

## QUESTIONS D'EXAMEN

### RÉACTEUR CRITIQUE À PUISSANCE DE PRODUCTION ÉLECTRIQUE STABLE

1. Énumérer les particules et le rayonnement produits par la fission « au moment » de la fission, et ceux produits par la désintégration subséquente des produits de fission.
2. Décrire comment les 200 MeV (par fission) déposés dans le réacteur sont répartis parmi toutes les sources d'énergie instantanée et retardée qui résultent de la fission.
3. Comparer les expressions « facteur de multiplication des cellules unités » et « facteur de multiplication neutronique efficace », en établissant une distinction claire entre les deux.
4. Expliquer en quoi les caractéristiques du réacteur CANDU modifient les éléments suivants :
  - (a) Facteur de fission rapide
  - (b) Facteur antitrappe
  - (c) Facteur d'utilisation thermique
  - (d) Facteur de reproduction
  - (e) Probabilités de non-fuite (rapide et thermique)
5. Pourquoi le pas du réseau a-t-il une incidence sur la réactivité?
6. Expliquer pourquoi l'eau ordinaire ( $H_2O$ ) ne convient pas comme modérateur dans les réacteurs CANDU, mais est tout à fait acceptable pour les réacteurs qui utilisent du combustible enrichi.
7. Définir les notions suivantes :
  - (a) Réactivité
  - (b) Valeur de réactivité
  - (c) Excédent de réactivité du coeur (tel qu'employé dans les centrales CANDU)
  - (d) Réactivité de réglage
8. Définir l'expression coupe macroscopique, et expliquer ce qu'on entend par libre parcours moyen.
9. Donner la formule de la vitesse de réaction par volume unitaire de certaines matières dans un réacteur, avec un flux =  $\phi$  neutrons/( $cm^2$  s).
10. Dans une réaction nucléaire particulière, la somme des masses des réactifs originaux est

« plus grande » que la somme des masses des produits par 0,0043 u. Utiliser la formule  $E = mc^2$  pour calculer le dégagement d'énergie (en MeV).  
(1 u =  $1,66 \times 10^{-27}$  kg; 1 MeV =  $1,6 \times 10^{-13}$  J; vitesse de la lumière =  $3 \times 10^8$  m/s).

11. Donner la séquence des réactions qui permettent d'obtenir du Pu 239 à partir de U-238.
12. Le tableau suivant précise les sections efficaces des neutrons thermiques de U-235 et U-238 pour la diffusion élastique, la capture radiative et la fission (les sections efficaces sont indiquées en barns). Le tableau indique également le nombre moyen de neutrons par fission ( $\nu$ ).

	$\sigma_s$	$\sigma_{n,\gamma}$	$\sigma_f$	$\nu$
<b>U-235</b>	17,6	98,3	580,2	2,43
<b>U-238</b>	10,0	2,71	0	0

- (a) Si un neutron thermique frappe un noyau de U-235, quelle est la probabilité que la fission se produise?
- (b) Quelle est la probabilité qu'un neutron thermique qui se déplace dans un milieu infini d'uranium naturel conduise éventuellement à une fission (rapport isotopique de U-235 dans l'uranium naturel = 0,72 %).
- (c) Calculer la valeur de  $k_\infty$  pour l'uranium naturel, en supposant que tous les neutrons en cause (ceux qui causent une fission et ceux qui sont produits par la fission) sont des neutrons thermiques.

## QUESTIONS D'EXAMEN

### RÉPONSE DU RÉACTEUR CRITIQUE À UN CHANGEMENT DE RÉACTIVITÉ

1. Définir le taux-log et la constante de temps du réacteur et préciser le rapport qui existe entre elles.
2. Expliquer comment les neutrons retardés affectent la commande du réacteur.
3. Définir les expressions suivantes et expliquer comment ces phénomènes surviennent :
  - a) saut prompt
  - b) chute prompte
4. Dans un réacteur à faible puissance, comparer le changement qui survient dans le réacteur de puissance à la suite d'une insertion de réactivité positive très petite et celui qui est observé à la suite d'une insertion beaucoup plus grande (qui est tout de même trop faible pour causer une criticité instantanée).
5. Expliquer pourquoi la puissance du réacteur connaît d'abord une baisse rapide suite à une grande insertion de réactivité négative, puis continue à diminuer beaucoup plus lentement.
6. Définir la notion de « criticité instantanée » et donner une idée approximative de l'insertion de réactivité qui la cause.
7. L'effet des neutrons retardés sur la facilité de commande d'un CANDU alimenté à l'équilibre devient négligeable lorsque le réacteur devient supercritique d'environ 5 mk. Expliquer pourquoi.
8. Au temps  $t = 0$ , une variation brusque positive de réactivité, d'une grandeur de  $\Delta k \ll \beta$  survient dans un réacteur exploité à faible puissance  $P_0$ . Formuler l'expression de la puissance au temps  $t$  après la variation.
9. Un réacteur alimenté à l'équilibre ( $\beta \approx 0,005$ ) est critique à 40 % de la pleine puissance lorsqu'il reçoit une insertion de + 0,1 mk de réactivité. Ne pas tenir compte des effets de réaction.
  - (a) Calculer l'ampleur du saut prompt.
  - (b) Calculer la période stable.
  - (c) Calculer la puissance du réacteur après 30 secondes.

## QUESTIONS D'EXAMEN

### SENSIBILITÉ DU RÉACTEUR SOUS-CRITIQUE

1. Définir le facteur de multiplication sous-critique.
2. Expliquer comment la multiplication sous-critique d'une source de neutrons cause :
  - a) Un niveau de puissance stationnaire observable qui est plus important que la source.
  - b) Un changement du niveau de puissance à la suite d'un changement de réactivité qui laisse le cœur dans un état sous-critique.
3. Choisir l'énoncé (a) à (d) qui complète correctement la phrase suivante, puis justifier ce choix d'après vos connaissances de la théorie fondamentale du réacteur.

Le changement dans la puissance neutronique résultant d'un apport de réactivité par paliers de 1 mk de réactivité positive dans un réacteur, lorsque  $k = 0,998$  diffère du changement résultant de la *même* insertion de 1 mk lorsque  $k = 0,900$ , en raison du fait que, pour  $k = 0,998$ , le changement est :

- a) Plus grand et met plus de temps à atteindre la puissance d'équilibre;
  - b) Plus petit et met moins de temps à atteindre la puissance d'équilibre;
  - c) Plus grand et met moins de temps à atteindre la puissance d'équilibre;
  - d) Plus petit et met plus de temps à atteindre la puissance d'équilibre.
4. Décrire la réponse à un changement de réactivité qui survient dans le cœur sous-critique et expliquer pourquoi la réponse dynamique diffère pour un réacteur fortement sous-critique et pour un réacteur qui est presque critique. (Le réacteur demeure sous-critique à la suite de chaque addition de réactivité).
  5. Soit un réacteur alimenté à l'équilibre sous-critique ( $\beta \approx 0,005$ ) qui a été mis à l'arrêt pendant 3 semaines. L'intensité de la source est  $P_{\text{source}} = 10^{-7}$  de la PP et  $k = 0,9995$ .
    - a) Quel pourcentage de tous les neutrons sont des neutrons émis par la source?
    - b) Quel pourcentage de tous les neutrons sont des neutrons de fission?
    - c) Quel pourcentage de tous les neutrons sont des neutrons retardés?

## QUESTIONS D'EXAMEN

### EFFETS DE LA TEMPÉRATURE ET DU VIDAGE SUR LA RÉACTIVITÉ DU COEUR

Expliquer ce qu'on entend par « coefficient de température »

1. Donner les températures d'exploitation approximatives courantes du combustible, du modérateur et du caloporteur dans un réacteur CANDU dans les états de fonctionnement suivants :
  - (a) Mis à l'arrêt et refroidi
  - (b) Mis à l'arrêt à chaud (puissance zéro chaud)
  - (c) Pleine puissance
2. Décrire l'effet d'une élévation de la température des neutrons thermique sur l'absorption dans les isotopes fissiles U-235 et Pu-239.
3. Nommer et expliquer le principal phénomène qui donne un coefficient de température négatif.
4. Expliquer l'effet, sur la réactivité, d'un changement de température :
  - a) du combustible
  - b) du modérateur
  - c) du caloporteur
5. Utiliser les graphiques de la réactivité en fonction de la température dans le manuel (pour le combustible, le modérateur et le caloporteur) en vue de déterminer le changement de réactivité pour :
  - (a) le réchauffement du circuit caloporteur, de la puissance froide à la puissance zéro chaude
  - (b) une diminution de la puissance unitaire, qui passe de la pleine puissance à la puissance zéro chaude
6. Comparer les durées des changements de réactivité dus aux changements qui surviennent dans le modérateur, le caloporteur et la température du combustible, à la suite d'une augmentation de puissance.
7. Définir les expressions suivantes « coefficient de puissance » et « réactivité du vide ».
8. Expliquer en quoi le coefficient de puissance CANDU affecte :
  - (a) la régulation normale
  - (b) le transitoire de puissance suite à une perturbation importante

9. Expliquer comment l'expulsion du caloporteur augmente simultanément la fission rapide et diminue la capture de résonance.
10. Expliquer comment la température des neutrons thermiques change en fonction de l'expulsion du caloporteur et préciser les effets des taux d'absorption des neutrons thermiques.
11. Expliquer pourquoi la perte de caloporteur provenant d'un canal de combustible de CANDU augmente la réactivité.
12. Nommer les principales perturbations importantes qui déterminent les limites inférieure et supérieure des isotopes dans le caloporteur, et pour chacune, décrire comment la limite augmente.

## QUESTIONS D'EXAMEN

### EFFETS DES PRODUITS DE FISSION SUR LA RÉACTIVITÉ DU COEUR

1. Nommer les deux produits de fission de saturation les plus importants sur le plan de l'exploitation, et pour chacun d'eux, donner la liste des propriétés qui en font un produit de fission important.
2. Formuler les équations des processus nucléaires de production de l'iode 135 et du xénon 135, et de leur enlèvement du combustible.
3. Sur un même graphique, dessiner les courbes d'accumulation de la charge d'iode en fonction du temps et de la charge de xénon en fonction du temps à la suite d'un redémarrage sans xénon ou sans iode dans le coeur.
4. Sur un même graphique, dessiner la variation de la charge d'iode en fonction du temps et la charge de xénon en fonction du temps suite à un déclenchement des conditions de régime permanent à l'équilibre pleine puissance. Sur le graphique, indiquer le moment approximatif du maximum du xénon, l'ampleur approximative du maximum et la durée approximative qui s'écoule avant le redémarrage du réacteur.
5. Donner la signification de chacun des termes suivants :
  - a) Empoisonnement
  - b) Opération de prévention de l'empoisonnement
  - c) Capacité de dépassement de l'empoisonnement
  - d) Durée du dépassement de l'empoisonnement
  - e) Décision et temps d'intervention
6. Formuler les équations décrivant le taux de variation de l'iode et du xénon dans un réacteur CANDU. Calculer la concentration d'iode à l'équilibre et indiquer le pourcentage (à pleine puissance) de chacun des termes xénon.
7. Dessiner le transitoire de réactivité qui suit une augmentation de puissance et une diminution de puissance dans un réacteur exploité à un niveau de puissance élevé constant. Préciser les problèmes opérationnels qui pourraient survenir dans ces deux situations.
8. Quelles sont les deux conditions qui déterminent si des oscillations du xénon vont se produire dans un réacteur?
9. Décrire le phénomène d'oscillation du xénon.
10. Expliquer comment les oscillations sont contrôlées dans un réacteur CANDU et expliquer comment une oscillation non contrôlée pourrait se produire.

11. Comparer les effets opérationnels du samarium et ceux du xénon et ceux des phénomènes suivants :
- a) Accumulation initiale
  - b) Dépendance du niveau d'équilibre par rapport au flux
  - c) Transitoire suivant un déclenchement ou une mise à l'arrêt
  - d) Retour à l'équilibre à la suite d'un redémarrage
  - e) Transitoires aux changements de puissance

## QUESTIONS D'EXAMEN

### EFFETS DE L'IRRADIATION DU COMBUSTIBLE ET DU RECHARGEMENT DU COMBUSTIBLE EN MARCHE SUR LA RÉACTIVITÉ DU COEUR

1. Énumérer les principales caractéristiques associées à un chargement de combustible en marche pour le maintien de la réactivité du coeur.
2. Donner la définition des termes suivants :
  - (a) Combustible neuf
  - (b) combustion du combustible
  - (c) chargement du réacteur à l'équilibre
2. Expliquer pourquoi les expressions
3. suivantes utilisées pour décrire la « combustion » du combustible ne sont pas exactement proportionnelles les unes aux autres.
  - (a) Énergie thermique extraite par unité de masse d'uranium en unités MWh/kgU;
  - (b) Exposition neutronique totale du combustible (flux  $\times$  temps) en unités n/kb.
4. Expliquer la distinction opérationnelle qui existe entre les « produits de fission de saturation » et les « produits de fission de non-saturation »
5. Pour le graphique dans le texte indiquant le changement de réactivité d'une grappe de combustible avec l'irradiation, expliquer l'allure du graphique selon les aspects suivants :
  - a) Combustion de U-235 et croissance de Pu-239
  - b) Accumulation du Pu-240 et du Pu-241
  - c) Augmentation de la quantité de produits de fission

La fission complète de 1 g de U-235 produit 1 MW-jour d'énergie thermique. Comme l'uranium naturel contient seulement 0,72 % d'U235, il s'ensuit qu'environ 140 g d'uranium naturel est requis pour produire 1 MW-jour. Donner les deux principales raisons pour lesquelles le calcul du taux de rechargement du combustible dans un réacteur CANDU en exploitation à l'aide de ces données seulement n'est pas correct.

## QUESTIONS D'EXAMEN

### FONCTIONNEMENT DU RÉACTEUR À FAIBLE PUISSANCE

1. Énumérer les trois principales raisons de la non-linéarité entre les neutrons et la puissance thermique.
2. Lorsqu'un réacteur CANDU est mis à l'arrêt après avoir fonctionné pendant une longue période, la décélération de puissance peut être divisée en trois phases. Ces phases sont de 0 à 0,1 seconde; de 0,1 seconde à 10 minutes et de 10 minutes et plus.
  - (a) Expliquer pourquoi la durée de la première phase est aussi courte.
  - (b) Évaluer l'ampleur de la baisse de puissance initiale (la chute instantanée) pour un réacteur alimenté à l'équilibre.
  - (c) Discuter de la composition du nombre volumique de neutrons (en termes de neutrons instantanés, de neutrons retardés, de photo-neutrons, et de neutrons de fission spontanée) durant chacune de ces phases.
3. Donner la valeur approximative de la chaleur de désintégration à pleine puissance, et à 3 minutes et à 60 minutes après un déclenchement à pleine puissance.
4. Comparer la décélération de la puissance thermique avec la décélération de la puissance neutronique en termes de :
  - a) Taux de chute initial
  - b) Durée
5. Identifier les changements de réactivité qui surviennent dans un réacteur après sa mise à l'arrêt suite à une exploitation prolongée et, pour chacun, indiquer :
  - a) le signe
  - b) l'ampleur approximative
  - c) l'échelle de temps
6. Pour amener un réacteur à l'état critique après une longue mise à l'arrêt, il est de règle de suivre l'évolution d'un graphique qui permet de prévoir la concentration critique de poison.
  - (a) Quelles sont les variables représentées dans ce graphique? Pourquoi obtient-on une courbe linéaire?
  - (b) Expliquer pourquoi les procédures de démarrage nécessitent une certaine surveillance du flux neutronique durant le démarrage et ne dépendent pas seulement des prévisions de la criticité faites à l'avance.
7. Lorsqu'un réacteur est maintenu à un état critique de faible puissance pendant une

- période prolongée, il peut y avoir certaines incertitudes, à savoir si le réacteur demeure critique. Préciser ce que le terme « critique » signifie dans ce contexte et expliquer l'incertitude.
8. Décrire la réponse de puissance d'un réacteur légèrement supercritique à faible puissance, et expliquer pourquoi la réponse change à mesure que la puissance s'approche de la dernière dizaine (valeur de la puissance du réacteur).

## QUESTIONS D'EXAMEN

### FONCTIONNEMENT DU RÉACTEUR À HAUTE PUISSANCE

1. Décrire les préoccupations possibles liées à un aplatissement inadéquat du flux.
2. Énumérer quatre façons de produire un aplatissement global du flux dans un réacteur CANDU et préciser pourquoi l'aplatissement du flux est important.
3. Expliquer comment les réacteurs CANDU atteignent un équilibre relatif du flux zone-à-zone et comment les « points chauds » localisés sont évités. Indiquer comment des pointes locales pourraient néanmoins se produire.
4. Décrire la réponse des zones liquides alors que les barres de compensation sont insérées entièrement jusqu'au moment où elles sont retirées entièrement. Dire pourquoi une limite quant à la puissance globale est imposée avec les barres de compensation hors du coeur.
5. Donner les différents sens des termes « variations de la puissance dues au chargement de combustible » et « CPPF ».
6. Donner les niveaux de puissance approximatifs au-dessus desquels l'exploitation du réacteur est affectée par :
  - a) le xénon transitoire
  - b) les oscillations du xénon