

## Effets de température

écarts de température entre les milieux  
répartition complexe des températures dans un réacteur  
température moyenne pour le combustible et pour le modérateur

$T_u$  : la température moyenne du combustible

$T_m$  : la température moyenne du modérateur

$$P_{neutronique} = \lambda \cdot (T_u - T_m)$$

$\lambda$  dépend des échanges thermiques et du débit primaire

**toute variation de puissance  
entraîne des variations de températures**

## Phénomènes physiques...

dilatation, agitation thermique des noyaux  
**modification des sections efficaces macroscopiques**

**donc variations de la réactivité...**

**Trois effets de températures, plus ou moins rapides**

- **combustible (effet Doppler)**
- **modérateur ou de dilatation (liquide)**
- **neutrons (effet de spectre)**

## **Baisse de la réactivité ?**

la puissance neutronique diminue et le milieu se refroidit  
ce qui vient compenser l'augmentation initiale de température

**Le réacteur est stable.**

## **Hausse de la réactivité !**

la puissance neutronique augmente  
le milieu se réchauffe

entraînant une nouvelle augmentation de la réactivité

**Le réacteur est alors instable.**

**Un impératif : assurer des contre réactions...**

## Coefficient de température (1)

*variations relatives du coefficient de multiplication effectif  
en fonction des températures*

$$K_{\text{eff}} \approx 1 \quad \rho = \frac{K_{\text{eff}} - 1}{K_{\text{eff}}} \approx K_{\text{eff}} - 1 \quad \frac{1}{K_{\text{eff}}} \cdot \frac{\partial K_{\text{eff}}}{\partial T} \approx \frac{\partial K_{\text{eff}}}{\partial T} \approx \frac{\partial \rho}{\partial T}$$

*en théorie de l'âge de Fermi (fuites thermiques et rapides)*

$$K_{\text{eff}} = K_{\infty} \cdot \frac{e^{-B_g^2 \cdot \tau}}{1 + L^2 \cdot B_g^2}$$

## Coefficient de température (2)

$$\alpha = \frac{1}{K_{\text{eff}}} \cdot \frac{\partial K_{\text{eff}}}{\partial T} = \frac{\partial \rho}{\partial T}$$

$$\alpha = \frac{1}{K_{\text{eff}}} \cdot \frac{\partial K_{\text{eff}}}{\partial T} = \frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{p} \cdot \frac{\partial p}{\partial T} + \frac{1}{f} \cdot \frac{\partial f}{\partial T} + \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial T} + \frac{1}{P_{\text{nf}}} \cdot \frac{\partial P_{\text{nf}}}{\partial T}$$

$$\frac{1}{P_{\text{nf}}} \cdot \frac{\partial P_{\text{nf}}}{\partial T} = -B_g^2 \cdot \frac{\partial \tau}{\partial T} - \frac{B_g^2}{1 + L^2 \cdot B_g^2} \cdot \frac{\partial L^2}{\partial T} - \left( \tau + \frac{L^2}{1 + L^2 \cdot B_g^2} \right) \cdot \frac{\partial B_g^2}{\partial T}$$

## 1.1. Effet de température combustible

### Phénomène physique

**sections efficaces dépendent de la température du milieu**  
**sections efficaces effectives** prennent en compte ce phénomène

influence très faible et pas modification notable sur la neutronique  
**cas particulier, car significatif : les résonances**

**l'U8 absorbe plus au cours du ralentissement  
si la température s'élève**

## Etude théorique (Breit et Wigner)

**section efficace d'une résonance  
prend en compte l'agitation des noyaux cibles**

noyaux cibles oscillent autour d'une position d'équilibre  
*agitation thermique*      *spectre de Maxwell*

**déformation non négligeable** des courbes de sections efficaces

**plus de captures épithermiques par l'U 238  
facteur antitrappe plus faible**

**Un combustible (à base d'uranium) chaud  
sera moins réactif : effet Doppler**

*élargissement des résonances* pour tous les noyaux résonnants

**noyaux fissiles**, uranium 235, plutonium 239  
résonances de capture et de fission : **compensation**

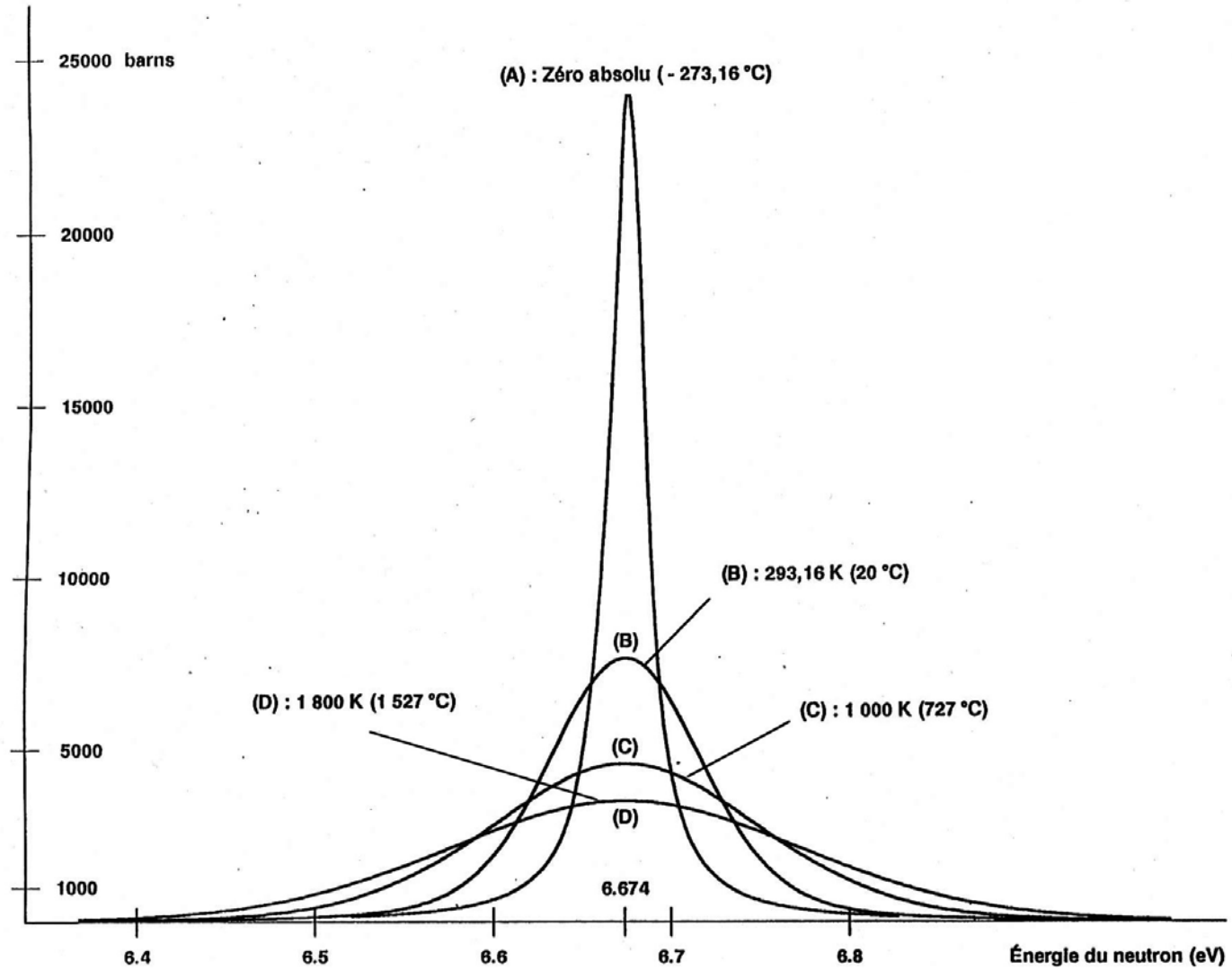
pour les **noyaux fertiles**, uranium 238, plutonium 240,  
la perte de réactivité devient prépondérante.

**effet de température combustible lié à l'U 8**

**Coefficient toujours négatif**

*l'aire sous la courbe reste constante*





Uranium 238 : section efficace de capture élargie par effet Doppler

## Coefficient de température du combustible

*uniquement facteur antitrappe*

$$\alpha_u = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial T_u}$$

*ou coefficient **Doppler***

*pour un réacteur hétérogène*

$$\rho(E) = \exp \left[ - \frac{N_u \cdot V_u}{\xi \cdot \Sigma_{sm} \cdot V_m} \cdot I_{\text{eff}}^{\text{het}}(E) \right]$$

intégrale de résonance effective augmente avec la température

élargissement des résonances d'absorption

**Le facteur antitrappe diminue  
donc baisse de la réactivité**

**de - 2 à -3 pcm / °C dans les réacteurs à neutrons thermiques**  
**de - 1 à -2 pcm / °C dans les réacteurs à neutrons rapides**  
**effet toujours stabilisant**

### Effet immédiat

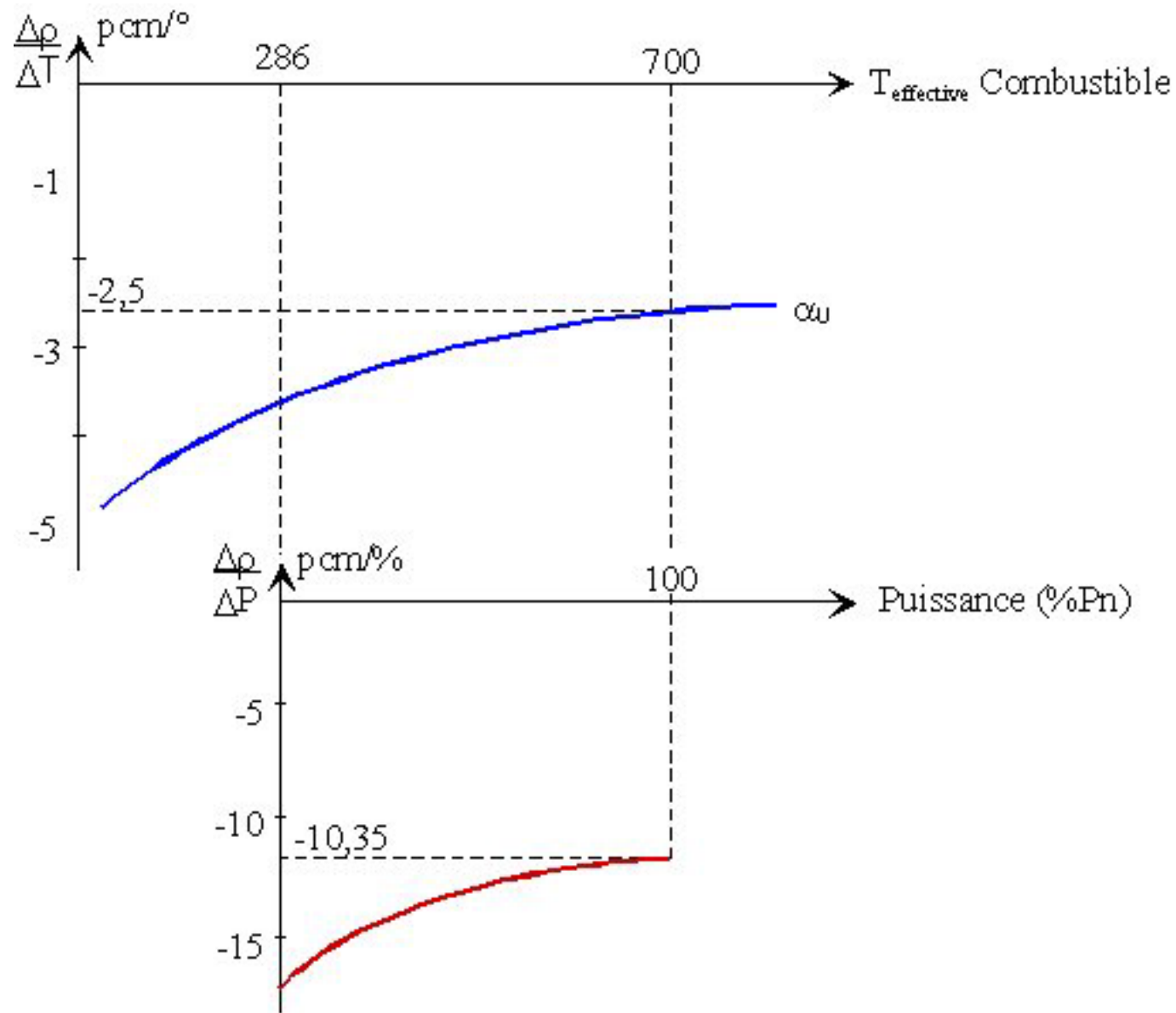
Calcul complexe : gradients de température taux de combustion  
**température effective du combustible (calculs)**

### **Effet de puissance**

**baisse de réactivité = "effet Doppler"**  
**ordre de grandeur d'environ 500 à 1000 pcm**

coeur oxyde, la réactivité diminue de 1 à 2 pcm / °C

$\alpha_u$  diminue en valeur absolue quand  $T_u$  augmente  
(*tassement des résonances*)



## 1.2. Effet de température du modérateur

effet de **température** modérateur  
ou de **dilatation** du modérateur  
concerne uniquement les réacteurs à **modérateur liquide**

les réacteurs à eau pressurisée en particulier

**la dilatation du modérateur** agit principalement sur

- le **facteur antitrappe**  $p$
- le **facteur d'utilisation thermique**  $f$
- les **fuites** *à un degré moindre*

## Variation du facteur antitrappe

variation au second ordre de l'autoprotection des résonances

si  $T_m$  augmente, la **concentration en modérateur**  $N_m$  **diminue**  
l'autoprotection est moins efficace  
ne pas confondre avec l'effet Doppler  
effet négligeable par rapport à la diffusion du modérateur

$$\frac{\partial p}{\partial T_m} = \frac{N_u \cdot V_u}{\xi \cdot V_m} \cdot \frac{1}{\Sigma_{sm}^2} \cdot \frac{\partial \Sigma_{sm}}{\partial T_m} \cdot I_{\text{eff}}^{\text{het}} \cdot \exp \left[ - \frac{N_u \cdot V_u}{\xi \cdot \Sigma_{sm} \cdot V_m} \cdot I_{\text{eff}}^{\text{het}} \right]$$

$$\frac{1}{p} \cdot \frac{\partial p}{\partial T_m} = \text{Log} \left( \frac{1}{p} \right) \cdot \frac{1}{\Sigma_{sm}} \cdot \frac{\partial \Sigma_{sm}}{\partial T_m}$$

$$\Sigma_{sm} = \frac{\mathcal{N}}{A} \cdot \sigma_{sm} \cdot \rho_m \Rightarrow \frac{\partial \Sigma_{sm}}{\partial T_m} = \frac{\mathcal{N}}{A} \cdot \sigma_{sm} \cdot \frac{\partial \rho_m}{\partial T_m}$$

$$\frac{1}{\Sigma_{sm}} \cdot \frac{\partial \Sigma_{sm}}{\partial T_m} = \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{\partial \rho_m}{\partial T_m}$$

$$\boxed{\frac{1}{p} \cdot \frac{\partial p}{\partial T_m} = \text{Log} \left( \frac{1}{p} \right) \cdot \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{\partial \rho_m}{\partial T_m}} \quad \text{liquide : } \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{\partial \rho_m}{\partial T_m} < 0$$

## effet stabilisant

la **densité du modérateur diminue**  
 les neutrons sont **moins souvent ralentis**  
**plus de chance d'être absorbés par l'U8**

## Variation du facteur d'utilisation thermique

$$f = \frac{\Sigma_{au} \cdot V_u \cdot \overline{\Phi}_u}{\Sigma_{au} \cdot V_u \cdot \overline{\Phi}_u + \Sigma_{am} \cdot V_m \cdot \overline{\Phi}_m}$$

$$\frac{1}{f} - 1 = \frac{\Sigma_{am} \cdot V_m \cdot \overline{\Phi}_m}{\Sigma_{au} \cdot V_u \cdot \overline{\Phi}_u}$$

- **facteur de désavantage**  $\frac{\overline{\Phi}_m}{\overline{\Phi}_u}$  négligeable devant la suivante
- **section efficace macroscopique d'absorption de l'eau**  $\Sigma_{am}$



$$\frac{1}{\frac{1}{f} - 1} \cdot \frac{\partial}{\partial T_m} \left( \frac{1}{f} - 1 \right) = \frac{1}{\Sigma_{am}} \cdot \frac{\partial \Sigma_{am}}{\partial T_m}$$

$$\frac{1}{f} \cdot \frac{\partial f}{\partial T_m} = - (1 - f) \cdot \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{\partial \rho_m}{\partial T_m}$$

## **effet déstabilisant**

quand la densité du modérateur diminue  
les neutrons sont moins absorbés par le modérateur

*effet amplifié avec le bore*

## Variation des fuites

$$P_{nf} = \frac{e^{-B_g^2 \cdot \tau}}{1 + B_g^2 \cdot L^2}$$

**L'âge de Fermi  $\tau$  augmente avec la température**  
sections efficaces diminuent avec la température

**L'aire de diffusion augmente**

$$L^2 = \frac{D}{\Sigma_a} = \frac{1}{3 \cdot \Sigma_a \cdot \Sigma_t}$$

**effet stabilisant**

**lorsque la densité du modérateur diminue,**  
libres parcours moyens et fuites de neutrons augmentent

## Coefficient de température modérateur

*deux effets principaux antagonistes*

- diminution du facteur antitrappe : effet **stabilisant**
- augmentation facteur utilisation thermique, **déstabilisant**

**exigence conception sous modérée**

*réacteurs autostables*

$$\alpha_m = \frac{1}{p} \cdot \frac{\partial p}{\partial T_m} + \frac{1}{f} \cdot \frac{\partial f}{\partial T_m} + \frac{1}{P_{nf}} \cdot \frac{\partial P_{nf}}{\partial T_m}$$

*dernier terme négligeable*

ordres de grandeur (REP eau pure)

$$\alpha_m \approx -45 \text{ pcm/}^\circ\text{C à } 250^\circ\text{C}$$

$$\alpha_m \approx -10 \text{ pcm/}^\circ\text{C à } 20^\circ\text{C}$$

**réacteurs REP EDF**, le coefficient varie avec la concentration en B

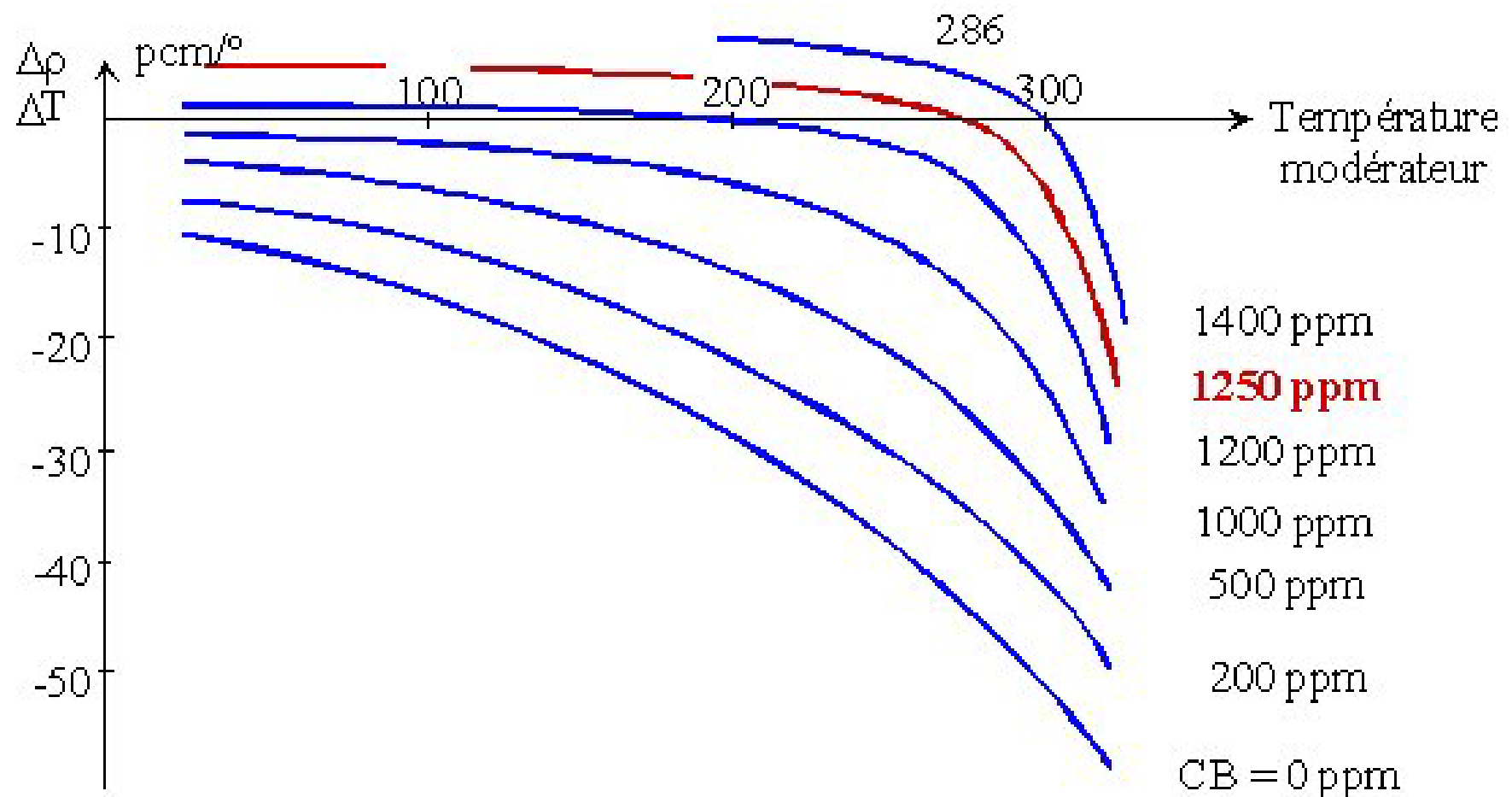
*Deux effets sont alors en compétition :*

- négatif dû à la **diminution du modérateur** (baisse de  $\rho$ )
- positif dû à la **diminution du bore** (augmentation de  $\beta$ )

---

*à partir de certaine concentration en bore  
l'effet de température du modérateur ne sera plus négatif  
limite 1200 ppm*

*effet de vide également : 50 pcm (bouillants)*



concentration bore limite pour garantir un effet contre réactif

## 1.3. Effet de spectre

Si température du modérateur augmente,  
le **spectre thermique de Maxwell "durcit"**  
sections microscopiques d'absorption plus faibles  
**pas exactement une loi en  $1/v$**

Les **sections efficaces moyennes** peuvent varier énormément  
avec la température du milieu, ainsi que les taux de réaction

phénomène particulièrement sensible avec les **noyaux lourds**  
qui présentent des **résonances à basse énergie** dans le thermique  
uranium 235 et plutonium 239

**L'effet de spectre agit sur les deux facteurs thermiques  $\eta$  et  $k$**

variations des rapports  $\frac{\bar{v} \cdot \bar{\sigma}}{v_0 \cdot \sigma_0}$  selon la vitesse des thermiques  
vitesse de référence étant  $v_0 = 2200 \text{ m/s}$ .

$$\eta = \frac{v_5 \cdot N_5 \cdot \bar{\sigma}_{f5} \cdot \bar{v}}{N_5 \cdot \bar{\sigma}_{a5} \cdot \bar{v} + N_8 \cdot \bar{\sigma}_{a8} \cdot \bar{v}}$$

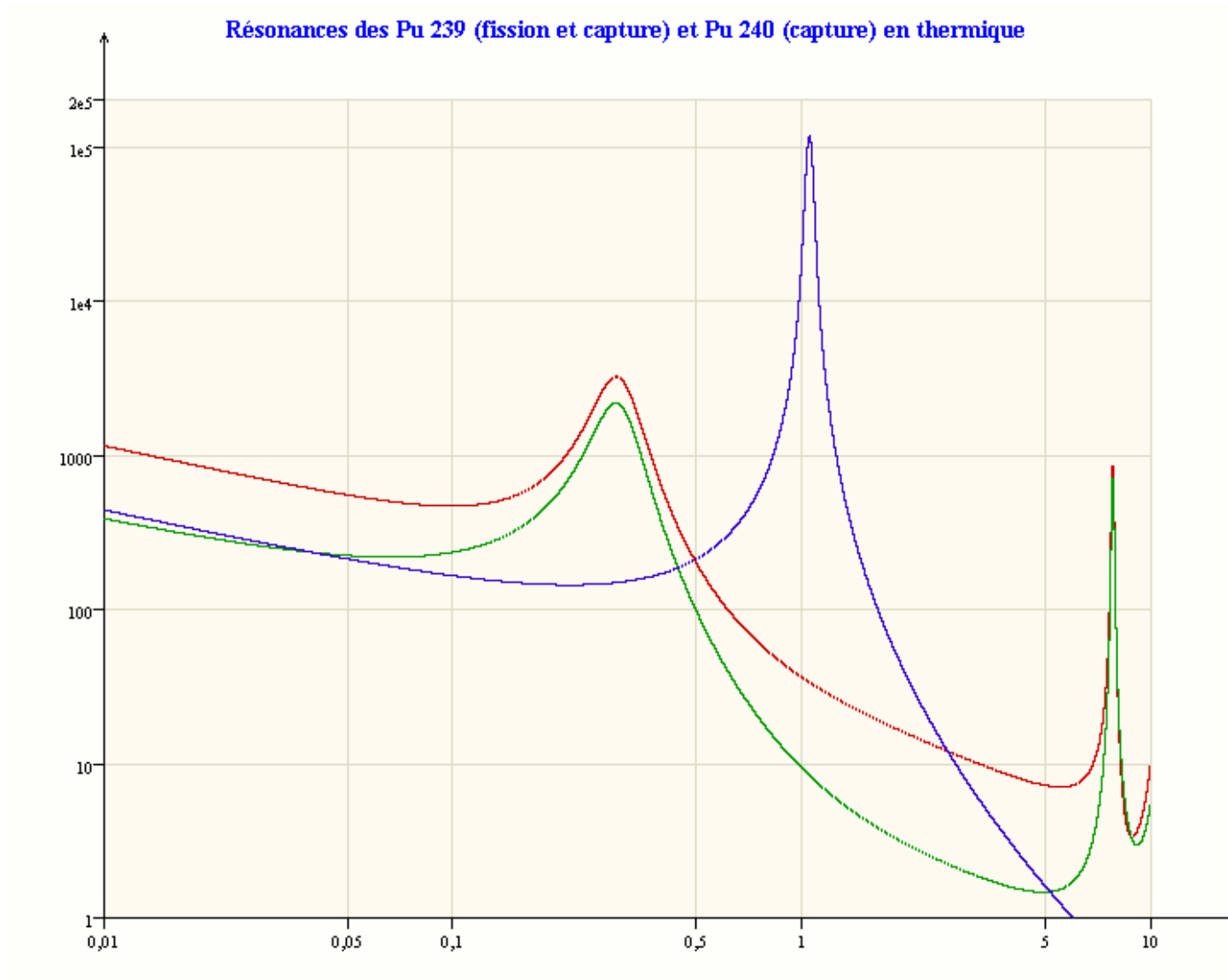
$$\eta = \frac{v_5 \cdot N_5 \cdot \bar{\sigma}_{f5} \cdot \bar{v}}{N_5 \cdot \bar{\sigma}_{a5} \cdot \bar{v} + N_8 \cdot \bar{\sigma}_{a8} \cdot \bar{v}} = v_5 \cdot \frac{\bar{\sigma}_{f5} \cdot \bar{v}}{\bar{\sigma}_{a5} \cdot \bar{v}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{N_8 \cdot \bar{\sigma}_{a8} \cdot \bar{v}}{N_5 \cdot \bar{\sigma}_{a5} \cdot \bar{v}}}$$

$$\eta_5 = v_5 \cdot \frac{\bar{\sigma}_{f5} \cdot \bar{v}}{\bar{\sigma}_{a5} \cdot \bar{v}}$$

**Ce terme décroît avec la température,**

les sections d'absorption et de fission décroissent plus vite que  $\frac{1}{v}$ ,

**section de fission décroît plus vite que section d'absorption avec de l'uranium, l'effet de spectre est stabilisant.**



**Résonances à 0.3 eV du Pu 239 et à 1 eV pour le Pu 240**



Pour le **plutonium 239**, grande résonance à **0.3 eV**  
**effet déstabilisant.**

combustible à UO<sub>2</sub> : effet de spectre sur  $\eta$  stabilisant  
avec l'usure et la **formation de plutonium 239**,  
l'effet **peut devenir déstabilisant**  
au delà d'une certaine concentration en plutonium

Quand la température augmente,  
les **absorptions dans le combustible diminuent**  
et le **flux dans le combustible est moins creusé**  
Le **facteur de désavantage diminue**  
**et le facteur d'utilisation thermique augmente**  
**effet déstabilisant**

## Variation des fuites

L'effet de spectre agit sur l'âge de Fermi et l'aire de diffusion

**diminution des sections efficaces moyennes**

**augmentation des libres parcours moyens**

le spectre devient plus dur

**accroissement des fuites**

**effet stabilisant.**

*effet de spectre et effet modérateur indissociables  
tous deux liés à la température du modérateur*

## Quelques valeurs :

filière UNGG :

le **coefficient de température du modérateur**,  
principalement lié à **l'effet de spectre**  
puisque le modérateur était du graphite solide  
valait en début de vie - **3 pcm / °C**  
et évoluait jusqu'à **+ 12 pcm / °C** en fin de vie  
(*combustible chargé en plutonium 239*)

**Réacteur à eau lourde**

de - 2 pcm / °C en début de vie, à + 4 pcm / °C en fin de vie.

**REP EDF**

de - 3 pcm / °C en début de vie (avec bore),  
à - 40 pcm / °C en fin de vie (sans bore)  
*effet de spectre masqué par la dilatation du modérateur*

## Conclusion

**grande importance pour le contrôle** des réacteurs  
**détermination délicate** et souvent imprécise  
**termes relativement nombreux**, positifs ou négatifs  
**varient au cours de la vie du réacteur**,  
notamment avec la formation de **plutonium**  
et de **produits de fission**  
et peuvent être très différents suivant les filières

code de calcul Apollo pour déterminer les coefficients

**effets de puissance** avec le xénon et le samarium  
qui font évoluer la valeur du facteur de régénération  $\eta$

**Coefficients de température et puissance étroitement liés**