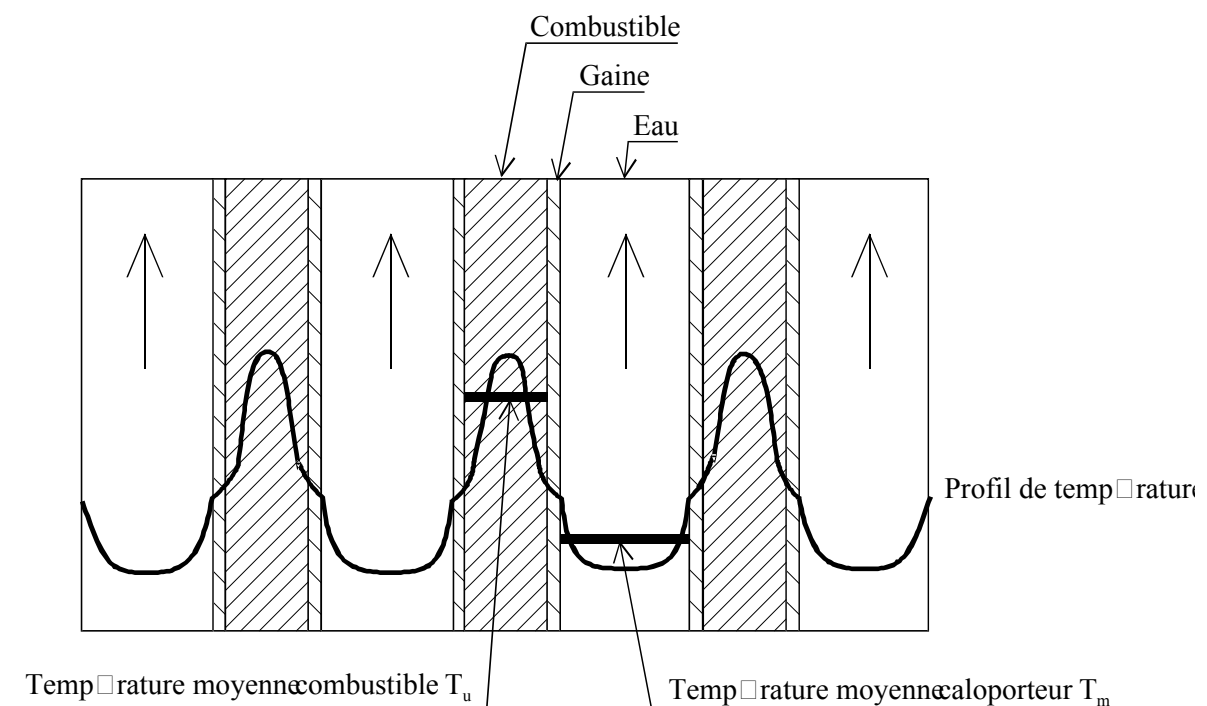


Les effets de température

1. Introduction

La chaleur issue du combustible est transférée au caloporteur (eau) grâce au gradient de température qui existe entre ces deux milieux.



Puissance neutronique = Puissance extraite du réacteur = P

$$P = \text{constante} \cdot (T_u - T_m)$$

Donc à chaque fois qu'il y a une variation de puissance, l'écart ($T_u - T_m$) varie.

D'autre part, la **température moyenne du coeur**, qui dépend évidemment de T_m et T_u , évolue également en **fonction de la puissance extraite** au générateur de vapeur puisque cette **puissance est proportionnelle à l'écart ($T_e - T_s$)**.

Chaque **variation de puissance extraite** engendre donc des variations de température, du combustible mais aussi du caloporteur (c'est-à-dire du modérateur). Les réacteurs sont calculés pour fonctionner à une température moyenne de caloporteur non constante (fixé par le compromis entre la température du caloporteur et la température de la vapeur au circuit secondaire) : on aura donc des **contre-réactions**. La température évoluera donc autour de sa position de consigne.

De telles variations de températures peuvent-elles perturber notre "équilibre neutronique"? La réponse est oui ; ce chapitre va expliquer ce phénomène et de le quantifier.

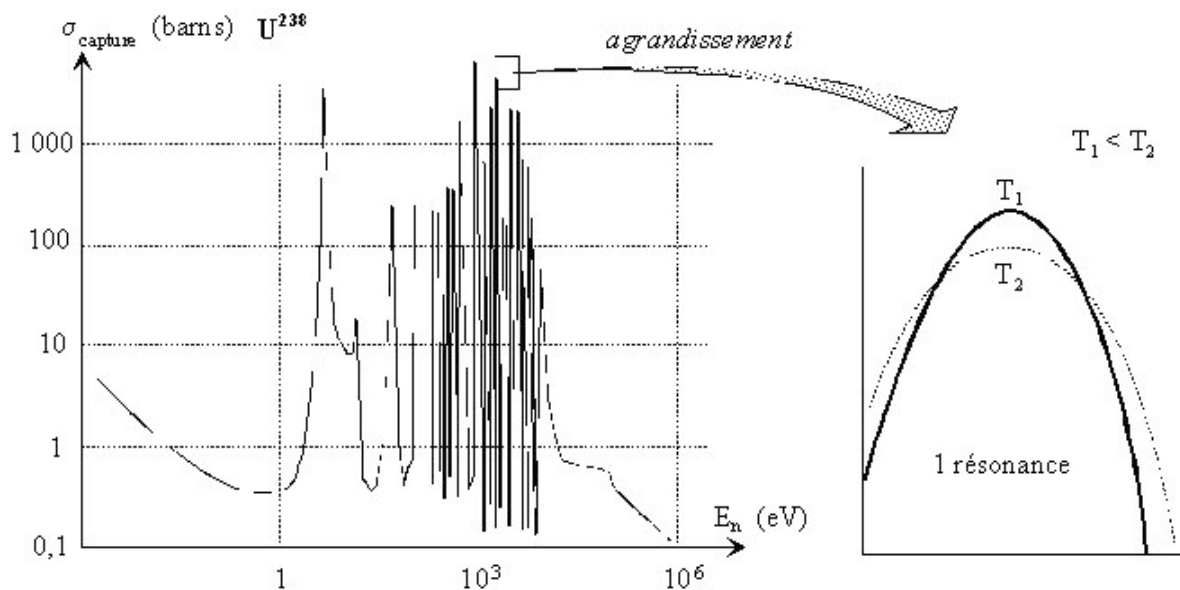
2. Effet de température du combustible

2.1 Phénomène physique

Les section efficaces microscopiques dépendent du matériau et de l'énergie du neutron incident. Par contre elles dépendent également de la température du matériau. Dans la quasi totalité des cas, cette influence est très faible et n'engendre aucune modification notable sur la neutronique du réacteur.

Il existe pourtant un cas dont on tient compte en neutronique, car il a un effet significatif : c'est celui de **l'uranium 238**.

Traçons la section efficace microscopique d'absorption de l'uranium 238, pour deux températures T_1 et T_2 avec $T_1 < T_2$:



Remarquons qu'à T_2 les **résonances du domaine épithermique** sont plus larges qu'à T_1 , même si le pic d'absorption est moins élevé. Globalement, à T_2 nous aurons donc **plus de captures neutroniques** par l'uranium 238 (ce que nous avons appelé les trappes).

Par conséquent, le facteur anti-trappe p est plus faible qu'à T_1 . Autrement dit, plus on chauffe de l'uranium 238, plus il capturera de neutrons épithermiques.

Un rapide raisonnement conduit à la conclusion suivante : "**plus on chauffe un combustible (composé d'uranium 238 et 235) moins il est réactif, et plus son K_{eff} diminue**".

- l'effet de température du combustible est aussi appelé **l'effet DOPPLER**, nom du chercheur qui à mis ce phénomène en évidence.
- **plus on chauffe un Noyau, plus il vibre**, plus il occupe de place, ce qui augmente la probabilité de rencontre avec un neutron. Cela est une explication très simpliste de l'effet dont on parle dans ce chapitre.
- plus il y a d'uranium 238 dans le combustible, plus ce phénomène est important. A la limite cet effet est nul s'il n'y a pas d'uranium 238 dans le combustible. Par exemple, sur un cœur "métal" de réacteur de recherche (cœur enrichi à 95% en uranium 235), où il n'y a presque pas d'uranium 238, l'effet Doppler n'existe pas.

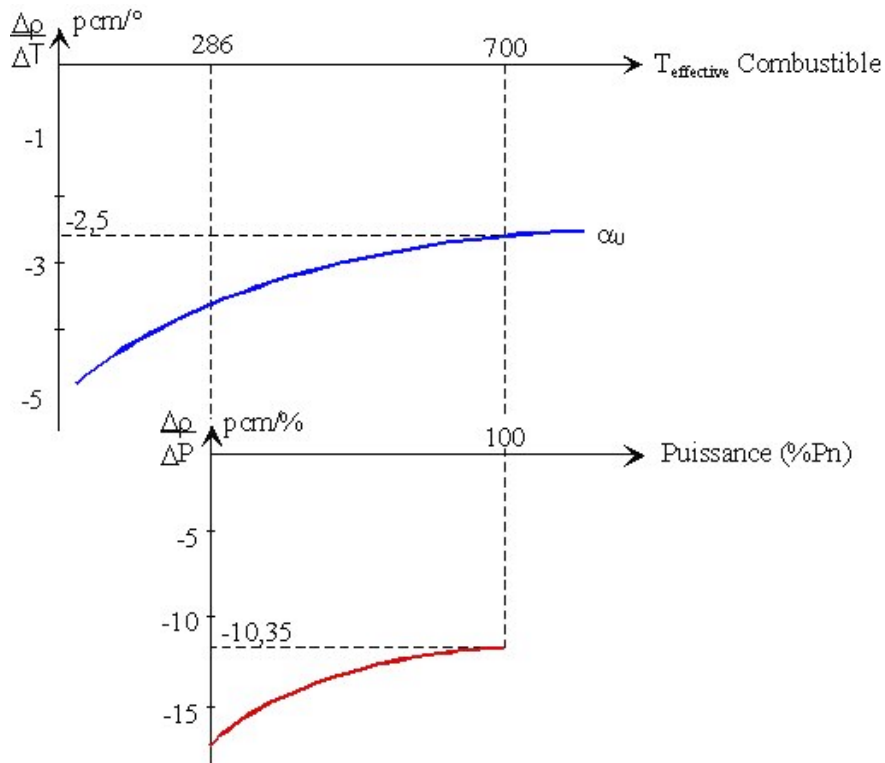
2.3 Le coefficient de température combustible

Le coefficient de température combustible, noté α_u ("u" pour uranium), est défini comme étant égal à :

$$\alpha_u = \frac{\Delta\rho}{\Delta T_u}$$

$\Delta\rho$ est la **différence entre les réactivités du coeur** correspondant à la **variation de température ΔT_u** , toutes les autres grandeurs restant égales par ailleurs (température modérateur, position des grappes de commandes, bore, débit d'eau,...).

Cet effet Doppler n'étant pas reliable directement par la mesure à la température du combustible, on l'associe généralement à la puissance extraite puisque la température combustible lui est liée. Les valeurs du coefficient Doppler peuvent aussi s'exprimer en pcm / % Puissance. On parlera de **coefficient de puissance**.



Soit un réacteur à l'état 1 dont la réactivité est ρ_1 et la température T_{u1} . Chauffons uniquement le combustible jusqu'à T_{u2} ($T_{u2} > T_{u1}$). L'uranium 238, plus chaud, capture plus les neutrons, le facteur anti-trappe diminue, et donc la réactivité diminue elle aussi jusqu'à ρ_2 ($\rho_2 < \rho_1$). Le calcul de α_u , d'après la définition, donne :

$$\alpha_u = \frac{\rho_2 - \rho_1}{T_{u,2} - T_{u,1}}$$

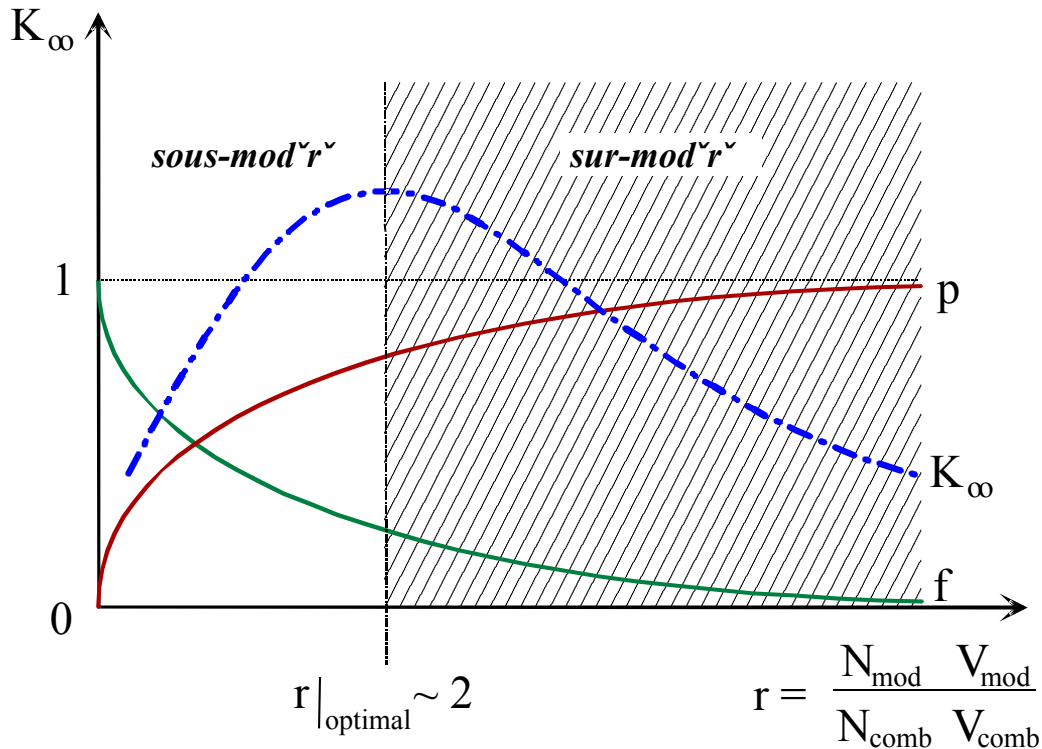
où : $(\rho_2 - \rho_1)$ est un terme négatif puisque $\rho_2 < \rho_1$
 $(T_{u2} - T_{u1})$ est un terme positif puisque $T_{u2} > T_{u1}$

donc α_u est un terme négatif, ce qui signifie qu'une **augmentation de la température du combustible engendre une baisse de la réactivité du réacteur**.

- l'effet de température est un effet **autostabilisant naturel** ; une augmentation de la puissance entraîne un échauffement du combustible, qui, de ce fait chute la réactivité, donc la puissance. Ce phénomène sera considéré comme une "**contre réaction**" (il s'oppose à la tendance souhaitée).
- l'ordre de grandeur de ce coefficient pour un oxyde d'uranium enrichi à environ 4% , est $\alpha_u \approx -2,5 \text{ pcm/}^\circ\text{C}$.
- l'effet du coefficient de température combustible est **quasi immédiat**.

3. Effet de température modérateur

3.1 Phénomène physique



Afin d'expliquer cet effet rappelons la courbe K_{eff} en fonction de r , le rapport de modulation :

$$r = \frac{N_{\text{mod}} \cdot V_{\text{mod}}}{N_{\text{comb}} \cdot V_{\text{comb}}}$$

Par construction, les réacteurs sont **toujours sous-modérés**, donc une baisse du rapport de modulation r entraîne une baisse du K_{eff} . Il reste à savoir comment évolue le rapport de modulation r en fonction de la température du modérateur.

- Lorsqu'on **chauffe le modérateur**, c'est à dire l'eau, N_{comb} et V_{comb} (également noté N_u et V_u) ne varient pas puisqu'on ne touche pas au combustible. Par contre, N_{mod} diminue car il y a dilatation de l'eau (il y a moins de molécules d'eau par unité de volume).
- De plus, **V_{mod} ne varie pas non plus**. En effet l'eau est un modérateur de neutrons tant qu'elle se trouve dans le coeur, si elle n'y est plus c'est tout simplement un fluide caloporteur. Donc lorsqu'on chauffe l'eau du coeur son volume augmente bien (pressuriseur) mais par contre V_{mod} ne varie pas.



Donc dans l'expression de r , seul le terme N_{mod} diminue lorsque la température du modérateur augmente. Nous concluons alors qu'**une augmentation de température du modérateur fait chuter la réactivité du réacteur.**

3.2 Le coefficient de température modérateur

Comme le coefficient de température combustible, celui du modérateur, noté α_m , est défini comme étant égal à :

$$\alpha_m = \frac{\Delta\rho}{\Delta T_m}$$

où $\Delta\rho$ est la différence entre les réactivités du coeur correspondant à la variation de température ΔT_m , toutes les autres grandeurs restant égales par ailleurs (température combustible, position des barres de commandes, débit d'eau,...).

- soit un réacteur à l'état 1 dont la réactivité est ρ_1 et la température T_{m1} . Chauffons uniquement le modérateur jusqu'à T_{m2} ($T_{m2} > T_{m1}$).
- Celui-ci se dilate, il y a moins de modérateur dans le coeur, les neutrons sont moins bien ralentis, et donc la réactivité diminue elle aussi jusqu'à ρ_2 ($\rho_2 < \rho_1$).

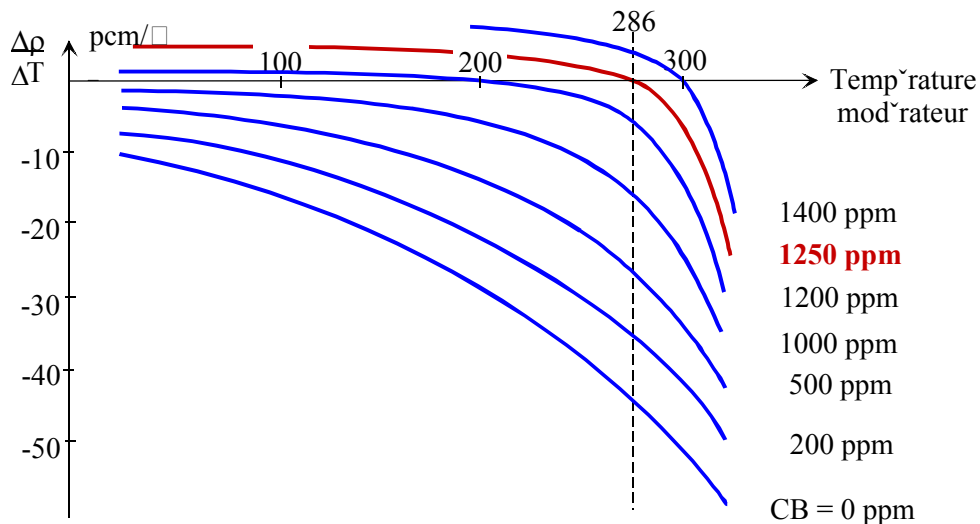
Le calcul de α_m , d'après la définition, donne :

$$\alpha_m = \frac{\rho_2 - \rho_1}{T_{m,2} - T_{m,1}}$$

où : $(\rho_2 - \rho_1)$ est un terme négatif puisque $\rho_2 < \rho_1$
 $(T_{m,2} - T_{m,1})$ est un terme positif puisque $T_{m,2} > T_{m,1}$

donc α_m est un terme négatif, ce qui signifie qu'une **augmentation de la température du modérateur engendre une baisse de la réactivité du réacteur.**

On constatera sur le graphique suivant que la **concentration du bore** joue également sur les contre réactions, la dilatation du modérateur diminuant aussi les interactions d'absorption avec le bore. La **concentration de bore est donc limitée pour garantir des contre-réactions.**



Quelques remarques :

- l'effet de température modérateur est en réalité la somme de l'effet de température de l'eau seule et du bore seul. On voit que si la concentration en bore est très importante, le coefficient de température devient positif : c'est une situation que l'on s'interdira toujours en fonctionnement. **L'effet de température du modérateur doit rester négatif tout au cours du cycle.**
- l'effet de température est un **effet autostabilisant** ; une augmentation de la puissance entraîne un échauffement du modérateur, qui fait alors chuter la réactivité, donc la puissance. Ce phénomène sera considéré comme une "**contre réaction**" (*il s'oppose à la tendance souhaitée*).
- l'ordre de grandeur de ce coefficient (pour un rapport de modération d'environ 2 à 3) est $\alpha_m \approx -15$ à -40 pcm/°C.
- l'effet du coefficient de température modérateur est **moins immédiat** que l'effet du coefficient de température combustible.
- **nous pourrions montrer que α_m est proportionnel à l'opposé de la pente de la courbe $K_{eff}(r)$.** (*voir exercice 3*)

4. Pilotage grâce aux effets de température

Il n'est pas nécessaire, sous certaines conditions, de faire varier la position des barres pour modifier l'allure du réacteur. Cela, bien évidemment grâce aux effets de température.

Pour faire **varier la puissance de l'installation**, on peut évidemment modifier la position des grappes de puissance. En fait, à cause des contre-réactions, en faisant cela, on ne fait que bouger la température moyenne du modérateur puisque **c'est la puissance extraite qui gouverne la puissance neutronique fournie.**

Mais grâce aux effets de température nous allons voir que cela n'est pas nécessaire, ceci sous certaines conditions précisées après.

Partons de ce que nous désirons précisément : **augmenter la puissance** de la turbine. Pour ce faire, ouvrons la vanne d'alimentation vapeur. Le débit de vapeur est plus important, la puissance de la turbine augmente.

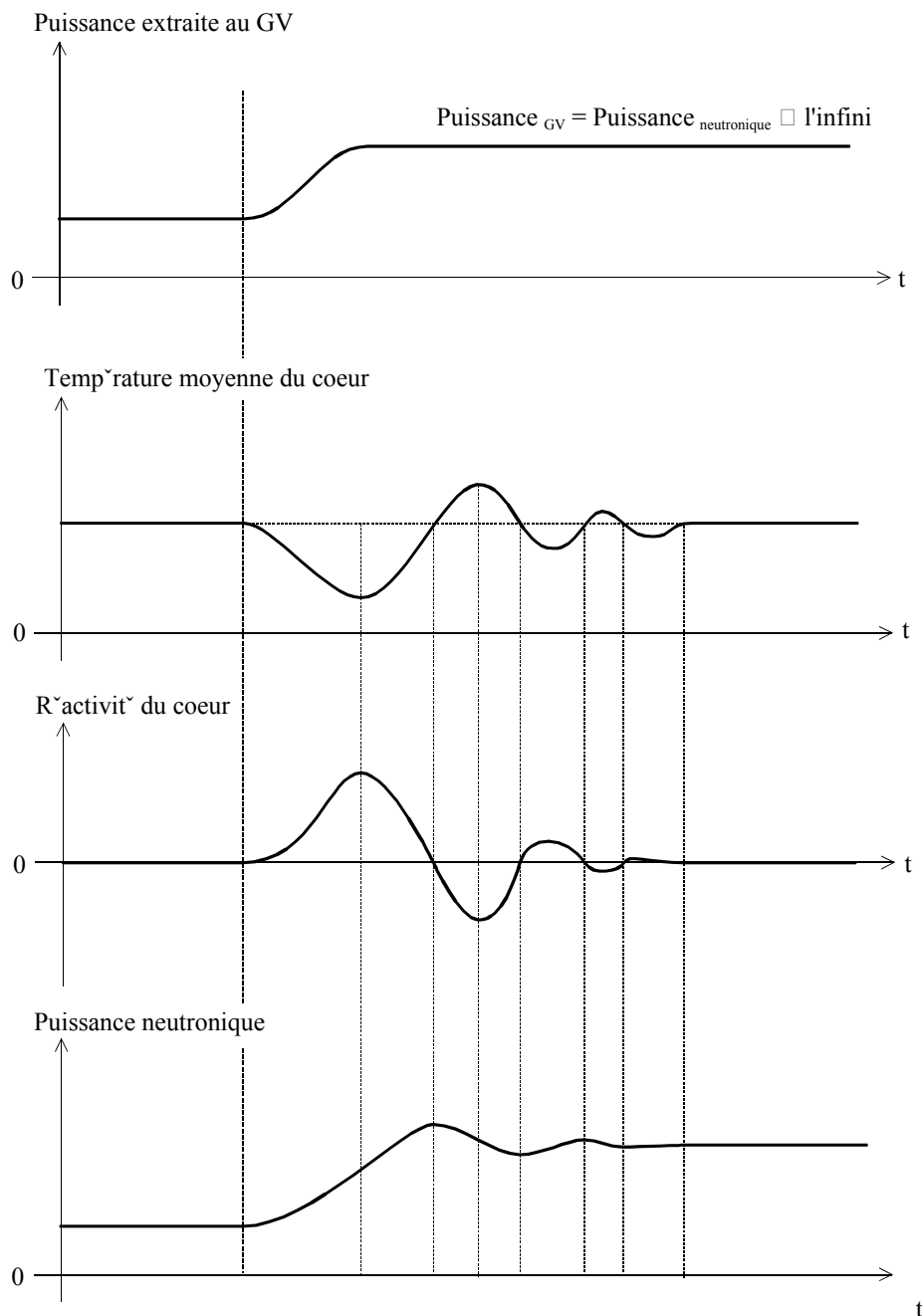
Du générateur de vapeur, on **soutire donc plus de vapeur.**

Le débit du secondaire augmente ; au niveau du générateur de vapeur, **l'eau du circuit primaire est donc mieux refroidie**. Cette baisse de température se répercute dans le coeur, et compte tenu des effets de température ("une baisse de température du modérateur et du combustible engendrent une augmentation de la réactivité"), la réactivité augmente ; elle devient positive.

De ce fait, la **puissance neutronique augmente**, entraînant une élévation de la température du coeur et donc du modérateur.

Les températures du combustible et du modérateur montant, la réactivité du coeur chute. Ce phénomène se poursuit jusqu'à ce qu'on ait :

- une **réactivité nulle**,
- **égalité entre puissance neutronique et puissance extraite** par le générateur de vapeur.



Ces contre-réactions rendent le pilotage d'un réacteur nucléaire très aisé.
Il suffit de demander de la puissance et le réacteur se règle tout seul.

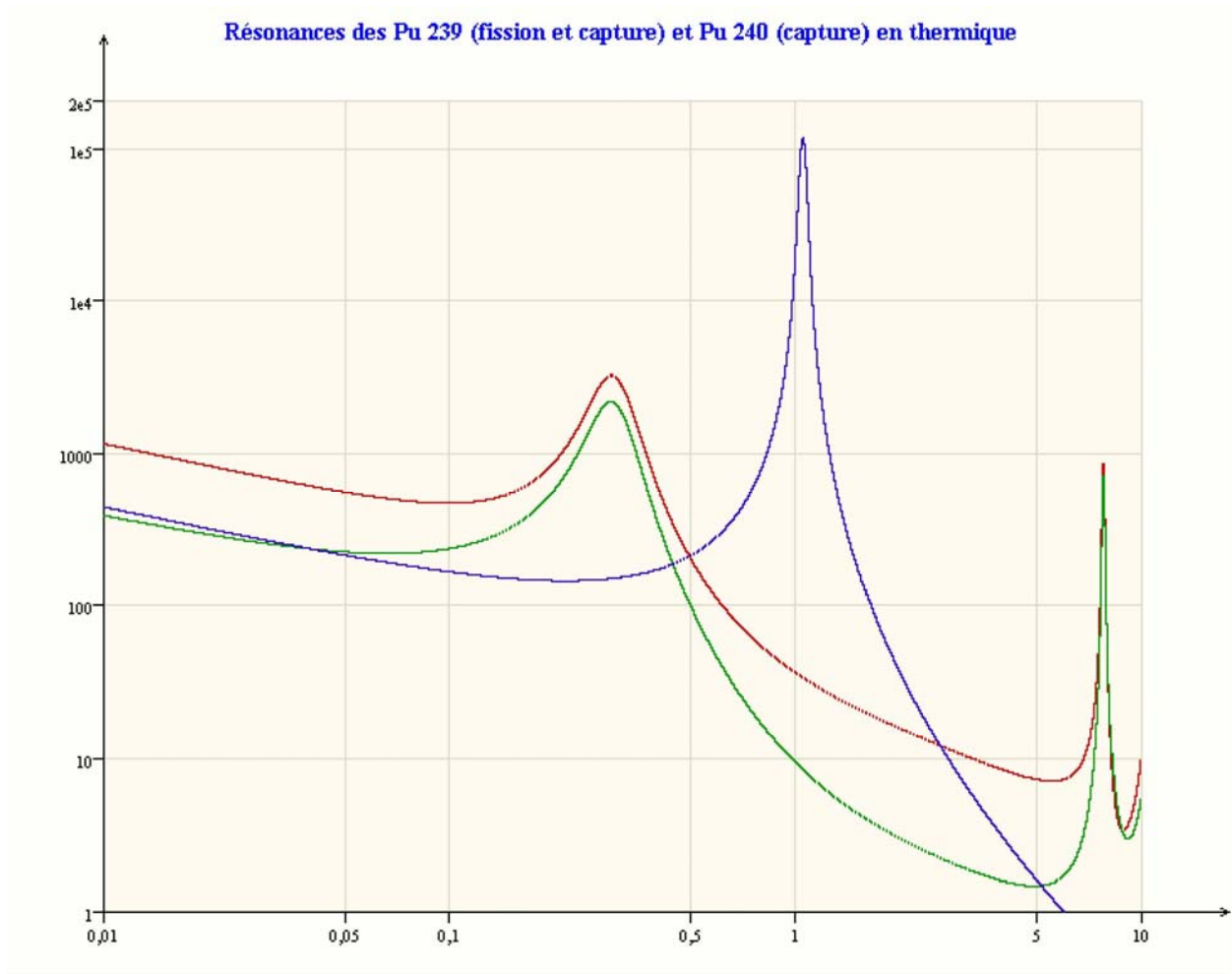
Mais attention, cette autorégulation ne se fera correctement que :

- **si le niveau de puissance est suffisant :** En effet, un réacteur peut être critique, mais à un niveau de puissance total quasi-nul (c'est le cas au démarrage). Le combustible ne chauffe pas et il est donc illusoire de s'attendre à une contre-réaction de réactivité : la température de l'eau chute, entraîne une hausse de la réactivité, mais celle-ci n'entraîne pas une augmentation de la température du combustible vu le niveau de flux trop faible. Il faudra attendre plusieurs générations. Le temps que ces générations arrivent, on risque de passer "prompt critique" ($\beta > 0$), c'est ce qui est arrivé à Tchernobyl.
- **si le saut de puissance n'est pas trop important :** Dans le cas contraire, on pourrait voir que certaines contraintes thermodynamiques ne sont plus respectées.

Il existe également un **effet dit de spectre**, c'est à dire que les neutrons thermalisés se trouvant distribués selon un spectre par le ralentissement sur les noyaux de modérateur, la montée de température du modérateur permet un **distribution spectrale des neutrons** un peu plus rapide, on dira plus "**dure**".

Le **spectre thermique** se déplaçant vers des énergies un peu plus élevées, il arrive que certains éléments, par des résonances particulières, apportent une **augmentation de réactivité** s'ils sont en quantité importante : c'est le cas du Pu 239 qui possède une résonance à 0,3 eV. (figure page suivante)

Ceci entraîne alors une **limitation de la concentration autorisée en Pu** (ou en assemblage MOX). La **filière UNGG** a pour cette raison été abandonnée : le modérateur était solide, donc pas d'effet de dilatation du liquide, la production importante de Plutonium en début de vie était due au fait de l'utilisation d'uranium naturel (0,7 % en U235).



Le déplacement du spectre des neutrons thermiques vers des énergies moyennes de 0,1 à 0,2 eV permet une augmentation des fissions par le Pu 239 (courbe rouge), en même temps que les captures par le Pu239. La réactivité augmente alors si la température du modérateur s'élève (modération plus "rapide") en cas de trop forte concentration de Pu.

5. Questions sur les effets de température

Ordres de grandeur des températures dans une chaufferie

Comment se traduit la température sur le **mouvement des atomes**

Expliquer ce qu'est une **contre-réaction**

Conséquences sur les **sections efficaces de l'U238**

Conséquences sur le **facteur antitrappe**, donc le Keff, si le combustible chauffe

Savoir expliquer l'effet de **dilatation du modérateur** sur le Keff

Condition indispensable pour garantir une contre réaction de température

Importance des **coefficients modérateur et combustible** (Doppler)

Valeurs (à froid et à chaud)

Délai de réaction sur le Keff des deux coefficients

Pourquoi observe-t-on des variations de température dans un cœur critique

Comment les **variations de puissance** modifient-ils la réactivité du cœur ?

Expliquer **l'autostabilité** du cœur en dynamique libre

Expliquer pourquoi l'opérateur doit ramener la Tm de consigne et comment il fait

6. Exercices sur les effets de température

Exercice 1

Un coeur fonctionne à l'**ETAT CRITIQUE** à une température modérateur de **250°C** et une température combustible de **700°C**.

Lorsque le coeur est à l'**ARRET FROID** la température est de **70°C**.

Les coefficients de température sont : ➤ $\alpha_m = -20 \text{ pcm} / ^\circ\text{C}$
➤ $\alpha_U = -2 \text{ pcm} / ^\circ\text{C}$

- En négligeant les effets de l'empoisonnement et en supposant que la position des barres n'est pas modifiée, quelle est la réactivité du coeur à l'**arrêt froid** ?
- Quelle **antiréactivité** faut-il prévoir pour que le coeur soit sous-critique de **2000 pcm** dans ces conditions ?

Exercice 2

On donne pour un réacteur type **REP** :

A la puissance nominale : ➤ Température du modérateur $T_m = 300 \text{ }^\circ\text{C}$
➤ Température du combustible $T_c = 600 \text{ }^\circ\text{C}$

A l'arrêt à froid : ➤ $T_m = T_c = 80 \text{ }^\circ\text{C}$

Coefficients de température : ➤ Modérateur $\alpha_m = -18 \text{ pcm} / ^\circ\text{C}$
➤ Combustible $\alpha_c = -1,9 \text{ pcm} / ^\circ\text{C}$

Calculer la **variation de réactivité** provoquée par le passage du réacteur de l'arrêt froid au fonctionnement à puissance nominale.

Exercice 3

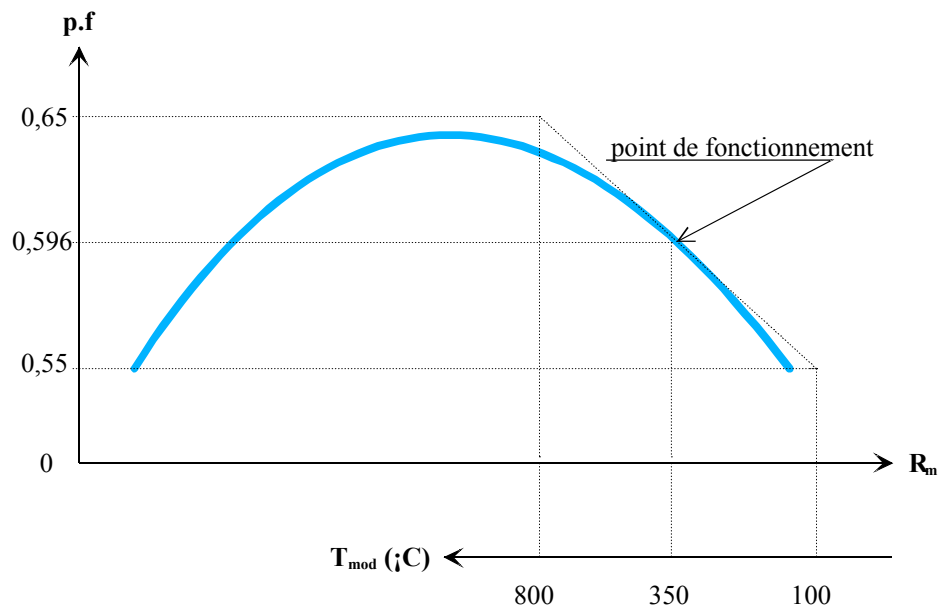
Détermination expérimentale de la valeur d'un coefficient de température modérateur.

Dans un réacteur, quels termes intervenants dans la formule des quatre facteurs sont **indépendants du rapport de modulation** ? Expliquer pourquoi.

La courbe ci-jointe nous donne l'**évolution** du produit **p.f** en fonction du rapport de modération et de la température du modérateur qui lui correspond (pour le réacteur étudié qui pourrait être Russe). En déduire la valeur du coefficient de température modérateur α_m à 350 °C.

On fera l'approximation **$K_{eff} \# 1$**

Compte tenu de la valeur du coefficient de température obtenue, ce réacteur est-il **stable ou instable** ? Discuter.



Données : COMBUSTIBLE UO_2

- $\nu = 2,42$
- $\epsilon = 1,04$
- $\Sigma_{a,comb} = 1,19 \text{ cm}^{-1}$
- $\Sigma_{f,comb} = 0,98 \text{ cm}^{-1}$
- $P_{NF} = 0,81$
- $\alpha_U = -2 \text{ pcm} / ^\circ\text{C}$