Exercices sur les effets de température

1. Réactivité à froid et sous-criticité

Calculer la réactivité du cœur à froid :

Le passage de l'état critique (puissance nominale) à l'arrêt à froid entraîne une baisse de température. Cette baisse de température; compte tenu des effets de température (empoisonnement négligé, position des barres de contrôle inchangée) entraîne une augmentation de réactivité (réaction semblable à la loi de LENTZ en électromagnétisme).

$$T \searrow \Rightarrow \rho \nearrow$$

Faisons un bilan de réactivité. A l'état initial (état critique), on a : $\rho_i = 0$

A l'état final (arrêt à froid), on a : $\rho_f = \rho_i + \alpha_m . \Delta T_m + \alpha_u . \Delta T_u$

C'est-à-dire : $\rho_f = \rho_i + \alpha_m . (T_{mf} - T_{mi}) + \alpha_u . (T_{uf} - T_{ui})$

Où ρ_f est la réactivité du cœur à l'arrêt à froid . $\rho_f = 0 - 20 . (70 - 250) -2 . (70 - 700)$

$$\rho_f = 4860 \text{ pcm}$$

Il faut donc introduire une antiréactivité équivalente (-4860 pcm) pour rendre critique le cœur du réacteur.

Antiréactivité à prévoir pour être sous-critique de 2000 pcm :

On a vu que pour rendre critique ($\rho = 0$) le cœur du réacteur lors du passage à l'arrêt à froid, il fallait introduire une antiréactivité de 4860 pcm. Si on veut le rendre sous-critique de 2000 pcm, il faut donc introduire une antiréactivité $\rho = 6860$ pcm entre le passage du cœur de l'état critique (puissance nominale) et l'état à froid.

$$\rho = - 6860 \text{ pcm}$$

2. Reprise froid chaud et variations de réactivité

On négligera ici les effets d'empoisonnement et le mouvement des grappes de contrôle (changement d'état critique). On considère donc que le cœur du réacteur est sensible aux seuls effets de température lors d'une variation de réactivité.

Lors du passage du cœur de l'arrêt à froid au fonctionnement à puissance nominale; les températures combustibles T_c et modérateur T_m vont augmenter car il y a augmentation de la réactivité (augmentation de puissance). Les contre-réactions (effets de température) vont alors s'opposer à cette augmentation de la réactivité.

Notons $\Delta\rho$ la variation de réactivité dans le cœur. Faisons un bilan de réactivité dans le cœur :

$\Delta\rho = \alpha_m . \Delta T_m + \alpha_u . \Delta T_u$ Où encore : $\Delta\rho = \alpha_m . (T_{mf} - T_{mi}) + \alpha_u . (T_{uf} - T_{ui})$

$\Delta\rho = -18 . (300 - 50) - 1,9 . (600 - 50)$ $\Delta\rho = - 4948$ pcm

Pour rendre le coeur critique à puissance nominale, il faudra prévoir une remontée des grappes de contrôle (ou une dilution du bore) correspondant à 4948 pcm.

3. Détermination d'un coefficient de température

Termes de la formule des 4 facteurs indépendants du rapport de modération :

Définissons tout d'abord le rapport de modération R_m. On le caractérise par la relation :

$$R_m = \frac{\text{nombre de noyaux moderateur}}{\text{nombre de noyaux combustible}} = \frac{N_m.V_m}{N_u.V_u}$$ Or $N_u \# N_8$, d'où : $$\boxed{R_m \approx \frac{N_m.V_m}{N_8.V_u}}$$

Le rapport de modération R_m varie avec la température par le biais de N_m / N_u et il est fonction des dimensions de la cellule par V_m / V_u (fixé à la construction du réacteur). Déterminons la dépendance des 4 facteurs en fonction du rapport de modération R_m.

Facteur de fission thermique η : par définition : $\boxed{\eta = \upsilon_5.\left(\frac{\Sigma_f}{\Sigma_a}\right)_{comb}}$

Cette relation est tout à fait explicite. En effet, le facteur η est totalement indépendant de R_m car il est fonction d'éléments indépendants de R_m (ν_5, $\Sigma_{f,comb}$, $\Sigma_{a,comb}$). η ne dépend que de l'enrichissement e du combustible.

Facteur antitrappe p :

Si il y a beaucoup de modérateur dans le cœur (R_m grand), les neutrons rapides sont mieux ralentis et leur chance d'échapper aux captures de l'U^{238} (facteur p) augmente. Le facteur antitrappe p dépend donc du rapport de modération R_m. Au mieux p vaut 1 (Aucune capture par les résonances de l'U^{238}). L'évolution du facteur antitrappe p en fonction du rapport de modération R_m est de la forme :

Facteur d'utilisation thermique f :

Par définition, dans un REP : $$\boxed{f = \frac{e.\sigma_{a5} + (1-e).\sigma_{a8}}{e.\sigma_{a5} + (1-e).\sigma_{a8} + R_m.\sigma_{am}.\frac{\Phi_{mod}}{\Phi_{comb}}}}$$

On s'aperçoit que le facteur d'utilisation thermique f dépend du rapport de modération R_m sous la forme d'une fonction du type : $\boxed{f = \frac{a}{a + R_m.b}}$ où, a et b sont des constantes.

Les variations de f en fonction du rapport de modération R_m sont de la forme :

Facteur de fission rapide ε :

Les fissions rapides sont essentiellement dues à l'U^{238}. Elles interviennent très peu dans les piles à uranium naturel où l'on peut les négliger. On prendra : $\varepsilon \# 1,04$. Par contre, la sous modération des REP conduit à une majoration des fissions rapides qui compensent un peu les valeurs mauvaises de p et de f dans cette filière.

$$1,05 < \varepsilon < 1,3$$

On supposera que ε n'évolue pratiquement pas avec le rapport de modération R_m.

ε et η ne dépendant pas du rapport de modération, $K_\infty = \varepsilon.p.f.\eta$ dépend de R_m comme le produit f.p. La représentation de K_∞ en fonction du rapport de modération R_m est donc de la forme :

Valeur du coefficient de température modérateur α_m :

On cherche le coefficient de température modérateur α_m à 350°C. On se place donc à T_m = 350°C. Par définition, on a : $\boxed{\alpha_m = \frac{\Delta\rho}{\Delta T_m}}$ Or, la réactivité est définie par : $\rho = \frac{K_{eff} - 1}{K_{eff}}$

Cependant, on fait l'approximation $K_{eff} \# 1$, d'où : $\rho \# K_{eff} - 1$

Et de ce fait, une variation de réactivité est définie par : $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2 = K_{eff1} - K_{eff2}$

Donc : $\Delta\rho = \Delta K_{eff}$ Or, le facteur de multiplication est définit par la relation : $K_{eff} = \varepsilon.p.f.\eta.P_{NF}$

En différenciant cette relation autour du point de fonctionnement, on obtient :

$$\Delta k_{eff} = \varepsilon.\eta.P_{NF}.\Delta(f.p) = \Delta\rho$$

Or d'après (1) : $\Delta\rho = \alpha_m.\Delta T_m$ D'où, on obtient finalement la relation finale : $\alpha_m = \frac{\Delta(p.f)}{\Delta T_m}.\varepsilon.\eta.P_{NF}$

Où $\frac{\Delta(p.f)}{\Delta T_m}$ représente la pente de la courbe p.f = g (T_m) au point de fonctionnement. On peut la déterminer graphiquement. Pour déterminer la valeur du coefficient de température modérateur, il nous faut aussi calculer la valeur du facteur de fission thermique η.

Par définition, on a : $\eta = \upsilon.\left(\frac{\Sigma_f}{\Sigma_a}\right)_{comb}$ $\eta = 2,42.\frac{0,98}{1,19}$ $\eta = 1,993$

On en déduit alors le coefficient de température modérateur α_m, d'après la formule (3) :

$$\alpha_m = 1{,}04 . 0{,}81 . 1{,}993 . \frac{0{,}55 - 0{,}65}{100 - 800} \qquad \alpha_m = 23{,}99 \text{ pcm} / {}^\circ\text{C}$$

A titre de remarque, il est à noter que le coefficient de température modérateur α_m dépend de la température du modérateur T_m. En effet, ce coefficient de température peut varier dans le domaine suivant (pour un REP sous modéré) : -15 pcm / °C < α_m < -40 pcm / °C

Stabilité du réacteur :

On nous donne le coefficient de température combustible α_u = -2 pcm . °C^{-1}.
On peut donc calculer le coefficient de température globale α du réacteur. Ce coefficient vaut :

$$\alpha = \alpha_u + \alpha_m \qquad \alpha = 23{,}99 - 2 \qquad \alpha = 21{,}99 \text{ pcm} / {}^\circ\text{C} > 0$$

Le coefficient de température globale étant positif, notre réacteur est instable. En effet; si on a une augmentation accidentelle de la température du combustible et donc du modérateur; alors les contre-réactions du réacteur vont agir de telle manière à augmenter la réactivité totale du coeur (car $\alpha > 0$).

Ceci était prévisible car le point de fonctionnement du réacteur se trouve dans le domaine sur-modéré [voir courbe $k_\infty = g(R_m)$]. Ce domaine de fonctionnement est nécessairement instable.