

## 19 Changements dans la puissance du réacteur au fil du temps

Dans les deux chapitres précédents, nous avons examiné comment les changements de réactivité font augmenter ou diminuer le flux de neutron et, par conséquent, comment ils changent la sortie de puissance thermique du combustible. Nous savons comment la population de neutrons peut changer d'une génération à une autre si le réacteur est supercritique ou sous-critique.

Le taux de changement de puissance est le facteur qui détermine le degré de difficulté de la régulation d'un réacteur, ou même si la régulation est possible. Dans ce chapitre, nous allons examiner les facteurs qui ont une incidence sur le taux de changement de la puissance du réacteur.

### 19.1 Effet de la durée de vie des neutrons sur les changements dans la puissance du réacteur

Nous avons vu que la masse volumique des neutrons, le flux neutronique et la puissance du réacteur augmentent ou diminuent d'une génération à une autre. Si  $k > 1$ , un niveau de puissance initial de  $P_0$  augmente à  $P_0 k$  dans une génération, à  $(P_0 k) \times k$  en deux générations, à  $P_0 k^3$  en trois générations et, après  $N$  générations, à  $P_0 k^N$ . La formule pour la puissance après  $N$  générations,  $P$ , est :

$$P = P_0 (k)^N = P_0 (1 + \Delta k)^N \quad (1)$$

Cela nous indique que si l'on débute avec la puissance  $P_0$ , et que nous insérons la réactivité  $\Delta k$ , la puissance devient  $P$  après  $N$  générations, tel qu'indiqué dans l'équation 1. La formule décrit la puissance comme étant le nombre de générations qui se sont écoulées, et non le temps.

Le temps  $t$  requis pour  $N$  générations est :

$$t = \ell \cdot N \quad \text{alors} \quad N = \frac{t}{\ell} \quad (2)$$

Dans cette équation,  $\ell$  est le temps moyen correspondant à une génération de neutrons. (1) et (2) ensemble calculent l'accroissement de puissance pendant le temps  $t$ . Nous allons montrer plus tard que dans des conditions d'exploitation normale,  $\ell \approx 0,1$  s pour un réacteur CANDU.

Exemple :

Supposons que la puissance du réacteur est régulière à 60 % PP lors d'une insertion de réactivité de  $\Delta k = +0,5 \text{ mk}$  (c.-à-d.  $k = 1,0005$ ). Jusqu'où ira la puissance en 100 secondes?

Solution :

À partir de (2)

$$N = 100 \text{ s} / 0,1 \text{ s} = 1000 \text{ générations}$$

À partir de (1)

$$P = 60 \% \times (1,0005)^{1000} = 60 \% \times 1,65 = 99 \%$$

### 19.2 Période du réacteur

Pour rendre le calcul plus facile (particulièrement avant l'existence des calculatrices), on écrivait l'équation 1 d'une manière différente :

$$P = P_0 e^{t/\tau} \quad (3)$$

On peut voir que les équations (1) et (3) sont identiques.

La constante  $\tau$  est la période du réacteur. Cette équation donne la puissance en termes de temps écoulé,  $t$ , et l'on obtient la période du réacteur.

Sur le plan pratique, pour avoir une idée de la rapidité avec laquelle la puissance change, on pourrait examiner le temps que cela prend pour que la puissance double, ou qu'elle augmente de dix fois, ou peu importe. L'équation (3) suppose que l'on utilise le temps que cela prend pour que la puissance change d'un facteur  $e$ . La puissance augmente d'un facteur  $e$ , c'est-à-dire  $P = e P_0$ , lorsque le temps  $t$  est égal à la période du réacteur  $\tau$ . Cela est notre définition de la période du réacteur : c'est le temps requis pour que la puissance augmente d'un facteur  $e$  ( $e = 2,718\ 281\ 828\ 5\dots$ ).

Pour certaines valeurs de réactivité faibles ( $\Delta k$ ) de l'exploitation normale, les équations (1) et (3) permettent d'obtenir des résultats identiques pour :

$$\tau = \ell / \Delta k \quad (4)$$

Si l'on répète l'exemple précédent,  $\tau = 0,1/0,0005 = 200$  s

$$P = 60 \% \times e^{100/200} = 60 \% \times e^{0,5} = 60 \% \times 1,65 = 99 \%$$

À noter que plus  $\Delta k$  est grand, plus la période du réacteur est courte et plus les changements de puissance sont rapides.

### 19.3 Effet des neutrons retardés sur le changement de puissance

Pour la fission de l'uranium 235, 99,35 % des neutrons produits sont des neutrons instantanés et 0,65 % sont des neutrons retardés émis par les produits de fission. Le temps requis pour une génération de neutrons instantanés est de 0,001 s. La durée de vie moyenne des neutrons retardés est de presque 13 secondes. La durée de vie moyenne,  $\ell$ , pour tous les neutrons, instantanés et retardés, est donc donnée par :

$$\ell = 0,9935 \times 0,001 \text{ s} + 0,0065 \times 13 \text{ s} = 0,085 \text{ secondes}$$

Pour simplifier la question, nous arrondissons habituellement la valeur de  $\ell$  à 0,1 s, comme nous l'avons fait dans un exemple précédent.

Bien que les neutrons retardés représentent une petite fraction (0,65 %) des neutrons générés par la fission, ils augmentent la durée de vie moyenne de tous les neutrons de 0,001 s à 0,085 s, c'est-à-dire d'un facteur de 85. L'équation (4) indique que la période est 85 fois plus longue que ce qu'elle serait pour  $\ell = 0,001$  s. Cela réduit le taux initial d'accroissement de la puissance d'un facteur de 85.

En résumé, l'effet des neutrons retardés consiste à ralentir le taux de changement de puissance de manière raisonnablement lente pour de petites additions de réactivité positive. Les neutrons retardés rendent la régulation et la protection pratiques.

### 19.4 Effet des neutrons instantanés considérés seuls, et criticité instantanée

Les équations de la période du réacteur et des changements de puissance (1, 2, 3 et 4) permettent de prévoir avec exactitude les changements de puissance en autant que  $\Delta k$  prenne une valeur faible, ce qui est propre aux additions de réactivité effectuées pour la régulation normale du réacteur. Ces équations ne s'appliquent pas du

tout aux grandes insertions de réactivité  $+\Delta k$  comme celles qui seraient utilisées pour calculer des conditions d'excursion de puissance ou d'accident.

Le réacteur en cause à Tchernobyl a démontré que le comportement d'un réacteur suite à une insertion soudaine de réactivité positive importante est dévastateur. Lors de cet accident, l'accroissement de puissance est passé d'un faible niveau à environ 10 000 pour cent de la pleine puissance en moins de 2 secondes. Pourquoi les neutrons retardés n'ont-ils pas limité le taux d'accroissement de la puissance? Dans la section qui suit, nous allons décrire les effets, ou l'absence d'effets, des neutrons retardés de manière plus approfondie, afin de répondre à cette question.

D'abord, examinons le rôle des neutrons retardés dans un réacteur à puissance constante ( $k = 1$ ). Supposons que nous pouvons « arrêter » 0,065 % des neutrons retardés. Si l'on débute avec 100 neutrons, après une génération il y aurait 99,35 neutrons (étant donné l'absence des neutrons retardés). Dans la deuxième génération, ce nombre diminuerait à 98,7 et au cours de la troisième génération, il aurait diminué à 98. La puissance décroît comme si le réacteur était sous-critique.

En fait, le réacteur dépend de l'arrivée des neutrons retardés avant « d'atteindre le maximum » de la population de neutrons et cela influe également sur l'état critique du réacteur. Lorsque  $+\Delta k$  est ajouté, tant que  $\Delta k$  est très faible, la puissance ne peut pas s'accroître très rapidement. La population de neutrons instantanés demeure légèrement « sous-critique » en soi. (Il est important que  $k \times 99,35$  soit inférieur à 100). Le maximum atteint grâce aux neutrons retardés augmente la puissance du réacteur, mais l'augmentation vers le « maximum » ne se produira que lorsqu'un nombre additionnel de neutrons retardés issus des produits de fission au niveau de puissance plus élevé commenceront à intervenir. Cela prend plusieurs secondes. L'arrivée lente des neutrons retardés contrôle le taux d'accroissement de puissance (en le diminuant d'un facteur d'environ 85, comme nous l'avons vu plus tôt).

Supposons maintenant une grande insertion de réactivité  $+\Delta k$  dans le cœur du réacteur. Les neutrons instantanés (multipliés par  $k$ ) augmentent suffisamment d'une génération à une autre et la puissance augmente même sans les neutrons retardés. La population de neutrons instantanés « prend le dessus » et la puissance augmente bien que le temps de génération des neutrons soit de  $\ell = 0,001$  s, soit la durée de vie des neutrons instantanés seuls, et non  $\ell = 0,085$  s, durée de vie moyenne que nous utilisions avant. On dit d'un réacteur dans cet état qu'il est critique instantané, c'est-à-dire qu'il est critique à cause des neutrons instantanés seuls. C'est ce type d'accroissement rapide de la puissance qui a causé l'explosion du cœur à Tchernobyl.

Le taux d'accroissement de la puissance d'un réacteur critique instantané peut être illustré à l'aide de l'exemple précédent où  $\ell = 0,001$  s. Nous calculerons l'accroissement de puissance en une seconde plutôt qu'en cent secondes.

Pour une insertion de réactivité positive de  $0,5$  mk, la période du réacteur est donnée par :

$$T = \frac{\ell}{\Delta k} = \frac{0,001}{0,0005} = 2 \text{ secondes}$$

En une seconde, l'accroissement de puissance serait celui donné par l'équation (3), c'est-à-dire :

$$P = P_0 e^{t/\tau} = P_0 e^{1/2} = P_0 \times 1,65$$

Pour  $P_0 = 60$  %, cela donne un accroissement de puissance de presque 100 % en une seconde, plutôt qu'en 100 secondes. (Pour Tchernobyl, l'addition de réactivité était d'environ 25 mk de plus que la réactivité requise pour atteindre la criticité instantanée.)

Cet exemple illustre la rapidité avec laquelle l'accroissement de puissance se produirait, même pour des changements de réactivité inférieurs à 1 mk, si tous les neutrons étaient instantanés. La régulation efficace du réacteur n'est pas possible dans ces circonstances, parce que les changements de puissance à cause d'effets de faibles insertions de réactivité se produisent trop rapidement pour que le système de régulation puisse réagir.

L'arrêt d'urgence du réacteur poserait encore des problèmes plus grands. Même dans le cas des systèmes de protection très rapides, on doit compter une seconde ou à peu près pour que ceux-ci entrent en action. Dans cet intervalle de temps relativement long, des dommages importants pourraient être causés à cause des niveaux de puissance excessifs qui auraient été atteints.

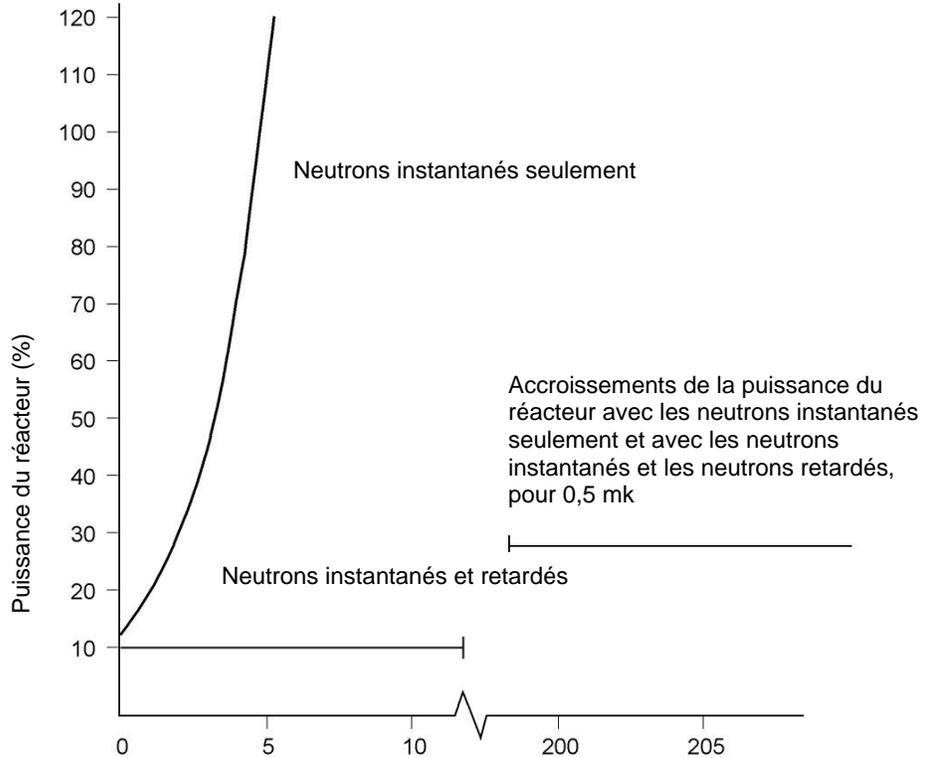


Figure 19.1

La figure 19.1 illustre l'accroissement de puissance pour une insertion de réactivité de + 0,5 mk, compte tenu des neutrons instantanés seulement, d'une part, et des neutrons retardés d'autre part.

### 19.5 Puissance dans le réacteur sous-critique

Lorsque que  $k$  est inférieur à un ( $\Delta k$  négatif), la puissance diminue d'une génération à l'autre. D'après ce que nous avons vu précédemment, la puissance devrait diminuer à 0. Curieusement, ce n'est pas ce qui se produit. D'abord, nous allons décrire comment se comporte le réacteur sous-critique, puis nous en donnerons les raisons.

Lorsque le réacteur est fortement sous-critique ( $\Delta k$  est grand et négatif), la puissance est stable à un très faible niveau. Si le réacteur n'était pas aussi fortement sous-critique, sa puissance serait stable à un niveau plus élevé. L'addition de réactivité positive à un réacteur sous-critique (ce qui correspond à un  $\Delta k$  négatif) provoque un accroissement de puissance et une stabilisation à un niveau plus élevé. Contrairement au réacteur critique, il n'a pas de réaction en chaîne auto-entretenu qui augmentera la puissance encore et encore.

Le réacteur fortement sous-critique est presque sans réaction; les grandes insertions de réactivité positive qui normalement seraient dangereuses dans un réacteur critique n'ont presque aucun effet. Un réacteur sous-critique qui est presque critique répond beaucoup comme un réacteur critique; c'est-à-dire que même une petite addition de réactivité peut produire un grand accroissement de puissance, où l'accroissement de puissance se produirait graduellement pendant plusieurs minutes. Tant que l'addition de réactivité laisse le cœur sous-critique, la puissance se stabilise à un niveau plus élevé et ne continue pas d'augmenter.

Ce comportement résulte de la réaction des photoneutrons. Certains produits de fission émettent des rayons gamma énergétiques qui éjectent des neutrons provenant du deutérium dans les molécules d'eau lourde. Lorsque le réacteur est mis à l'arrêt, c'est-à-dire lorsque  $\Delta k$  négatif est introduit pour arrêter la réaction en chaîne, la source de neutron ne peut pas être arrêtée. Il y a toujours quelques photoneutrons.

Les photoneutrons peuvent pénétrer dans le combustible et causer la fission. Les neutrons imputables à ces fissions causent également d'autres fissions. (Moins d'un neutron par fission survit, étant donné que  $k$  est inférieur à un.). Cela donne lieu à un flux de neutron plus grand que le flux de neutron de la source à elle seule. Le cœur agit comme un amplificateur pour le flux de la source. Ce n'est pas une réaction en chaîne auto-entretenu; si nous pouvions éliminer les neutrons de la source, le flux diminuerait à zéro. Toutefois, il subsiste toujours quelques neutrons de la source dans le réacteur qui causent la fission.

Le flux observé provient de la source de photoneutrons qui diminue lentement (elle diminue parce que les produits de fission se désintègrent graduellement au fil des semaines et des mois) de même qu'en raison de certains neutrons de fission. Lorsque le réacteur est fortement sous-critique, il y a principalement des neutrons de la source, qui ne sont pas touchés par les changements de réactivité. Lorsque le réacteur est moins sous-critique ( $k$  est plus élevé, mais toujours inférieur à un), davantage de neutrons de fission survivent et causent d'autres fissions, ce qui augmente la population totale de neutrons. Lorsque le réacteur est proche de la criticité, l'ensemble des neutrons sont des neutrons de fission et le cœur répond beaucoup comme un cœur critique. Il faut se rappeler que l'addition de réactivité négative n'entraîne pas  $k = 0$ , mais que cela fait simplement en sorte que  $k$  est inférieur à un. À mesure que  $k$  augmente et s'approche de un, l'amplification des neutrons de la source augmente parce que davantage de neutrons de fission survivent.

### **19.6 Exercices**

1. Définir la période du réacteur.
2. Expliquer pourquoi les neutrons retardés sont importants pour le contrôle du réacteur.
3. Décrire comment, dans un cœur sous-critique, un approvisionnement régulier de neutrons source produit un flux supérieur à celui qui serait seulement imputable à la source.

Expliquer pourquoi l'amplification des neutrons de la source dans un cœur sous-critique est différente pour d'autres valeurs de  $k$  sous-critiques.

