

Eléments de physique des réacteurs

H.Nifenecker

Noyaux Fissiles

Uranium 235, 233

Plutonium 239, 241

Noyaux fertiles

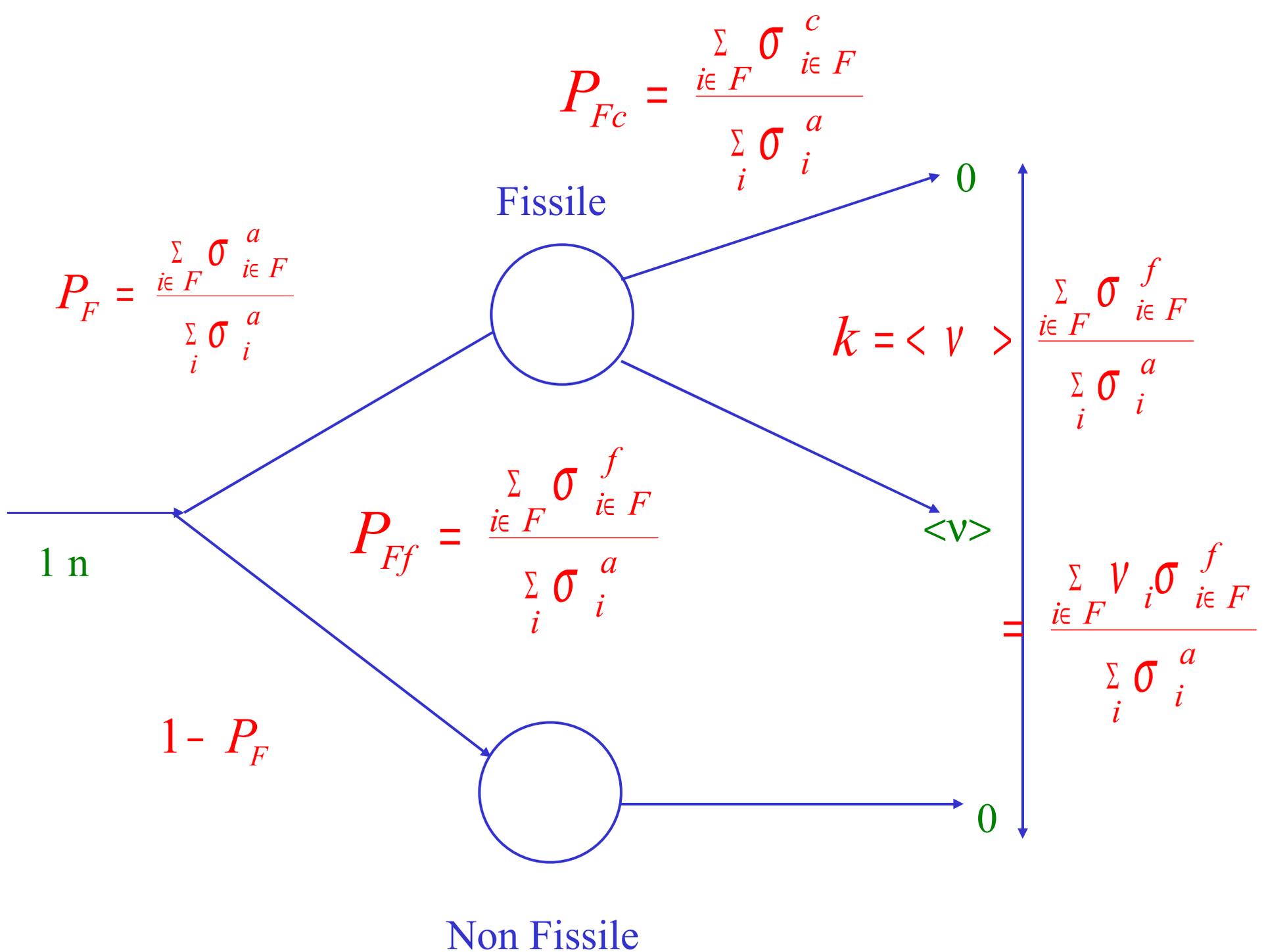
Noyau Fertile +1n → Noyau Fissile

2 désintégrations β



Propriétés des neutrons de fission

- Emission de 2 à 3 neutrons par fission
- Vitesse des neutrons de Fission: environ 20000 km/s
Energies: environ 2 Millions eV
- Vitesse des neutrons thermiques(lents) environ 2,2 km/s
Energies environ 25 meV



Réaction en chaîne

Fission \Rightarrow neutrons \Rightarrow Fissions

1 Fission \Rightarrow k Fissions à chaque generation

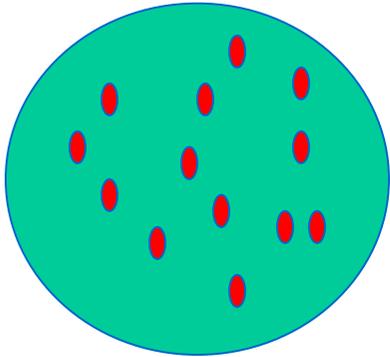
$k > 1$ Divergence. (surcriticalité)

$k < 1$ Milieu multiplicateur Sous-critique

1 fission $\Rightarrow 1 + k + k^2 + \dots k^i + \dots = \frac{1}{1 - k}$ fissions

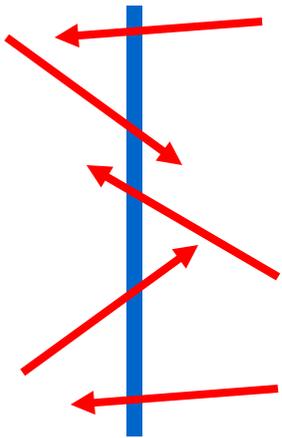
$k = 1$ Milieu critique

Définitions



Densité de neutrons: n/cm^3

$$n(\vec{r}, u, \vec{\Omega}, t) \Rightarrow n_T(\vec{r}, u, t)$$



Flux neutronique: $n/cm^2/s$

$$\phi(\vec{r}, u, \vec{\Omega}, t) = u n(\vec{r}, u, \vec{\Omega}, t)$$

Courant neutronique: $n/cm^2/s$

$$J(\vec{r}, \vec{u}, t) = \int_{(4\pi)} \vec{\Omega} \phi(\vec{r}, u, \vec{\Omega}, t) d^2\Omega = J^+ - J^-$$

Notations

Sections efficaces macroscopiques

$$\Sigma^{(a)} \left(cm^{-1} \right) = 10^{-24} \sum_i^N n_i \sigma_i^{(a)} \text{ (barns)} \quad n_i \text{ nombre de noyaux/cm}^3$$

Taux de réaction

$$n_i^{react} = n_i \sigma_{react} \phi = \Sigma_{react} \phi \quad \phi \quad \text{Flux neutronique}$$

Coefficients multiplicateurs

- Milieu infini: k_∞
 - Milieu fini : k effectif $k_{eff} < k_\infty$
- $$k_\infty = \frac{\nu \Sigma_f}{\Sigma_a}$$

Applications numériques 1

Réacteur à neutron lent

$$\sigma_F = 100 \quad \text{barns, } u=10 \text{ km/s}$$

$$N_{U235} = \frac{11}{235} \times 0,03 \times 6,06 \times 10^{23} = 8,5 \times 10^{20} / \text{cm}^3$$

$$\Sigma_F = 100 \times 10^{-24} \times 8,5 \times 10^{20} = 8,5 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$$

$$\Lambda_F = \frac{1}{\Sigma_F} = 12 \text{ cm}$$

Applications numériques 2

Consommer 2/3 de l'U5 en 3 ans?

Nombre de fissions en trois ans :

$$f = \Sigma_F \varphi \times 3600 \times 24 \times 365 \times 3 = 8 \times 10^6 \varphi$$

Nombre de noyaux à consommer: 6×10^{20}

$$\varphi = 7.10^{13} \text{ n / cm}^2$$

Nombre de fissions par seconde :

$$f = 6.10^{12} \text{ fissions / cm}^3$$

Applications numériques 3

Densité de neutrons:

$$n = \frac{\varphi}{u} = \frac{7 \times 10^{13}}{10000} = 7 \times 10^9 \text{ par } cm^3 \text{ soit } 2,6 \times 10^{-10} \text{ atm}$$

Neutrons rapides $n = \frac{\varphi}{u} = \frac{5 \cdot 10^{15}}{100000000} = 5 \times 10^5 \text{ par } cm^3$

$$N_{Pu239} = \frac{11}{235} \times 0,15 \times 6,06 \times 10^{23} = 42,5 \times 10^{20} / cm^3$$

$$\sigma_F = 2 \text{ barns}$$

$$\Sigma_F = 2 \times 10^{-24} \times 42,5 \times 10^{20} = 0,85 \times 10^{-2} cm^{-1}$$

$$f = 4,25 \times 10^{13} \text{ fissions } / cm^3$$

Applications numériques 4

Energie par fission

$$200 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} = 3,2 \times 10^{-11} \text{ Watt}$$

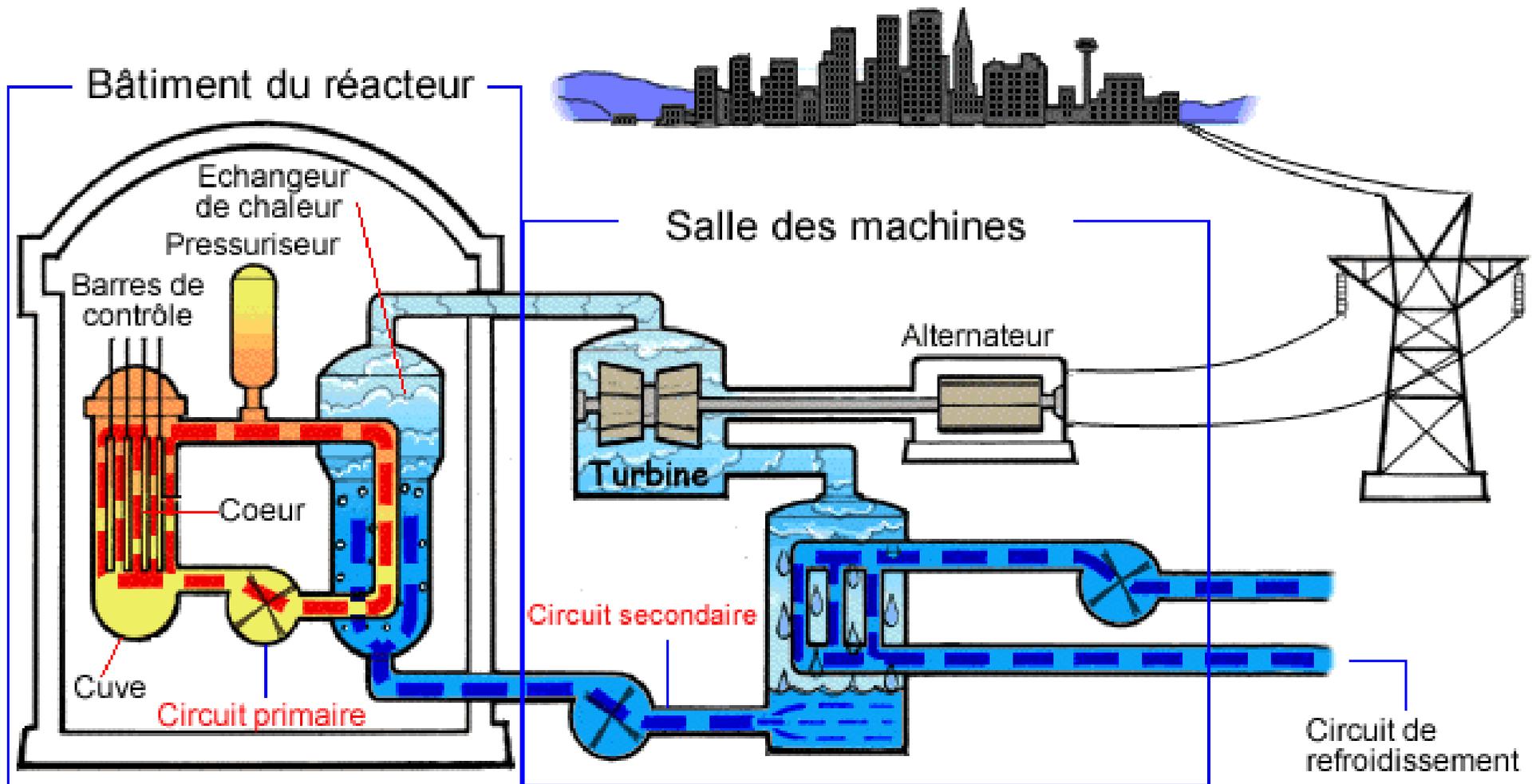
Puissance : 203 Watt/cm³

Le tonnage d'uranium est d'environ 120 tonnes, soit 12 m³.

La puissance totale du réacteur serait environ:

$$12 \times 10^6 \times 200 = 2,4 \times 10^9 \text{ Watt}$$

Schéma d'un REP



Extraction de chaleur

Extraire la chaleur (3 GWth)

Débit d'eau : 60000 m³/h=17 t/s.

Capacité calorifique de l'eau : 4186 J/kg/K

T=300 d°C P=155 bar

$$Q = 4186 \times \Phi \times \Delta T$$

$$\Delta T = \frac{3 \times 10^9}{4186 \times 17000} = 42 \text{ } d^{\circ} K$$

Température intérieure

Température de fusion de l'oxyde d'uranium: 2865 d°C

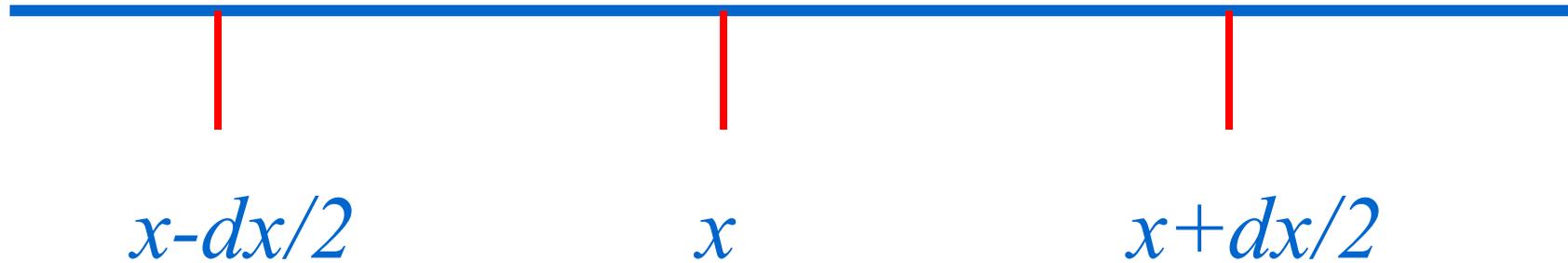
Supposons qu'on limite la température intérieure à 1000 d°C

$$\Delta T = \frac{w}{a} L^2 \quad a = 3W / m / K \quad w = 100W / cm^3$$

$$\Delta T = 33 \times 10^6 \times L^2$$

$$L = 4,5 \text{ mm}$$

Modèle 1D



Evolution de $n(x, u)$ avec ε direction ± 1

1. Bilan entrées-sorties
2. Changements d'orientation
3. Absorption
4. Neutrons de fission

Entrées-Sorties, absorption

Entrée Sortie

$$\Delta (n(x, t) dx) = \frac{1}{2} u dt \left[n \left(x - \frac{dx}{2} \right) - n(x) - n(x) + n \left(x + \frac{dx}{2} \right) \right]$$

$$\frac{\Delta n(x, t)}{dt} = \frac{1}{8} u \frac{d^2 n(x, t)}{dx^2} dx$$

Absorption $\Delta (n(x, t)) = -\Sigma_a n(x, t) u dx$

Neutrons de fission

$$\Delta (n(x, t)) = \nu \Sigma_f n(x, t) u dx$$

Equation de la diffusion

$$\frac{dn(x,t)}{dt} = u \left(D \frac{d^2 n(x,t)}{dx^2} - \Sigma_a n(x,t) (1 - k_\infty) \right)$$

On cherche une solution factorisée:

$$n(x,t) = f(t) \cos(Bx) \quad \text{Annulation pour } x = L \quad B = \frac{\pi}{L}$$

$$\text{et: } \frac{df(t)}{dt} = f(t) u \left(-DB^2 - \Sigma_a (1 - k_\infty) \right)$$

$$f(t) = f_0 \exp \left(\left(k_\infty - 1 - \frac{B^2 D}{\Sigma_a} \right) \Sigma_a u t \right)$$

Solution

Dépendance en temps

$$f(t) = f_0 \exp\left(\left(k_\infty - 1 - \frac{B^2 D}{\Sigma_a}\right) \Sigma_a u t\right)$$

$$k_\infty > 1 + \frac{B^2 D}{\Sigma_a} \quad \text{Divergence}$$

$$k_\infty < 1 + \frac{B^2 D}{\Sigma_a} \quad \text{Extinction}$$

$$\text{Criticité} \quad k_\infty = 1 + \frac{B^2 D}{\Sigma_a} \quad \Rightarrow \quad k_{eff} = k_\infty - \frac{B^2 D}{\Sigma_a} = 1$$

Exemples de k

Exemple réacteur à une dimension:

$$k_{eff} = k_{\infty} - \frac{\pi^2 D}{L^2 \Sigma_a} \quad \rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}}$$

Coef. Multiplicateur de source : k_s

$$\frac{k_s}{1 - k_s} = k_1 + k_1 k_2 + \dots + k_1 k_2 \dots k_i + \dots$$

Importance: $\varphi^{\oplus} = \frac{k_s}{1 - k_s}$ Mais aussi k_1

Evolution temporelle

Après N générations

Nombre de fissions : $(k-1)^N$

Temps entre deux générations: θ

Puissance $P(t) = (k-1)^{t/\theta}$

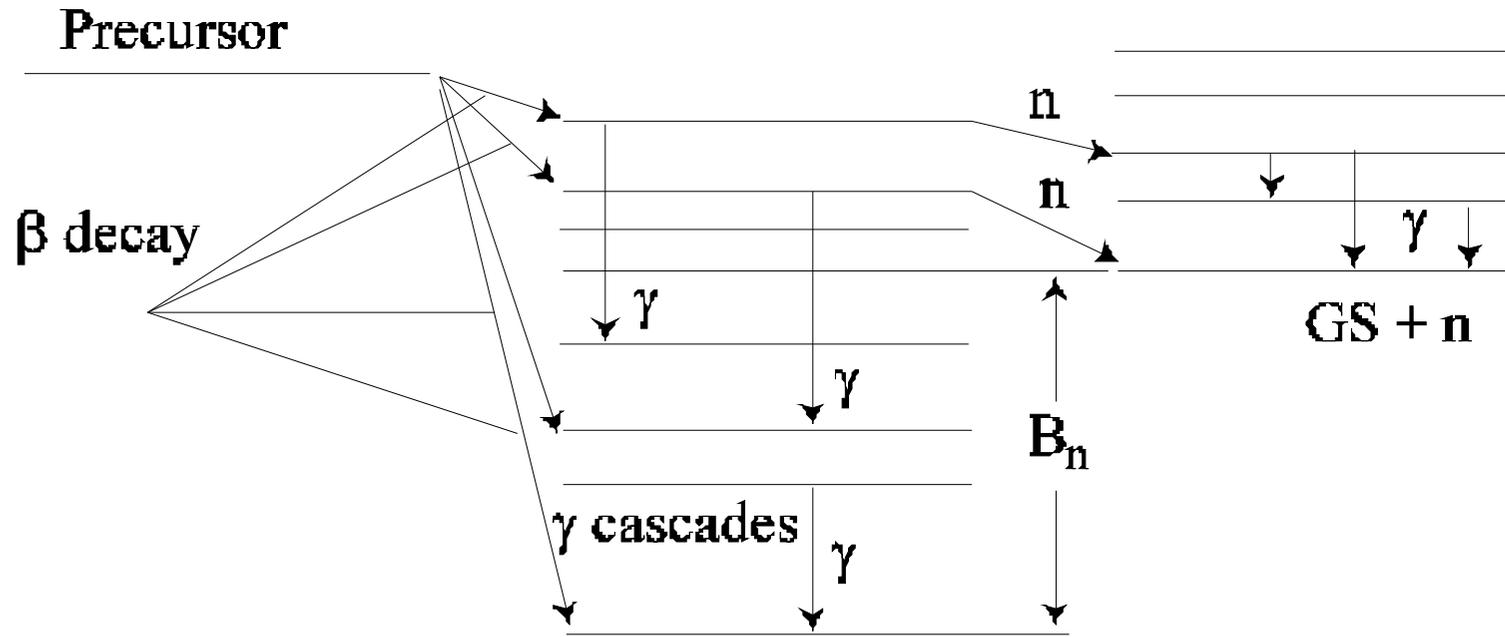
θ temps entre 2 générations

Sans neutrons retardés

Neutrons rapides $\theta = 10^{-7}$ s.

Neutrons lents $\theta = 10^{-4}$ s.

Neutrons retardés



neutron emitter

Temps caractéristiques

τ temps entre 2 générations (sans neutrons retardés)

Neutrons rapides $\tau = 10^{-7}$ s.

Neutrons lents $\tau = 10^{-4}$ s.

Neutrons retardés :

Fraction : β (0.0065 pour U235) $\rho = \beta = 1$ \$

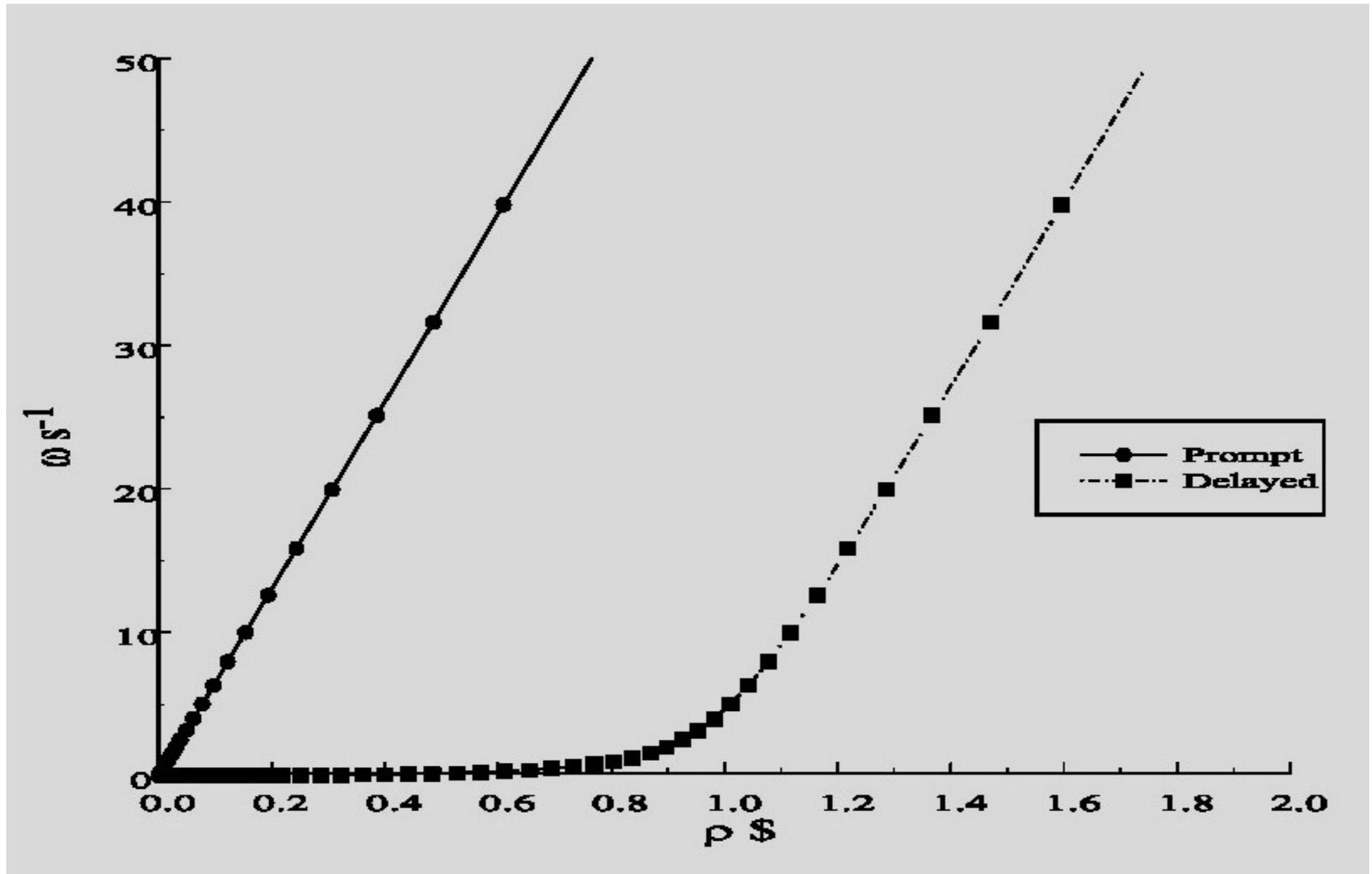
Retard : T_D (8,8 s. for U235)

$$k_p = k_{\text{eff}} - \beta$$

$$k_p < 1 \quad \theta = (1 - \beta) \tau + \beta T_D \quad (0,056\text{s.})$$

$$W(t) = W_0 \exp\left(\frac{(k - 1) t}{\theta}\right) = W_0 \exp\left(\frac{\rho t}{(1 - \rho) \theta}\right)$$

Effet des n retardés



Effet Doppler

- Combustible : fissile+fertile
- Absorption par les résonances du fertile
- Température ↗ Largeur ↗ Absorption ↗

$$\Delta = \sqrt{\frac{4E_0kT}{A}}$$

- Exemple: Résonance à 6.7eV dans ^{238}U
 $\Gamma=25.5 \text{ meV}$ $\Delta(300\text{d}^\circ\text{K})=53 \text{ meV}$

Effet de densité (ρ)

$$T \uparrow \quad \rho \downarrow$$

Exigence:

$$\frac{dk}{d\rho} > 0$$

Effet de vide

Bulles, l'ébullition doit diminuer k

Effet de vide

L'accroissance de la température ou des fuites :

- Décroît la proportion du fluide de refroidissement et du ralentisseur par rapport au **combustible**;
- Augmente les fuites de neutrons
- Dans les réacteurs thermiques : Durcissement des Spectres et absorption accrue ont des effets opposés :
 - REP: Durcissement du spectre dominant: réactivité décroît
 - RBMK: diminutions de l'absorption dominante: augmentation de la réactivité (ralentissement par le graphite)
- Dans les réacteurs rapides : Compétition entre absorption diminuée et fuites accrues:
 - Grand réacteur(Super-Phenix: augmentation de la reactivit 
 - Réacteurs plus petits (Phenix : décroissance de la reactivit 

Effet Xénon

$$\sigma_c = 2.7 \cdot 10^6 \text{ barns}$$



6.7h

9.2h

$2.6 \cdot 10^6 \text{ y}$

$$n_{Xe} = \frac{y_I \Sigma f \phi n}{\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \phi n}$$

$$\frac{dn_I}{dt} = -\lambda_I n_I$$

$$\frac{dn_{Xe}}{dt} = \lambda_I n_I - \lambda_{Xe} n_{Xe}$$

Xénon 2: décroissance de la réactivité

