbar$$

Fonction d'onde

$$\lambda = \frac{2\pi \hbar}{mv}$$

Energie cinétique minimum

$$\lambda = \frac{2\pi \hbar}{mv} \longrightarrow E = 2 \frac{(\pi \hbar c)^2}{L^2 m c^2}$$

Pour n-n

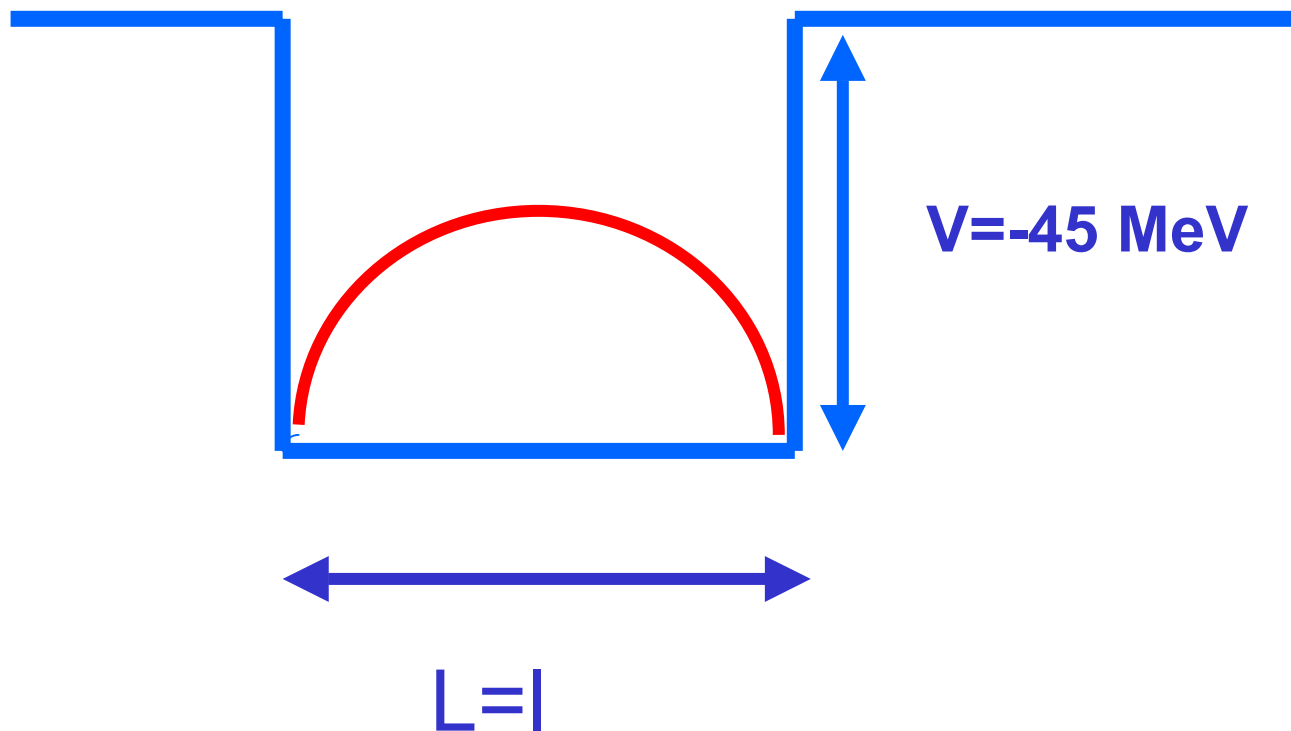
$$E = \frac{200}{L^2}$$

Si E=100 L=2,8
diamètre approché du deuterium

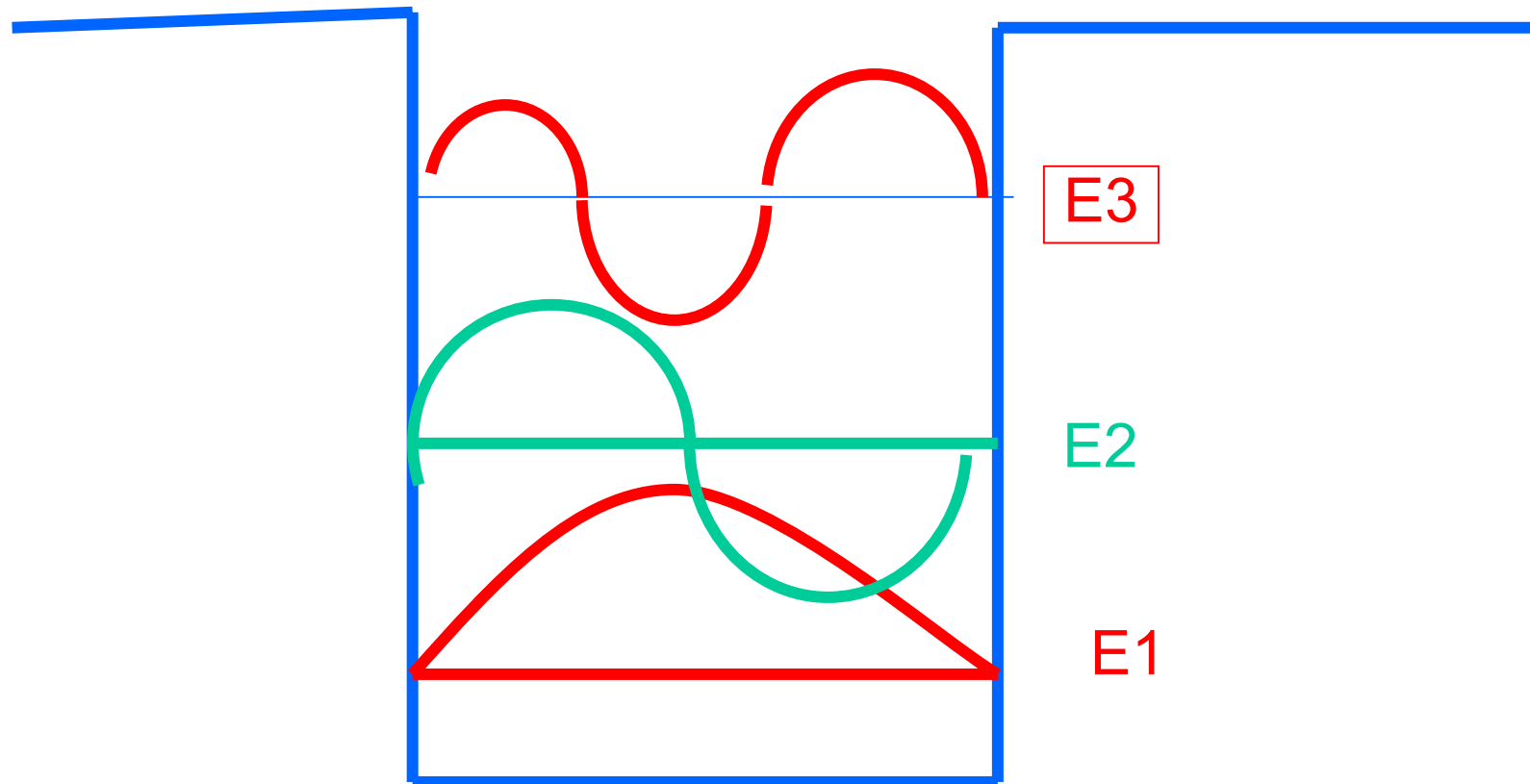
Dimension du noyau

- **Densité des nucléons : $0,17/\text{fm}^3$**
- **Rayon d'un noyau de masse A :** $R = 1,12 \times A^{1/3}$
- **Mécanique quantique :** $\lambda = \frac{2\pi \hbar}{mv}$
- **Constante de structure fine :** $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$
- **Constantes**
 - $\hbar c = 197$ MeV-fm
 - $e^2 = 1,44$ MeV-fm

Premier niveau l maximum



Niveaux excités



Energie du fondamental

$$\lambda = \frac{2\pi \hbar}{mv} \longrightarrow E = 2 \frac{(\pi \hbar c)^2}{L^2 m c^2}$$

Les nucléons ont une masse de l'ordre de 930 MeV

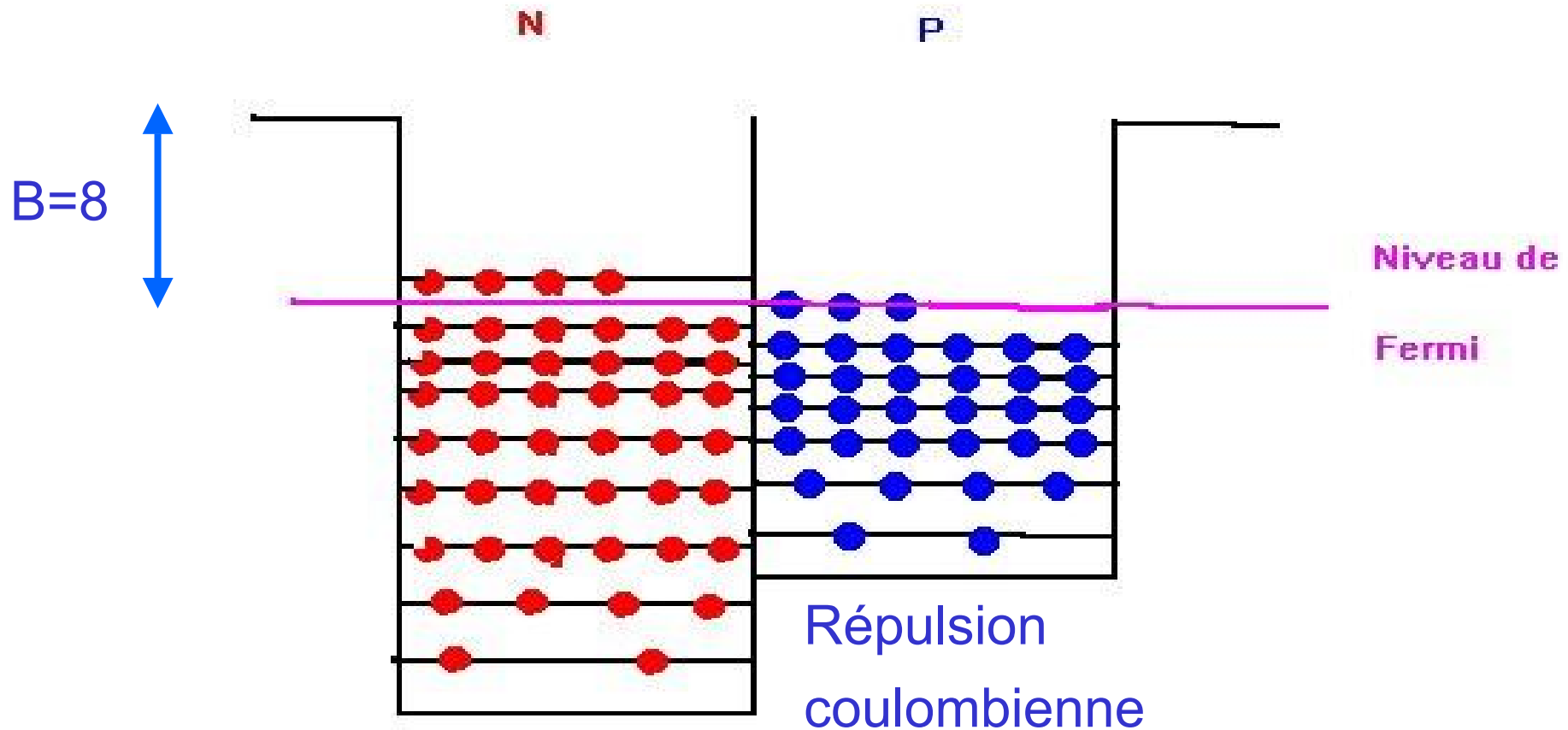
$$E = \frac{204}{L^2} \quad \text{Typiquement 2-5 MeV}$$

Les électrons ont une masse de l'ordre de 0,5 MeV

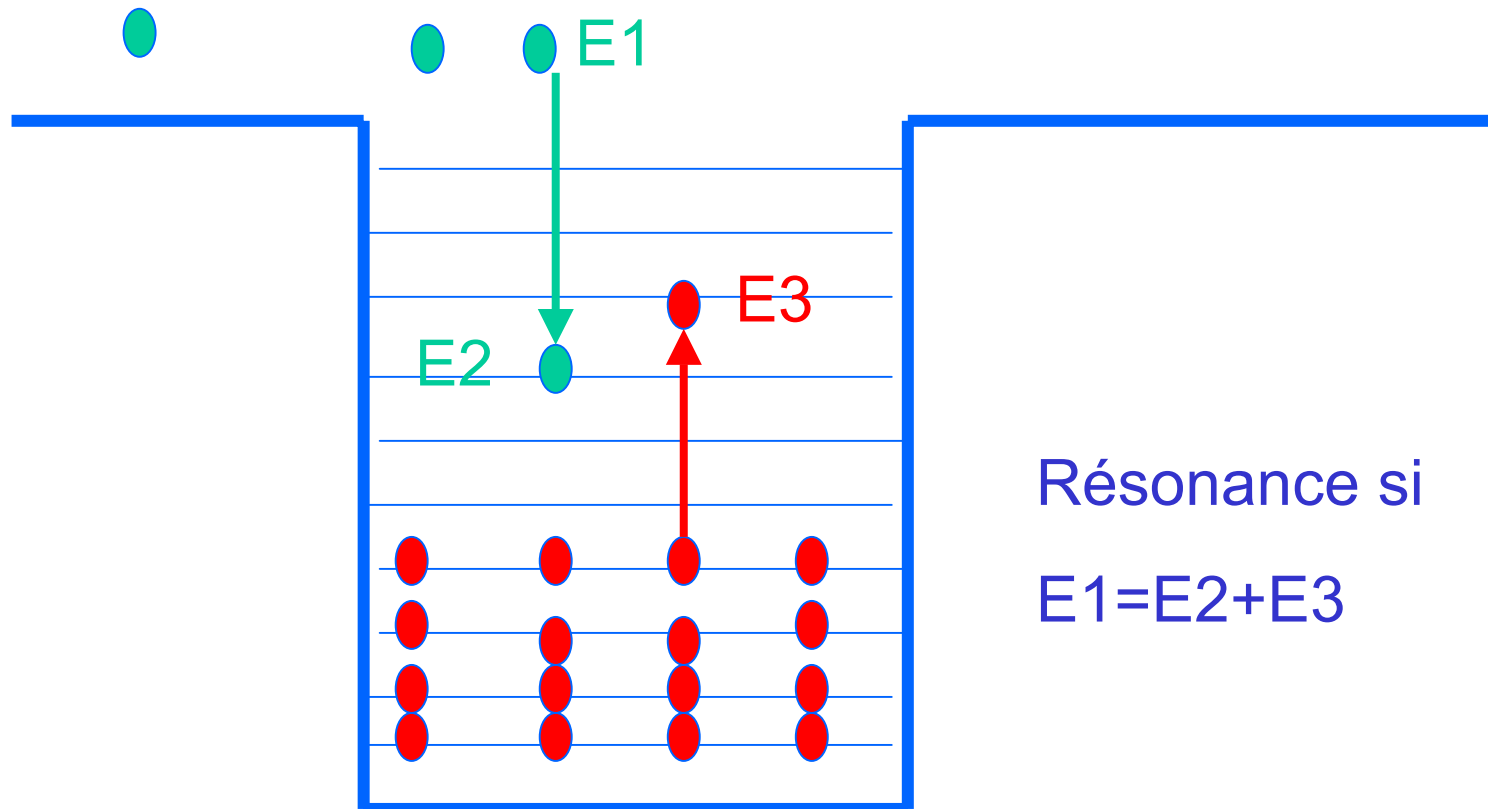
$$E = \frac{0,375}{L^2} 10^6 \quad \text{Les électrons ne peuvent rester dans le noyau}$$

Exclusion de Pauli

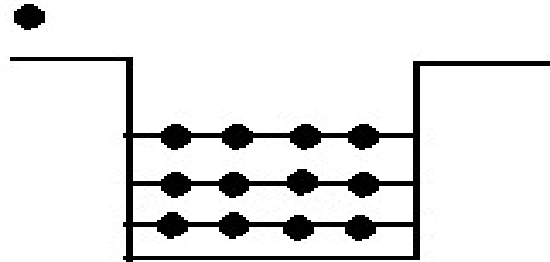
Un seul nucléon (fermion) par état quantique
Au maximum 4 par état d'énergie ↓↑↑↓



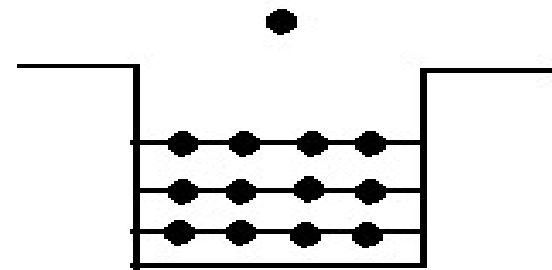
Résonances



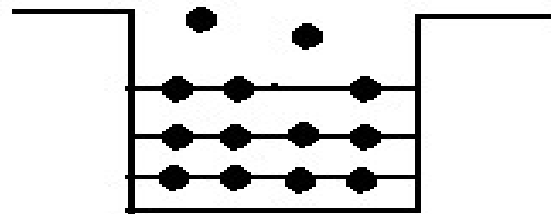
Multiparticules



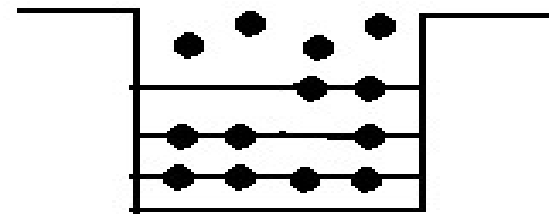
état initial



états à une particule



états "portes"



thermalisation

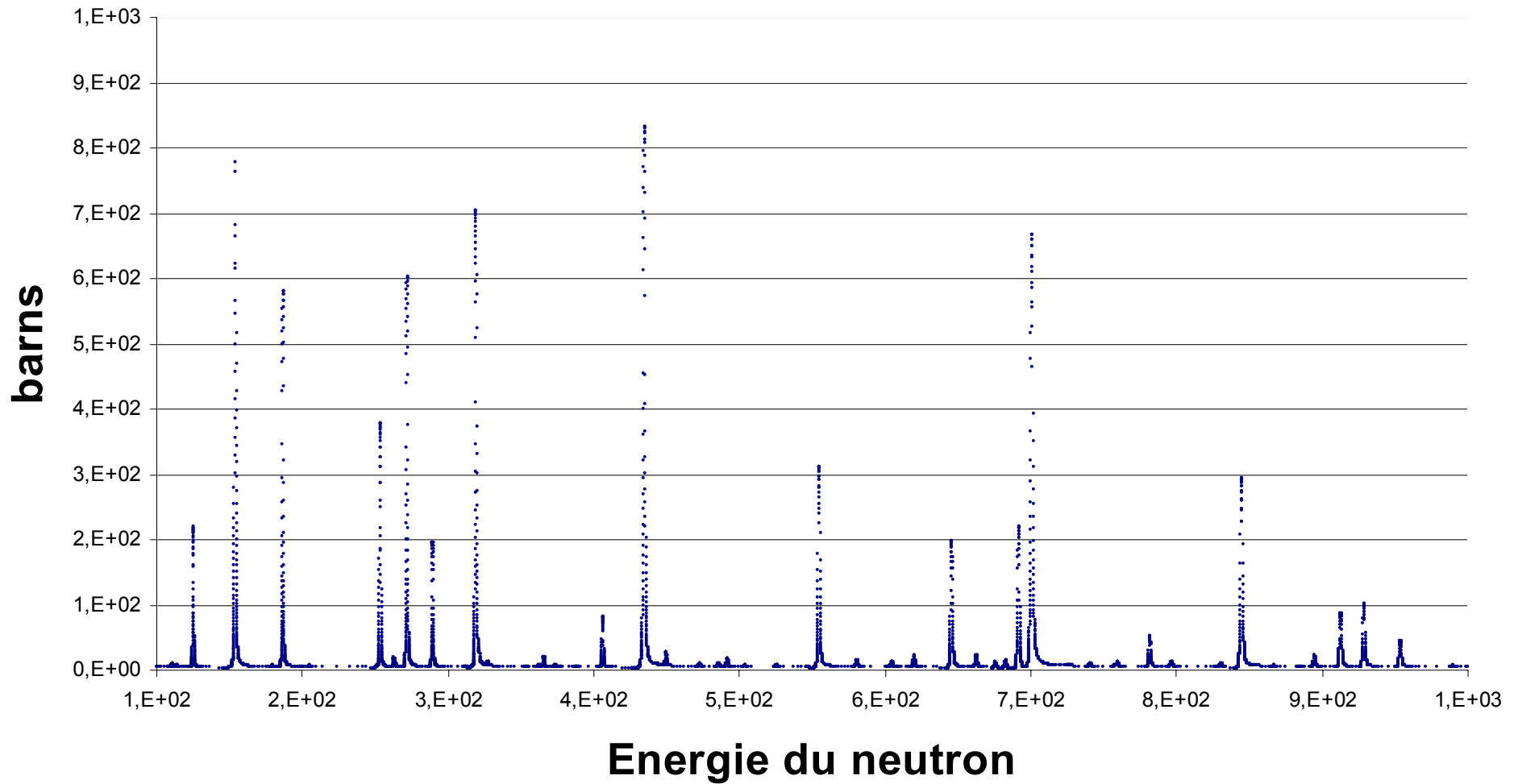
1 quasi-particules, 2,3.....n

Puis

$$E_R = e_1 + e_2 + e_3 + \dots + e_n$$

Exemple de résonances

section efficace totale Rhodium 103



Largeur des niveaux

• Densité nucléaire ρ

• Section efficace nucléon-nucléon σ

• Une estimation de libre parcours $\Lambda = \frac{1}{\rho \sigma}$ $\Lambda = 50$ Fm ??

• Tenir compte du blocage de Pauli et de la réflexion à la surface

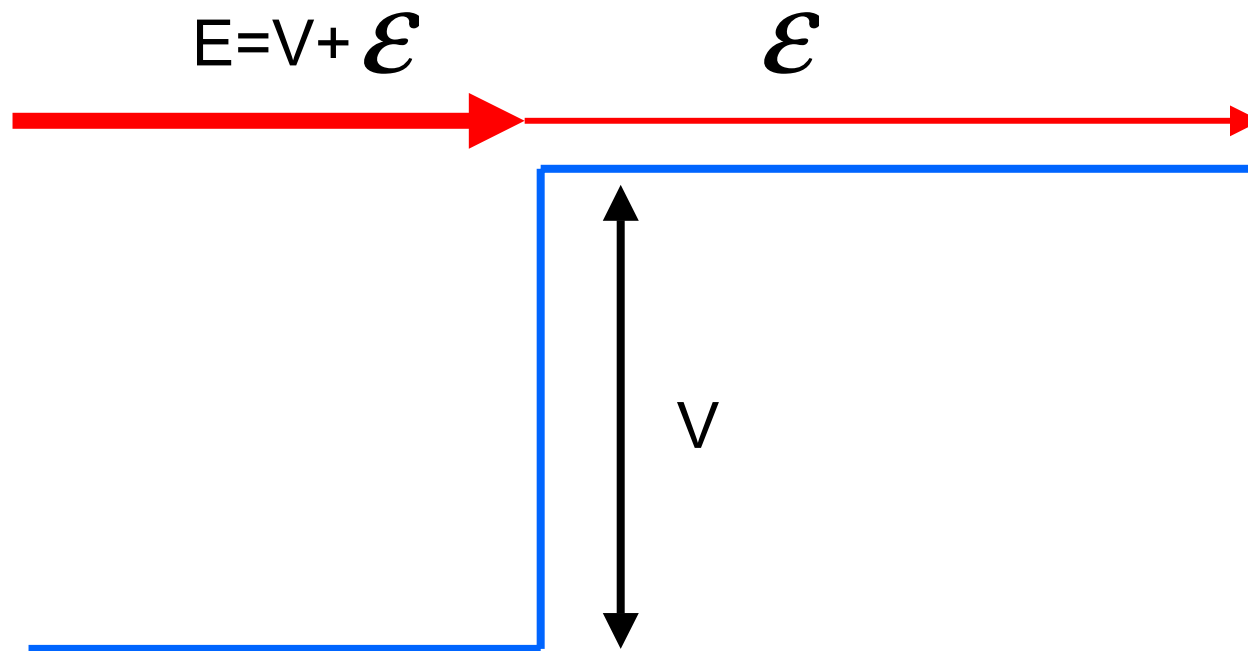
• Temps entre deux interactions: $\tau = \frac{\Lambda}{v_n}$ $\tau = 8 \cdot 10^{-22}$ s.

• Relation d'incertitude: $\Delta t \cdot \Delta E = \hbar$ $\tau \cdot \Gamma = \hbar$

$$\Gamma = 0,8 \text{ MeV}$$

Parcours des neutrons dans le noyau

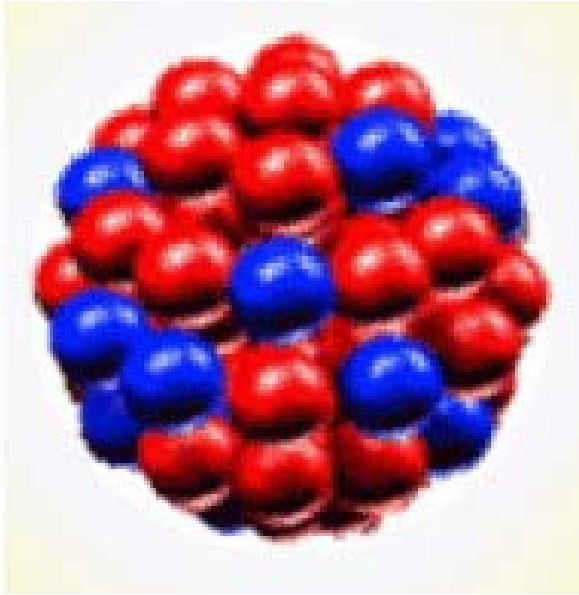
$\Lambda = 50 \text{ Fm}$ Plus grand que les dimensions du noyau



Transmission de la barrière de potentiel $\Theta = \frac{\Lambda}{\lambda} = \sqrt{\frac{\epsilon}{E}} \cong 4 \cdot 10^{-4} \sqrt{\epsilon_{eV}}$

Parcours de la particule de l'ordre de 40000 Fermis $40000 \sqrt{\epsilon}$

Analogie avec une goutte liquide



L'énergie de volume
Proportionnelle au nombre de liens
De proximité, soit A

Mais il manque des liens en surface
Nombre de liens manquant proportionnel
à la surface. Soit proportionnel à $A^{2/3}$

Les protons (en bleu) se repoussent
Répulsion coulombienne

Une tendance à $N=Z$, énergie de symétrie

Une tendance à l'appariement des neutrons et des protons
Energie d'appariement

Existence d'effets de couche (cf gaz rares pour les atomes)

Vers une formule de masse

$$\text{Volume} \propto A \quad \text{Surface} \propto A^{2/3}$$

$$\text{Symétrie protons - neutrons} \propto \frac{(N - Z)^2}{A^2}$$

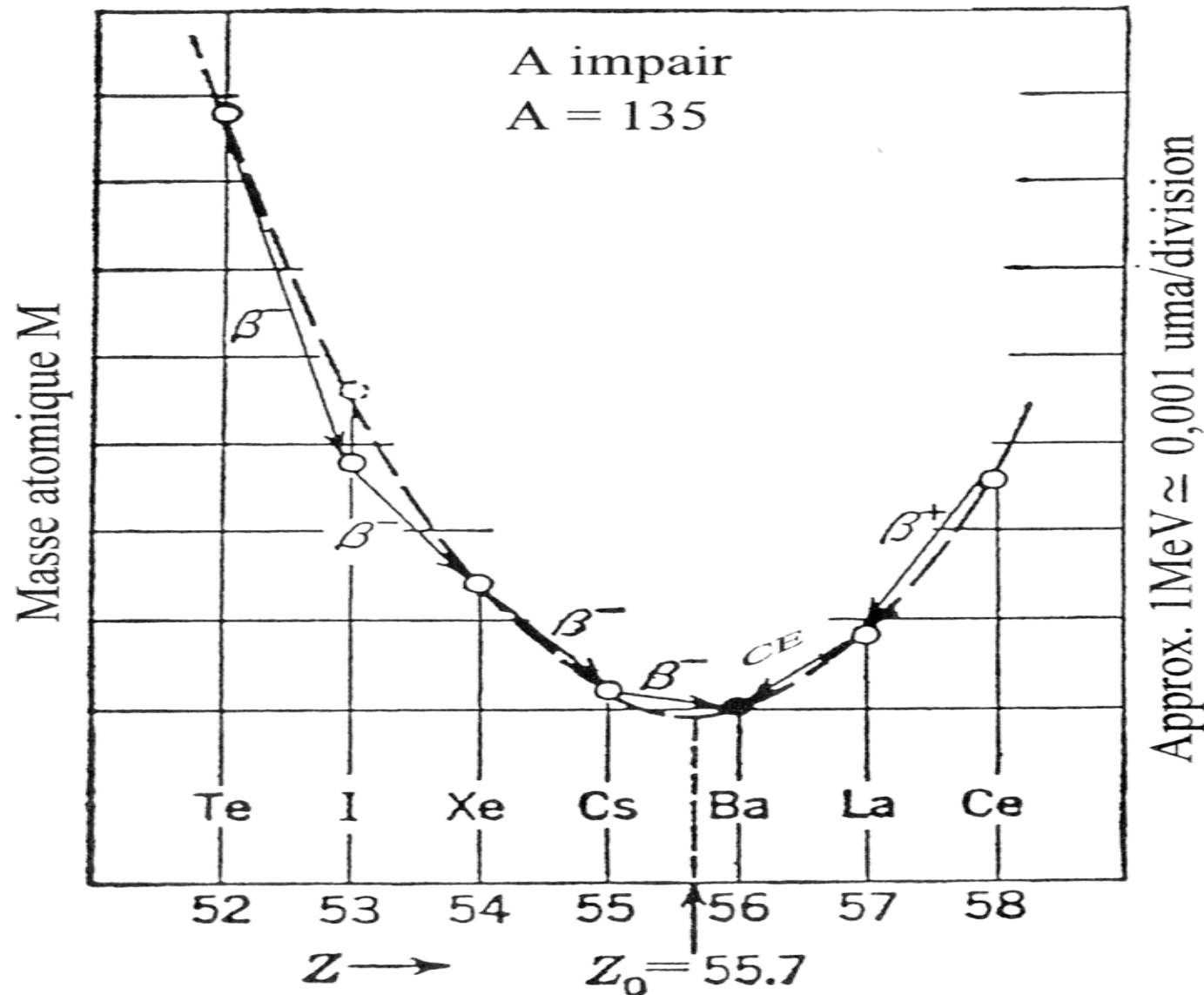
$$\text{Coulomb} \propto \frac{Z^2}{R} \propto \frac{Z^2}{A^{1/3}}$$

- Energie d'appariement (n–n), (p–p)
- Le terme de couche (Couche) est minimum pour les nombres magiques correspondant à des noyaux sphériques (2, 8, 20, 28, 40, 50, 82, 126, 184)

Formule de masse

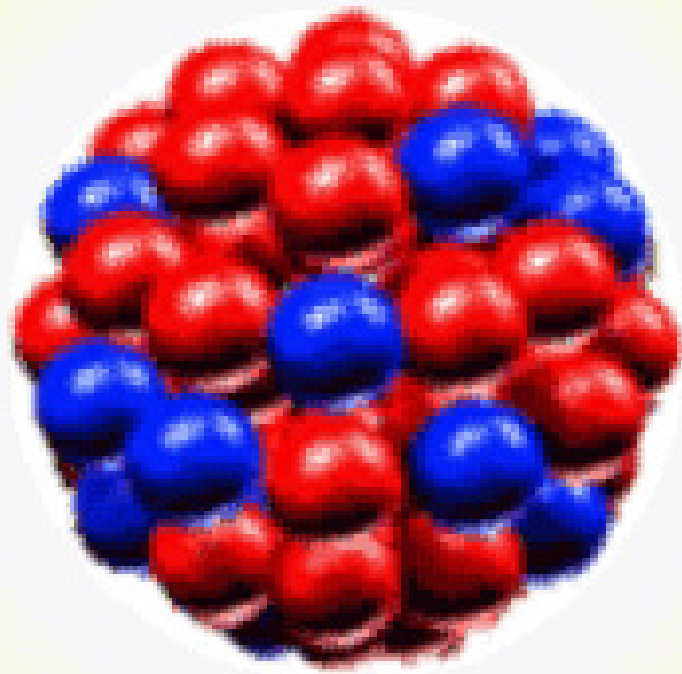
$$E(A,Z) = \tilde{\text{Volume}} + \tilde{\text{Surface}} + \tilde{\text{Isospin}} + \tilde{\text{Coulomb}} + \tilde{\text{Pair}} + \tilde{\text{Couche}}$$

Effet de la symétrie

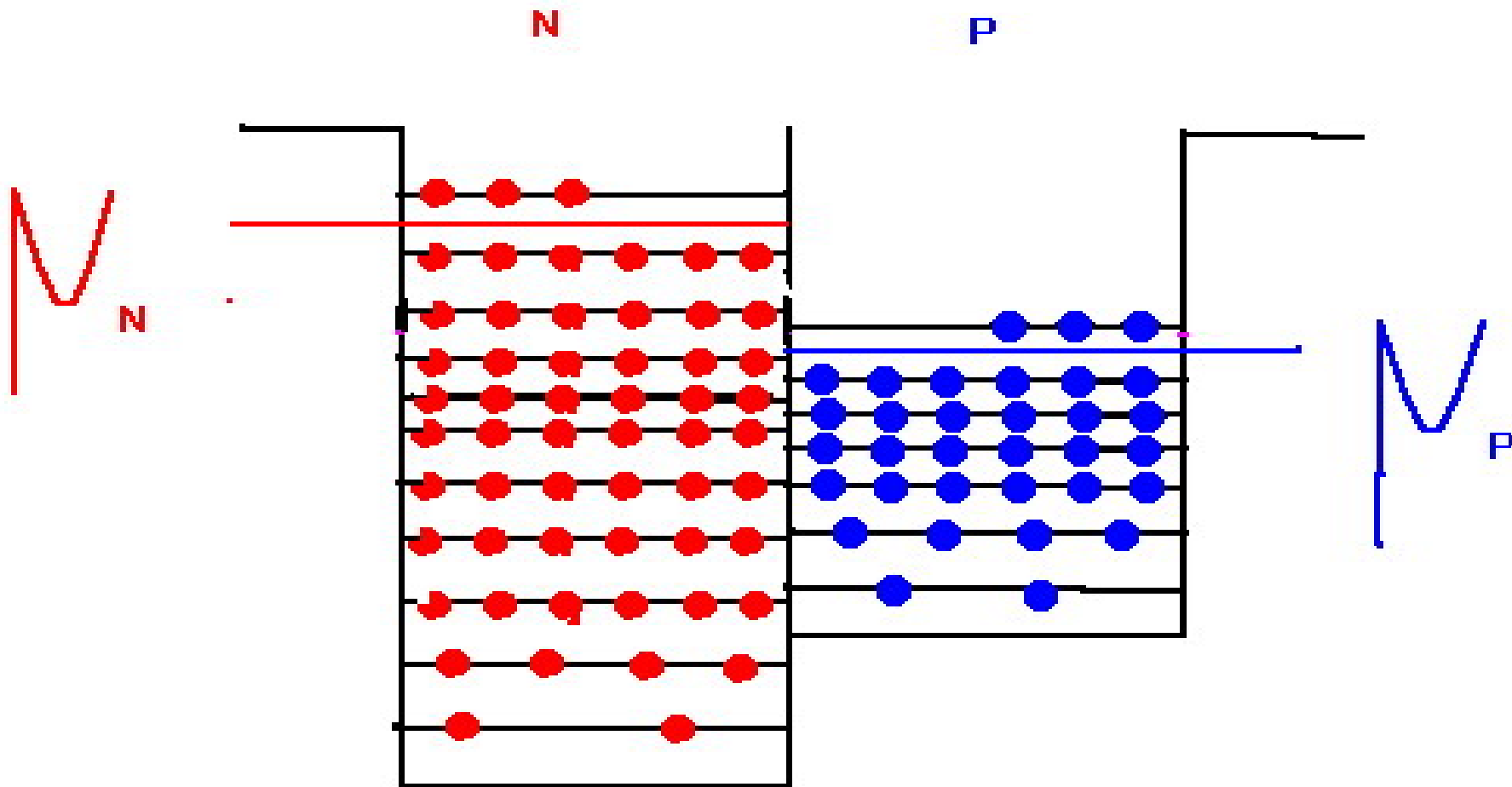
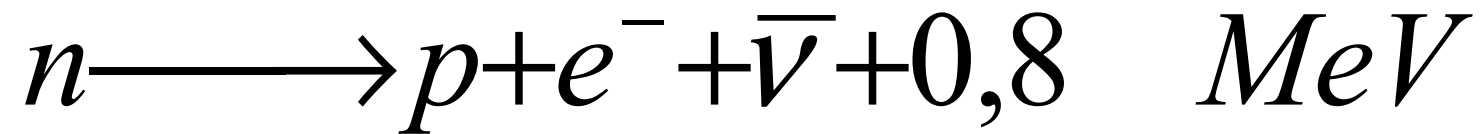


Radioactivité beta (1)

La couleur jaune symbolise l'émission de rayon γ



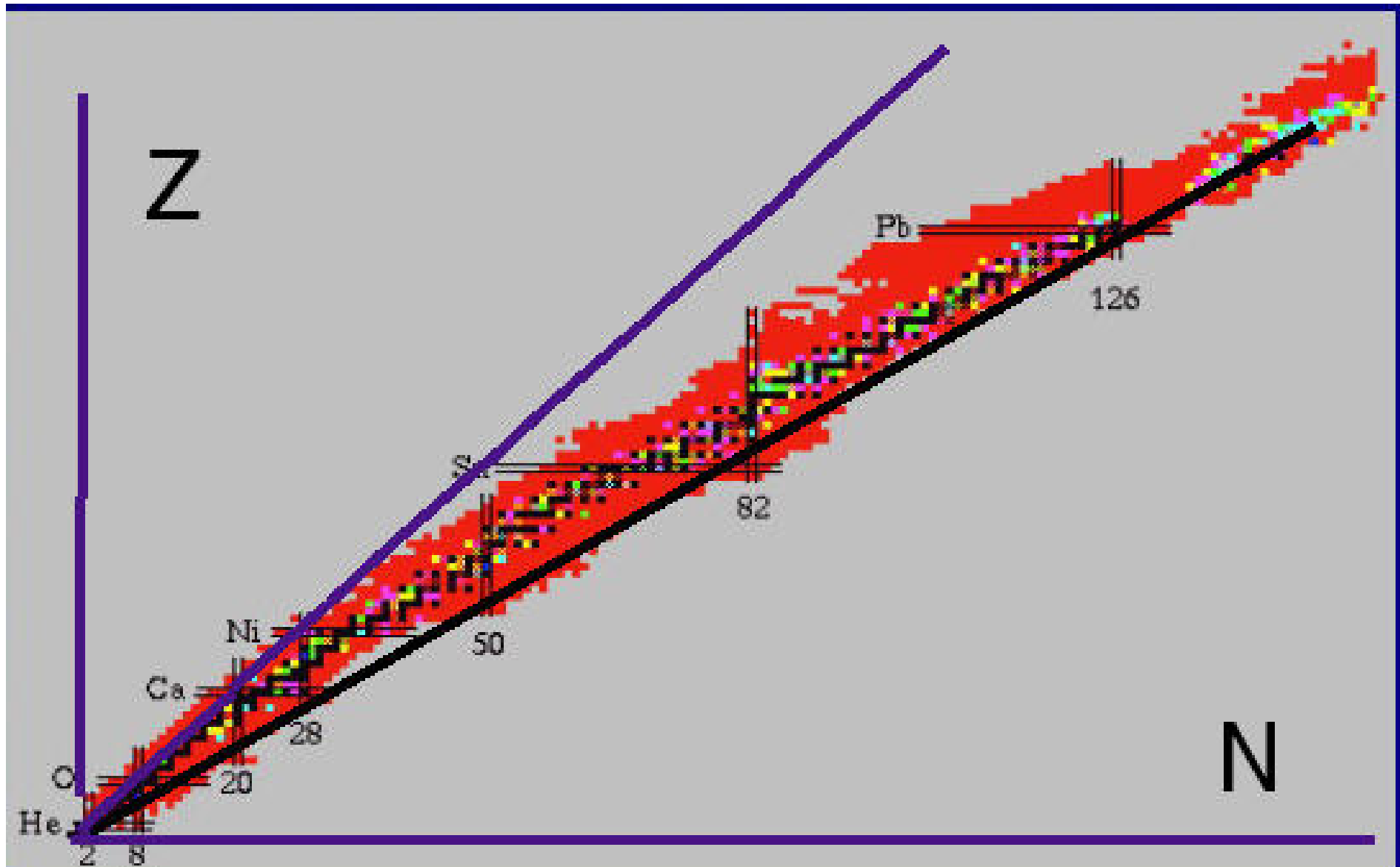
Radioactivité beta (2)



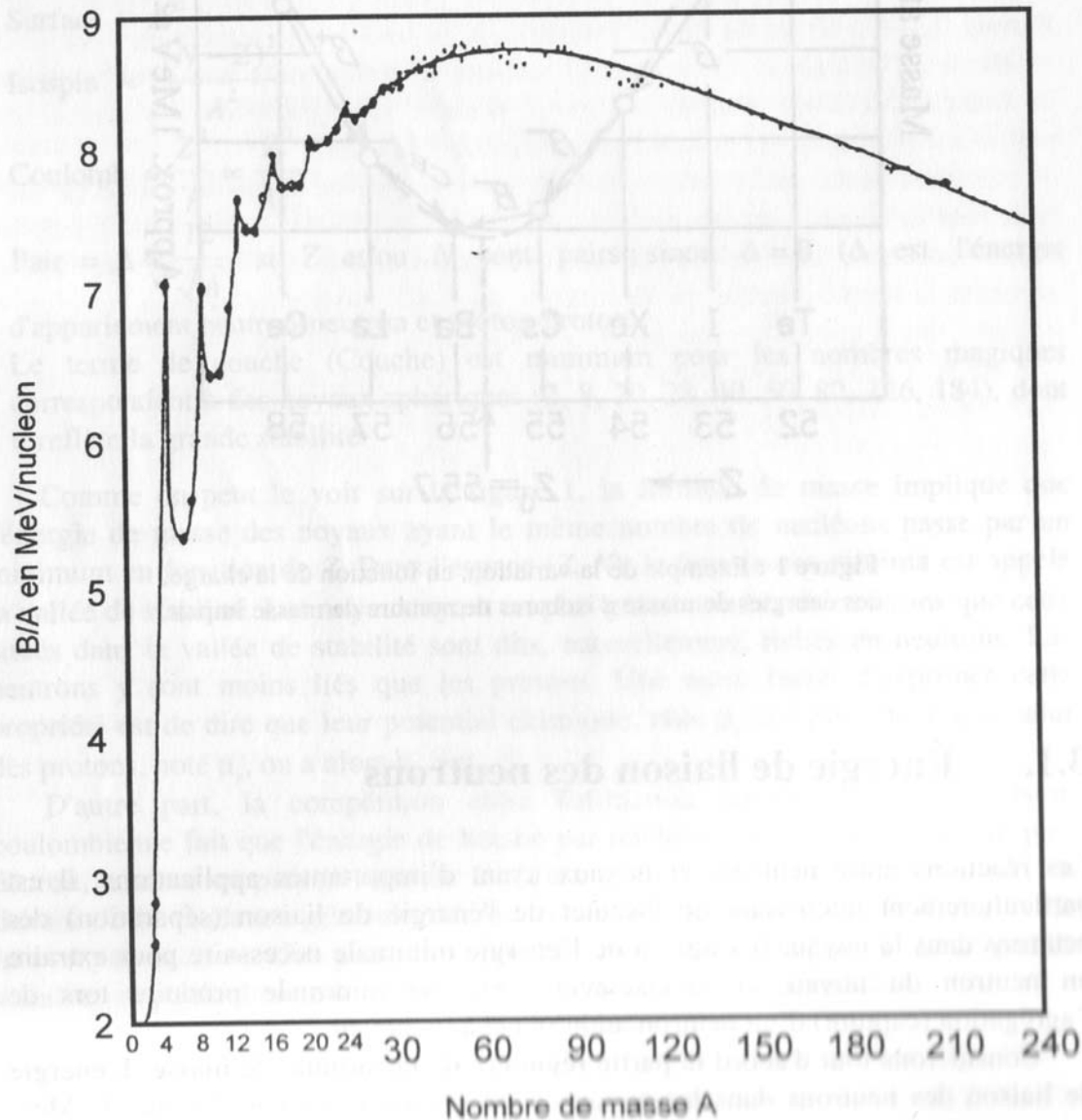
Hervé Nifenecker, cours UIAD 2009-2010

Ici un neutron va se transformer en proton

Vallée de stabilité



Energies de liaison



En dessous du fer on gagne
De l'énergie par la fusion
(Etoiles)

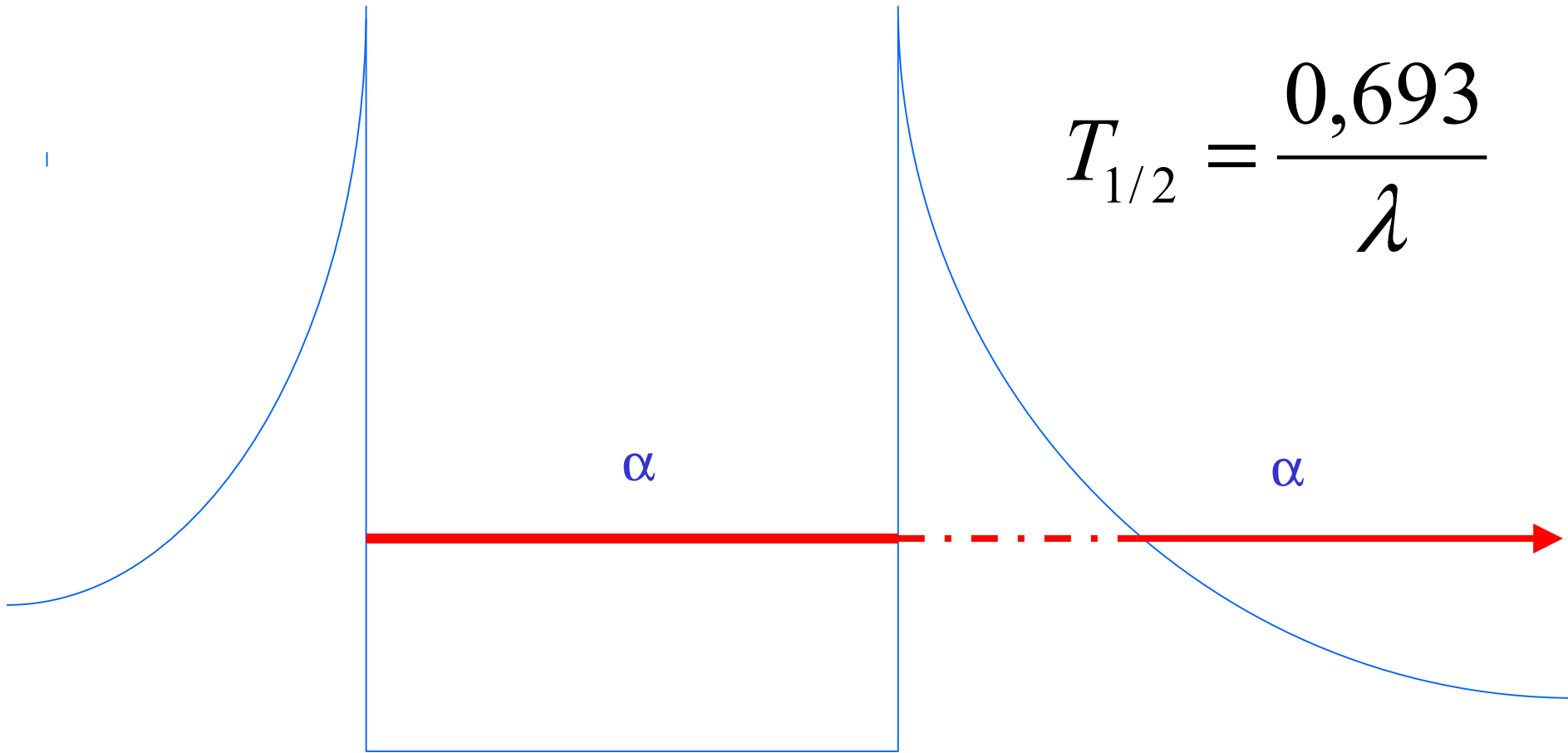
Au dessus du fer on gagne
De l'énergie en divisant
la masse :

- radioactivité α
- fission

Radioactivité alpha (1)



Radioactivité (2)

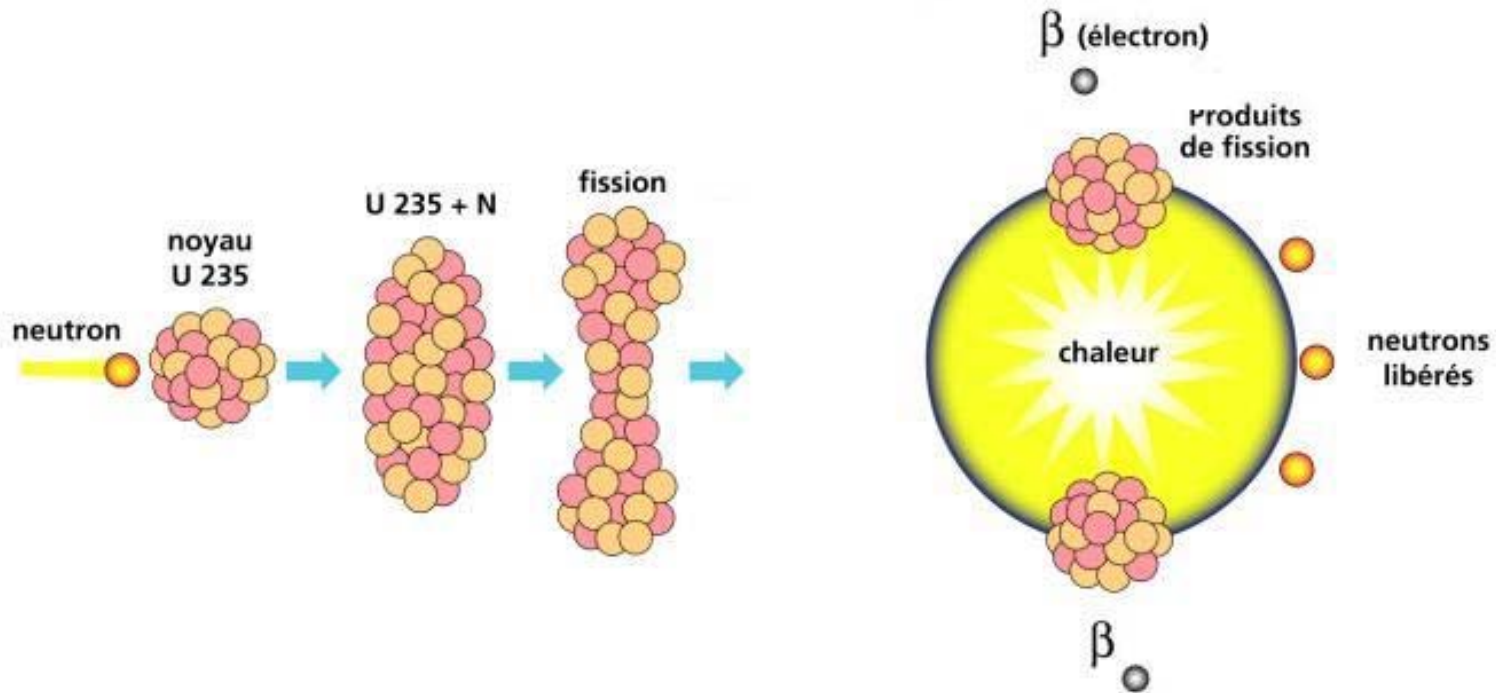


$$\lambda = 1,2 \cdot 10^{21} e^{-\gamma} s^{-1}$$

$$\gamma = 3,959 \frac{Z_{final}}{\sqrt{Q_{\alpha}}} - 2,97 \sqrt{Z_{final} R_{\alpha}}$$

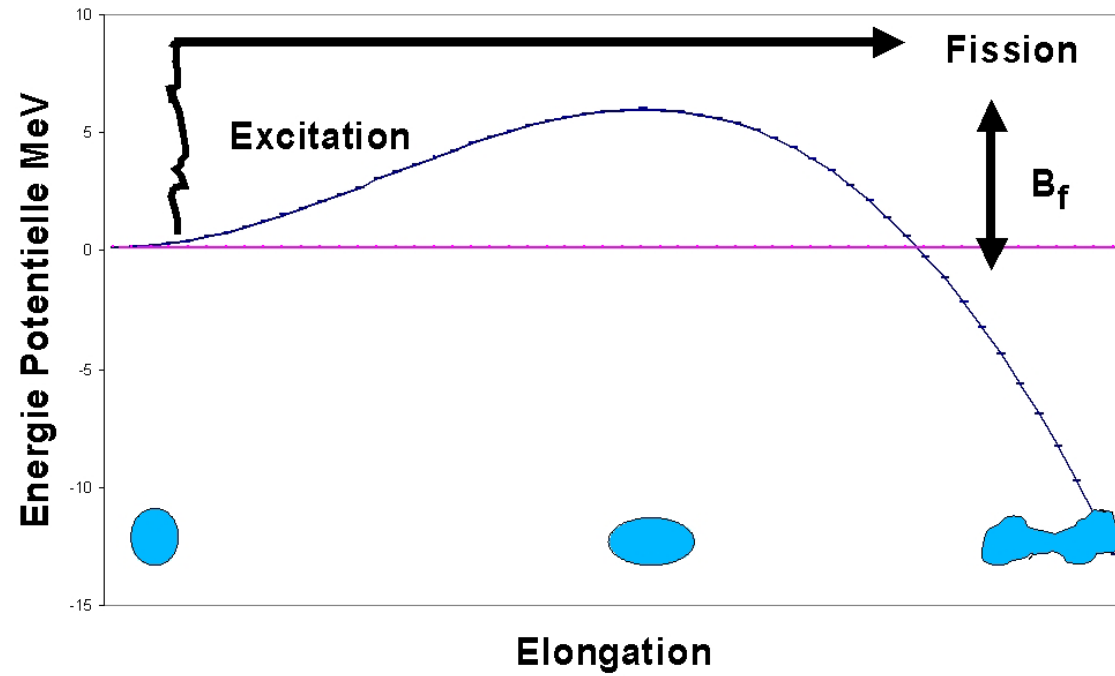
Processus de fission

11-02 Phénomène de la fission nucléaire

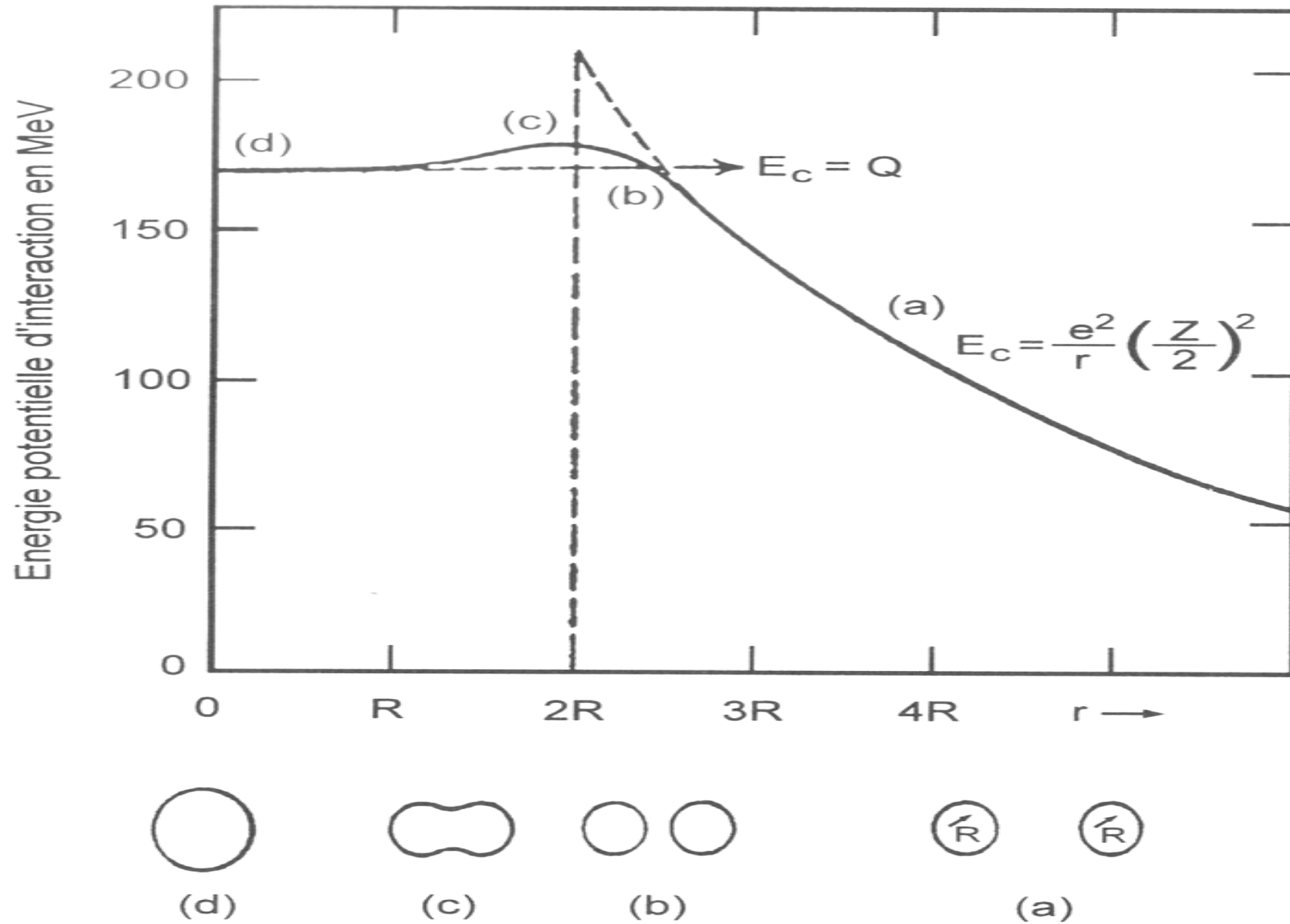


Source EDF

Barrière de fission



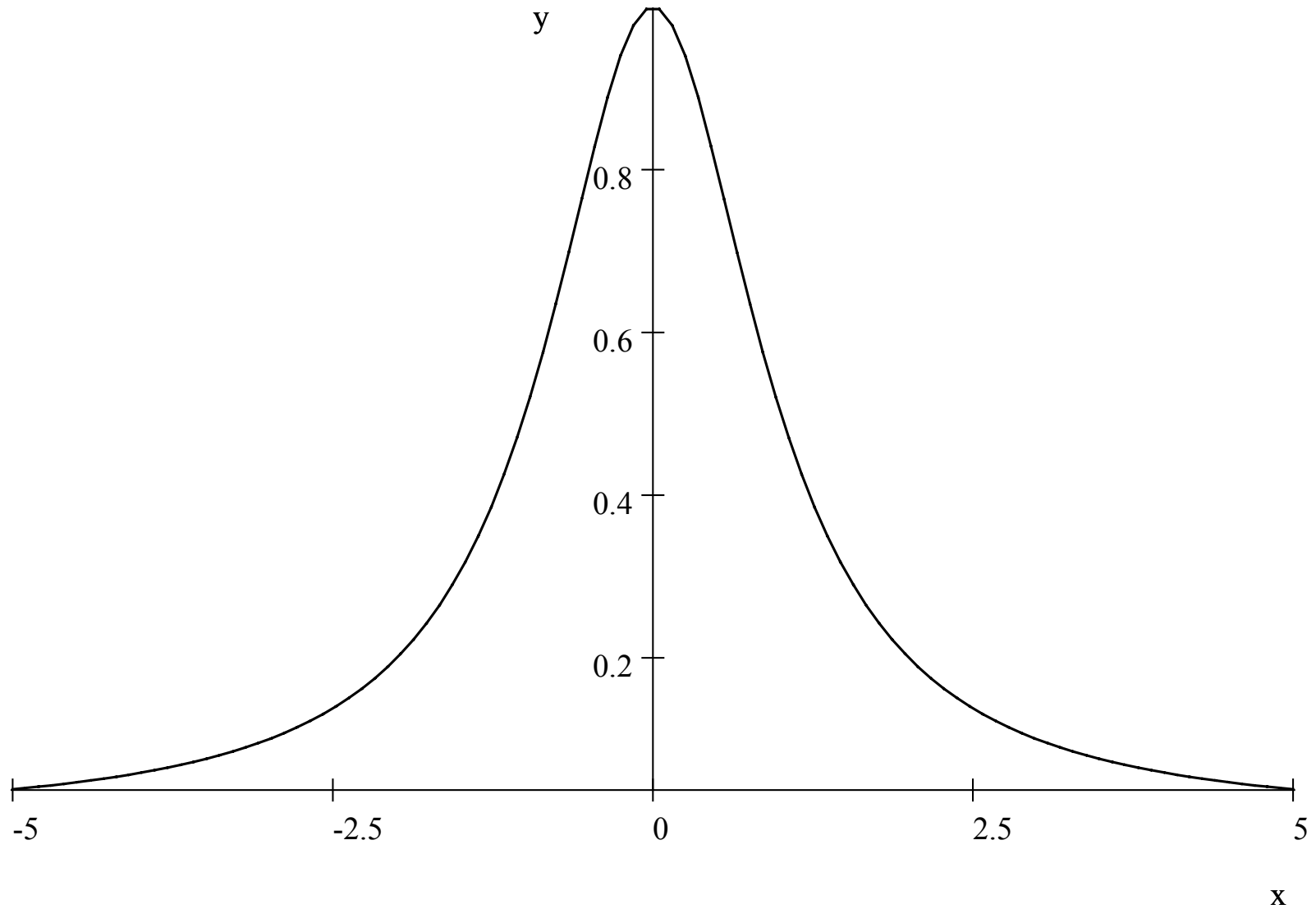
Processus de fission



Que devient le neutron?

1. Ressort : diffusion élastique résonante (aussi potentielle)
2. Ressort avec perte d'énergie : diffusion inélastique
3. Energie émise sous forme de photon: capture
4. Emission de particule chargée (réaction n-p, n-2p, n-pn...)
5. Fission

Forme de Breit Wigner



Forme des résonances

- La forme des résonances est une forme de Breit-Wigner, semblable

à celle décrivant les lignes optiques des atomes

E_R est l'énergie de la résonance, g un facteur de spin

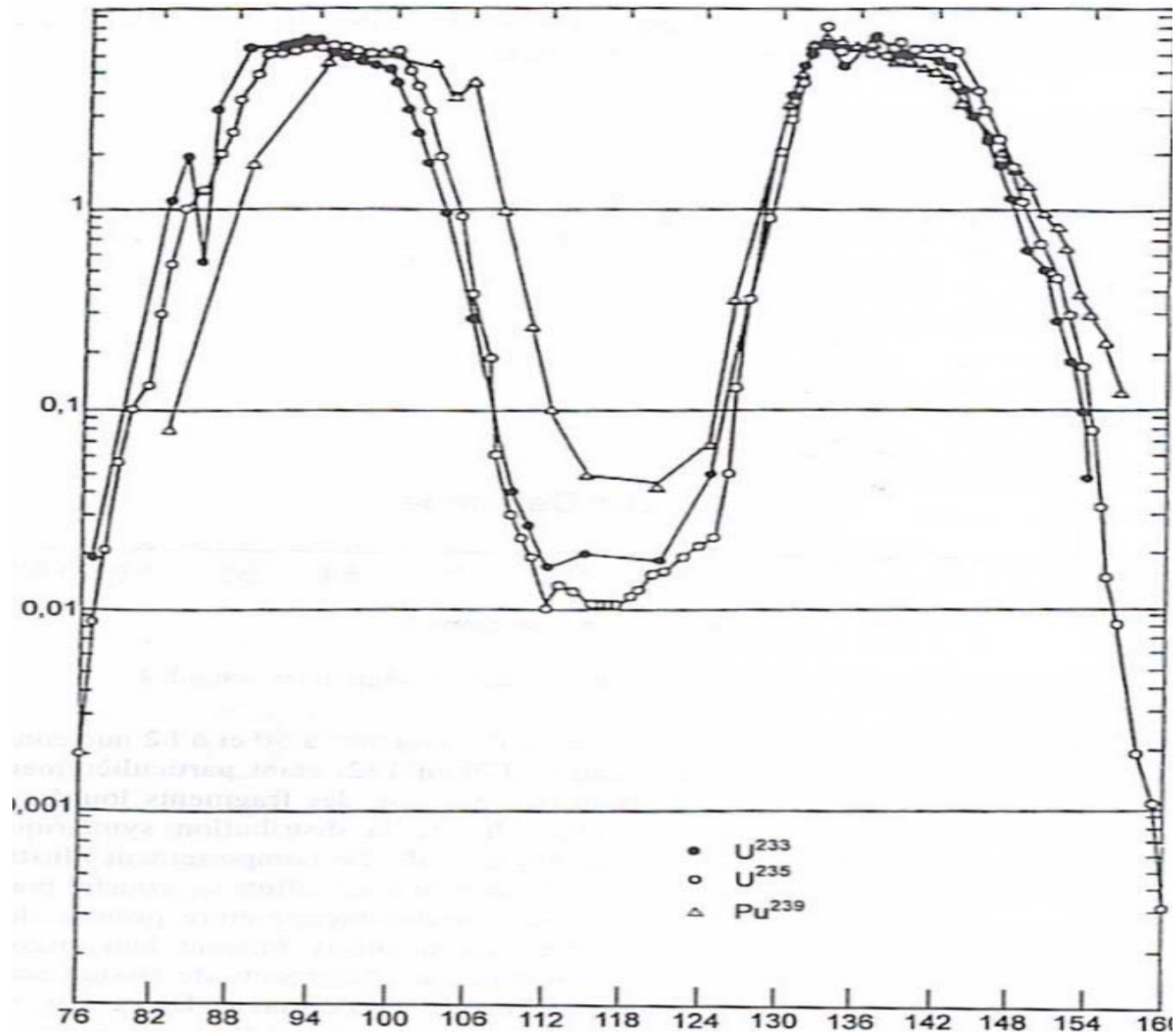
$$\sigma(E) = g \frac{6,5 \times 10^5}{E_{eV}} \frac{\Gamma_n \Gamma}{(E - E_R)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2} \quad \text{barns}$$

$$\sigma_0 = 4g \frac{6,5 \times 10^5}{E_R} \frac{\Gamma_n}{\Gamma} \quad S = 1,5 \times 10^7 \frac{\Gamma_n}{E_R}$$

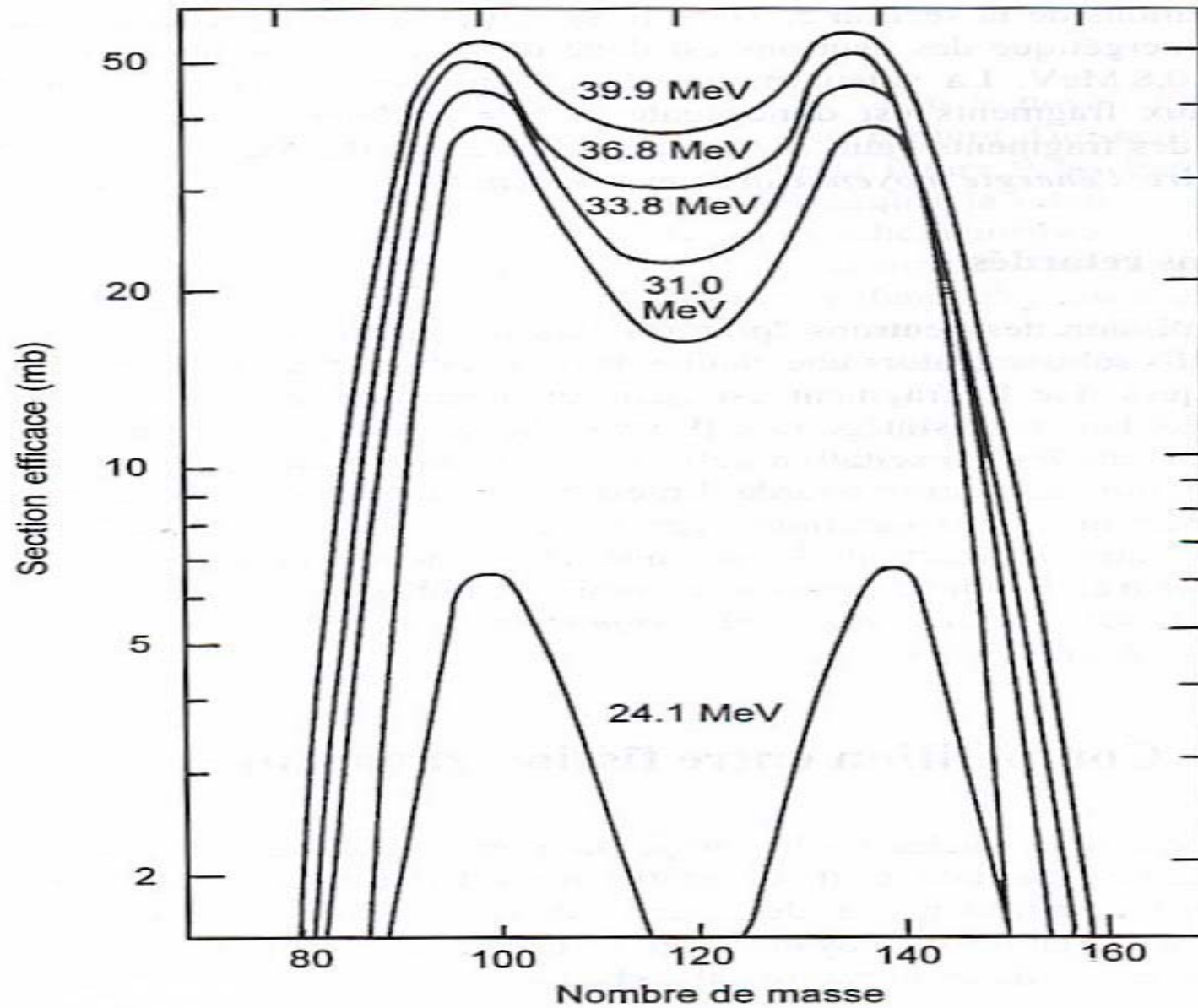
- Γ est la largeur totale de la résonance (eV). Γ_n est la largeur partielle d'émission de neutron

$$\Gamma_n = \Gamma_n^0 \sqrt{E} \quad \sigma = g\pi \left(\frac{\lambda}{2\pi} + R \right)^2 \left\langle \frac{\Gamma_n^0}{D} \right\rangle$$

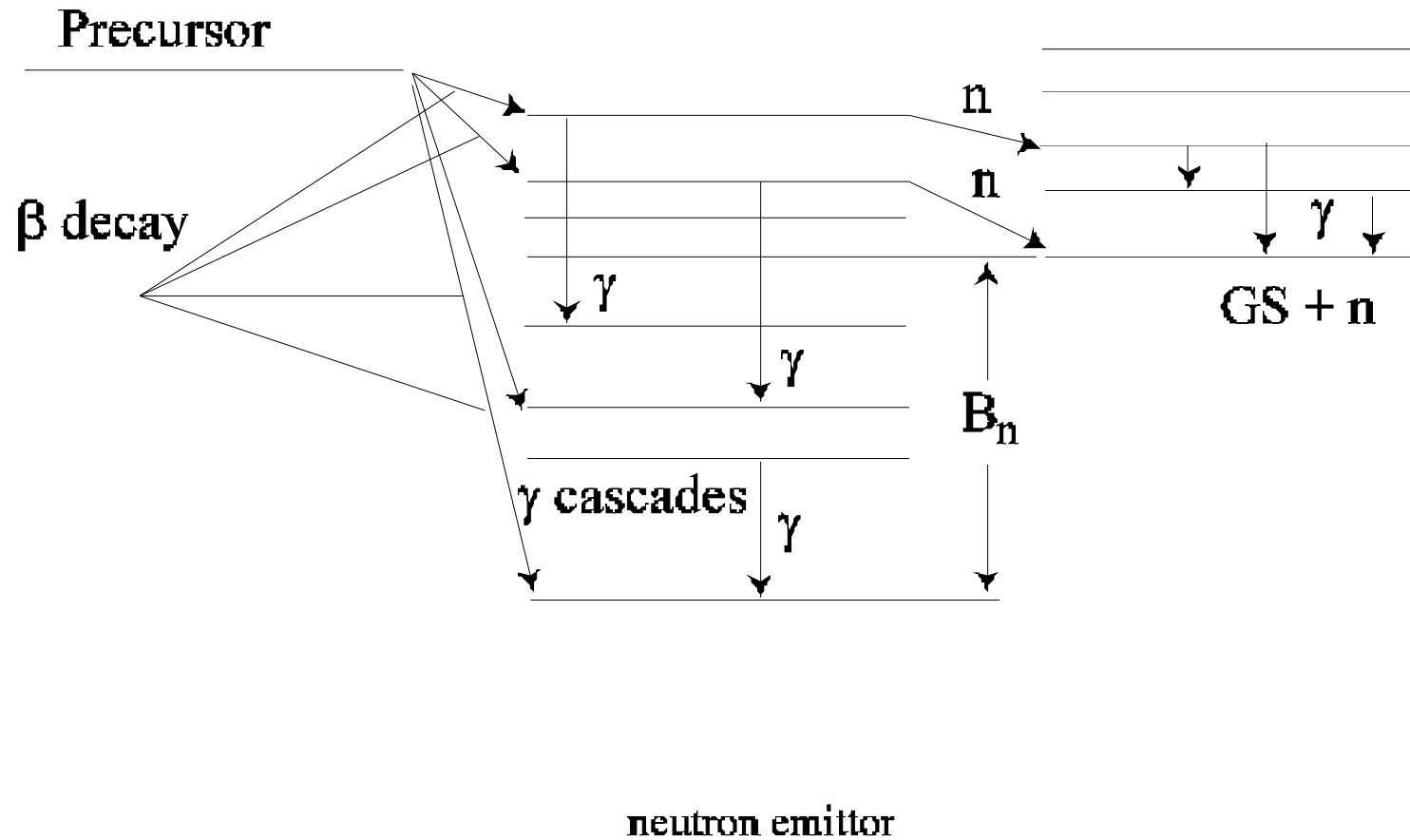
Distribution en masse des PF



Evolution des distributions



Neutrons retardés



Densité de niveaux

On distingue la région des résonances telle que:

$D > \Gamma$ Avec D la distance moyenne entre résonance

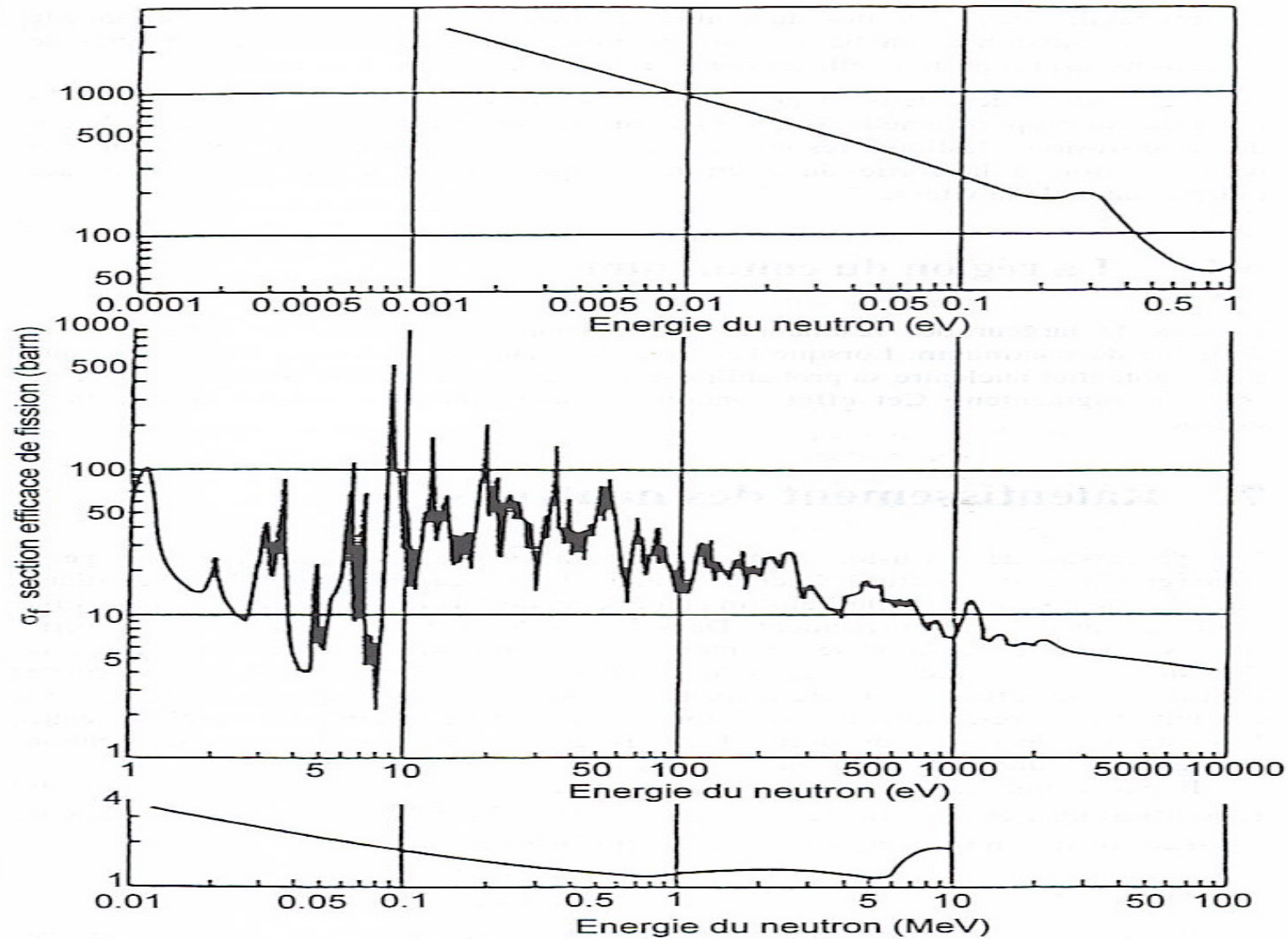
La densité de niveau ρ est l'inverse de D

$$\rho(E^*) \cong e^{2\sqrt{\frac{AE^*}{8}}} = e^{\frac{E^*}{T}}$$

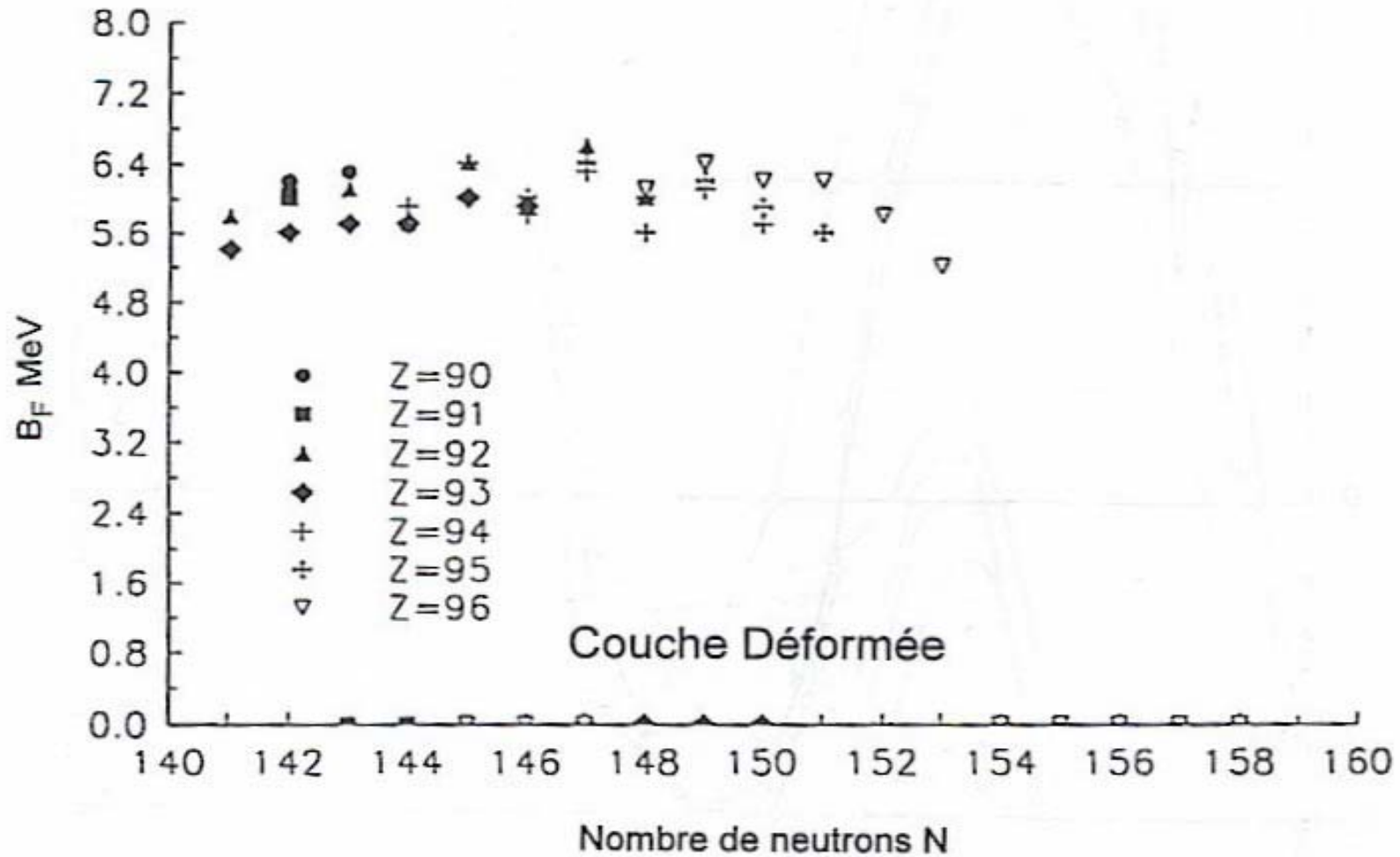
Température

$$T = \sqrt{\frac{8E^*}{A}}$$

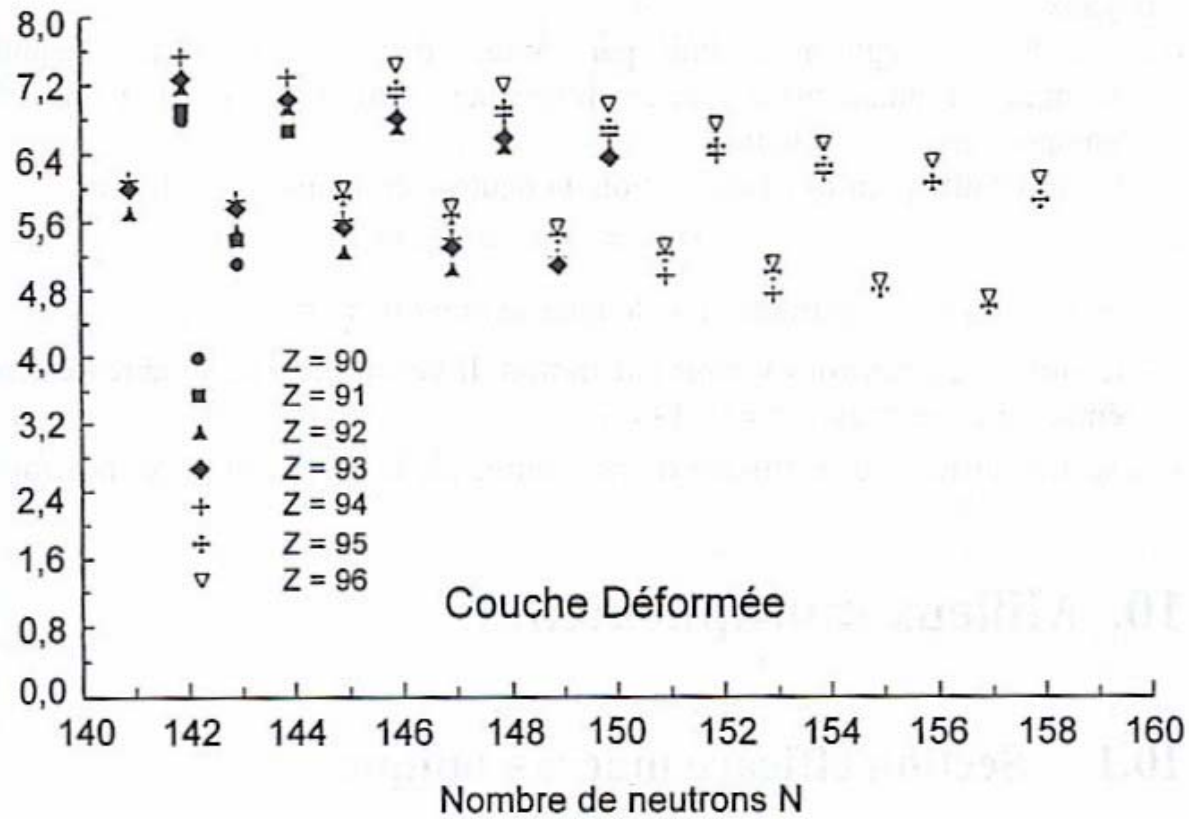
Section efficace de fission



Barrières de fission



Energies de liaison des neutrons



Largeurs

$$\sigma_0 = 4g \frac{6,5 \times 10^5 \Gamma_n^0}{\sqrt{E_R} \Gamma} \quad S = 1,5 \times 10^7 \frac{\Gamma_n^0}{\sqrt{E_R}}$$

Probabilité d'émission gamma : $p_\gamma = \frac{\Gamma_\gamma}{\Gamma}$

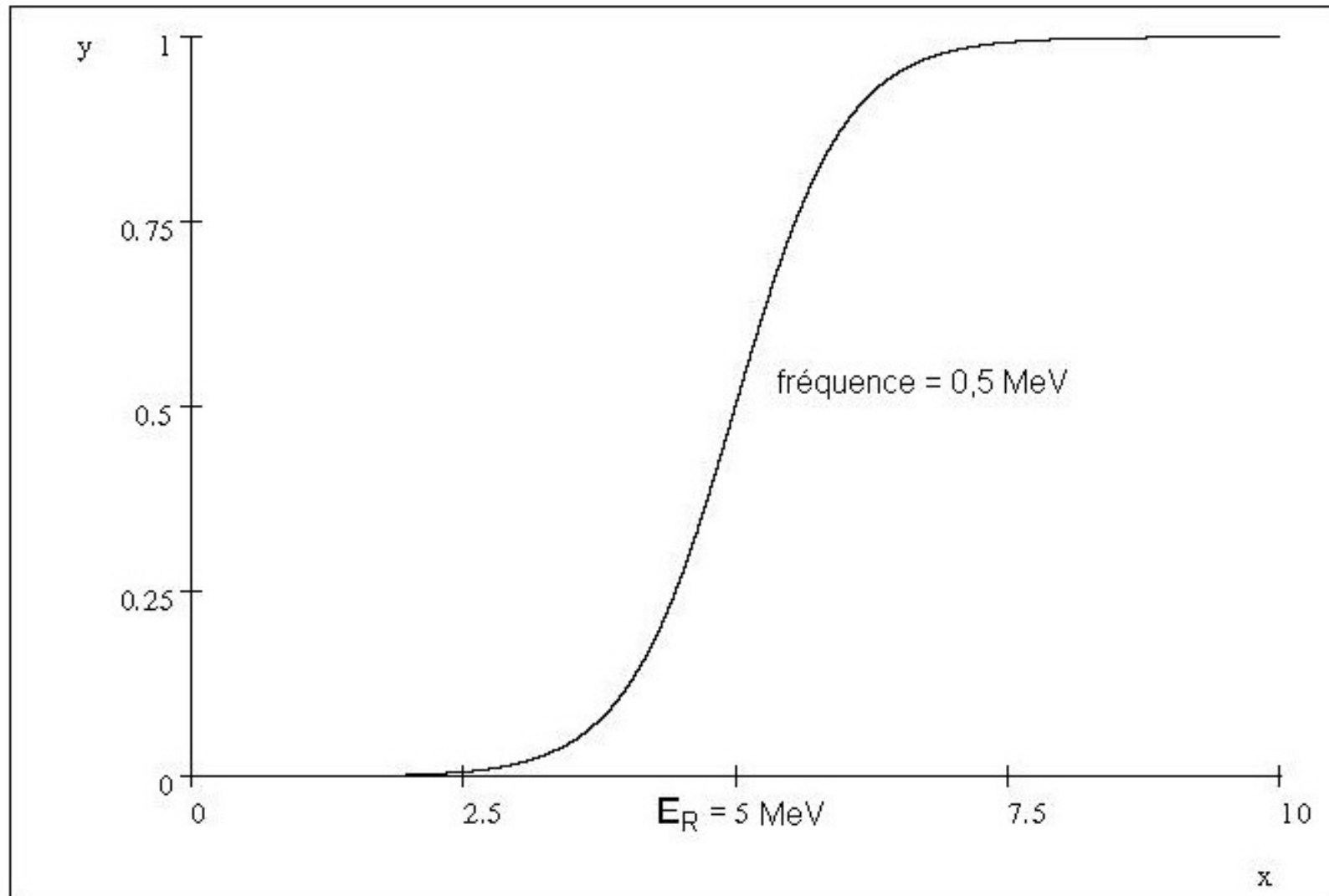
$$\Gamma = \Gamma_n + \Gamma_\gamma + \Gamma_f$$

Comportements des <largeurs> en fonction de l'énergie des neutrons

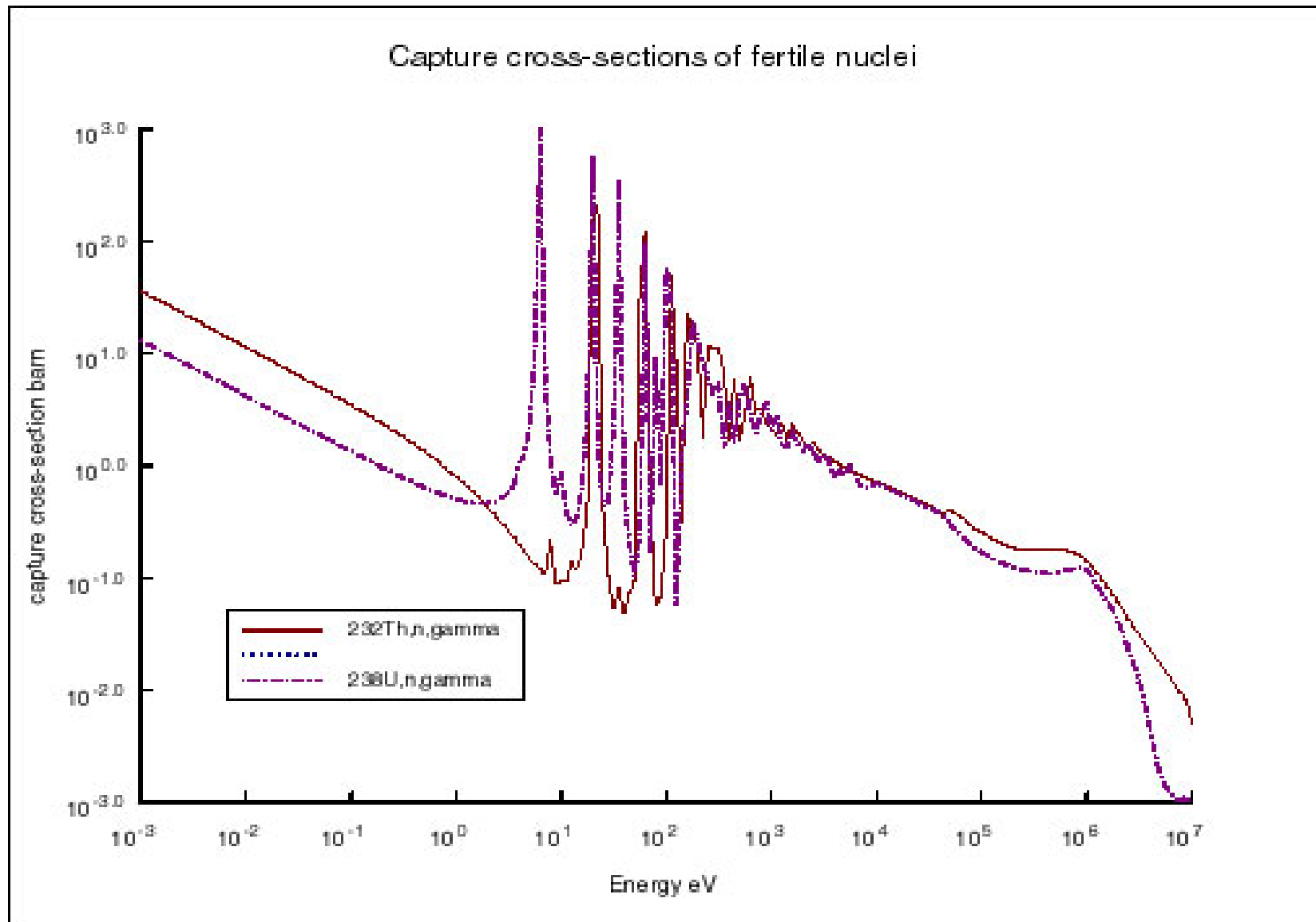
$$\langle \Gamma_\gamma \rangle \quad \text{indépendant} \quad \langle \Gamma_n \rangle \approx \sqrt{E}$$

$$\langle \Gamma_f \rangle \approx \frac{1}{1 + e^{\frac{B_F - E^*}{\hbar\omega}}} \hbar\omega \quad \begin{array}{l} \text{fréquence} \\ \text{caractéristique}^* \\ \text{du point selle} \end{array} \quad \hbar\omega \cong 0,5 \text{ MeV}$$

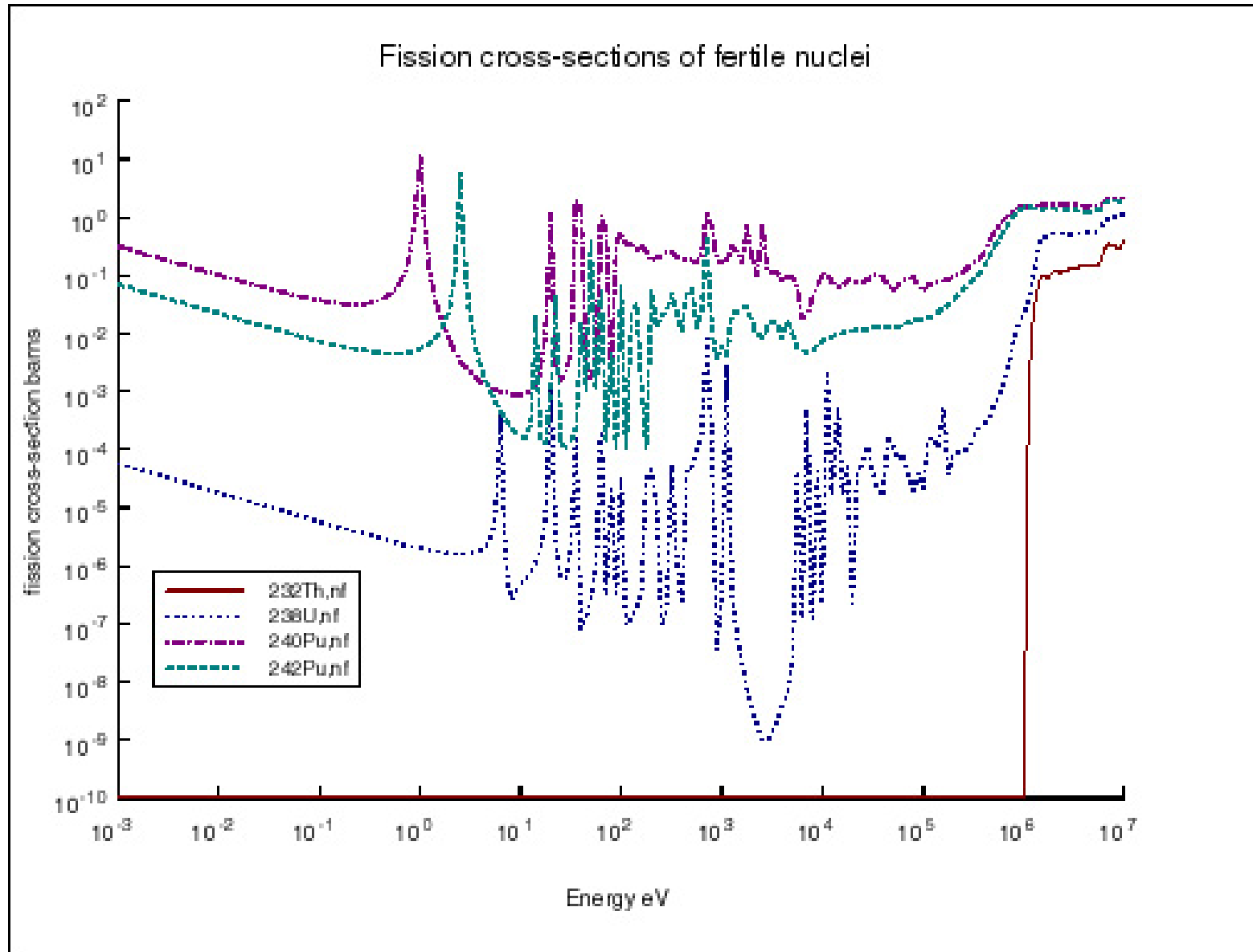
Forme de la probabilité de fission



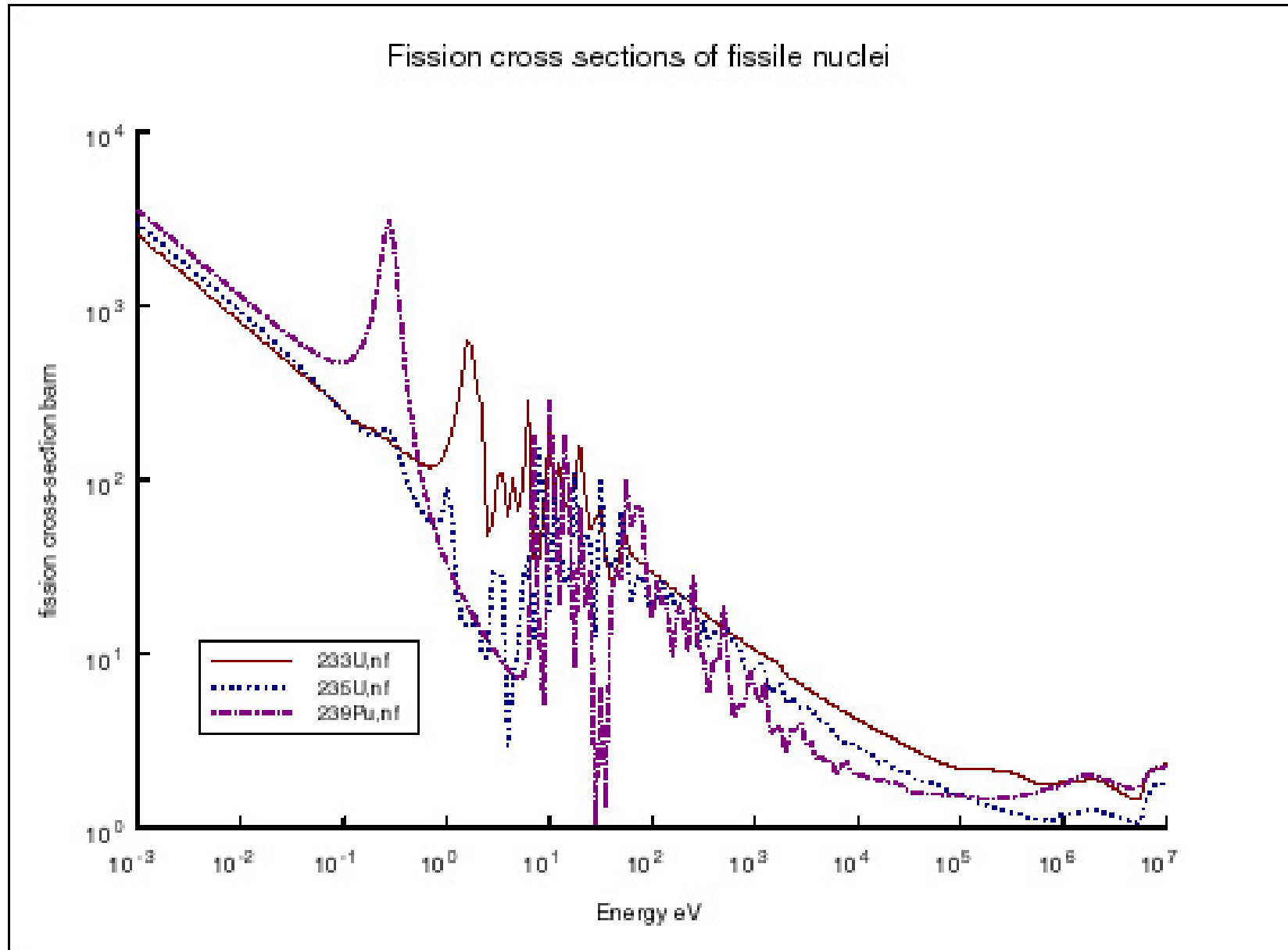
Capture Fertiles



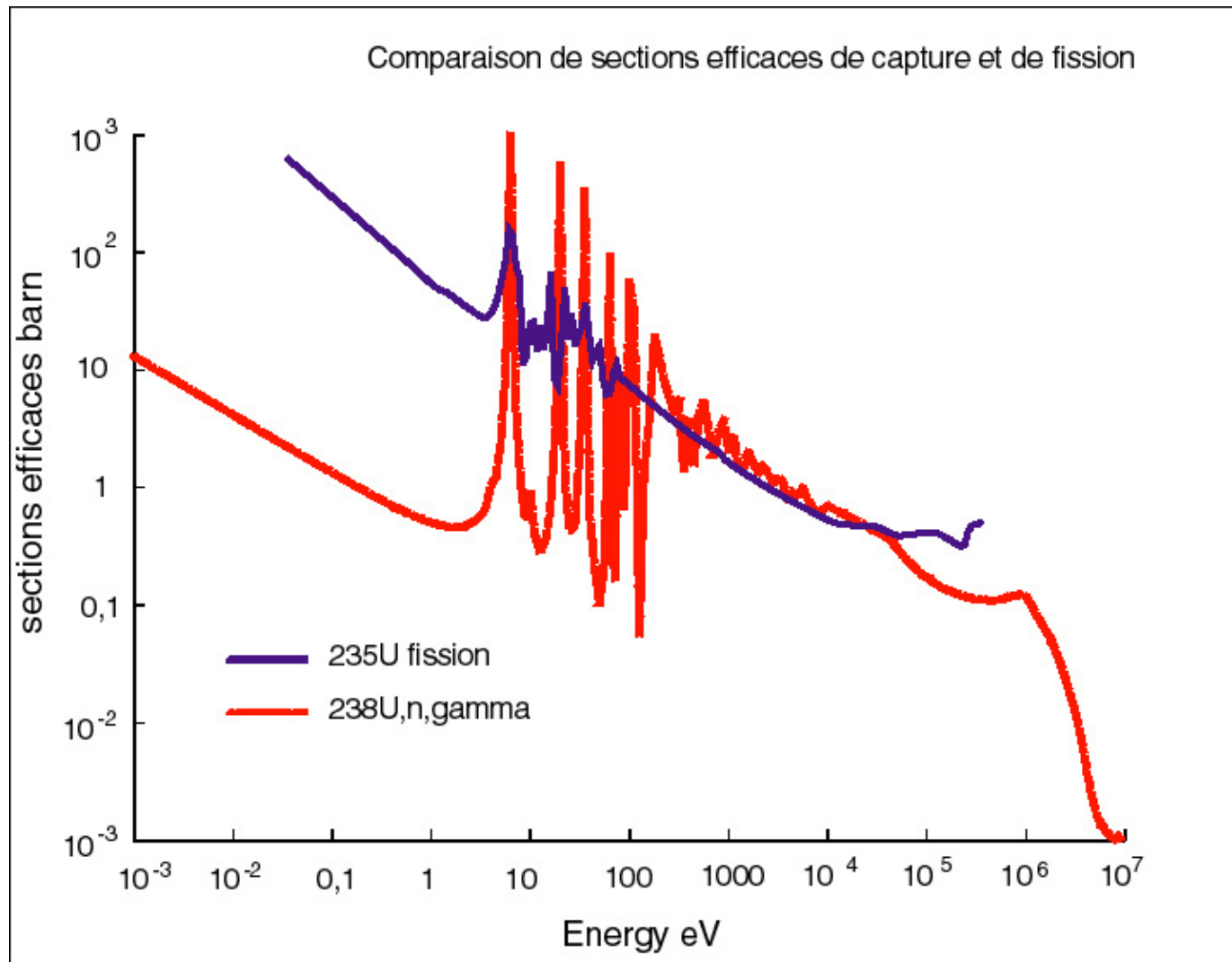
Fission Fertiles



Fission fissiles



Fertile-Fissile



Condition pour la réaction en chaîne

Milieu fissile.

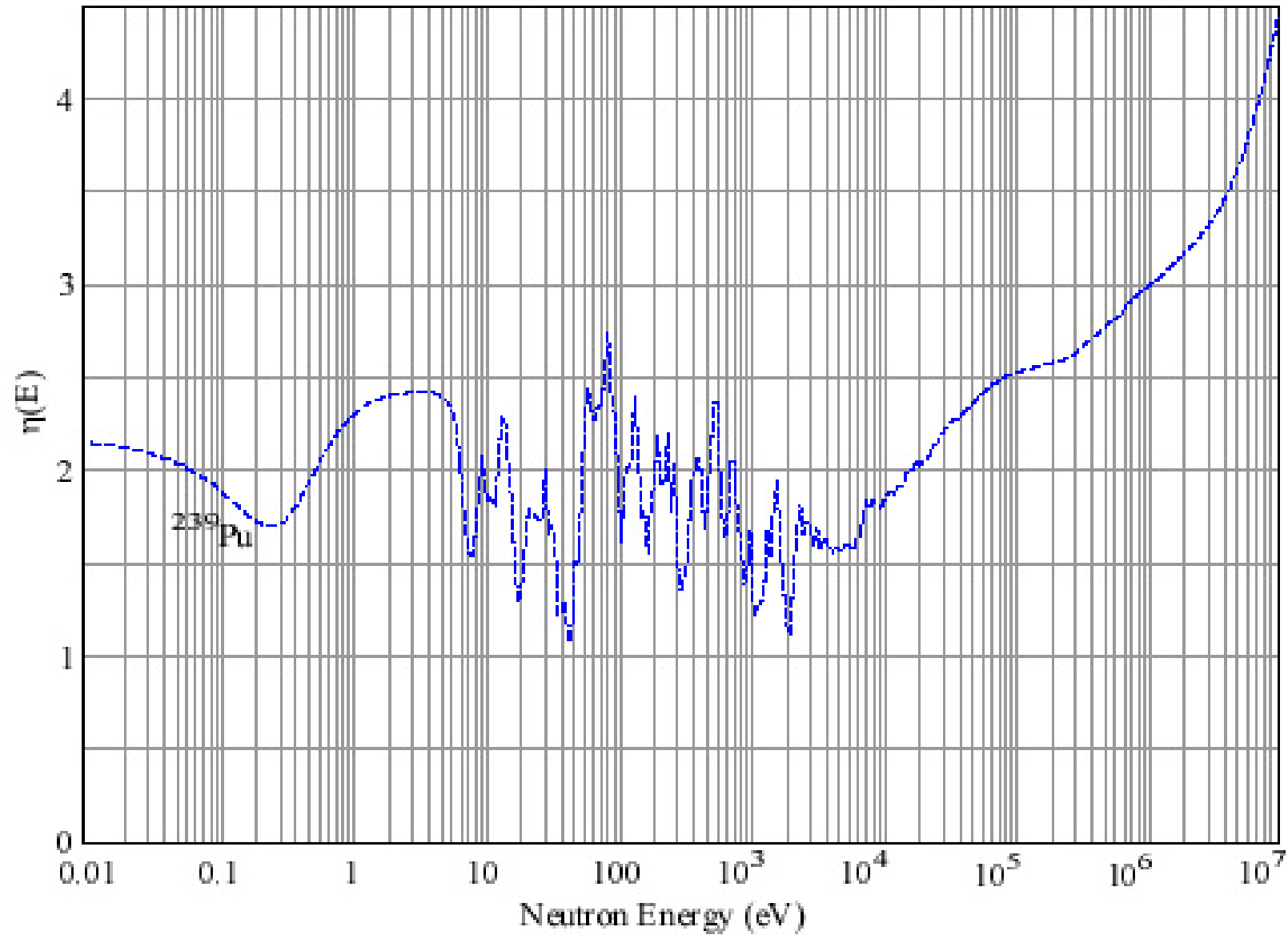
Un neutron absorbé : capture ou fission

$$(1 - \alpha) = \frac{\sigma_{fission}}{\sigma_{fission} + \sigma_{cap}} \quad \eta = \nu \times (1 - \alpha)$$

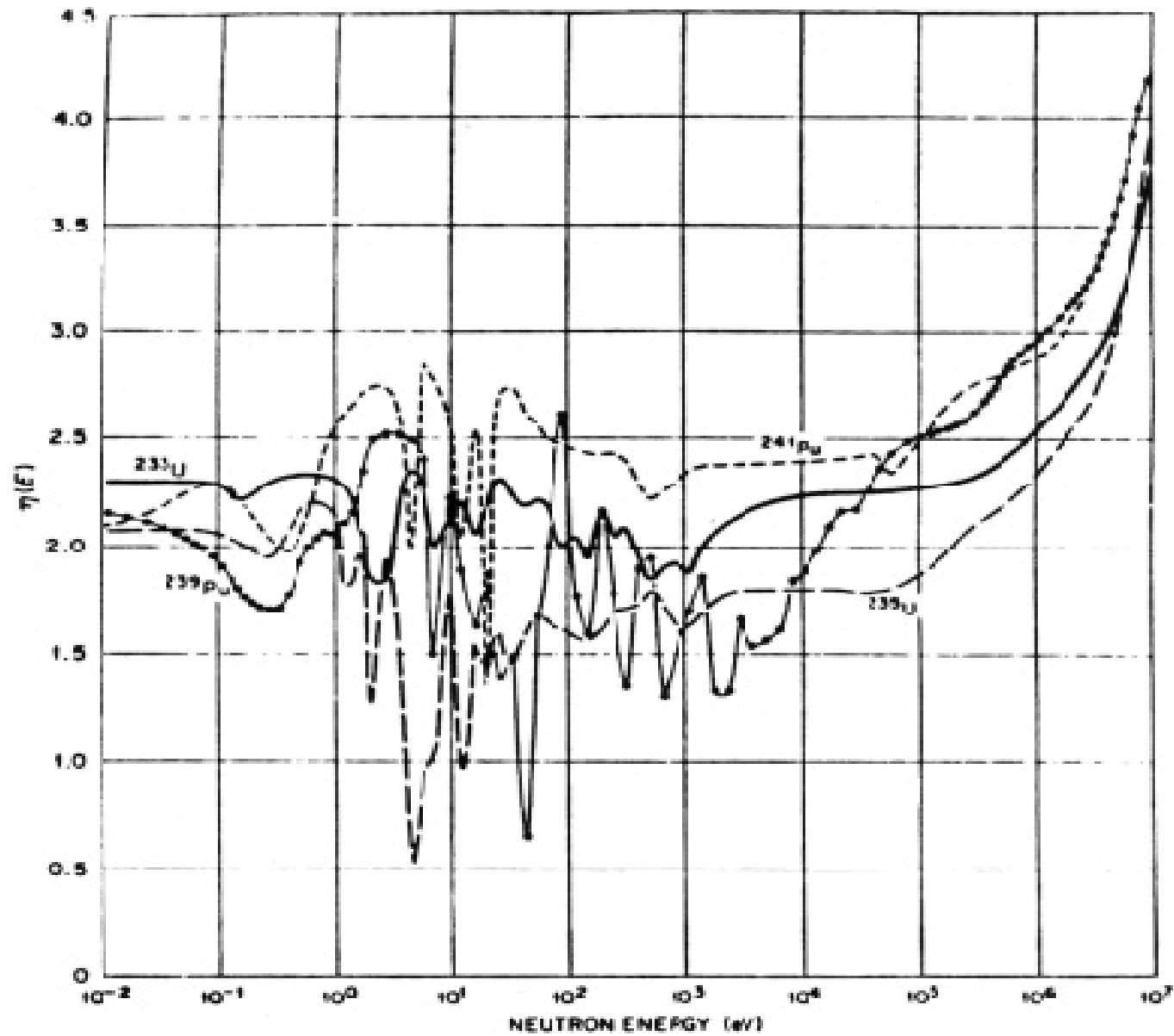
Criticité $\eta > 1$

Surrégénération $\eta > 2$

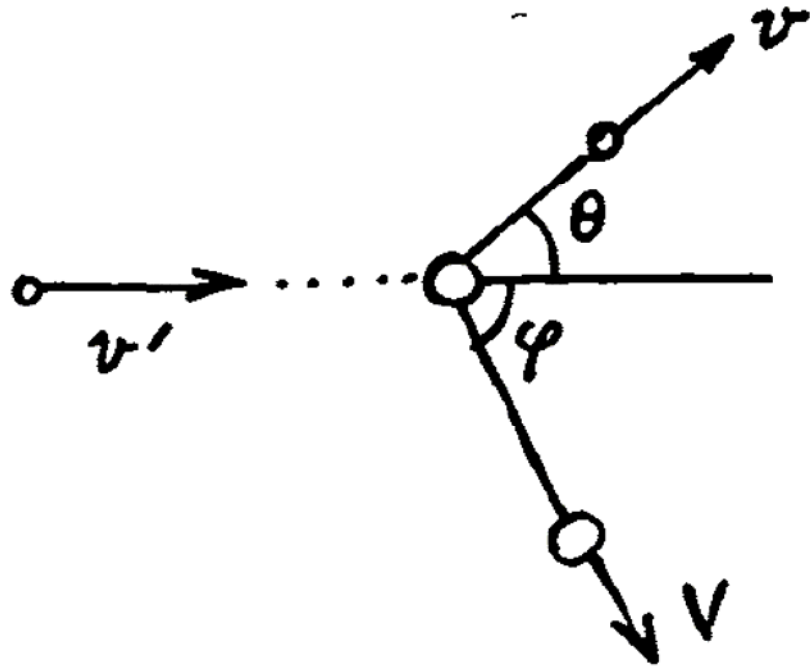
Eta Pu239



Eta fissiles



Ralentissement



$$E_n = E_n' \left(1 - \frac{4A}{(A+1)^2} \right)$$

$2 \text{ MeV} \rightarrow 0,025 \text{ eV}$

H(26), C(119), Na(227), Pb(1900)

