

Questions à réviser

Usure du combustible

1. Définition des JEPP.

Pour pouvoir bénéficier d'une échelle commune à l'usure neutronique et à l'usure technologique, on emploie les Jours Equivalents Pleine Puissance (ou JEPP). On part du principe que l'usure neutronique comme technologique est proportionnelle au flux neutronique donc à la puissance produite. Un réacteur fonctionnant un jour à pleine puissance s'use de la même façon qu'un réacteur fonctionnant à mi-puissance pendant deux jours. On parle aussi de Jours Equivalents Puissance Nominale JEPN (ou puissance contractuelle JEPC).

2. Importance des captures stériles de l'U235 et fertiles de l'U238.

L'uranium 235 peut conduire lors d'une absorption à des fissions mais aussi à des captures stériles puisque l'U236 n'est pas fissile. Une partie (15%) des absorptions ne sert ni à la production de puissance, ni au renouvellement du combustible. Il faut en tenir compte dans le bilan matière : seuls 85% de l'uranium 235 conduira à des fissions donc à un renouvellement de la population neutronique.

En revanche l'U238 conduit la plupart du temps (peu de fissions rapides) à des absorptions captures. L'U239 produit ainsi évolue rapidement en Np239 (23 mn) puis en Pu239, en 2.3 jours. Le plutonium ainsi produit permet un renouvellement partiel du combustible. On parle de taux de conversion ($C=0.6$ pour un REP), ou de régénération partielle. Seuls les réacteurs rapides sont surgénérateurs. Par leur conception, on produit plus de Pu239 que l'on ne consomme de matière fissile. En revanche l'apparition de Pu239 modifie les effets de résonance à 0.3 eV dans le domaine thermique. Cet effet est bien connu dans les réacteurs à modérateurs solides (graphite des UNGG).

3. Compétition entre U235 et Pu239 pour la production d'énergie.

Les fissions de l'U235 et du Pu239 donnent pratiquement le même bilan en énergie, soit 200 MeV. En revanche la section d'absorption du Pu (1100 barns) étant plus importante que celle de l'U235 (680 barns), les fissions du Pu deviennent de plus en plus importantes avec le taux de combustion. On constate qu'un réacteur UOX produit 20 à 30 % de son énergie en fin de cycle grâce au Pu qui s'y est formé. Un réacteur MOXé évidemment un peu plus. Dans le même bilan matière, on observe la formation de Pu240 (absorptions captures) et de Pu241 (idem) donc la possibilité de produire de l'énergie par le Pu241 formé (quelques % seulement).

4. Facteur de conversion.

Le **facteur de conversion** est le rapport entre le nombre de noyaux fissiles formés (U 233, Pu 239, Pu 241) et le nombre de noyaux fissiles consommés.

$$C = \frac{\text{taux de réaction de capture fertile}}{\text{taux de réaction d'absorption fissile}}$$

Plus ce rapport est grand, plus le réacteur fournira de combustible de remplacement. Si ce rapport devient supérieur à un, nous serons en présence d'un surgénérateur (possible uniquement avec des neutrons rapides). Pour les réacteurs thermiques à eau, il est de l'ordre de 0,6. Le rapport du nombre de noyaux excédentaires produits (noyaux produits - noyaux consommés) au nombre de noyaux fissiles consommés est appelé **facteur de surgénération**, noté S ($S = C - 1$).

5. Energies disponibles, énergies fournies, durée de vie.

L'énergie que doit fournir le cœur est : $E_i = P \cdot J \cdot 24 \cdot 3600$

où : P est la puissance nominale (*ou contractuelle*) du réacteur en Watts

J est le nombre de JEPP

24 convertit J en heures, 3600 convertit (J . 24) en secondes

d'où : $E_i = P \cdot J \cdot 86400$ avec E_i en Joules

L'énergie fournie par le combustible, notée E_{fc} (Energie fournie par le cœur), est égale au produit du nombre de fissions par l'énergie libérée lorsqu'un noyau fissionne (E_f) : $E_{fc} = \text{nombre de fissions} \cdot E_f$

E_f est l'énergie libérée par la fission d'un noyau soit environ 200 MeV. Le **nombre de fissions** est égal au **nombre de noyaux disparaissant par fission**. En corrigeant des captures on trouve :

$$E_{fc} = N_{\text{cons}} \cdot \frac{\sigma_f}{\sigma_a} \cdot E_f \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ où } E_{fc} \text{ est en Joules et } E_f \text{ en MeV}$$

L'énergie fournie par le combustible, E_{fc} , doit être égale (*ou supérieure*) à l'énergie (*imposée*) que doit fournir la combustible E_i .

$$E_{fc} = E_i \quad N_{\text{cons}} \cdot \frac{\sigma_f}{\sigma_a} \cdot E_f \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} = P \cdot J \cdot 86400$$

$$\text{donc : } P \cdot J = N_{\text{cons}} \cdot \frac{\sigma_f}{\sigma_a} \cdot E_f \cdot K \quad (1) \quad \text{où } K \text{ est une constante.}$$

L'énergie fournie par le cœur (P.J) est proportionnelle au nombre de noyaux fissiles consommés. $N_{\text{cons}} = N_{\text{fi}} - N_{\text{ff}}$

où: N_{fi} = nombre de noyaux fissiles en début de vie
 N_{ff} = nombre de noyaux fissiles en fin de vie

N_{ff} , le **nombre de noyaux fissiles en fin de vie**, ne saurait être nul.

Un réacteur ne peut en aucun cas consommer la totalité de ses noyaux fissiles.

En tenant compte des enrichissements en début et en fin de cycle :

$$P.J = M_c \cdot (e_i - e_f) \cdot \text{constante}$$

6. Comment augmenter la durée de vie

L'énergie que peut fournir un cœur est proportionnelle à :

- La **masse** de combustible.
- La **différence** entre les enrichissements initial et final.

Pour **augmenter la durée de vie d'un réacteur** on peut :

- **augmenter la masse du combustible** (*soit augmenter la taille du réacteur*),
- **augmenter l'enrichissement initial**,
- **diminuer l'enrichissement final**, en concevant un cœur qui soit critique avec le moins de noyaux fissiles possible.

7. effets de l'irradiation neutronique sur la tenue des gaines

Les gaines, première barrière de confinement des produits de fission, doivent absolument, durant toute la vie du combustible, garder leur intégrité. Elles sont soumises à un flux neutronique (*d'environ $10^{14} \text{ n/cm}^2.\text{s}$*) et radiatif très intenses, et à température très élevée (*de 300°C à l'extérieur du crayon combustible à plus de 500°C à l'intérieur en fonctionnement normal*). Le **zirconium** est un matériau qui supporte tout de même bien l'irradiation. On risque donc :

- **fissurations, voire ruptures**, avec pour conséquence l'entraînement de produits de fission dans le circuit primaire.
- **déformation par fluage** (*déformation plastique*), d'où perturbation de l'écoulement du fluide caloporteur ou blocages des barres de contrôle.

8. Effets de l'usure neutronique sur les pastilles de combustible

Le combustible, soumis à des contraintes très fortes (*flux neutronique supérieur à $10^{14} \text{ n / (cm}^2.\text{s)}$, et température de plus de 1000°C*) ne peut, en cours de fonctionnement, garder, en totalité son intégrité. En fait le combustible va gonfler (*par inclusion de gaz*), se déformer, se fissurer, et peut même, en son centre (*là où la température est la plus élevée*), fondre.

9. Effets des diffusions élastiques sur les aciers, notion de DPA.

Le bombardement neutronique entraîne un **déplacement des noyaux par cascade**. Les dommages causés par l'irradiation sont évalués par le **nombre de déplacement par atome (D.P.A)**. Les aciers austénitiques peuvent supporter près de 8 DPA. Les conditions thermiques sous contrainte permettent toutefois des réarrangements par diffusion atomique.

10. Taux de combustion : définitions, ordres de grandeurs (filières).

Le taux de combustion, noté τ , est la **quantité d'énergie fournie par une tonne de combustible**. Par tonne de combustible, on entend tout ce qui se trouve dans la gaine :

- la masse de l'uranium 235 et 238, plus la masse de l'oxygène
- plus la masse des produits de fission
- plus la masse des transuraniens (Pu239, Pu240,... U236, U237,...)

$$\tau = \frac{P.J}{M_c}$$

P est la puissance du réacteur en [MW], J est le nombre de JEPP en [jour], M_c est la masse de combustible en [tonne], τ est le taux de combustion en [MW.j / t]

Le taux de combustion relate la "*vieillesse du cœur*", et les évolutions des **différentes caractéristiques d'un réacteur** sont présentées en fonction de ce taux de combustion. Toutes les limites technologiques sont limitées par le taux de combustion maximal, **fixé par les autorités de sûreté** :

R.E.P. :	max = 50000 MW.j / t
U.N.G.G. :	max = 5000 MW.j / t
R.N.R. :	max = 100000 MW.j / t

11. Durée de vie et gestion d'un chargement

Il peut être avantageux de profiter des zones les plus riches en neutron, donc de flux élevé pour y placer les assemblages les moins riches, assurant ainsi une usure maximale ; et de disposer les assemblages les plus riches dans les zones où le flux est le plus faible. Cette disposition aurait l'avantage d'uniformiser le niveau de puissance (éviter les pics de puissance) et d'optimiser l'usure du combustible : d'où un prix du Kwh minimal. On doit optimiser les périodes de rechargement tout en surveillant le taux de combustion moyen du groupe d'assemblage qui suit le cycle. En même temps il faut surveiller le taux de combustion maximal des différents éléments, pour ne pas le dépasser.

La politique actuelle de rechargement d'EdF consiste à gérer le combustible par cycles de 18 mois en trois étapes, de l'extérieur vers l'intérieur. On appelle cette gestion out-in. Pour protéger les vieilles cuves de l'usure neutronique, on revient parfois à une gestion in-out.

