

## 21 Effets des changements de température sur la réactivité

### 21.1 Expérience du NRX et réaction négative

En 1949, le réacteur NRX du Laboratoire nucléaire de Chalk River s'est « emballé » lors d'un essai contrôlé. Le réacteur NRX était un réacteur expérimental modéré à l'eau lourde qui utilisait des barres de commande pour la régulation de puissance. Le niveau d'eau lourde a été établi à 3 cm au-dessus de la hauteur à laquelle le réacteur serait critique à faible puissance une fois les barres retirées. On a laissé la puissance du réacteur augmenter « sans vérification ». (S'il y avait eu un problème, on aurait pu mettre rapidement le réacteur à l'arrêt.) La manière dont la puissance a changé n'était pas ce à quoi on s'attendait d'après les connaissances acquises (voir figure 21.1).

Au début, la puissance a augmenté, mais elle n'a pas augmenté indéfiniment comme on s'y attendait. À mesure que la température du combustible augmentait, la réactivité diminuait et cela a causé un ralentissement du taux d'accroissement de puissance. Par la suite, la réactivité a diminué encore plus alors que l'eau lourde devenait plus chaude. La diminution totale de réactivité a été suffisante, lors de cet essai, pour rendre le réacteur sous-critique. Par conséquent, la puissance a atteint un maximum et a ensuite commencé à diminuer.

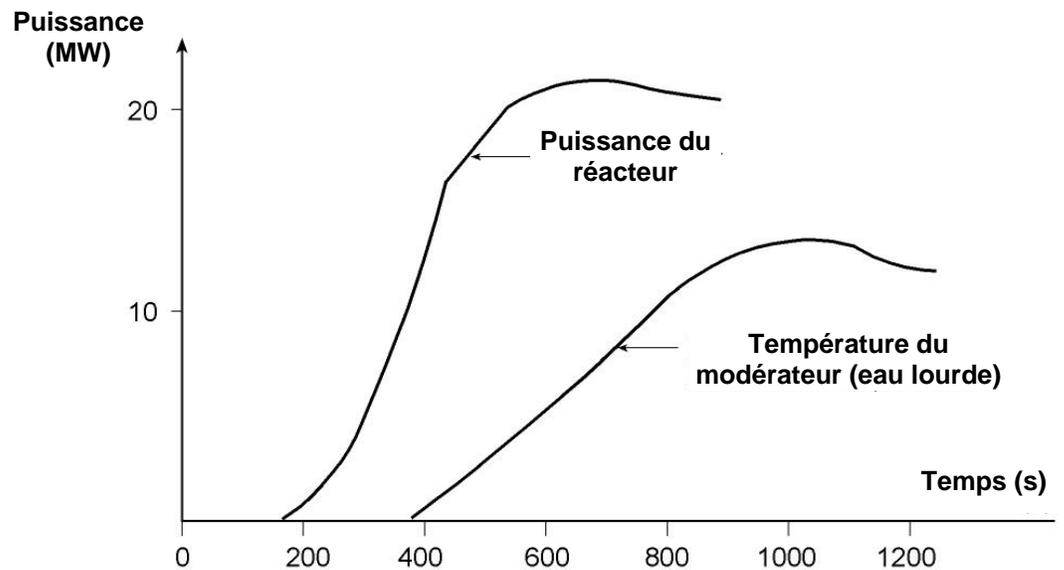


Figure 21.1  
Expérience du NRX

L'essai a permis de démontrer que pour de petites insertions de réactivité positive, le réacteur NRX fonctionne en mode d'auto-régulation. Les augmentations de la température associées à l'accroissement de puissance ont réduit la réactivité, ce qui a permis d'éviter que la puissance ne s'accroisse indéfiniment.

La puissance aurait continué d'augmenter si l'insertion de réactivité initiale avait été plus grande. Dans cet exemple, on ne cherche pas à démontrer que la puissance du réacteur ne peut pas augmenter de manière continue (en fait elle le pourrait), mais plutôt à démontrer qu'il y a une perte de réactivité causée par l'augmentation de la température du combustible et de l'eau lourde.

Les réacteurs commerciaux CANDU se comportent de la même manière et la régulation de puissance normale du réacteur tient compte de cet effet. Lorsqu'un accroissement de puissance important est requis, le système de régulation fait automatiquement grimper la puissance par palier. La combinaison des petites additions de réactivité et des pertes de réactivité à mesure que la puissance s'accroît produit un accroissement de puissance modéré et le système de contrôle est très peu sollicité pour limiter l'accroissement de puissance.

Comparons ce phénomène avec ce à quoi l'on doit s'attendre d'après ce que nous avons vu dans les chapitres précédents, où  $\Delta k$  est supposé ne pas changer. (C'est ainsi que se comporte un réacteur lorsqu'il est supercritique à faible puissance, lorsque les effets du réchauffement sont très faibles.) Même une légère modification  $\Delta k$  initiale pour une longue période de réacteur finit éventuellement par causer un accroissement de puissance rapide. Les accroissements de puissance sont de plus en plus rapides à mesure que le temps passe. Dans l'intervalle de puissance qui génère beaucoup de chaleur, un accroissement trop rapide peut causer une défaillance de l'équipement. Le système de régulation devrait alors initier un accroissement de puissance en ajoutant de la réactivité positive  $\Delta k$ , puis en réduisant continuellement  $\Delta k$ , limitant ainsi activement le taux d'accroissement.

L'avantage de la perte de réactivité avec un accroissement de puissance n'est pas clair s'il y a une insertion accidentelle d'une plus grande quantité de réactivité positive. Le taux d'accroissement de la puissance s'élève un peu plus lentement, ce qui peut aider. Si l'insertion accidentelle n'est pas trop importante, la puissance pourrait éventuellement cesser de s'accroître, mais pas nécessairement en dessous de 100 %. Par ailleurs, ces effets, s'ils sont importants, risquent de retarder le déclenchement d'un arrêt automatique.

## 21.2 Coefficients de température

Le coefficient de température de la réactivité est le changement de réactivité par augmentation de température unitaire. Il peut être positif ou négatif. Il était négatif dans l'exemple précédent, parce qu'une augmentation de la température a causé une perte de réactivité. Les unités du coefficient de température sont des  $\text{mk}/^\circ\text{C}$ .

Les changements de température surviennent plus ou moins indépendamment dans le combustible, le circuit caloporteur et le modérateur. Il y a un coefficient de température de réactivité associé à chacun d'eux. Les caractéristiques d'« auto-régulation » illustrées précédemment nécessitent un coefficient de température global négatif, mais les changements dans la température du combustible sont les facteurs les plus importants pour déterminer le coefficient global.

Le changement de réactivité causé par les changements de température du caloporteur est habituellement très faible (et difficile à expliquer). Les changements de la température du modérateur causent des changements importants de réactivité, mais un contrôle normal maintient la température du modérateur constante. En outre, le chauffage et le refroidissement du modérateur sont relativement lents (en raison de la grande quantité de  $\text{D}_2\text{O}$ ), alors les effets ne sont pas aussi immédiats que l'effet de réactivité du combustible. Dans ce cours, nous examinons seulement les effets causés par les changements de température dans le combustible.

### 21.2.1 Coefficient de réactivité de la température du combustible

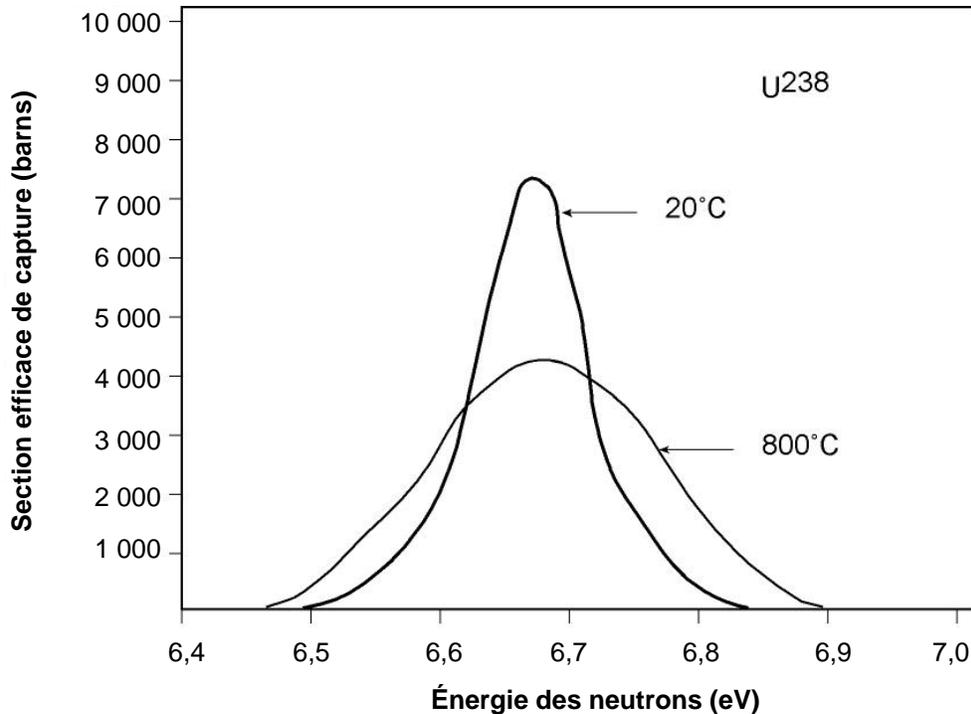
Il existe deux principaux facteurs agissant sur le coefficient de température du combustible :

1. L'augmentation de la température du combustible augmente la capture par résonance dans l'uranium 238.
2. Le rapport de la fission à l'absorption dans le combustible change en fonction de la température du combustible. (L'orientation et l'importance du changement varient selon que le combustible est neuf, ou que le chargement est effectué à l'équilibre.)

Nous allons examiner ces deux effets tour à tour.

#### Absorption par résonance accrue

Le changement dans l'absorption par résonance en fonction de la température est toujours l'effet de température du combustible le plus important.



**Figure 21.2**  
**Élargissement des résonances**

La capture par résonance représente environ 10 % des pertes de neutrons dans un cœur CANDU. L'absorption des neutrons résonants dans l'uranium 238 augmente fortement à mesure que la température du combustible augmente.

La raison de cette capture par résonance accrue est la suivante : la largeur et la hauteur des pics de résonance dans la section efficace de l'uranium 238 dépend de la température de l'uranium 238. La figure 21.2 illustre un pic de résonance particulier à 20 °C et un autre pic à 800 °C. À la température la plus élevée (habituellement la température du combustible efficace à puissance élevée), le pic est plus faible, mais quand même suffisamment élevé pour capturer presque tous les neutrons dans cette plage d'énergie. Au même moment, la résonance s'étend sur une plage plus vaste d'énergie de neutron, ce qui expose davantage de neutrons à la capture. Le nombre de neutrons qui pénètrent dans le combustible en se thermalisant et qui sont capables de s'en échapper est peu élevé.

Rapport de la fission à l'absorption

Nous avons déjà parlé de la variation de la section efficace des neutrons en fonction de l'énergie du neutron. Les changements de

température dans le milieu des neutrons thermiques, qui comprennent le combustible chaud, sont reflétés dans l'énergie des neutrons thermiques. Les sections efficaces des neutrons thermiques (taille cible apparente) diminuent lorsque la vitesse des neutrons est plus élevée, mais les sections efficaces ne changent pas toutes de la même manière. On pourrait s'attendre à ce que le rapport de la fission à l'absorption dans le combustible change en fonction de la température des neutrons. Pour le combustible neuf, lorsque l'uranium 235 est le seul nucléide fissile, ce rapport diminue à mesure que la vitesse des neutrons thermiques augmente. Pour le combustible à l'équilibre, avec une quantité importante de plutonium 239, le rapport augmente.

$$\left( \frac{\sigma_f^{\text{combustible}}}{\sigma_a^{\text{combustible}}} \right)$$

Pour le combustible neuf, à mesure que les neutrons thermiques deviennent « plus chauds », un nombre moins élevé de neutrons sont absorbés dans le combustible et causent la fission de l'uranium 235. L'effet contraire est observé dans le combustible qui contient du plutonium. Un résumé non technique de ce « phénomène des neutrons chauds » peut vous aider à mémoriser ce phénomène. L'uranium 235 préfère les neutrons froids; le plutonium 239 a une préférence marquée pour les neutrons chauds. Ainsi, pour le combustible neuf, l'augmentation de la température des neutrons thermiques diminue la réactivité. Pour le combustible à l'équilibre, la réactivité augmente en fonction de l'augmentation de la température des neutrons thermiques.

#### Effet combiné

À mesure que la puissance s'accroît, le combustible chauffe. Cela élargit les résonances de l'uranium 238 et chauffe les neutrons thermiques. Le changement global de réactivité résulte d'une combinaison de ces deux effets. L'effet d'absorption par résonance est toujours plus important que « l'effet des neutrons chauds ».

Dans le cas du combustible neuf, le coefficient de température du combustible est négatif, étant donné que ces deux effets sont négatifs. La valeur courante est de  $-0,013 \text{ mk}/^\circ\text{C}$ . Dans le cas du combustible à l'équilibre, l'effet important du plutonium compense partiellement l'augmentation de la capture par résonance, ce qui réduit l'importance du coefficient de température à environ  $-0,004 \text{ mk}/^\circ\text{C}$ .

### 21.2.2 Coefficient de puissance

Sur le plan opérationnel, la puissance du réacteur est mesurée et la température du combustible ne l'est pas. Si l'on étudie le comportement du réacteur à mesure que la puissance change, il est pratique de définir un coefficient de puissance. Le coefficient de puissance est le changement de réactivité causé par les effets de la température lorsque la puissance passe de la puissance zéro chaude à la pleine puissance.

La valeur courante pour les réacteurs CANDU est  $\approx -5$  mk, soit une diminution de réactivité. La valeur exacte dépend de la conception du réacteur et de l'état du combustible. Pour Bruce B, les valeurs sont d'environ  $-9$  mk pour le combustible neuf et de  $-3,5$  mk pour le combustible à l'équilibre. Le changement de réactivité est presque uniforme dans la plage de puissance élevée. Un coefficient de puissance de  $-3,5$  mk laisse supposer un accroissement de puissance de 10 % (par exemple, un passage de la puissance de 80 % à 90 %) donne lieu à une perte d'environ 0,35 mk, ce qui équivaut à un changement d'environ 5 % dans le niveau de zone.

### 21.2.3 Réactivité cavitaire

S'il y a ébullition dans un canal de caloporteur, la vapeur déplace graduellement le caloporteur. Ce phénomène porte le nom d'expulsion du caloporteur. La formation d'un vide partiel ou total dans un canal a une incidence sur la capture par résonance, sur l'absorption parasite, la fission rapide et les fuites. Nous allons expliquer ces effets dans un cours plus avancé.

La réactivité cavitaire est le changement de réactivité lors d'une expulsion du caloporteur de 100 % hors de tous les canaux de caloporteur. Elle est positive dans les réacteurs CANDU. La valeur réelle varie d'un réacteur à l'autre, mais est d'environ +10 mk dans les réacteurs de Bruce.

La réactivité positive de +10 mk est une valeur très importante, qui est en mesure de causer un accroissement beaucoup trop rapide de puissance. Cependant, il n'est pas possible habituellement pour tout le caloporteur de se transformer rapidement en vapeur, même lors de l'ouverture d'une brèche importante. Les systèmes de sûreté sont conçus pour détecter et arrêter l'accroissement de puissance longtemps avant que la réactivité de +10 mk soit insérée. Il existe deux systèmes d'arrêt d'urgence automatique rapides et indépendants qui permettent de mettre le réacteur à l'arrêt.

### 21.3 Notions principales

- Le combustible CANDU a un coefficient de température négatif. À mesure que la température du combustible augmente, de la réactivité négative est ajoutée dans le cœur.
- Le coefficient de température du combustible dépend principalement de l'élargissement des pics d'absorption de résonance de l'uranium 238 et des changements dans la section efficace des nucléides contenus dans le combustible.
- Le coefficient de puissance est le changement total de réactivité qui se produit lorsque la puissance du réacteur passe de la puissance zéro chaude à la pleine puissance. Dans un réacteur CANDU, ce coefficient est négatif.
- Le coefficient de réactivité cavitaire est le changement de réactivité qui survient dans le cœur si le circuit caloporteur expulse le caloporteur. Dans un réacteur CANDU, cette insertion de réactivité est positive.

## 21.4 Exercices

1. Définir :
  - a) le coefficient de température;
  - b) le coefficient de puissance;
  - c) la réactivité cavitaire.
2. Préciser les raisons pour lesquelles le coefficient de température du combustible est négatif et pourquoi sa valeur est plus faible pour le combustible à l'équilibre que pour le combustible neuf.
3. Pourquoi un coefficient de température négatif est-il souhaitable?

