

# Formule des quatre facteurs

$$K_{\text{eff}} = \frac{\text{nombre de neutrons d'une génération}}{\text{nombre de neutrons de la génération précédente}}$$

$$K_{\text{eff}} = \frac{\text{Productions}}{\text{Disparitions}}$$

Les (n) neutrons issus d'une fission peuvent :

- Avoir fait de **nouvelles fissions**
- être **absorbés par un corps non fissile**
- **fuir hors du réacteur**

$$K_{\text{eff}} = \frac{\text{Productions}}{\text{Absorptions}} \cdot \frac{\text{Absorptions}}{\text{Absorptions} + \text{Fuites}}$$

**Décomposition en deux termes :**

$$K_{\infty} = \frac{\text{Productions}}{\text{Absorptions}}$$

$$P_{\text{nf}} = \frac{\text{Absorptions}}{\text{Absorptions} + \text{Fuites}}$$

# Evènements neutroniques

Domaine rapide ( $E > 1\text{MeV}$ )

**fissions rapides** avec l'uranium 238

Domaine épithermique ( $1\text{ eV} < E < 1\text{ MeV}$ )

**résonances de capture de l'U238**

Domaine thermique ( $E < 1\text{ eV}$ )

**absorptions par le combustible** ou les **autres matériaux**

*Réacteur homogène, ou réacteur hétérogène :  
combustible et modérateur*

# En domaine rapide fissions rapides de l'U238

**$\epsilon$ , facteur de fissions rapides**

$$N_R = \epsilon N_{RTH}$$

$$\epsilon = \frac{\text{nombre de neutrons candidats au ralentissement}}{\text{nombre de neutrons issus de fission thermique}}$$

# Au cours du ralentissement captures par les résonances de l'U238

**p, facteur antitrappe**

$$N_{TH} = p N_R = p \varepsilon N_{RTH}$$

$$p = \frac{\text{nombre de neutrons thermiques}}{\text{nombre de neutrons candidats au ralentissement}}$$

## Dans le domaine thermique, captures dans le combustible

**f facteur d'utilisation thermique :**

$$N_{THC} = f N_{TH} = f p \varepsilon N_{RTH}$$

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

Dans le domaine thermique  
dans le combustible  
neutrons rapides issus des fissions thermiques

**$\eta$  facteur de fission thermique  
(ou facteur de régénération)**

$$N'_{RTH} = \eta N_{THC} = \eta f p \varepsilon N_{RTH}$$

$$\eta = \frac{\text{nombre de neutrons rapides issus de fission}}{\text{nombre de neutrons thermiques absorbés dans le combustible}}$$

# Bilan neutronique entre deux générations

$$K_{\infty} = \frac{N'_{RTH}}{N_{RTH}} = \frac{\eta p f \epsilon \cdot N_{RTH}}{N_{RTH}}$$

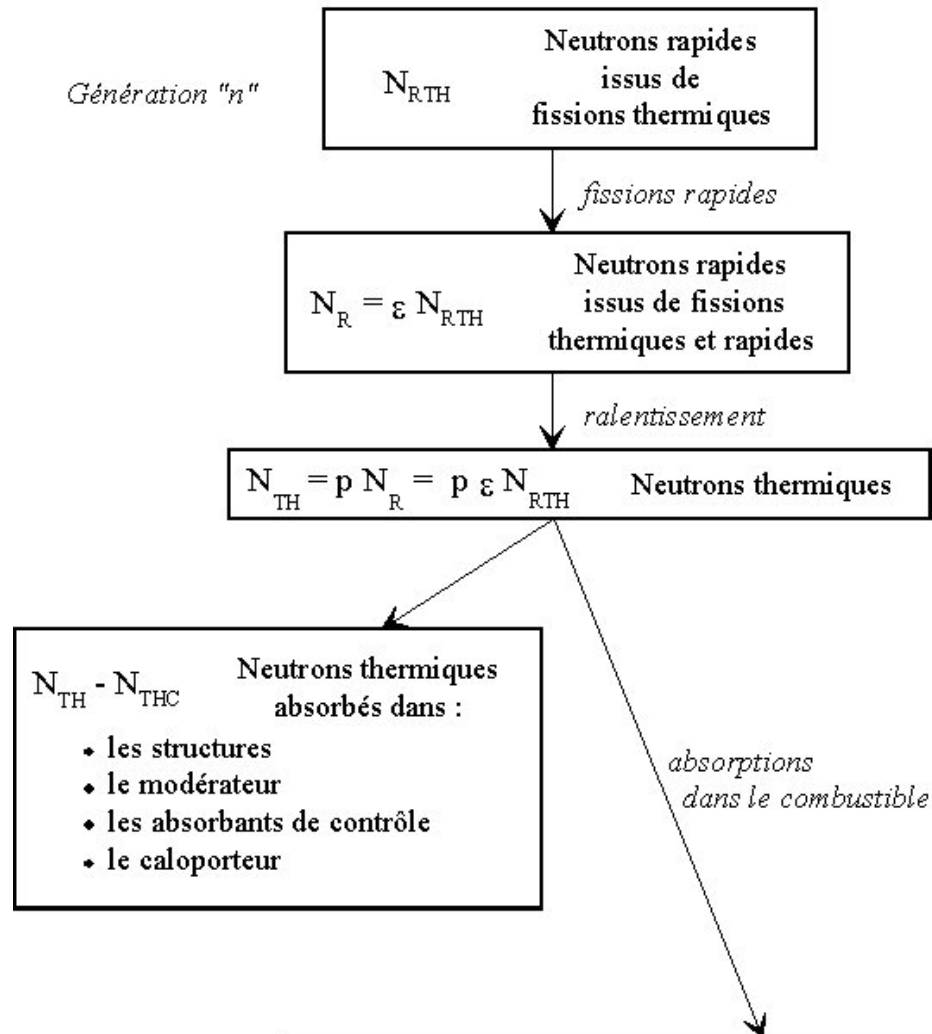
## Formule des 4 facteurs

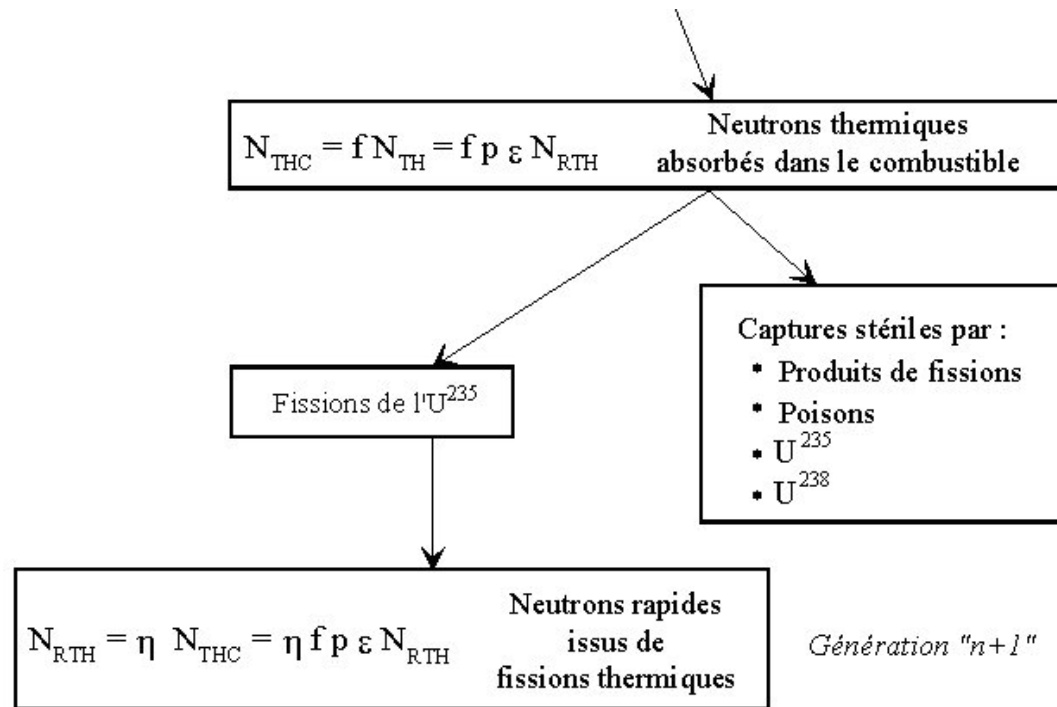
$$K_{\infty} = \epsilon p f \eta$$

$K_{\infty}$  **caractéristique neutronique** du milieu



## BILAN NEUTRONIQUE





Fin du bilan neutronique :

***nouvelle génération en milieu infini***

# Ordres de grandeur

**Facteur de fission rapide** : entre **1,03** et **1,08**.

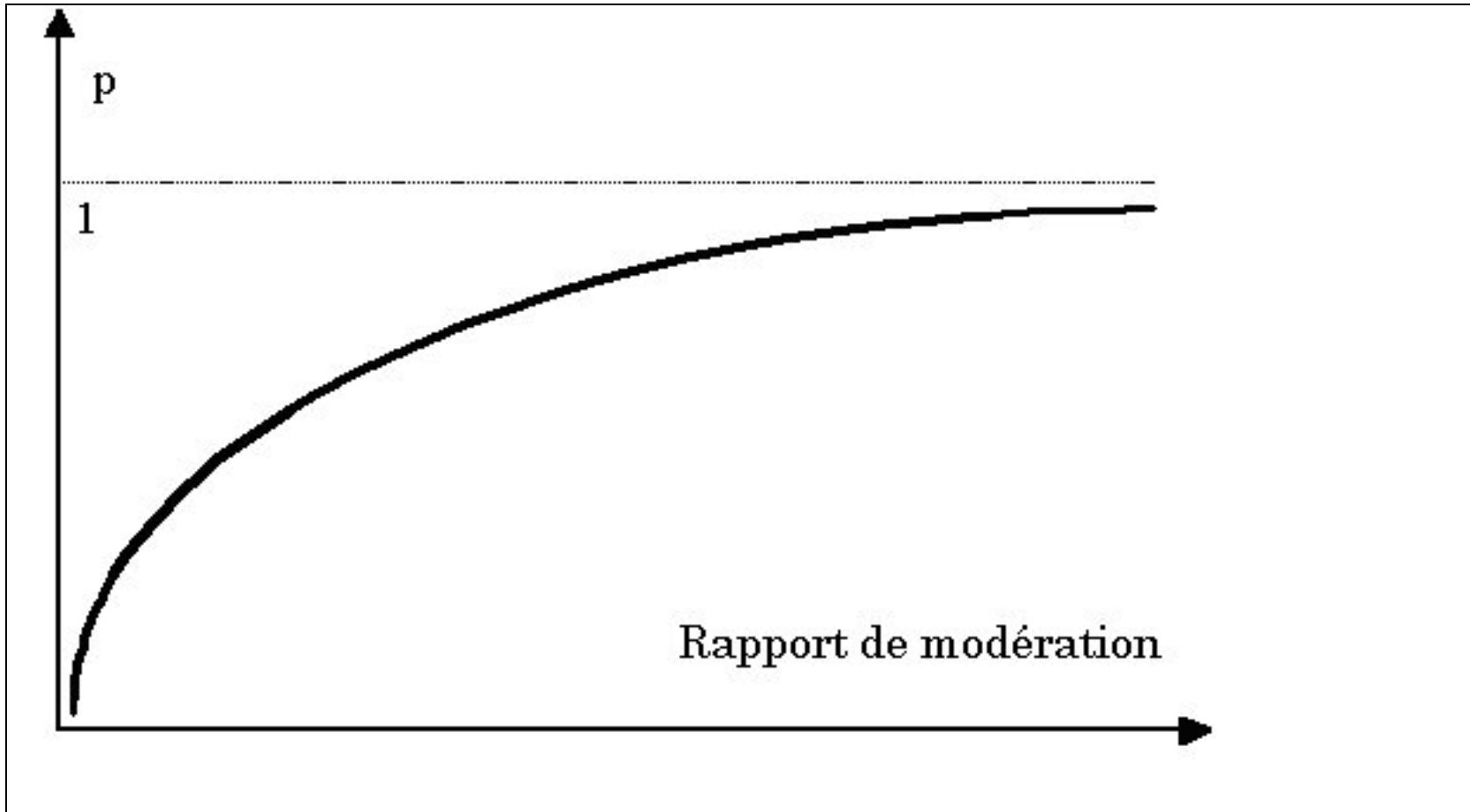
pour les REP EdF, il est de **1,05**

dépend de l'enrichissement et de la taille des éléments combustibles

**Facteur anti-trappe p** : entre **0,7** et **0,9**

dépend de plusieurs paramètres :

- **L'enrichissement en U235**
- **La qualité du modérateur**
- **La quantité de modérateur** (ou **rapport de modération**)

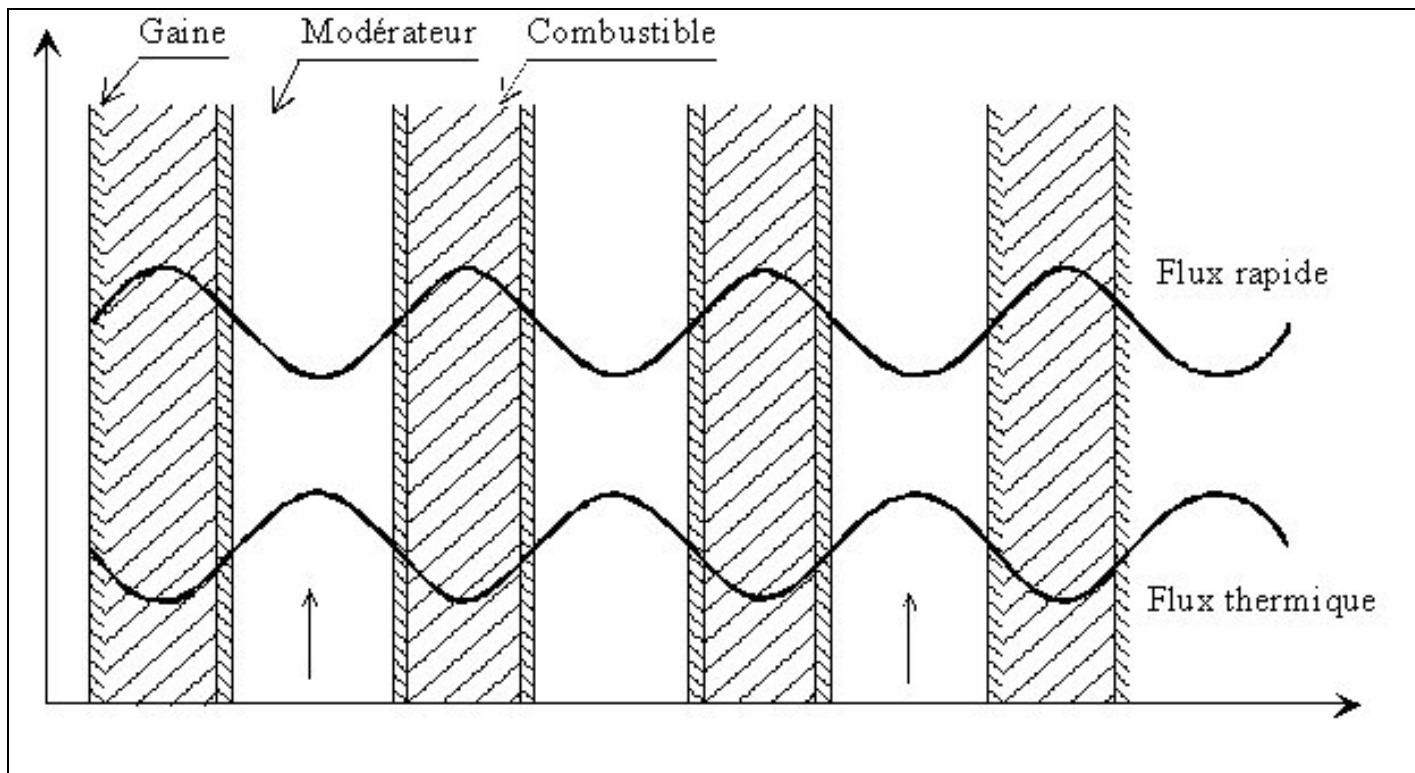


## Influence du rapport de modération sur le facteur anti-trappe

# Facteur d'utilisation thermique f

**Le facteur (f) est un facteur pilotable par les opérateurs**

**Répartition du flux neutronique thermique (cas hétérogène)**



## Facteur d'utilisation thermique f pour un cœur hétérogène

nombre de neutrons absorbés dans le combustible

$$N_5 \sigma_{a5} \Phi_{\text{comb}} V_{\text{comb}} + N_8 \sigma_{a8} \Phi_{\text{comb}} V_{\text{comb}}$$

nombre de neutrons absorbés dans le coeur

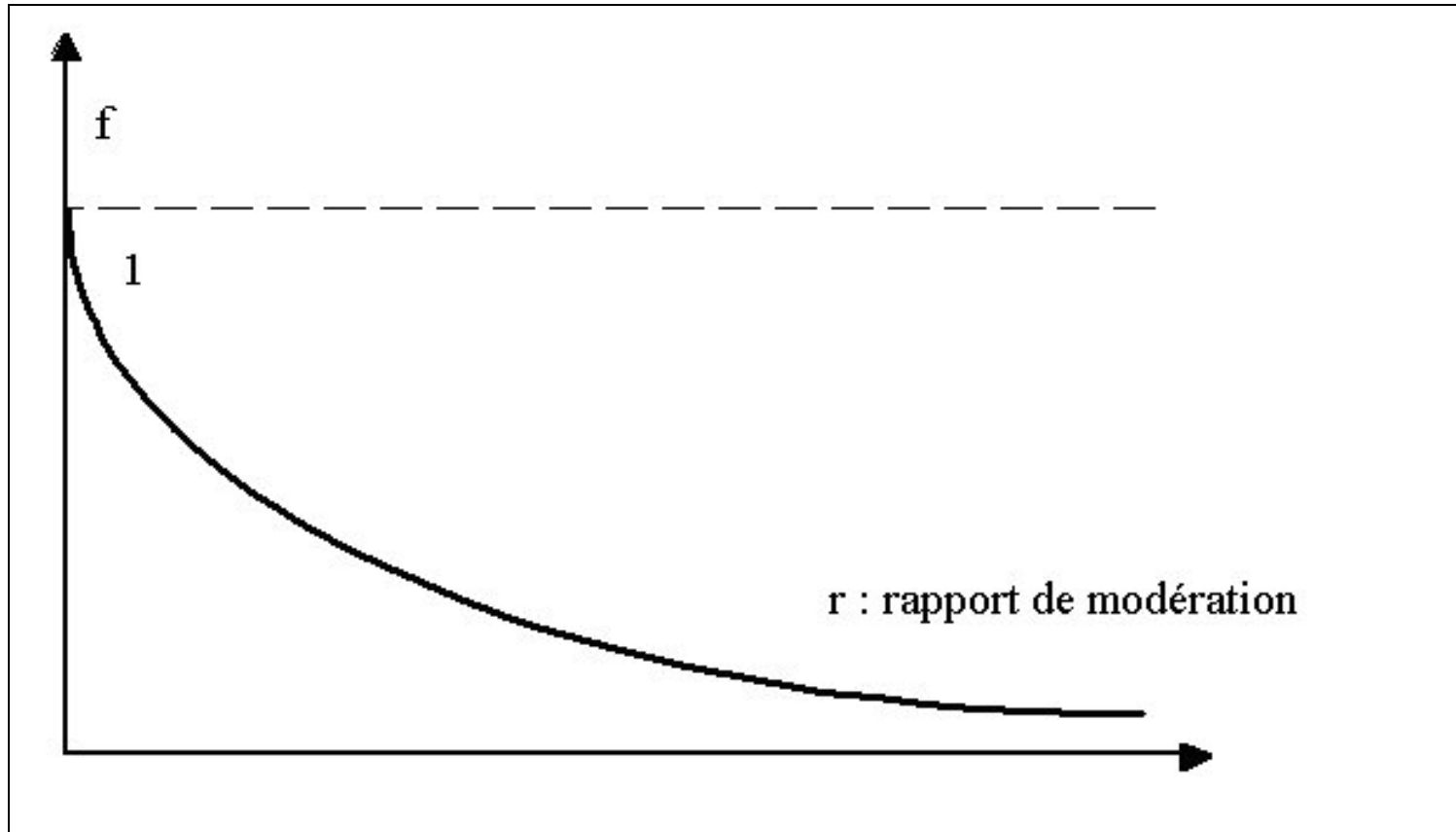
$$N_5 \sigma_{a5} \Phi_{\text{comb}} V_{\text{comb}} + N_8 \sigma_{a8} \Phi_{\text{comb}} V_{\text{comb}} + N_{\text{mod}} \sigma_{a,\text{mod}} \Phi_{\text{mod}} V_{\text{mod}}$$

$$f = \frac{N_5 \sigma_{a5} \Phi_{\text{comb}} V_{\text{comb}} + N_8 \sigma_{a8} \Phi_{\text{comb}} V_{\text{comb}}}{N_5 \sigma_{a5} \Phi_{\text{comb}} V_{\text{comb}} + N_8 \sigma_{a8} \Phi_{\text{comb}} V_{\text{comb}} + N_{\text{mod}} \sigma_{a,\text{mod}} \Phi_{\text{mod}} V_{\text{mod}}}$$

$$f = \frac{1}{1 + \frac{\sum_{am} \cdot \Phi_m \cdot V_m}{\sum_{au} \cdot \Phi_u \cdot V_u}}$$

$$f = \frac{1}{1 + \frac{N_m \cdot \sigma_{a,m} \cdot V_m \cdot \Phi_m}{N_u \cdot \sigma_{a,u} \cdot V_u \cdot \Phi_u}} = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_{a,m}}{\sigma_{a,u}} \cdot r \cdot \zeta}$$

**Apparition du rapport de modération  
et du facteur de désavantage**



## Influence du rapport de modération sur le facteur d'utilisation thermique (f)



## Facteur de désavantage ( $\eta$ )

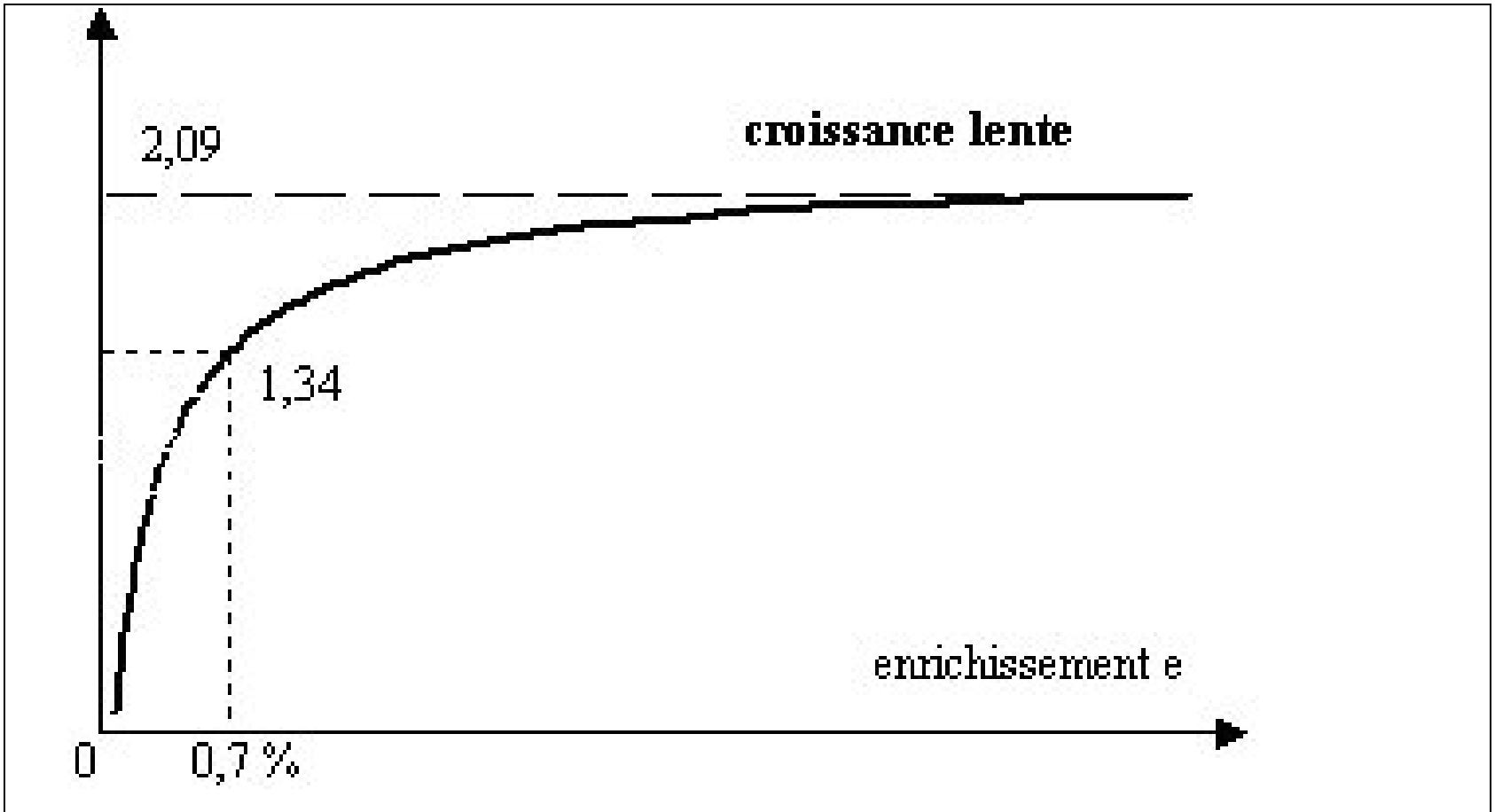
$$\eta = \frac{\nu \cdot \text{nombre de fissions thermitiques}}{\text{nombre de neutrons thermitiques absorbés dans le combustible}}$$

$$\eta = \frac{\nu_5 \cdot N_5 \cdot \sigma_{f5} + \nu_9 \cdot N_9 \cdot \sigma_{f9}}{N_5 \cdot \sigma_{a5} + N_8 \cdot \sigma_{a8} + N_9 \cdot \sigma_{a9} + N_0 \cdot \sigma_{a0} + N_p \cdot \sigma_{ap}}$$

### influence de l'enrichissement

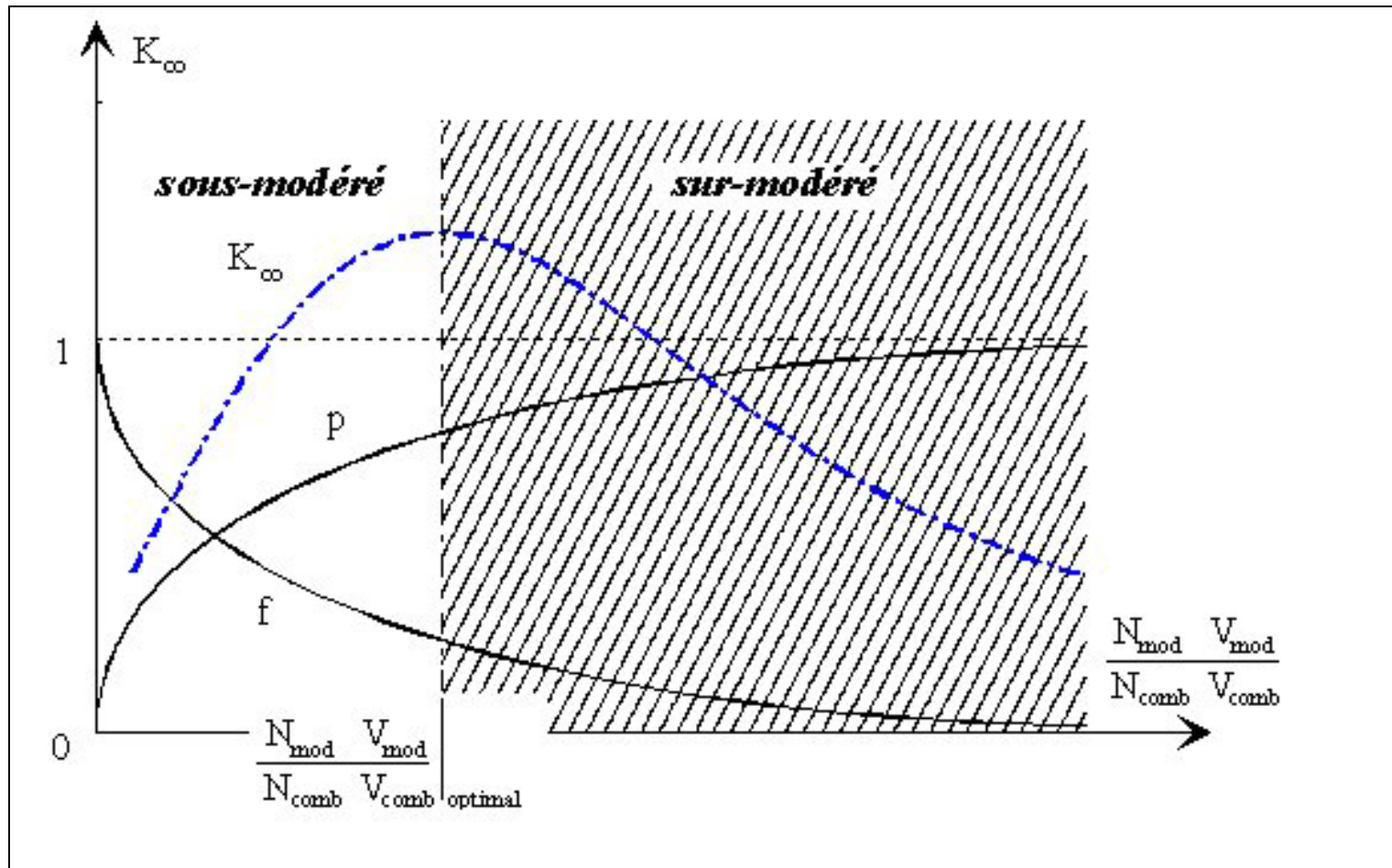
$$\eta = \frac{\nu_5 \cdot N_5 \cdot \sigma_{f5}}{N_5 \cdot \sigma_{a5} + N_8 \cdot \sigma_{a8}}$$

$$\eta = \frac{\nu_5 \cdot \sigma_{f5}}{\sigma_{a5} + \sigma_{a8} \cdot \left( \frac{1}{e} - 1 \right)}$$



$e = 0,7 \%$  (uranium naturel)       $\eta = 1,34$   
 $e = 3 \%$  (réacteurs EDF)       $\eta = 1,8$   
 $e = 100 \%$  (uranium 235 pur)       $\eta = 2,09$

# Influence du rapport de modération sur K infini



Il est obligatoire, selon les **autorités de sûreté**, que des **contre réactions efficaces** existent.

**Le cœur doit être sous-modéré** pour que, lorsque la température du cœur augmente, le facteur de multiplication diminue, provoquant ainsi une chute de température.

**Un cœur sous-modéré est plus stable en cas d'incident.**

Le même raisonnement peut se faire en raisonnant sur un appel de puissance au générateur de vapeur qui refroidit l'eau du primaire, entraînant une diminution de la température du modérateur, donc une remontée des fissions si le réacteur est sous-modéré.

**Un réacteur sous-modéré est autostable pour le pilotage.**

## Avantages et inconvénients d'un cœur homogène

- Le **facteur antitrappe p** est **plus faible** en homogène
- Le **facteur de fissions rapides** est légèrement plus faible en homogène
- Le **facteur d'utilisation thermique f** est **plus important** pour un cœur homogène

$$f = \frac{N_5 \sigma_{a_5} + N_8 \sigma_{a_8}}{N_5 \sigma_{a_5} + N_8 \sigma_{a_8} + N_{\text{mod}} \sigma_{a,\text{mod}}}$$

$$\eta = \frac{\nu_5 \cdot N_5 \sigma_{f_5} \Phi V}{N_5 \sigma_{a_5} \Phi V + N_8 \sigma_{a_8} \Phi V} = \nu_5 \left( \frac{\Sigma_f}{\Sigma_a} \right) \Big|_{\text{combustible}}$$

## Cas d'un réacteur modéré à l'eau légère et à l'uranium naturel

valeurs usuelles :  $\sigma_{f5} = 582$  barns       $\sigma_{a5} = 681$  barns  
 $\sigma_{f8} = 0$  barn       $\sigma_{a8} = 2$  barns       $\sigma_{a,mod} = 0,644$  barn

$$\xi = \frac{\Phi_{mod}}{\Phi_{comb}} = 1 \qquad \frac{N_{mod} V_{mod}}{N_{comb} V_{comb}} = 2$$
$$\varepsilon = 1,05 \quad p = 0,7 \quad \nu_5 = 2,42$$

$$f.\eta = \frac{\nu_5 \sigma_f e}{e \sigma_{a5} + (1-e) \sigma_{a8} + \frac{N_{mod} V_{mod}}{N_{comb} V_{comb}} \frac{\Phi_{mod}}{\Phi_{comb}} \sigma_{a,mod}} = 1,23$$

$$\mathbf{K_{00} = \varepsilon p f \eta = 1,05 \cdot 0,7 \cdot 1,23} \qquad \mathbf{K_{\infty} = 0,9 < 1}$$

**Un réacteur dont le combustible est de l'uranium naturel et modéré à l'eau légère est toujours sous-critique.**

# Facteur de multiplication $k_{eff}$

## Probabilité de non-fuite

$$K_{eff} = K_{\infty} P_{NF}$$

$P_{nf}$  dépend de la **géométrie du réacteur** et de la "**liberté de déplacement**", donc de la **composition du milieu**.

## Taille critique et masse critique

- le **volume** est proportionnel à la **population** neutronique,
- la **surface** extérieure est proportionnelle aux **fuites**.

# Facteur de multiplication $k_{eff}$

## Probabilité de non-fuite



*Les quatre facteurs...*



## **Expression de $P_{NF}$ pour différentes géométries**

$$P_{NF} = \frac{1}{1 + L^2 B_g^2} = \frac{1}{1 + \frac{DB_g^2}{\Sigma_a}}$$

$$L^2 = \frac{D}{\Sigma_a} \quad \text{aire de diffusion (en cm}^2\text{)}$$

$$D = \frac{1}{3\Sigma_s} \quad \text{coefficient de diffusion (en cm)}$$

$B_g^2$  laplacien géométrique dépend de la géométrie du cœur

# criticité et niveau de puissance

la valeur de  $K_{\text{eff}}$  n'a rien à voir avec la puissance.

