

Questions à réviser

Formule des quatre facteurs

1. Quelle est la différence entre le coefficient de multiplication en milieu infini k_∞ et le coefficient de multiplication effectif k_{eff} .

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

Le premier terme de ce produit est équivalent au coefficient de multiplication effectif mais pour un **milieu de dimensions infinies** dans lequel il n'y aurait **pas de fuites**. Ce nouveau coefficient est appelé **coefficient de multiplication en milieu infini**.

Le deuxième terme représente la **probabilité** pour un neutron de **rester** dans le réacteur : la **probabilité de non fuite**, évidemment inférieur à 1.

$$K_\infty = \frac{\text{Productions}}{\text{Absorptions}} \quad P_{nf} = \frac{\text{Absorptions}}{\text{Absorptions} + \text{Fuites}}$$

2. Quelle relation fondamentale relie ces deux grandeurs ?

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

3. De quoi est fonction la probabilité de non-fuite P_{nf} ?

Dans l'hypothèse d'un réacteur homogène, et de neutrons thermiques, deux termes interviennent : la **diffusion**, liée aux interactions possibles qui "gênent" le parcours vers la surface, donc les fuites ; et la **géométrie** qui "dimensionne" la possibilité de fuites par la surface.

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

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

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

B_g^2 étant le **laplacien géométrique** qui dépend de la géométrie du cœur

4. Quelle est la géométrie la plus économe de neutron ?

La sphère est la géométrie qui présente le minimum de surface pour un même volume. Le rapport S/V y est minimal. Les réacteurs sont donc construits avec une forme si possible cylindrique, forme la plus proche de la sphère (et d'ailleurs avec un rapport H/R qui minimise le rapport S/V).

5. Formule des quatre facteurs, avec la définition de chaque facteur.

Formule des 4 facteurs : $K_{00} = \epsilon p f \eta$

Coefficient de fission rapide :

$$\epsilon = \frac{\text{nombre de neutrons candidats au ralentissement}}{\text{nombre de neutrons issus de fissions thermiques}}$$

facteur anti-trappe :

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

facteur d'utilisation thermique :

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

facteur de régénération :

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

6. De quel phénomène tient compte ϵ ? Donnez son ordre de grandeur.

Soit un nombre N_{RTH} de neutrons rapides issus de fissions thermiques. Nés dans le combustible, et à ces énergies, ces neutrons peuvent faire quelques fissions rapides avec l' U^{238} . Chaque fission donnant naissance à 2 à 3 neutrons rapides, le nombre de neutrons rapides N_R est donc légèrement supérieur à N_{RTH} ; on notera ϵ , **facteur de fissions rapides**, le terme correctif :

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

Il est usuellement compris entre **1,03** et **1,08**. Pour les REP EDF, il est de **1,05**

7. Ce facteur varie-t-il avec l'enrichissement ou avec le rapport de modération ?

Il n'y a pas de formule simple pour calculer ce coefficient, qui dépend peu de la **modération** mais plutôt de la **taille des éléments combustibles** du fait du parcours à l'intérieur de la gaine, et de l'enrichissement.

8. De quel phénomène tient compte p ? Donnez son ordre de grandeur.

Le facteur antitrappe (p) mesure la **probabilité pour un neutron d'échapper aux captures par l'uranium 238 pendant son ralentissement**. Il représente les conséquences des phénomènes se déroulant dans le domaine épithermique, les neutrons étant en cours de ralentissement.

Il dépend du **rapport de modération** qui représente le rapport entre la quantité de modérateur (nombre de Noyaux de modérateur soit $N_{\text{mod}} \times V_{\text{mod}}$) par rapport à la quantité de combustible (nombre de Noyaux de combustible soit $N_{\text{comb}} \times V_{\text{comb}}$).

Lorsqu'il y a beaucoup de modérateur dans le cœur (rapport de modération grand), les neutrons rapides sont mieux ralentis et leurs chances d'échapper aux captures de l'U238 augmentent.

9. Ce facteur varie-t-il avec l'enrichissement, avec le rapport de modération ?

- **L'enrichissement en U235.** Pour de l'U5 pur, la valeur maximale de p est 1 : dans ce cas, tous les neutrons rapides arriveraient dans le domaine thermique. Dans la réalité, p varie entre 0,7 et 0,9 (uranium très enrichi). Plus l'uranium sera enrichi, moins il y aura d'U238, donc plus p sera grand.
- **La qualité du modérateur :** pour ralentir les neutrons avec le moins de chocs possibles, on utilisera des corps légers tels que le carbone, l'eau légère ou l'eau lourde.
- **La quantité de modérateur (ou rapport de modération) :** si la quantité de modérateur est faible, les neutrons seront mal ralentis en présence de nombreux noyaux d'uranium 238.

10. De quel phénomène tient compte f ? Donnez son ordre de grandeur.

Ce facteur représente la **fraction** des neutrons thermiques qui sont absorbés **dans le combustible**. La valeur maximale de f est 1, cas idéal où tous les neutrons thermiques seraient absorbés par le combustible.

Le facteur (f) est un **facteur pilotable** par les opérateurs. Il varie de 0,95 à des valeurs assez faibles.

10. Ce facteur varie-t-il avec l'enrichissement ou avec le rapport de modération ?

Le facteur f varie avec le **rapport de modération** puisqu'il offre plus ou moins de **choix au neutron entre l'eau ou le combustible**. En plus il dépend un peu de l'enrichissement, l'U5 étant plus absorbant que l'U8. Cet effet n'est pas pilotable puisque le combustible est choisi dès la conception de la centrale.

11. Comment le facteur (f) peut-il varier ? Est-il pilotable ?

Une **chute de grappes**, ou une **injection de bore**, se traduit par une diminution de f. Lors d'un arrêt d'urgence par insertion des grappes d'absorption, c'est la forte diminution de f qui provoque l'étouffement de la réaction (K_{eff} devient ainsi largement inférieur à 1).

12. De quel phénomène tient compte le η ? Donnez son ordre de grandeur.

Le facteur de régénération représente le **nombre de neutrons rapides produits**, par neutron **absorbé dans le combustible**. Le facteur de régénération peut s'écrire sous la forme :

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

13. Ce facteur varie-t-il avec l'enrichissement ou le rapport de modération ?

Les valeurs numériques les plus significatives sont :

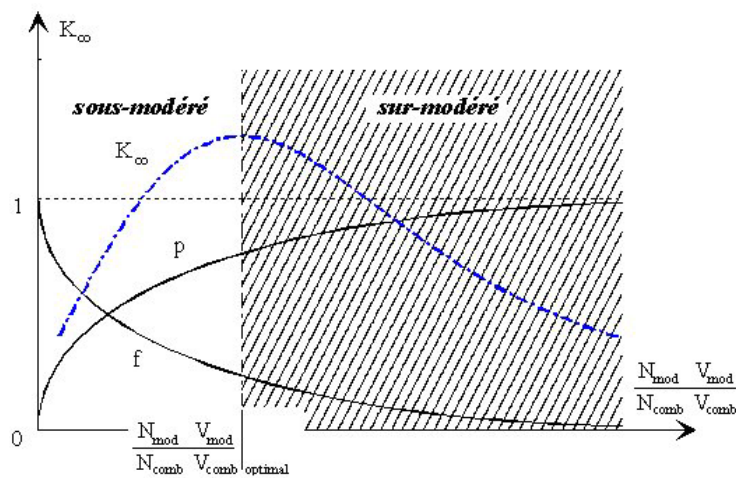
| | |
|--------------------------------|---------------|
| $e = 0,7 \%$ (uranium naturel) | $\eta = 1,34$ |
| $e = 3 \%$ (réacteurs EDF) | $\eta = 1,8$ |
| $e = 100 \%$ (uranium 235 pur) | $\eta = 2,09$ |

Il suffit d'un faible enrichissement pour que η augmente de façon significative. Au delà de 5 %, l'enrichissement n'apporte plus grand chose au regard du coût financier que représente l'usine d'enrichissement.

La valeur maximale de η est obtenue pour $e_5 = 100$ %. La valeur minimale correspond à celle de l'uranium naturel (enrichissement 0,7 %) : $\eta_{\min} = 1,34$

14. Influence du rapport de modération sur le K_{eff} .

Le graphique doit être discuté lors d'une montée de température du modérateur;



15. Pourquoi doit-on fonctionner en réacteur sous-modéré ?

Le **rapport de modération** représente le rapport entre la quantité de modérateur (nombre de Noyaux de modérateur soit $N_{\text{mod}} \times V_{\text{mod}}$) par rapport à la quantité de combustible (nombre de Noyaux de combustible soit $N_{\text{comb}} \times V_{\text{comb}}$).

Si l'on effectue un calcul détaillé, l'importance du rapport de modération fait intervenir beaucoup de paramètres, dont l'effet relatif des largeurs des résonances par rapport à l'efficacité du ralentissement (sauts moyens en énergie).

Pour garantir sûreté et autosabilité du cœur en fonctionnement. Les autorités de sûreté l'impose, le constructeur doit le **vérifier** en permanence, et spécialement à froid au maximum de réactivité.

16. Ordre de grandeur du rapport de modération optimal pour un REP ?

Il est de l'ordre de 2.

17. Le Keff est-il relié à la puissance extraite ?

La criticité ne donne **aucune information sur le niveau de puissance**.
On peut être critique à puissance nulle comme à pleine puissance.

Seule information, la population reste constante à la criticité. Elle augmente en fonction du Keff et du niveau initial.

18. Comment faire varier le niveau de puissance produit ?

En extrayant de la puissance, on diminue la température au niveau de l'échangeur, donc on refroidit le caloporteur. **Le rapport de modération augmente**. On pourra refaire le raisonnement en cas de diminution d'extraction de puissance...

Les neutrons sont donc placés dans une **configuration sous-modérée** où le Keff passe supérieur à 1...

Les contre réactions feront le reste (*voir plus tard les effets de température*).