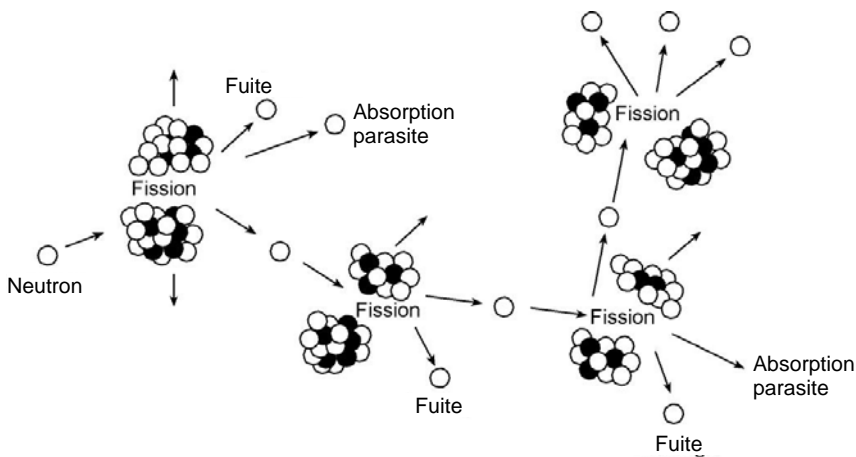


## 18 Criticité et multiplication de neutrons

Dans la réaction en chaîne illustrée à la figure 18.1, un seul neutron est disponible chaque fois pour causer la fission. Par conséquent, le nombre de fissions qui se produisent par seconde demeure constant.

La puissance produite dépend du nombre de fissions par seconde. Si un réacteur produit un watt de puissance de manière régulière, alors  $3,1 \times 10^{10}$  fissions se produiront chaque seconde.  $3,1 \times 10^{10}$  neutrons sont disponibles suite à ces fissions pour produire  $3,1 \times 10^{10}$  fissions durant la seconde suivante, et ainsi de suite. Il n'y a aucune multiplication des neutrons.



**Figure 18.1**  
**Réaction en chaîne**

Lorsque la réaction en chaîne est entretenue de cette manière, le niveau de puissance est régulier et l'on dit du réacteur qu'il est critique. Si la puissance augmente ou diminue, le taux de production de neutrons n'est plus constant.

Le facteur de multiplication de neutrons,  $k$ , basé sur le cycle des neutrons dont nous avons parlé dans le chapitre précédent, est utilisé pour suivre la production de neutrons.

$$k = \frac{\text{Nombre de neutrons dans une génération}}{\text{Nombre de neutrons de la génération précédente}}$$

Un réacteur nucléaire peut fonctionner avec une puissance régulière, qui augmente ou qui diminue. Pour illustrer comment ces trois états différents sont décrits par le facteur de multiplication, supposons que nous débutons avec 100 neutrons, qui constituent la première génération. L'absorption et les fuites éliminent certains de ces neutrons. Ceux qui restent sont disponibles pour la fission. Après un certain temps, le temps de génération, ces neutrons causent la fission et les neutrons de la deuxième génération sont produits.

Si  $k = 1$ , il y a 100 neutrons au début de la deuxième génération, 100 à la troisième, et ainsi de suite et les fissions se poursuivent au même taux qu'au début. La puissance est régulière et le réacteur est à l'état critique.

À noter que le réacteur peut être critique à n'importe quel niveau de puissance.

Si  $k > 1$  (supérieur à un), disons 1,05, les 100 neutrons de la première génération produisent  $100 \times 1,05 = 105$  neutrons au début de la génération suivante. Cela augmente encore dans la troisième génération et dans les générations subséquentes, ce qui mène à un nombre plus élevé de fissions induites et, par conséquent, à une population de neutrons plus grande. Après 100 générations, par exemple, le nombre de neutrons présents serait de 13 150 ( $100 \times 1,05^{100}$ ). On peut comparer ces calculs aux intérêts composés qui s'accumulent dans un compte de banque à intérêt quotidien. Quelques neutrons peuvent initier une réaction de fission en chaîne. La puissance augmente et le réacteur devient supercritique.

Dans cet exemple, avec  $k = 1,05$ , la puissance a augmenté 131 fois en environ un dixième de seconde. Ce taux est trop rapide pour contrôler la réaction et, dans la pratique, le facteur de multiplication ne devrait jamais devenir aussi élevé.

Si  $k < 1$  (inférieur à un), 0,95 par exemple, le nombre de neutrons passe de 100 à 95 dans la deuxième génération. Dans ce cas, les 100 neutrons originaux diminuent à un à environ 90 générations ( $100 \times 0,95^{90}$ ). La réaction en chaîne ne peut pas être entretenue dans ces conditions. À mesure que la population de neutrons diminue, le nombre de fissions et la puissance diminuent également. Le réacteur est alors sous-critique.

Le terme réactivité ( $\Delta k$ ) est souvent utilisé à la place du facteur de multiplication des neutrons  $k$ . Il est défini par l'équation suivante :

$$k = 1 + \Delta k$$

$k$  est toujours proche de 1, alors  $\Delta k$  peut prendre une valeur positive ou négative. Nous pouvons dire que le réacteur est :

critique, si	$\Delta k = 0$ ;
supercritique, si	$\Delta k > 0$ (réactivité positive)
sous-critique, si	$\Delta k < 0$ (réactivité négative)

La réactivité ( $\Delta k$ ) est habituellement exprimée en milli- $k$ , où  $1 \text{ mk} = 10^{-3} k$ .

Exemple :

Soit  $k = 1,004$

$$\Delta k = 1,004 - 1$$

$$= 0,004 \text{ ou } 4 \text{ mk}$$

Il est important de préciser que ni  $k$  ni  $\Delta k$  ne permettent d'obtenir des renseignements sur le niveau de puissance dans le réacteur. Il nous renseigne seulement sur le fait que le niveau de puissance est constant, qu'il augmente ou qu'il diminue.

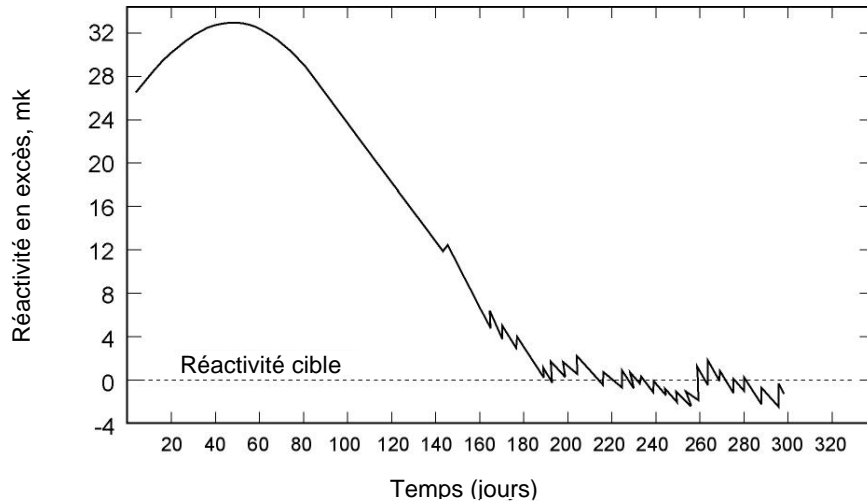
### 18.1 Contrôle de la réactivité

La réactivité doit être contrôlée pour trois raisons principales :

1. Cela maintient le réacteur critique et le niveau de puissance régulier;
2. Cela augmente ou diminue la puissance à un taux contrôlé afin de répondre à la demande;
3. Cela permet de réduire rapidement la puissance en cas d'excursion de puissance.

Il doit toujours y avoir une réactivité positive en excès disponible dans les cas où nous avons besoin d'augmenter la puissance. Plusieurs éléments influencent la réactivité en excès, comme la combustion de l'uranium 235, la production de plutonium 239, la production de produits de fission absorbateurs de neutrons et les changements dans la température du combustible, du caloporteur et du modérateur. Avant d'expliquer comment ajuster  $\Delta k$ , nous allons discuter des effets de la combustion du combustible qui causent de lents changements de la réactivité à long terme. Les effets des produits de fission et de la température sont examinés dans d'autres chapitres plus loin.

La figure 18.2 illustre l'effet de la combustion de l'uranium 235 et de l'accumulation de plutonium 239. Le graphique suppose un réacteur rempli de combustible neuf au jour zéro.



**Figure 18.2**  
**Réactivité en excès**

Comme le réacteur est exploité avec production de puissance, des atomes fissiles sont consommés, ce qui fait baisser la réactivité. Lorsque la réactivité globale s'approche de zéro, les atomes fissiles doivent être remplacés au taux auquel ils ont été consommés (rechargement de combustible en cours d'exploitation).

On aurait pu ne pas s'attendre à l'accroissement de réactivité constaté au cours des premiers mois. Cette augmentation survient parce que le plutonium 239 est produit initialement plus rapidement que l'uranium 235 est consommé. La production nette de plutonium 239 s'atténue après un ou deux mois, lorsque la fission du plutonium 239 devient importante, de manière à ce que la matière fissile ne soit pas remplacée aussi rapidement que la combustion et que la diminution de réactivité. L'augmentation graduelle des absorbeurs de neutron dans le combustible accentue la diminution de réactivité. En exploitant le réacteur, nous devons ajuster la réactivité afin de compenser ces changements de réactivité.

Il existe trois moyens de contrôler la réactivité :

1. Ajuster la quantité de matière fissile dans le réacteur.
2. Ajuster la quantité d'absorbeur dans le réacteur.
3. Ajuster les fuites de neutron provenant du réacteur.

### **18.2 Ajustement de la quantité de matière fissile**

Si davantage d'uranium 235 est inséré dans le réacteur, l'uranium 235 absorbe une fraction plus grande des neutrons absorbés par tous les matériaux du cœur. Ainsi, l'insertion de matière fissile ajoute de la réactivité positive (+  $\Delta k$ ). Tous les réacteurs CANDU réagissent ainsi lors du chargement de combustible en marche.

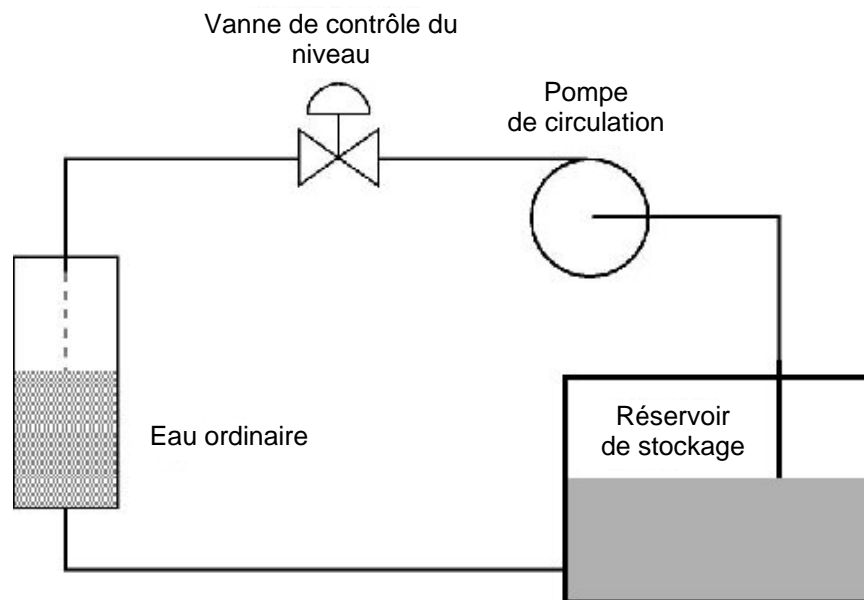
### **18.3 Ajustement de la quantité d'absorbeur**

Si un absorbeur de neutron est introduit dans le réacteur, il absorbe des neutrons qui autrement auraient été absorbés par l'uranium 235. De cette manière, l'insertion d'absorbeur ajoute de la réactivité négative (-  $\Delta k$ ). Des méthodes pratiques permettent d'absorber principalement des neutrons thermiques, ce qui change l'absorption parasite. Un absorbeur liquide et trois types d'absorbeurs solides sont utilisés :

1. Compartiments de zone liquide (utilisés dans les réacteurs CANDU).
2. Barres de compensation, constituées de cobalt ou d'acier inoxydable (utilisées dans tous les réacteurs CANDU, sauf Bruce-A).

3. Barres solides, constituées de cadmium ou d'acier inoxydable (utilisées dans tous les réacteurs CANDU, sauf Pickering-A).
4. Barres d'arrêt, constituées de cadmium dans une enveloppe d'acier inoxydable (utilisées dans tous les réacteurs CANDU).

De l'eau ordinaire est utilisée dans les zones liquides. Un tube est partiellement rempli d'eau ordinaire. L'augmentation du niveau d'eau fait en sorte que davantage de neutrons sont absorbés ( $-\Delta k$ ). La diminution du niveau fait en sorte que moins de neutrons sont absorbés ( $+\Delta k$ ). La figure 18.3 illustre un schéma simplifié du compartiment de contrôle de zone liquide.



**Figure 18.3**  
**Contrôle de zone liquide**

Les barres solides sont toutes semblables physiquement. Leurs noms proviennent des fonctions pour lesquelles elles sont utilisées.

En plus de ces dispositifs d'absorption, l'absorption parasite par des absorbeurs de neutron dissous est utilisée de deux manières :

1. Des absorbeurs de neutron sont dissous dans le modérateur. Les absorbeurs utilisés, appelés poison, sont le bore et le gadolinium. Ils peuvent être ajoutés graduellement par le

système d'addition de poison ou éliminés par le circuit d'épuration en vue d'ajuster  $\Delta k$ . Tous les réacteurs CANDU utilisent des poisons dissous.

2. Tous les réacteurs CANDU (sauf Pickering-A) sont en mesure d'injecter une solution de gadolinium rapidement dans le cœur pour une mise à l'arrêt rapide.

#### **18.4 Ajustement des fuites de neutron**

L'abaissement du niveau du modérateur dans la calandre augmente les fuites. Si une plus grande fraction des neutrons fuit hors du réacteur, de la réactivité négative est insérée ( $-\Delta k$ ). Si l'on change le niveau du modérateur, cela modifie l'efficacité du réflecteur. L'augmentation du niveau réduit les fuites et insère de la réactivité positive; la diminution du niveau permet que davantage de neutrons fuient et permet également d'insérer de la réactivité négative.

De plus, le modérateur peut être drainé rapidement hors du cœur, ce qui arrête le processus de fission. À mesure que le niveau diminue, les fuites augmentent et il est moins probable que les neutrons non thermalisés soient absorbés. Ils fuient tout simplement. Sans le modérateur, le combustible CANDU ne peut pas constituer une masse critique.

**18.5 Exercices**

1. Définir la constante de multiplication des neutrons.
2. Compléter le tableau ci-dessous.

	k $\begin{pmatrix} >1 \\ <1 \\ =1 \end{pmatrix}$	$\Delta k$ $\begin{pmatrix} + \\ - \\ 0 \end{pmatrix}$	Puissance $\begin{pmatrix} \text{Augmente} \\ \text{Diminue} \\ \text{Constante} \end{pmatrix}$
Supercritique			
Critique			
Sous-critique			

3. Si  $k = 0,997$ , trouver  $\Delta k$  et exprimez-le en milli-k.
4. Énumérer les trois méthodes fondamentales de contrôle de la réactivité et expliquer comment chacune d'elles fonctionne.
5. Si le réacteur est à un niveau de puissance de  $10^{-4,2}$  PP, est-il critique?