

---

**UPMC – M2 Ingénierie pour le Nucléaire**

# **Neutronique**

## **05. – Thermalisation des Neutrons**

---

Laurent Le Guillou  
UPMC / LPNHE

llg@lpnhe.in2p3.fr

# Plan général du cours

---

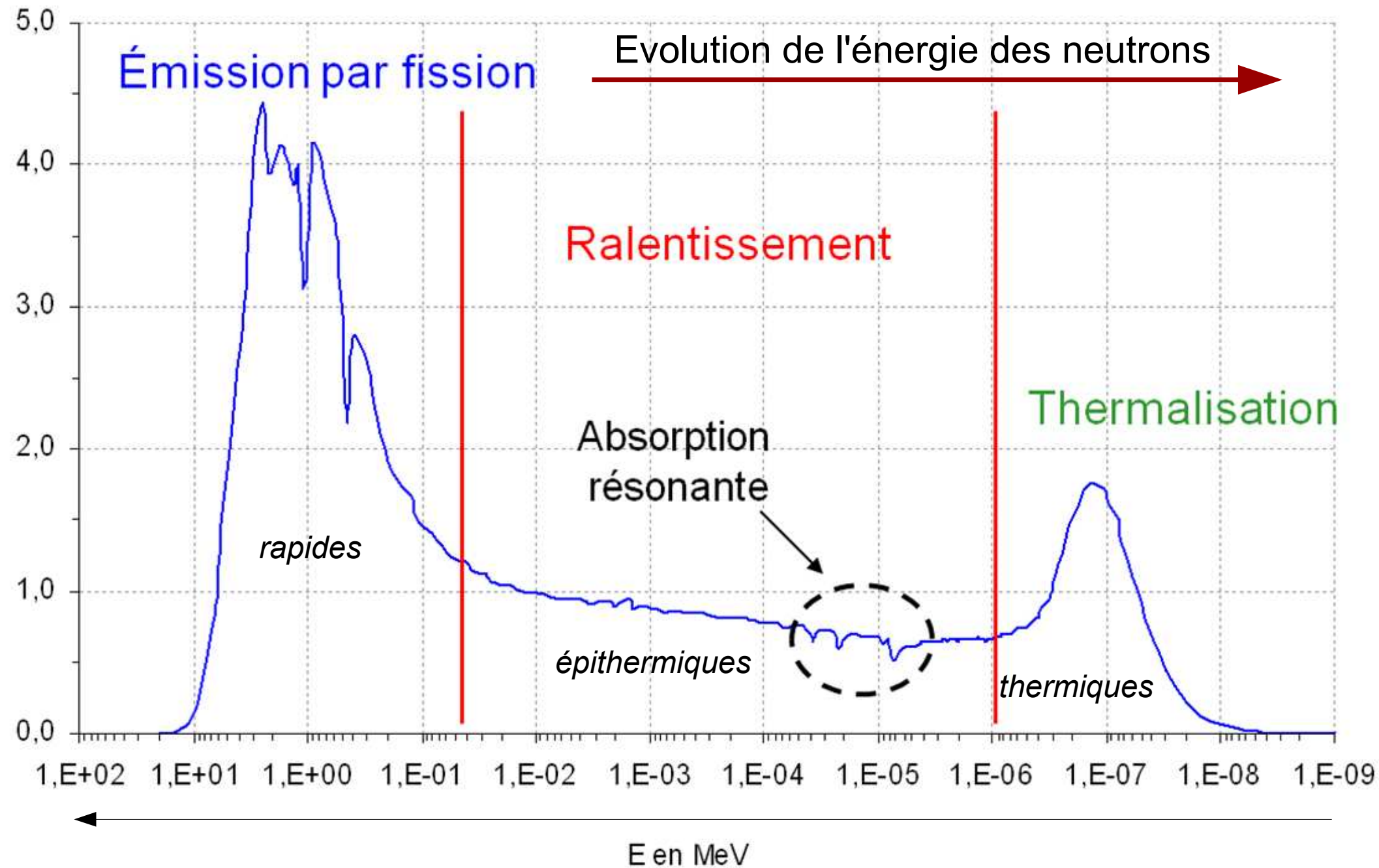
1. – Introduction générale, rappels
2. – Cinétique ponctuelle des réacteurs (*équations de Nordheim*)
3. – Ralentissement des neutrons
4. – Absorption résonante
5. – Thermalisation des neutrons
6. – Transport des neutrons : équation de Boltzmann
7. – Diffusion des neutrons
8. – Théorie multi-groupe
9. – Evolution du combustible (*équations de Bateman*)
10. – Effets de température
11. – Contrôle de la réactivité, contrôle de la puissance

# Plan

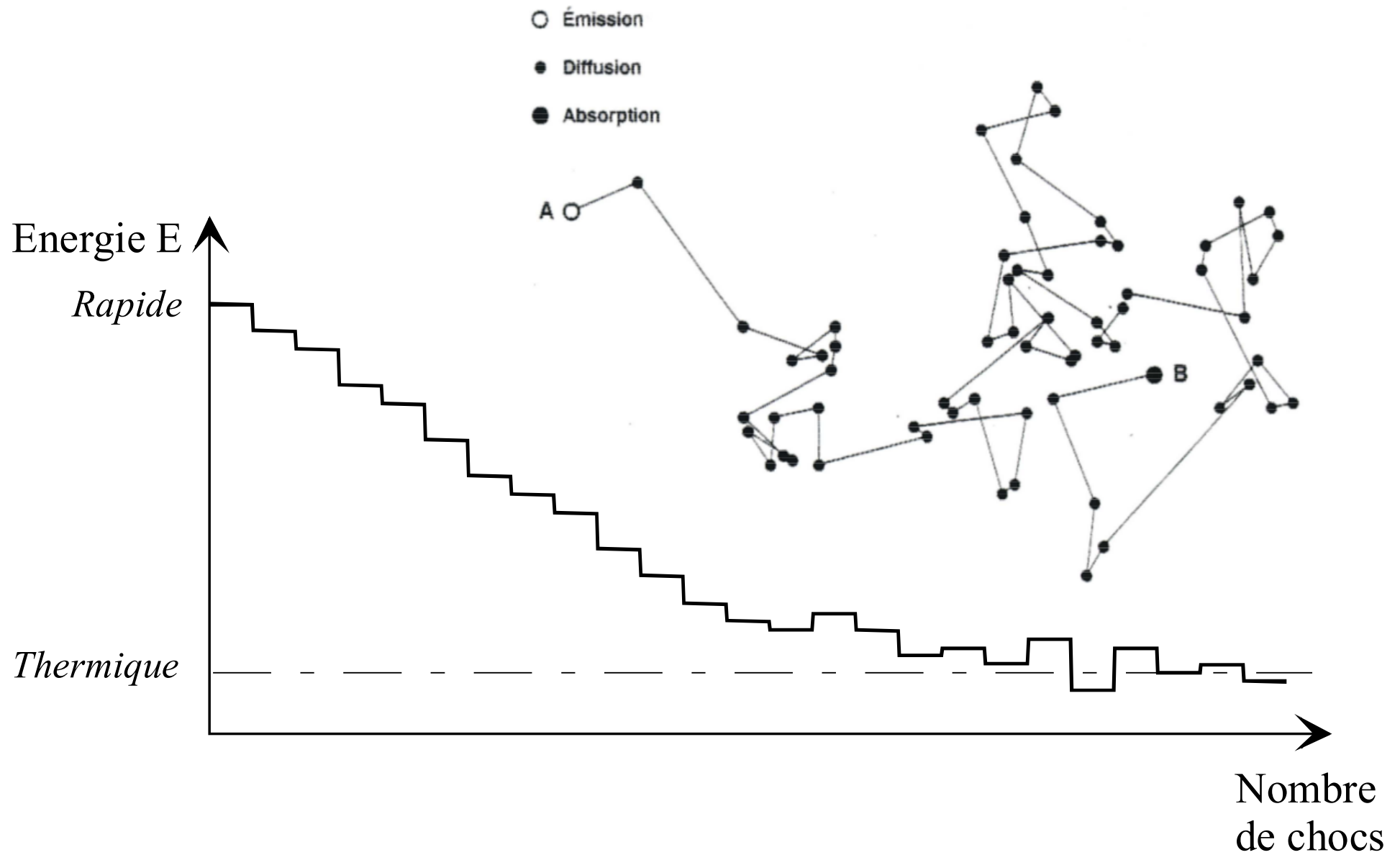
---

- Introduction
- Thermalisation par un gaz parfait mono-atomique
- Thermalisation par des modérateurs réels
- Spectre de Maxwell
- Spectres des neutrons thermiques
- Facteur de reproduction  $\eta$  (thermique)
- Facteur d'utilisation thermique  $f$
- Optimum de modération  $pf$

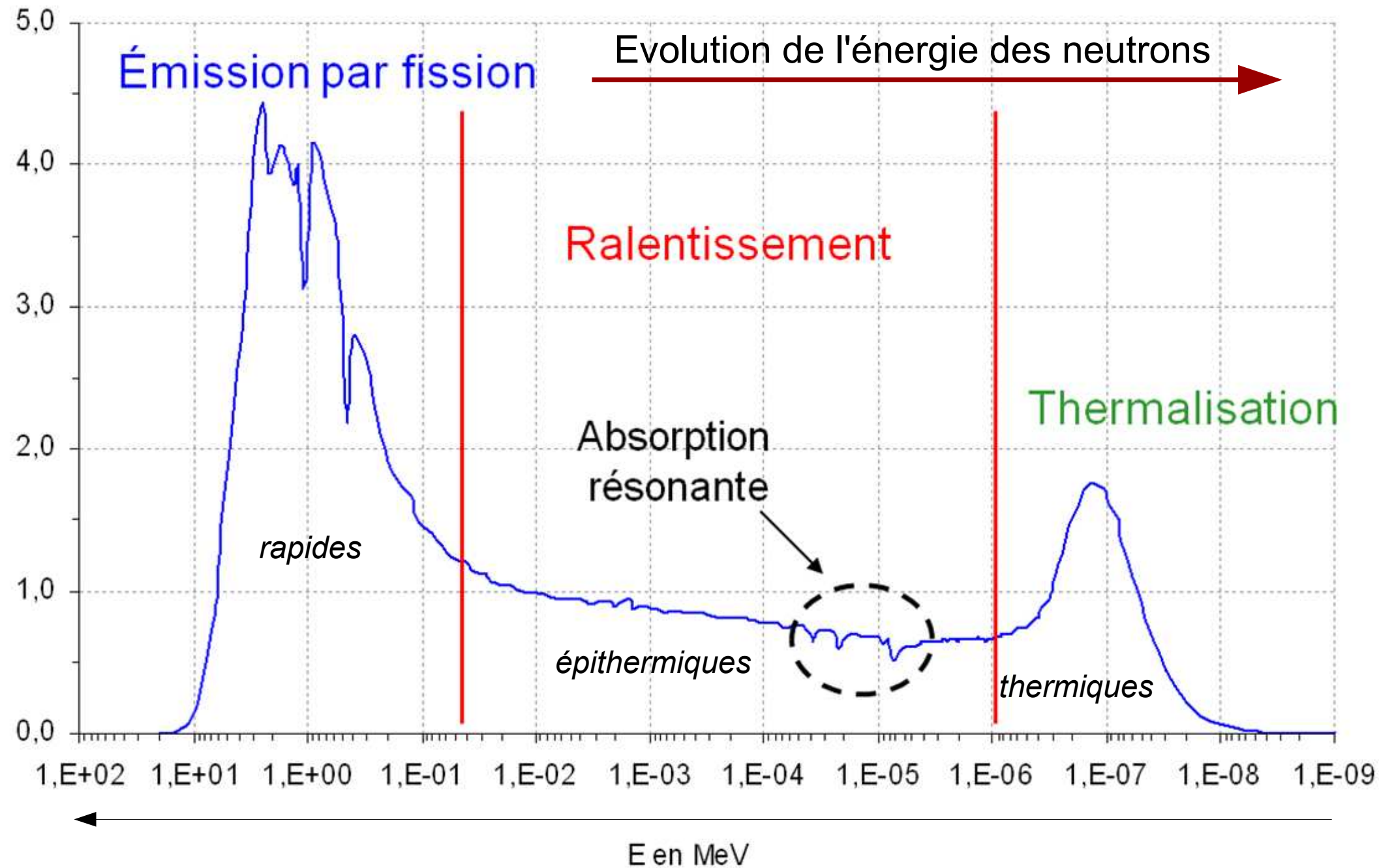
# « Vie » d'un neutron dans le réacteur



# Ralentissement par collisions successives



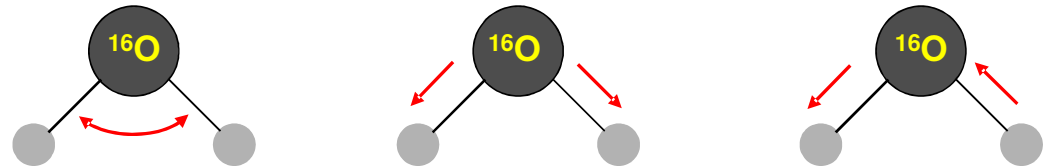
# « Vie » d'un neutron dans le réacteur



# Fin du ralentissement : thermalisation

---

- Hypothèses pendant le ralentissement ( $E_n \gg eV$ ):
  - Noyaux cibles **immobiles**
  - Atomes du modérateur **sans liaisons** (chimique, cristal)
- **Hypothèses invalides** lorsque  $E_n \approx eV$  :
  - Énergie du même ordre que les liaisons **moléculaires ou cristallines** ;
  - Neutrons **peuvent gagner de l'énergie** lors d'un choc (*up-scattering*)
  - **Mécanique classique insuffisante** : propriétés *quantiques* du neutron et de la matière, structures moléculaires, cristal...
  - Agitation thermique selon les degrés de liberté des molécules... (modes rotation, vibration...)



# Plan

---

- Introduction
- Thermalisation par un gaz parfait mono-atomique
- Thermalisation par des modérateurs réels
- Spectre de Maxwell
- Spectres des neutrons thermiques
- Facteur de reproduction  $\eta$  (thermique)
- Facteur d'utilisation thermique  $f$
- Optimum de modération  $pf$



# Thermalisation par un gaz mono-atomique

---

- Situation la plus simple : pas de liaisons chimiques
- **Lois du transfert d'énergie** entre neutron et atome :
  - Choc neutron/atome élastique et isotrope dans le c.d.m.
  - atomes → distribution de Maxwell

$$\sigma(E \rightarrow E', \mu) = \frac{\sigma_b}{2kT} \sqrt{\frac{E'}{E}} \frac{1}{\sqrt{4\pi\alpha}} \exp \left[ -\frac{(\alpha + \beta)^2}{4\alpha} \right]$$

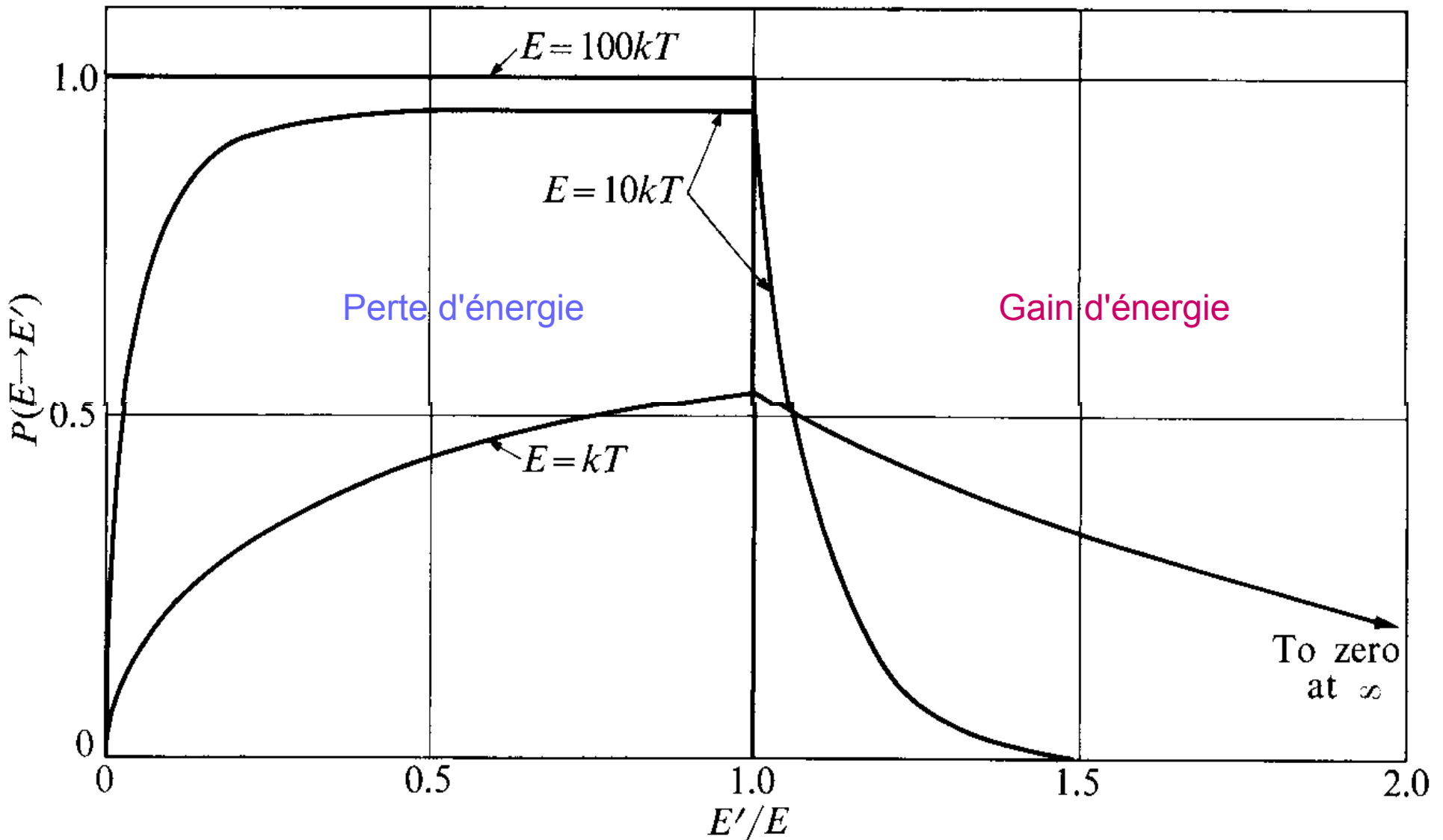
$$\alpha = \frac{E' + E - 2\mu\sqrt{EE'}}{akT} \quad a = \frac{M}{m} \quad (\text{transfert d'impulsion})$$

$$\beta = \frac{E' - E}{kT} \quad (\text{transfert d'énergie})$$

$\sigma_b$  caractéristique de l'atome

# Cas de l'hydrogène (gaz parfait mono-atomique)

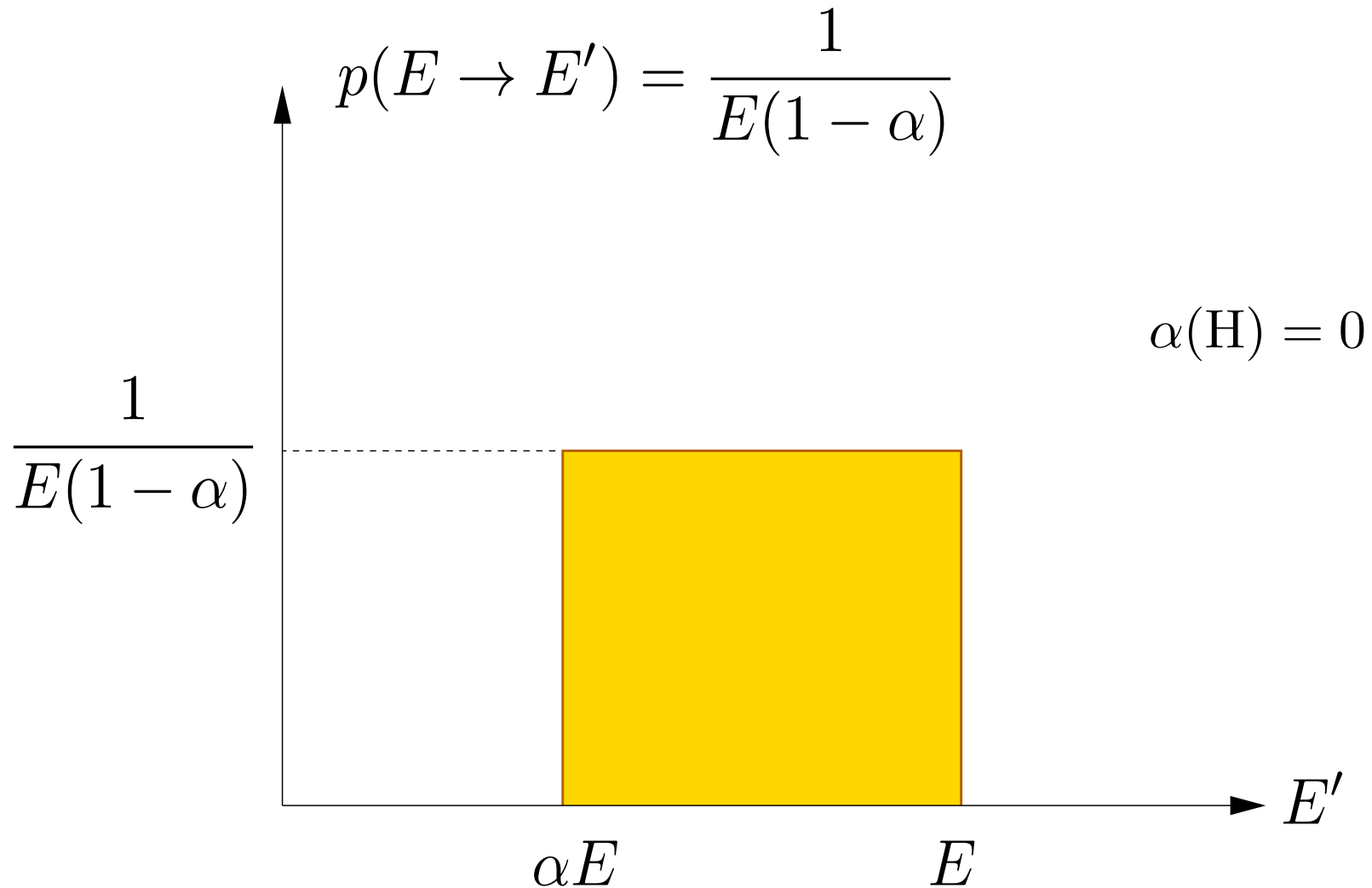
- Allure de la probabilité de transfert d'énergie pour 3 valeurs initiales d'énergie du neutron ( $100kT$ ,  $10kT$ ,  $kT$ )



# Comparaison avec le ralentissement (H)

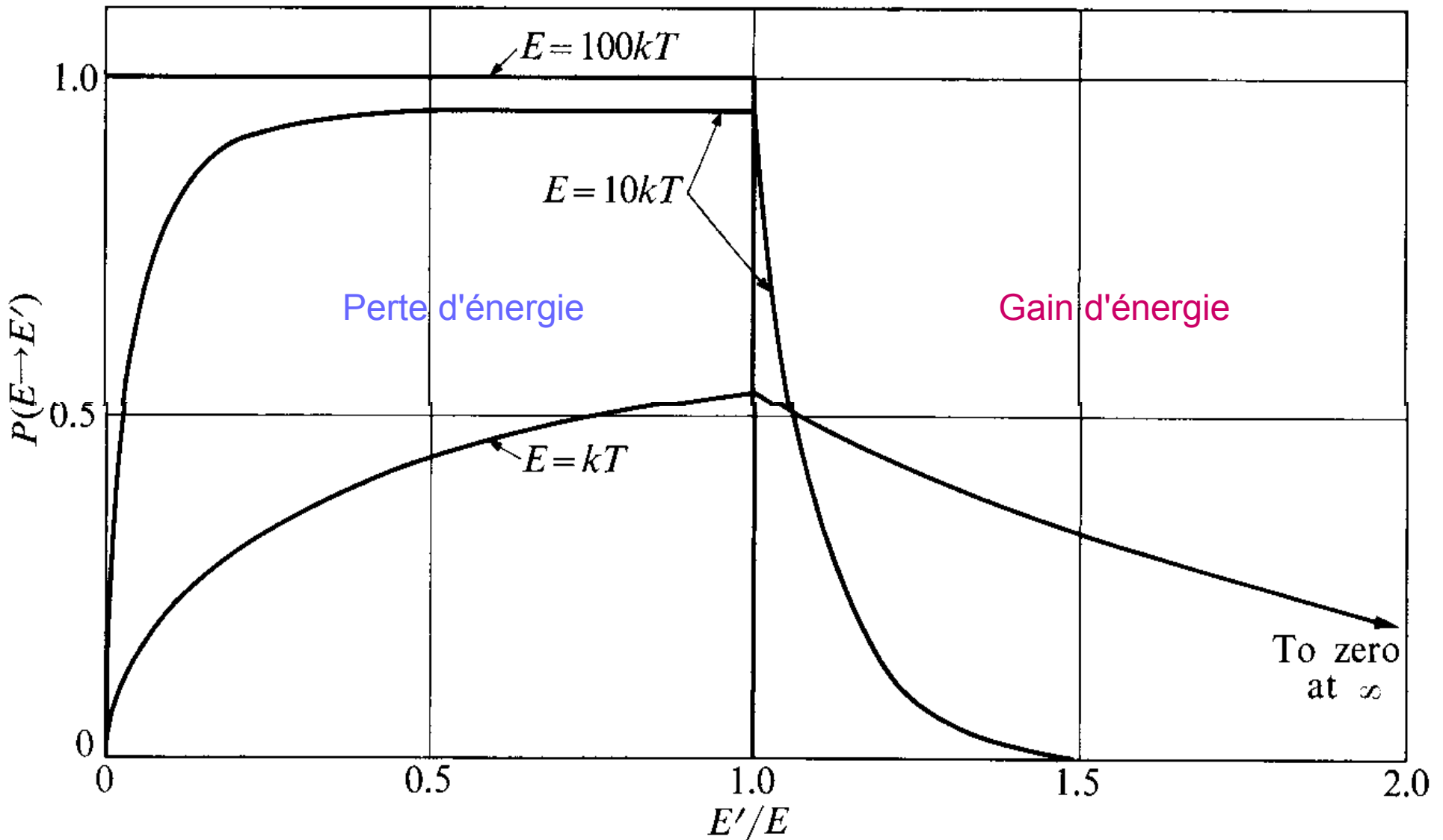
---

- Pendant la phase de ralentissement on avait :



# Cas de l'hydrogène (gaz parfait mono-atomique)

- Allure de la probabilité de transfert d'énergie pour 3 valeurs initiales d'énergie du neutron ( $100kT$ ,  $10kT$ ,  $kT$ )



# Plan

---

- Introduction
- Thermalisation par un gaz parfait mono-atomique
- Thermalisation par des modérateurs réels
- Spectre de Maxwell
- Spectres des neutrons thermiques
- Facteur de reproduction  $\eta$  (thermique)
- Facteur d'utilisation thermique  $f$
- Optimum de modération  $pf$

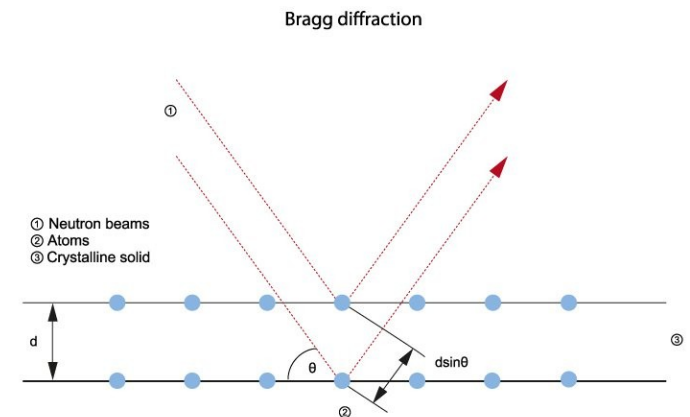
# Thermaliseurs réels (modérateurs liquides, solides)

- Diffusion sur une structure comprenant un **ensemble d'atomes**
  - Diffusion **élastique** : choc entre le neutron et la structure (cristal, molécule) infiniment lourde : énergie du neutron conservée.
  - Diffusion **inélastique** : changement de l'énergie interne de la molécule ou du cristal (gain ou perte)
  - Diffusion **cohérente** du neutron : interférence entre l'onde incidente du neutron et les ondes diffusées : cas d'un cristal (ou encore cristaux liquides)

longueur d'onde d'un neutron :  $\lambda = h/p = h/\sqrt{2Em}$

$$v \approx 2200 \text{ m/s} \quad \lambda = 0.18 \text{ nm}$$

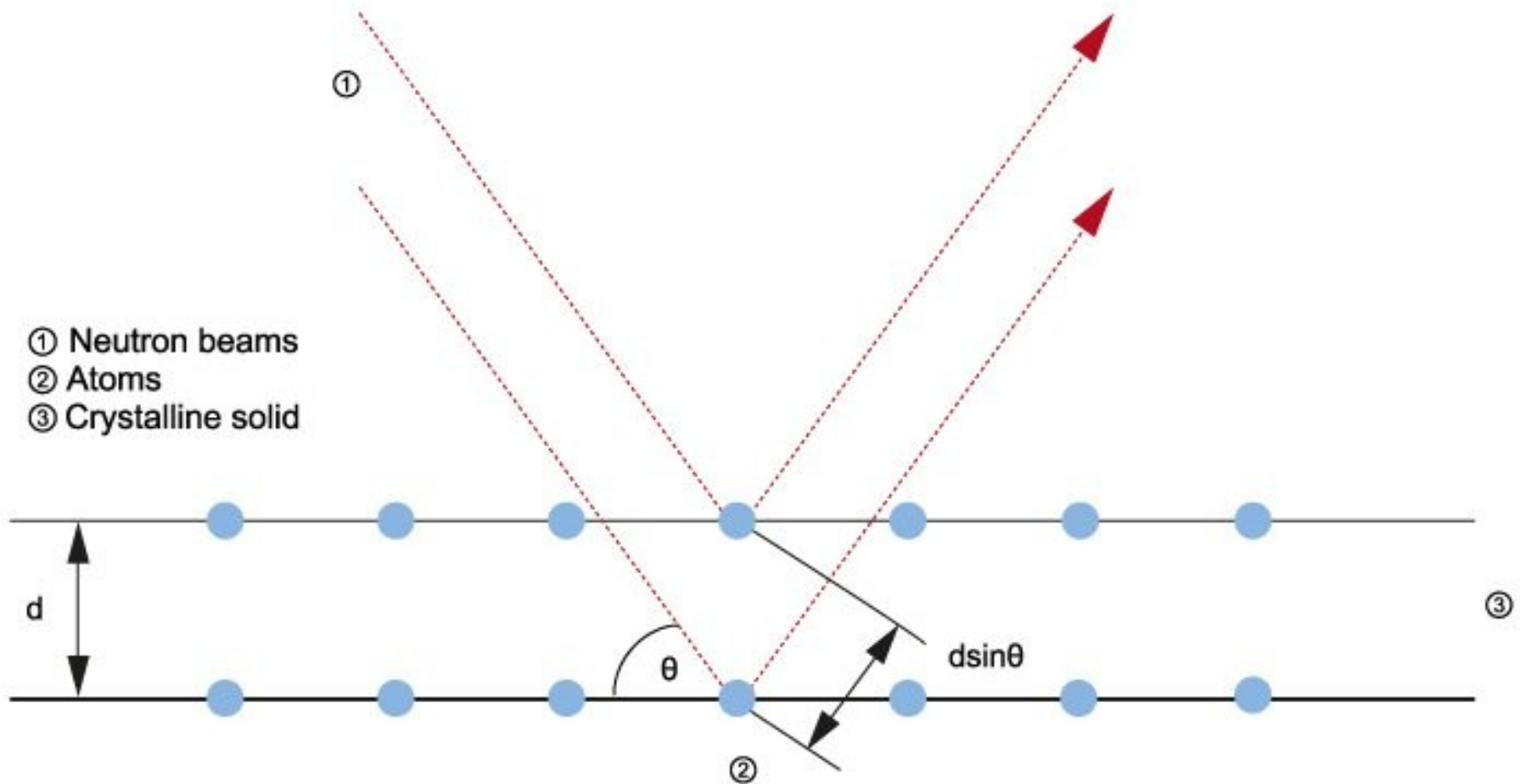
- Diffusion **incohérente**



# Diffusion cohérente

---

## Bragg diffraction



# Diffusion élastique cohérente

- Domine dans les **solides cristallins** (graphite, etc)

$$\sigma_{\text{coh}}(E \rightarrow E', \mu) = \frac{\sigma_c}{E} \sum_{i, E_i < E} f_i e^{-2W E_i} \delta(\mu - \mu_{0,i}) \delta(E - E')$$

$$\mu_{0,i} = 1 - \frac{E_i}{E}$$

caract. matériau :  $\sigma_c$

pics de Bragg :  $E_i$

coeff de Debye-Waller :  $W(T)$

structure cristal. :  $f_i$

*Même énergie  $E$*

*Directions privilégiées*

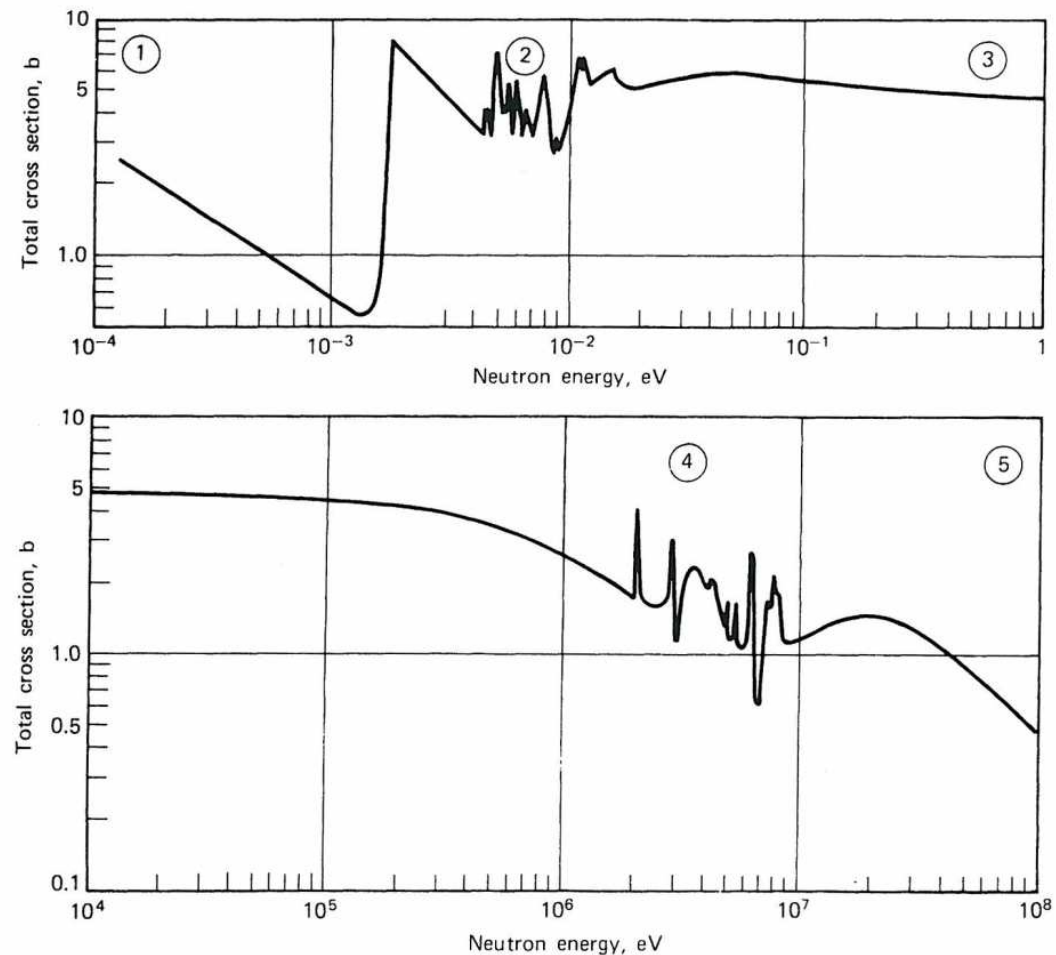


FIGURE 2-9. The total scattering cross section of  $^{12}\text{C}$ .



# Diffusion inélastique incohérente

---

- **Loi de transfert d'énergie :**

$$\sigma(E \rightarrow E', \mu) = \frac{\sigma_b}{2kT} \sqrt{\frac{E'}{E}} S(\alpha, \beta)$$

$$\alpha = \frac{E' + E - 2\mu\sqrt{EE'}}{akT} \quad a = \frac{M}{m} \quad (\text{transfert d'impulsion})$$

$$\beta = \frac{E' - E}{kT} \quad (\text{transfert d'énergie})$$

caract. du matériau  $\sigma_b$

- $S(\alpha, \beta)$  décrit les liaisons dans le matériau diffuseur (cf. gaz)
- Domine pour **l'eau légère**

# Diffusion élastique incohérente

---

- **Loi de transfert d'énergie :**

$$\sigma(E \rightarrow E', \mu) = \frac{\sigma_b}{2} e^{-2WE(1-\mu)} \delta(E - E')$$

$\sigma_b$  caract. du noyau

$W$  coefficient de Debye-Waller (fonction de  $T$ )

→ *même énergie*

- Domine pour l'**hydrure de zirconium** et le **polyéthylène**

# Plan

---

- Introduction
- Thermalisation par un gaz parfait mono-atomique
- Thermalisation par des modérateurs réels
- **Spectre de Maxwell**
- Spectres des neutrons thermiques
- Facteur de reproduction  $\eta$  (thermique)
- Facteur d'utilisation thermique  $f$
- Optimum de modération  $pf$

# Spectre de Maxwell

---

- Hypothèse de l'équilibre thermique du gaz parfait de neutrons
- **Spectre de Maxwell** (équilibre, sans absorption) :

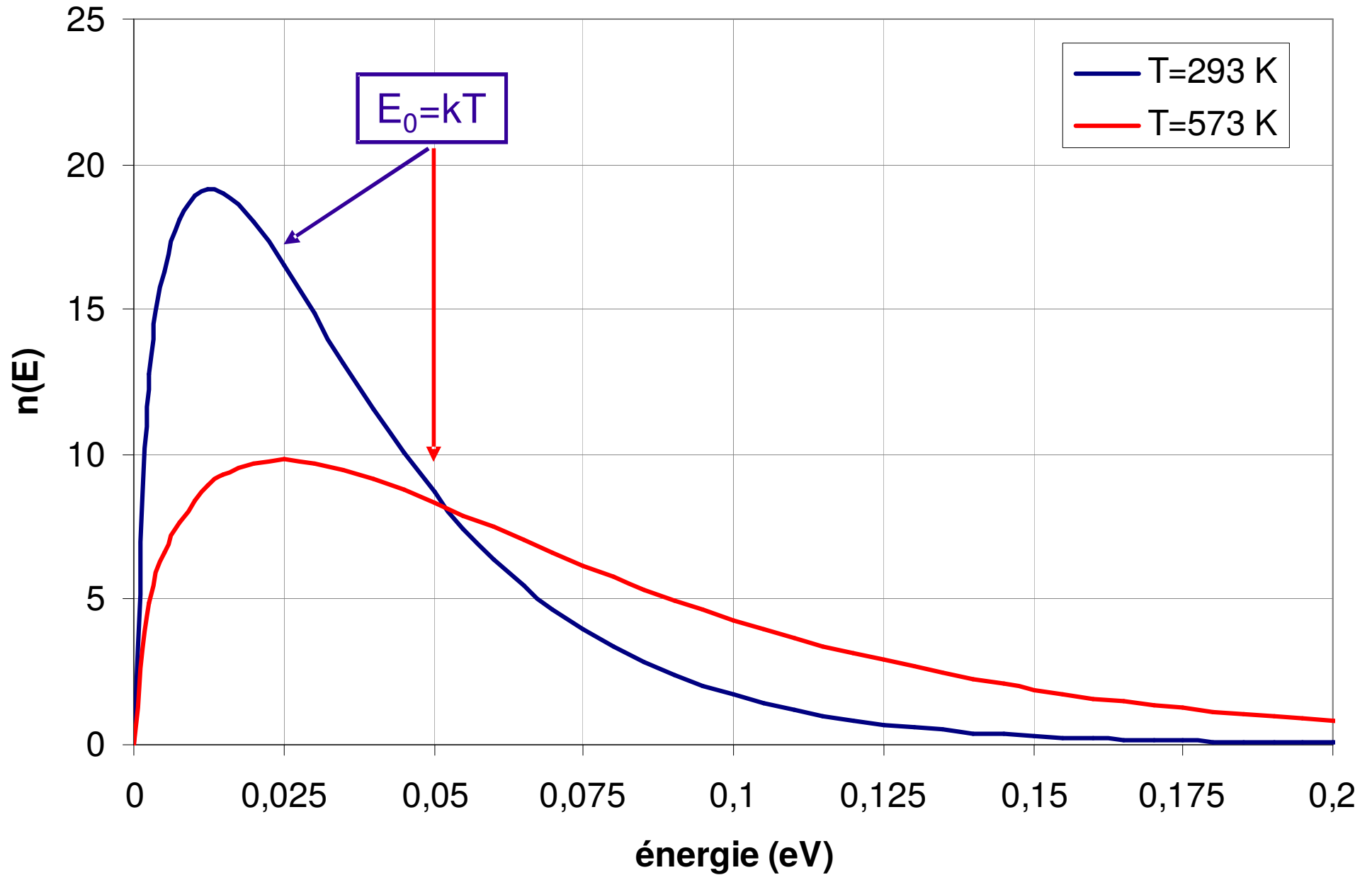
$$n(E) dE = \frac{2\pi}{(\pi kT)^{3/2}} \sqrt{E} e^{-E/kT} dE$$

$n(E)dE$  : proportion de neutrons dans l'intervalle d'énergie [  $E:E+dE$  ]

- Énergie la plus probable :  $E = \frac{kT}{2}$
- Énergie moyenne :  $\bar{E} = \frac{3kT}{2}$
- 293 K (20°C) :  $kT = 0.025 \text{ eV}$        $v \approx 2200 \text{ m/s}$
- 573 K (320°C) :  $kT = 0.050 \text{ eV}$        $v \approx 3100 \text{ m/s}$

# Spectre de Maxwell

---

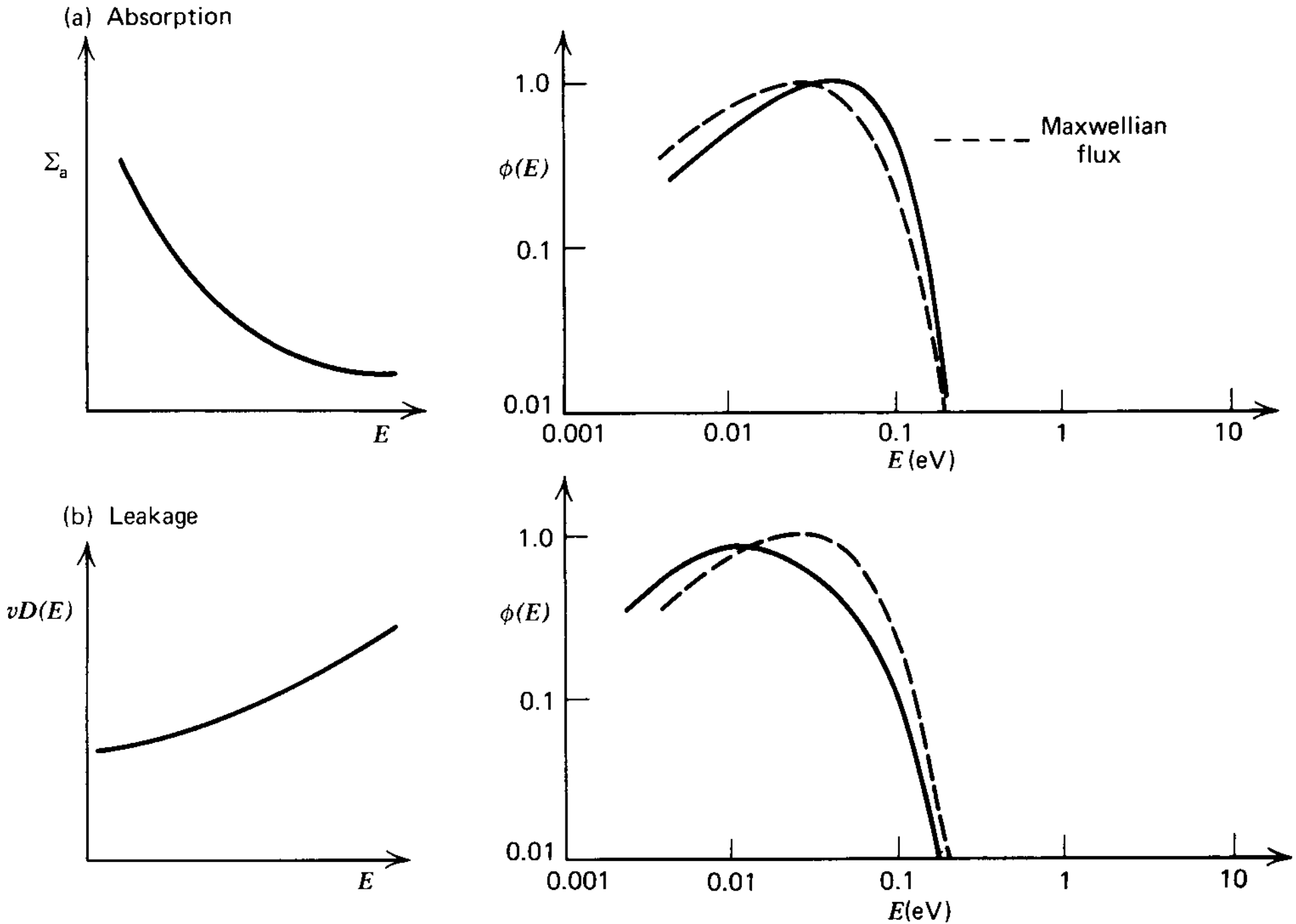


# Plan

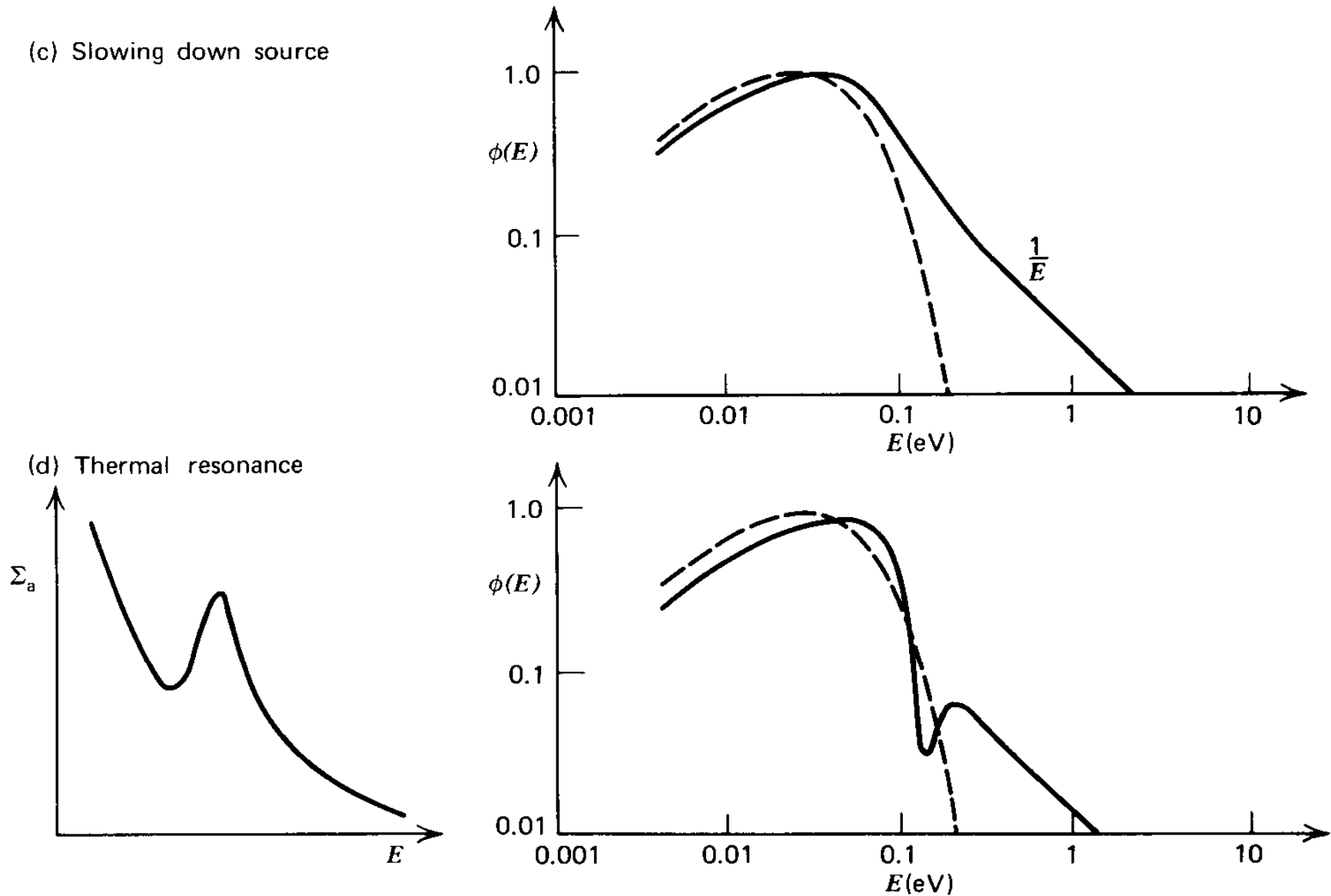
---

- Introduction
- Thermalisation par un gaz parfait mono-atomique
- Thermalisation par des modérateurs réels
- Spectre de Maxwell
- **Spectres des neutrons thermiques**
- Facteur de reproduction  $\eta$  (thermique)
- Facteur d'utilisation thermique  $f$
- Optimum de modération  $pf$

# Spectre réel : équilibre jamais atteint



# Spectre réel : équilibre jamais atteint



**FIGURE 9-1. Effects of nonequilibrium perturbations on thermal neutron flux spectra.**



# Spectre réel : UOX, MOX

- Cas du MOX (Pu)

$^{238}\text{U}$  /  $^{239}\text{Pu}$  /  $^{240}\text{Pu}$  /  $^{241}\text{Pu}$  /  $^{242}\text{Pu}$

2 % / 58 % / 23 % / 11 % / 6 %

- Teneur > en Pu

(2/3 Pu fissile)

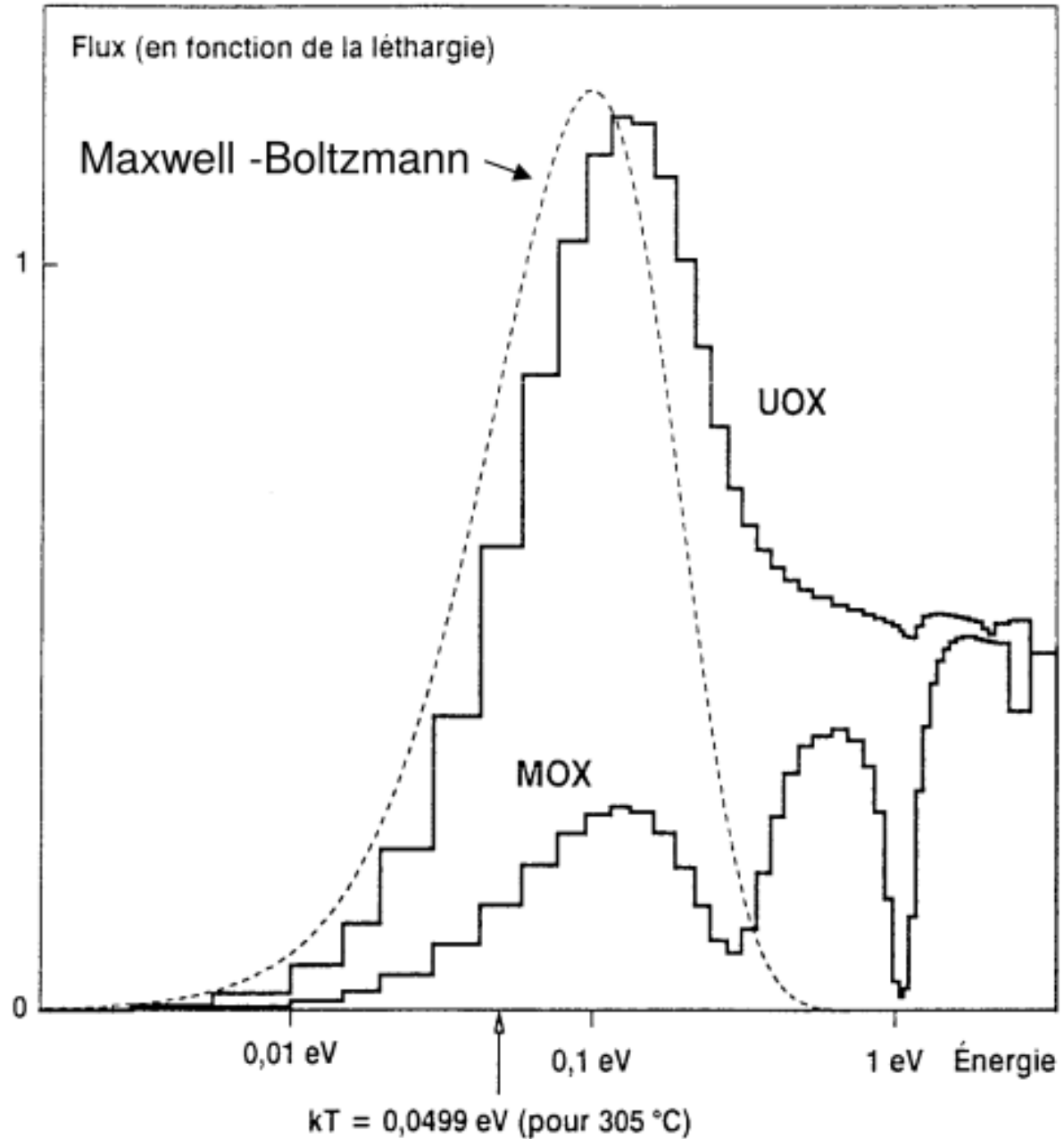
- $\Sigma_a(\text{Pu}) > \Sigma_a(^{235}\text{U})$

- Résonances Pu :

0.3 eV ( $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ )

1.06 eV ( $^{240}\text{Pu}$ )

2.5 eV ( $^{242}\text{Pu}$ )



# Plan

---

- Introduction
- Thermalisation par un gaz parfait mono-atomique
- Thermalisation par des modérateurs réels
- Spectre de Maxwell
- Spectres des neutrons thermiques
- Facteur de reproduction  $\eta$  (thermique)
- Facteur d'utilisation thermique  $f$
- Optimum de modération  $pf$

# Facteur de reproduction $\eta$ (neutrons thermiques)

---

- Facteur de multiplication/reproduction du combustible :

$$\eta = \frac{\text{neutrons rapides produits par fission par des neutrons thermiques}}{\text{neutrons thermiques absorbés dans le combustible}}$$

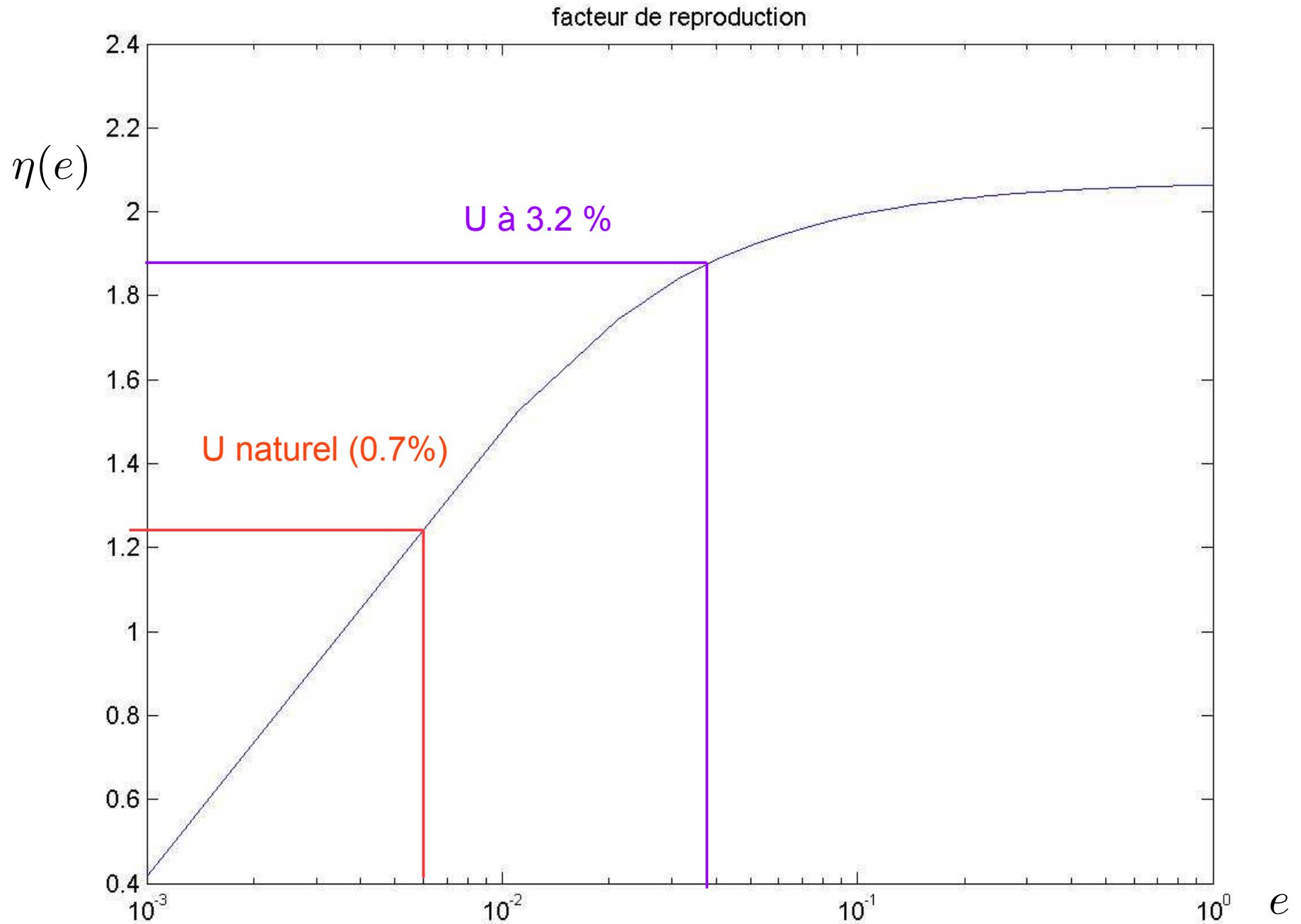
$$\eta = \frac{\bar{\nu} V_c \phi_c \Sigma_{f,c}}{V_c \phi_c \Sigma_{a,c}} = \frac{\bar{\nu} \Sigma_{f,c}}{\Sigma_{a,c}}$$

- Cas pour un enrichissement  $e$  en  $^{235}\text{U}$  :

$$\eta = \frac{\bar{\nu} \times e \times \sigma_{f,5}}{e \times \sigma_{a,5} + (1 - e) \times \sigma_{a,8}}$$

→ *Inutile d'enrichir au-delà de quelques %*

# Facteur de reproduction $\eta$ (neutrons thermiques)



# Plan

---

- Introduction
- Thermalisation par un gaz parfait mono-atomique
- Thermalisation par des modérateurs réels
- Spectre de Maxwell
- Spectres des neutrons thermiques
- Facteur de reproduction  $\eta$  (thermique)
- Facteur d'utilisation thermique  $f$
- Optimum de modération  $pf$

# Facteur d'utilisation thermique $f$

---

- Facteur d'utilisation des neutrons thermiques :

$$f = \frac{\text{neutrons thermiques absorbés dans le combustible}}{\text{neutrons thermiques absorbés}}$$

$$f = \frac{V_c \Sigma_{a,c} \phi_c}{V_c \Sigma_{a,c} \phi_c + V_m \Sigma_{a,m} \phi_m + \dots}$$

$$f = \frac{1}{1 + \frac{V_m}{V_c} \frac{\Sigma_{a,m} \phi_m}{\Sigma_{a,c} \phi_c} + \dots}$$

- Rapport de modération (volumique) :  $R = \frac{V_m}{V_c}$
- Facteur de « désavantage » :  $\frac{\phi_m}{\phi_c} > 1$  (si élevé, désavantage  $f$ )

UOX : 1.05      MOX : 1.10

# Facteur de désavantage

- Facteur de « désavantage » :

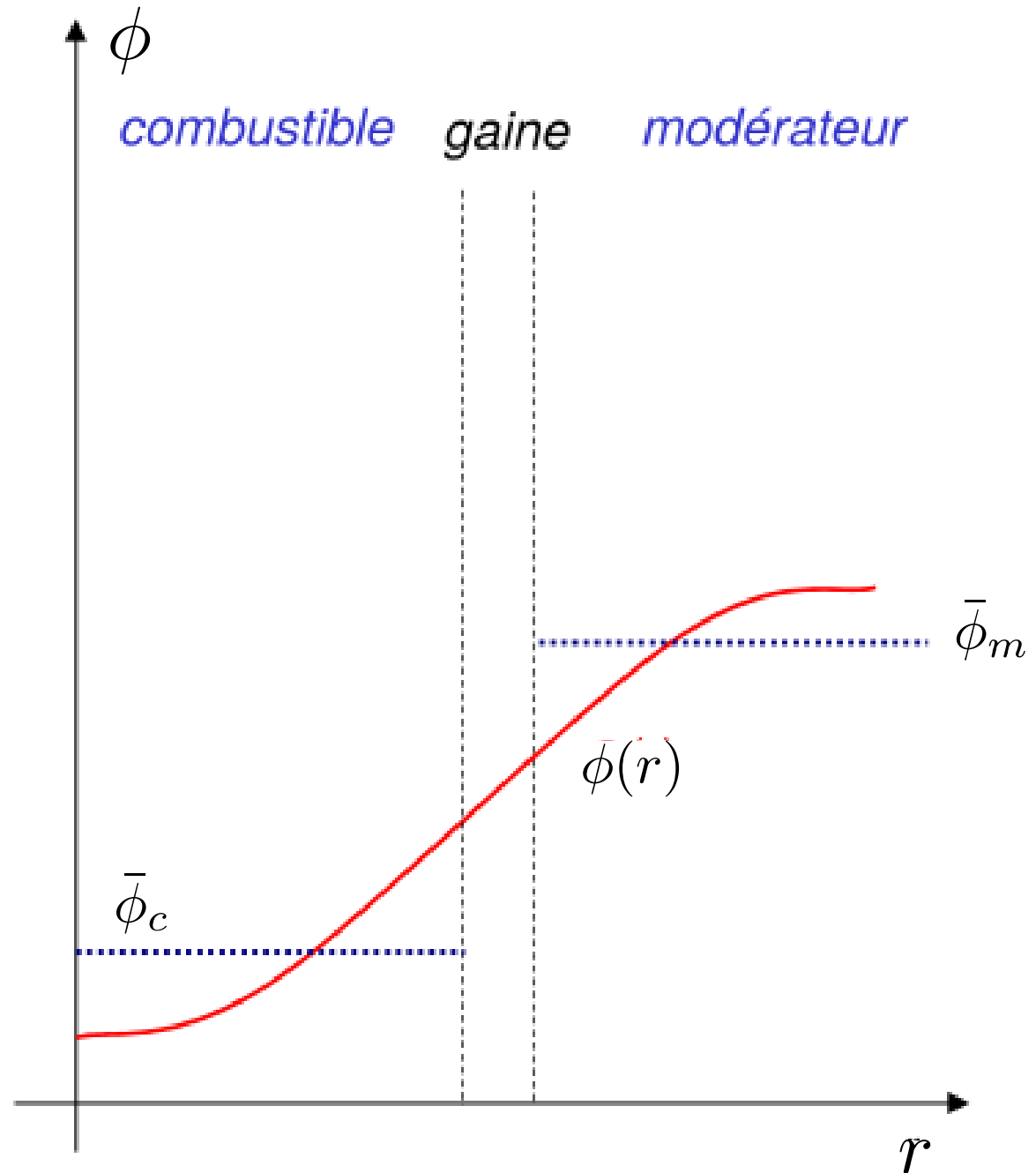
$$\frac{\phi_m}{\phi_c} > 1$$

UOX : 1.05

MOX : 1.10

homogène :  $\frac{\phi_m}{\phi_c} = 1$

$f_{\text{homogène}} > f_{\text{hétérogène}}$



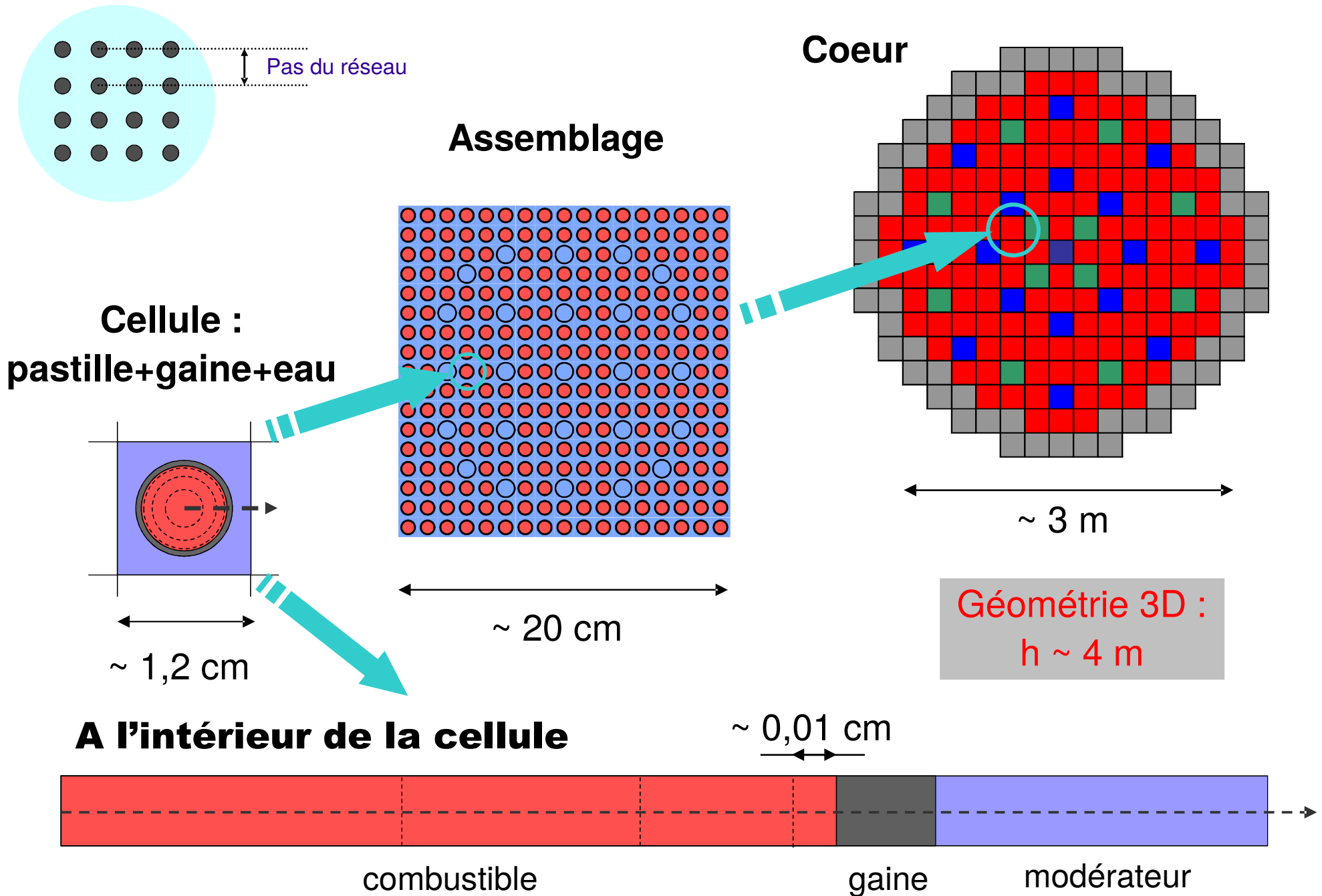
# Plan

---

- Introduction
- Thermalisation par un gaz parfait mono-atomique
- Thermalisation par des modérateurs réels
- Spectre de Maxwell
- Spectres des neutrons thermiques
- Facteur de reproduction  $\eta$  (thermique)
- Facteur d'utilisation thermique  $f$
- Optimum de modération  $pf$



# Optimum de modération : choix du pas du réseau



# Optimum de modération

- Rapport de modération :

$$R = \frac{V_m}{V_c}$$

- Facteur anti-trappes :

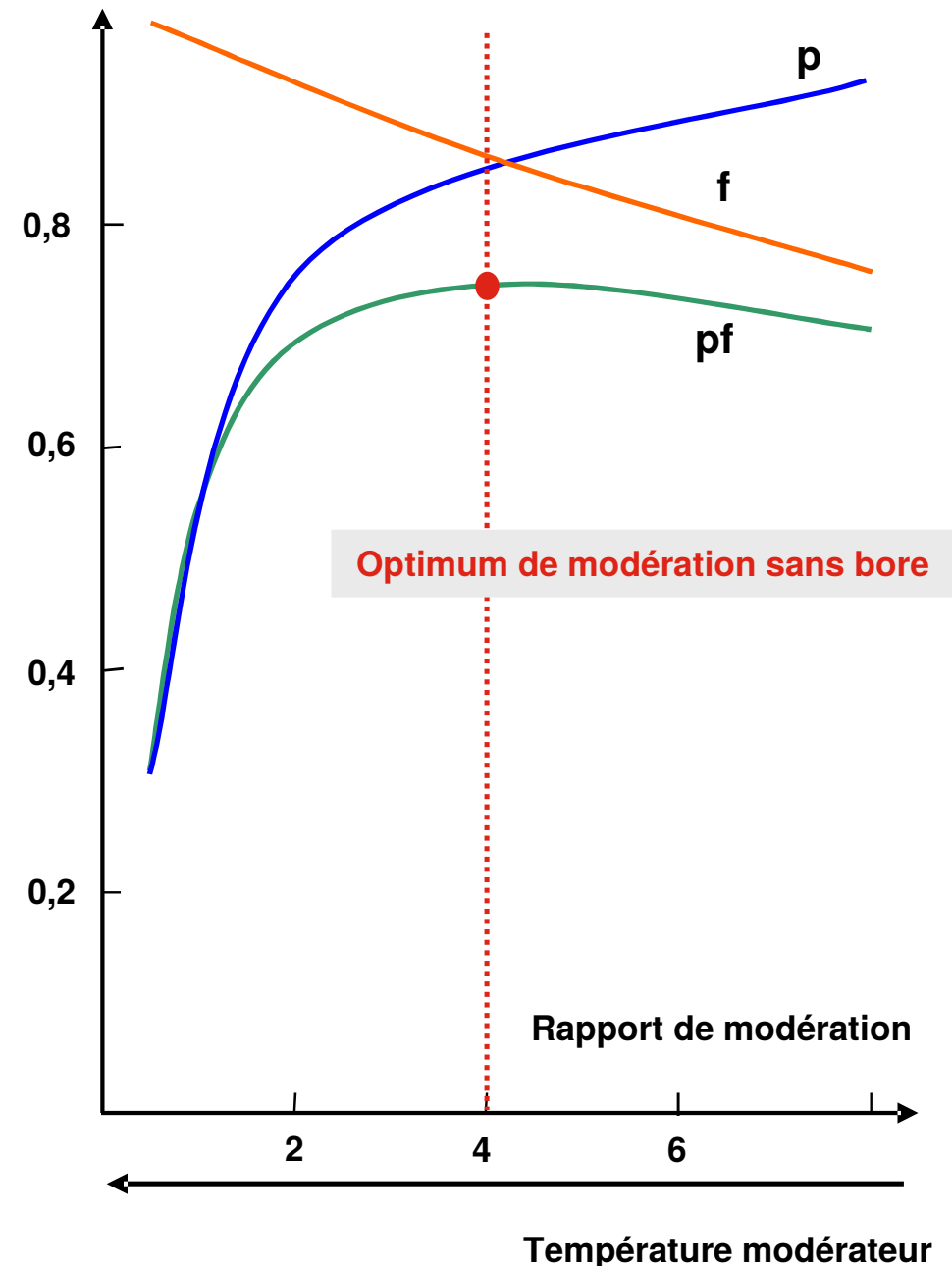
$$p = \exp \left[ - \frac{V_c N_c I_{\text{eff}}}{V_m \xi_m \Sigma_{s,m}} \right]$$

- Facteur d'utilisation thermique :

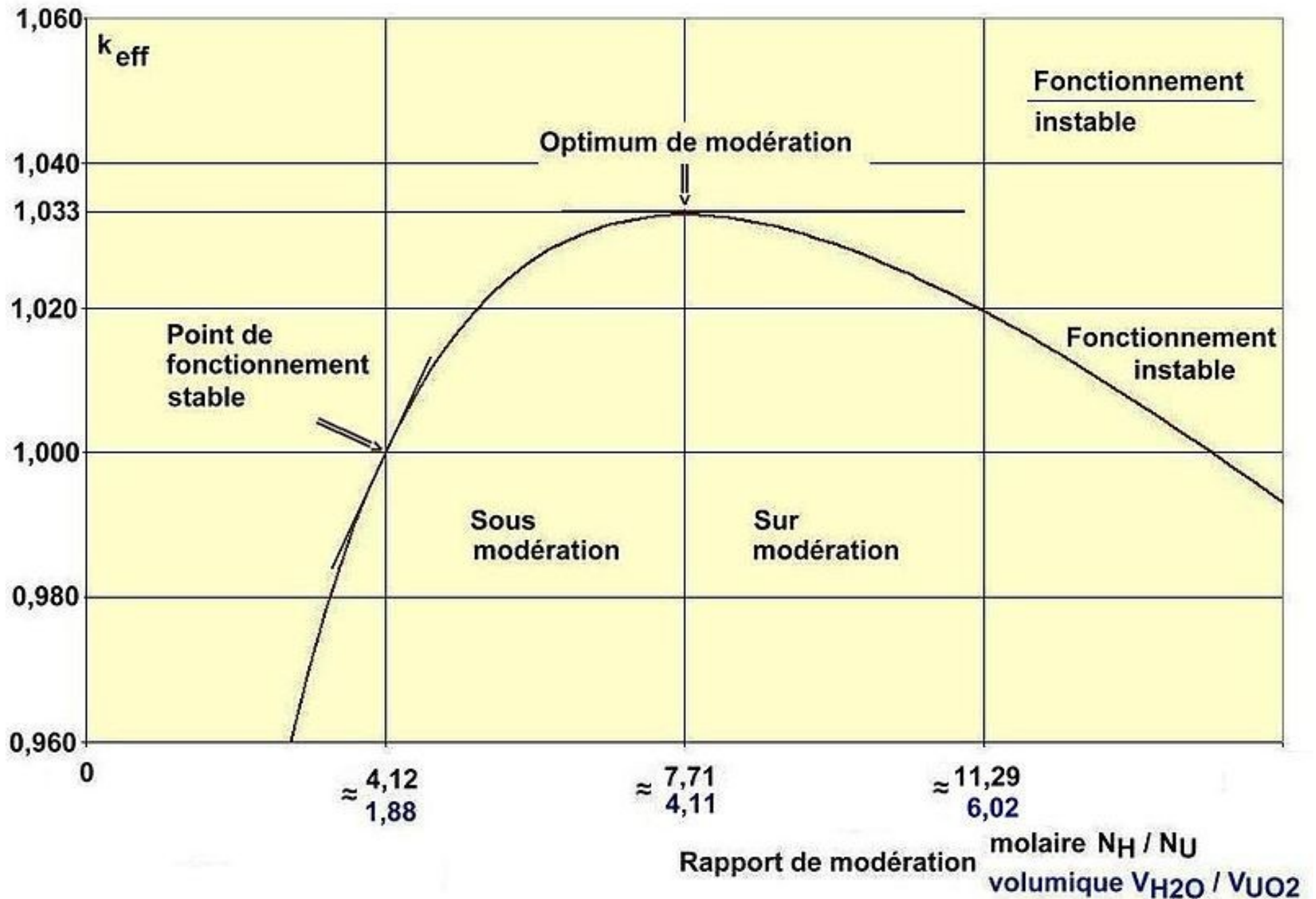
$$f = \frac{1}{1 + \frac{V_m \Sigma_{a,m} \phi_m}{V_c \Sigma_{a,c} \phi_c} + \dots}$$

- Optimum du produit  $pf$  :

→ Choix du pas du réseau



# Optimum de modération



# Optimum de modération versus sûreté

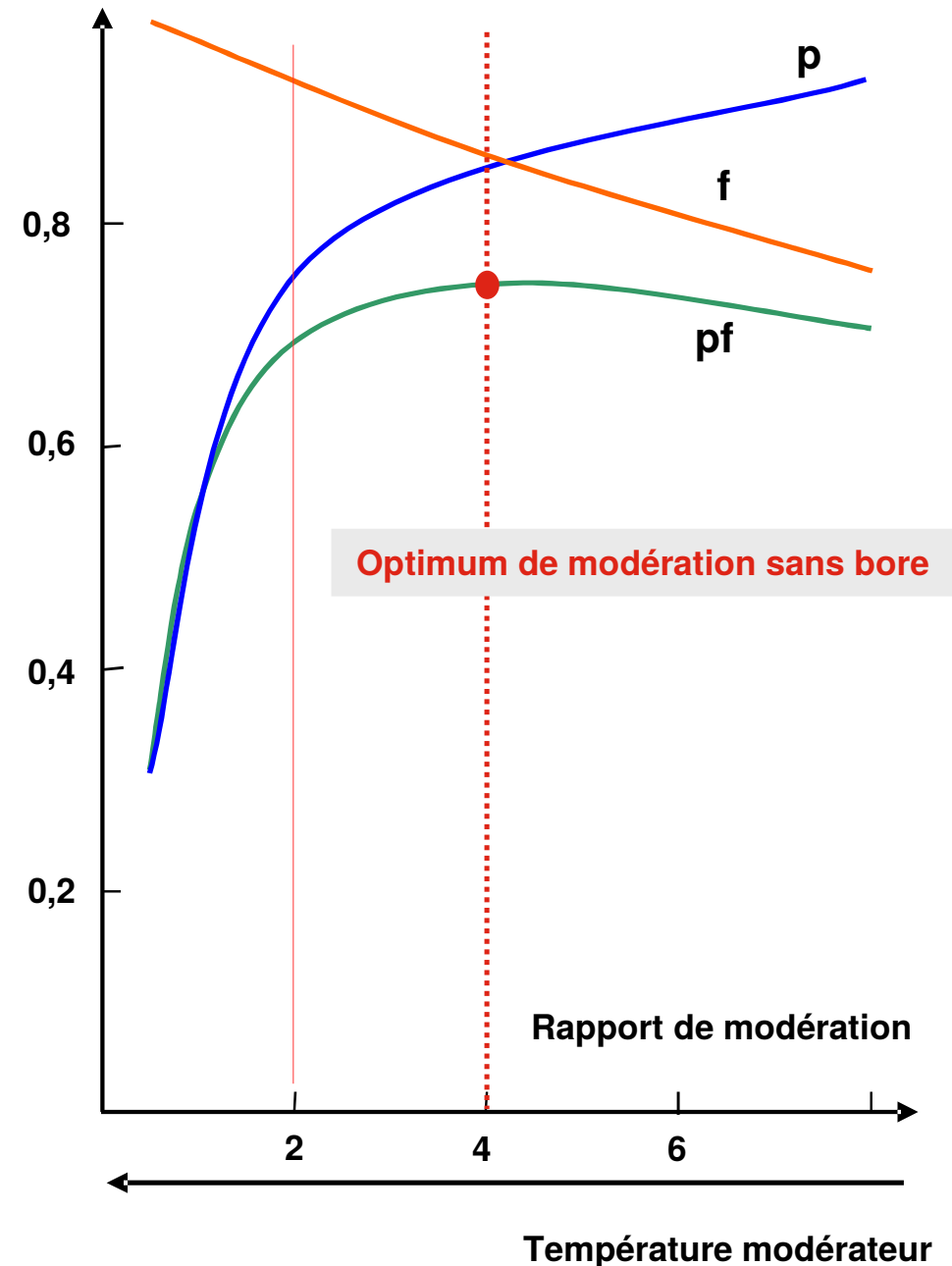
Choix des concepteurs des REP :

$$R = \frac{V_m}{V_c} \approx 2$$

- Coeur plus compact ;
- **Sûreté** : coefficient de perte d'eau (fuite, vaporisation)  $< 0$

→ **sous-modération** :

en cas de fuite/dilatation/bulles,  
diminution de  $k_\infty$  et  $k_{\text{eff}}$



# Optimum de modération (avec bore)

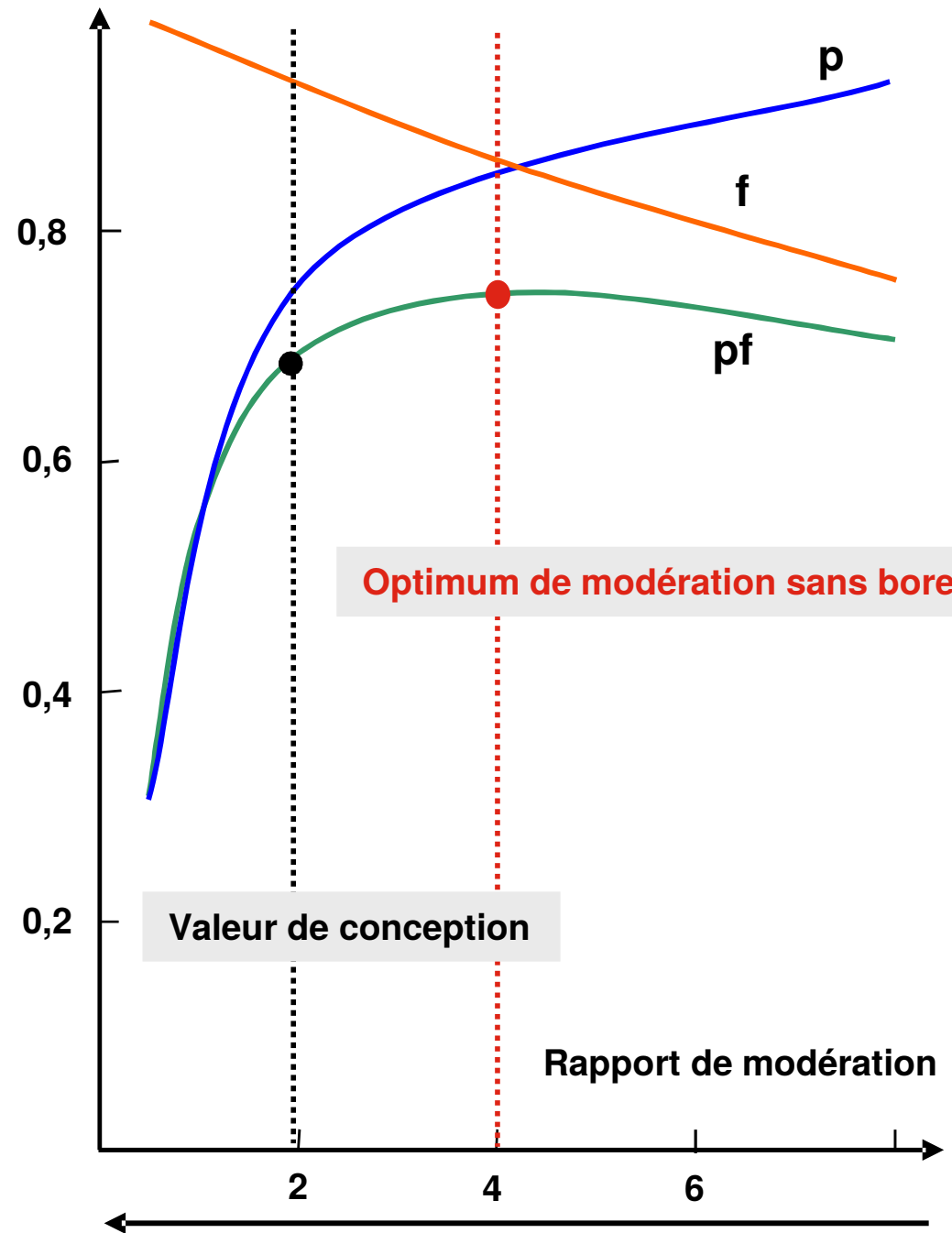
- **Acide borique  $B(OH)_3$**  en solution : abaisse la réactivité (**poison soluble**)
  - Compenser l'excès lié au combustible neuf

1000ppm de bore  $\rightarrow \Sigma_{a,m} \times 3$

- Inconvénient : diminue  $f$  : déforme la courbe  $\rightarrow$  **déplace l'optimum** et dégrade le coef. de température

- **Limite sur la concentration**

$\rightarrow$  *poisons consommables*



# Optimum de modération (MOX)

---

- Facteur  $f$  plus élevé pour le MOX  $f = \frac{1}{1 + \frac{V_m}{V_c} \frac{\Sigma_{a,m}}{\Sigma_{a,c}} \frac{\phi_m}{\phi_c} + \dots}$

(plus forte absorption des neutrons lents)

→ très sous-modéré (spectre écrasé)

- Moins de neutrons thermiques :

→ moyens de contrôle (absorbeurs, bore, etc) moins efficaces  
(efficaces surtout pour les neutrons thermiques)

→ limite la fraction de MOX utilisable à **env. 1/3 du combustible**

- **Discontinuités** de flux neutronique thermique aux interfaces

# « Discontinuité » à l'interface MOX/UOX

