

## 12 Modérateur et circuit du modérateur

### 12.1 Introduction

Le combustible nucléaire produit de la chaleur par fission. Dans le processus de fission, les atomes fissiles se divisent après avoir absorbé des neutrons lents. Ce processus libère des neutrons rapides et produit de la chaleur. Les neutrons rapides ne provoquent pas beaucoup de fission. Le modérateur les ralentit de manière à ce qu'ils puissent causer davantage de fission. Le modérateur doit ralentir les neutrons rapides sans en absorber un trop grand nombre, ou alors la réaction en chaîne s'arrêtera.

La plupart des neutrons, lorsqu'ils entrent en collision avec une molécule d'eau lourde, la frappent puis rebondissent. Ces collisions transfèrent de l'énergie en provenance des neutrons se déplaçant rapidement vers l'eau lourde. Ces collisions ralentissent les neutrons et réchauffent l'eau lourde. Le circuit du modérateur refroidit l'eau lourde en la faisant circuler dans des échangeurs de chaleur. La dernière section du présent chapitre décrit le circuit de circulation.

Le modérateur contient principalement de l'eau lourde ainsi qu'une très petite quantité d'eau ordinaire. Moins de 2 % des neutrons de fission sont absorbés dans le modérateur. Les faibles impuretés de H<sub>2</sub>O capturent environ la moitié de ces neutrons. Dans la prochaine section, on explique l'importance de maintenir le degré d'impureté (eau ordinaire) à un faible niveau et l'on explique pourquoi.

Il arrive parfois qu'un noyau de deutérium contenu dans le D<sub>2</sub>O capture un neutron et se transforme en tritium. Le tritium présente des dangers d'irradiation. Les neutrons peuvent également interagir avec les noyaux d'oxygène, ce qui produit d'autres dangers d'irradiation. Ce chapitre porte sur les dangers d'irradiation.

Les molécules d'eau sont brisées en fragments par les collisions énergétiques. Dans le prochain chapitre, nous décrirons les effets de ce phénomène sur le fonctionnement du modérateur.

### 12.2 Teneur isotopique du D<sub>2</sub>O

Un échantillon de modérateur comporte habituellement environ 99,8 % en poids de D<sub>2</sub>O et 0,2 % de H<sub>2</sub>O. On dit que sa teneur isotopique est de 99,8 %. La définition exacte est la suivante :

$$\text{Teneur isotopique d'un échantillon de D}_2\text{O} = \frac{\text{Masse de D}_2\text{O dans l'échantillon}}{\text{Masse de D}_2\text{O} + \text{masse de H}_2\text{O dans l'échantillon}} \times 100 \%$$

Le nombre de neutrons absorbés est sensible aux changements dans la teneur isotopique. La présence de moins de 0,2 % d'eau ordinaire absorbera la moitié des neutrons absorbés par le modérateur.

Si la teneur isotopique diminue de quelques dixièmes de un pour cent, un surplus de combustible peut compenser les pertes de neutrons. Cela augmente les coûts en combustible. Une diminution de la teneur isotopique de 99,8 % à 99,7 % augmente les coûts en combustible de un demi million de dollars à un million de dollars par année. De même, la mise à niveau du modérateur de 0,1 % permet d'économiser cette somme.

Si la teneur isotopique passe sous la barre des 99,5 %, le réacteur peut cesser de fonctionner. Un système d'amélioration du D<sub>2</sub>O à la centrale permet de faire passer la faible teneur isotopique d'eau lourde à 99,9 % ou plus. La teneur isotopique du produit amélioré dépend de la quantité et de la teneur isotopique de l'eau lourde à traiter, et du temps dont on dispose.

La manutention inappropriée de l'eau lourde s'avère coûteuse. Votre travail pourrait comprendre le transfert d'eau lourde, en réglant des vannes ou en vidant des conteneurs. Si c'est le cas, portez-y une attention particulière. Un transfert inadéquat peut mélanger des eaux à faible et à forte teneur isotopique. Le résultat pourrait nous obliger à effectuer une amélioration additionnelle de l'eau lourde et cela augmenterait les coûts en combustible, et de l'eau lourde coûteuse pourrait s'écouler dans les drains. Pire encore, vous pourriez causer une panne de courant.

### **12.3 Notions principales**

- La teneur isotopique de l'eau lourde est le pourcentage massique de D<sub>2</sub>O. La teneur isotopique du modérateur se situe habituellement près de 99,8 %. Le 0,2 % qui reste est composé d'eau ordinaire.
- Les exigences relatives à la teneur isotopique du caloporteur sont moins rigoureuses. Le caloporteur est exposé à beaucoup moins de collisions de neutrons thermiques, alors sa teneur isotopique a moins d'effet sur l'absorption des neutrons.
- Une légère diminution de la teneur isotopique augmente les coûts de combustible. Une baisse importante de la teneur isotopique entraîne l'arrêt du réacteur.

- Un produit de mise à niveau du D<sub>2</sub>O permet de maintenir une teneur isotopique élevée. Les erreurs qui entraînent une baisse de la teneur isotopique de l'eau lourde sont coûteuses.

#### 12.4 Dangers d'irradiation

Un nombre important de neutrons sont présents dans le cœur lorsque la puissance du réacteur est à quelques pour cents de la pleine puissance, ou plus. Ces neutrons interagissent avec le D<sub>2</sub>O pour produire de l'azote 16 radioactif, de l'oxygène 19 et du tritium.

Le tritium (hydrogène 3) se forme lorsque le deutérium absorbe un neutron. Les neutrons interagissent avec les isotopes de l'oxygène naturellement présents pour produire de l'azote 16 et de l'oxygène 19. Ces isotopes ont une incidence sur les travaux effectués dans la centrale.

L'azote 16 et l'oxygène 19 émettent des rayons gamma fortement énergétiques ainsi que des particules bêta énergétiques. Les particules bêta ne traversent pas les parois des conduites, mais les rayons gamma pénétrants présentent un danger d'irradiation autour de l'équipement renfermant ces isotopes.

L'azote 16 et l'oxygène 19 ont une courte période radioactive. Ces isotopes se désintègrent à des niveaux sans danger quelques minutes après la mise à l'arrêt du réacteur, ce qui permet d'avoir accès à l'équipement. Le rayonnement émis par ces isotopes redevient dangereux quelques secondes seulement après le redémarrage.

Les circuits qui accueillent l'eau provenant du cœur du réacteur peuvent être approchés seulement lorsque le réacteur est à l'arrêt. Le blindage très efficace autour de cet équipement peut permettre d'effectuer des travaux sur l'équipement à proximité, pendant que le réacteur est en marche. Les fuites de D<sub>2</sub>O provenant d'un réacteur en cours d'exploitation exposent toute personne située à proximité au rayonnement bêta et gamma et au tritium.

Certains circuits nécessitent une attention particulière lorsque le réacteur est en mode d'exploitation. Au besoin, un réservoir de relais entre le cœur et l'équipement recueille temporairement le débit de D<sub>2</sub>O. Cela permet à l'azote 16 et à l'oxygène 19 de se désintégrer avant d'atteindre des zones accessibles.

Les isotopes de l'oxygène naturellement présent dans la nature sont l'oxygène 16 (99,76 %). L'oxygène 18 (0,2 %) et l'oxygène 17 (0,04 %) sont d'autres isotopes de l'oxygène. L'oxygène 19 provient

de l'absorption de neutrons dans un noyau d'oxygène 18. L'azote 16 provient de la réaction (n, p) avec l'oxygène 16. (Une certaine quantité d'azote 17 est produite lors de la réaction (n,p) avec l'oxygène 17 et une certaine quantité de carbone 14 est produite par la réaction (n,  $\alpha$ ) avec l'oxygène 17).

L'oxygène a une période radioactive d'environ 27 secondes.

L'oxygène 16 a une période radioactive de 7,1 secondes.

Le tritium (hydrogène 3) a une période radioactive de 12,3 années. Sa concentration augmente graduellement dans le modérateur et dans le D<sub>2</sub>O (caloporteur). Sa concentration ne diminue presque pas lors d'une mise à l'arrêt.

Le tritium émet un rayonnement bêta faiblement énergétique et aucun rayon gamma. Les instruments de détection du rayonnement de type courant ne permettent pas de détecter le tritium. Toute personne ayant reçu une formation en radioprotection (RPT) peut effectuer un contrôle du rayonnement dans la plupart des milieux de travail.

Les particules bêta faiblement énergétiques émises par le tritium ne constituent pas un danger d'irradiation externe. Néanmoins, le tritium pose un danger d'irradiation interne grave. L'eau tritiée sous forme de vapeur pénètre dans le corps par les poumons et la peau. Elle se disperse ensuite dans toutes les parties du corps, tout comme l'eau ordinaire le fait. Les tissus et organes du corps ne possèdent pas de couche de cellules mortes pour se protéger.

Le modérateur possède la concentration de tritium la plus élevée de toute la centrale. Le tritium s'échappe lorsque le circuit est ouvert pour l'entretien. Une faible quantité s'échappe en temps normal parce que la calandre n'est pas sous pression, et qu'il existe quelques points de fuite. Dans les centrales plus anciennes, une combinaison de concentration de tritium élevée et de petites fuites peut, néanmoins, constituer un danger important associé au tritium dans le circuit du modérateur.

Le tritium s'accumule également dans le circuit caloporteur renfermant de l'eau lourde. Cette eau est chaude et n'est pas sous pression, et le circuit possède de nombreux points de fuite possibles. Pendant l'exploitation normale, le caloporteur contribue davantage à la présence de tritium dans la centrale que le modérateur.

Les neutrons génèrent moins de tritium dans le caloporteur que dans le modérateur, pour les raisons suivantes :

- a) Le modérateur est presque tout le temps exposé aux neutrons dans le cœur du réacteur. L'eau lourde du circuit caloporteur passe moins de 5 % de son temps à traverser le cœur.
- b) La concentration des neutrons thermiques est plus élevée dans le modérateur que dans le caloporteur.

Le personnel de centrale porte des combinaisons en plastique à pression positive qui permettent de respirer de l'air dans les zones de travail en présence de tritium. Ces combinaisons sont requises même lorsque la fuite ou le déversement de  $D_2O$  tritiée sont peu importants. Une protection complète est requise en tout temps pour les équipes d'entretien qui travaillent dans un circuit de  $D_2O$  ouvert.

À l'avenir, il sera possible de contrôler le problème du tritium. En 1990, une installation d'élimination du tritium a été exploitée sur le site de Darlington. Elle était conçue pour enlever 99,5 % du tritium contenu dans l'eau lourde qu'elle traite. Cette eau, dont la concentration en tritium est très faible, est retournée dans le modérateur du réacteur en exploitation, diluant par le fait même le tritium dans le modérateur. Le modérateur dans un réacteur en exploitation contient habituellement 14 ci/l de tritium.

### 12.5 Notions principales

- Les interactions des neutrons dans le modérateur produisent des isotopes radioactifs comme l'hydrogène 3 (tritium), l'azote 16 et l'oxygène 19.
- Les dangers d'irradiation associés au tritium ne dépendent pas de la puissance du réacteur. Les particules bêta du tritium peuvent causer des dommages biologiques internes.
- L'azote 16 et l'oxygène 19 produisent un rayonnement gamma intense, ce qui limite l'accès à l'équipement dans un réacteur en marche. Ils disparaissent après la mise à l'arrêt.
- Il peut y avoir des fuites d'eau lourde pendant le fonctionnement normal, ou lorsqu'un circuit est ouvert pour l'entretien. Cela génère des niveaux dangereux de tritium dans l'atmosphère. L'équipement de protection permet aux employés d'effectuer des travaux en présence de tritium.
- Le modérateur ( $D_2O$ ) possède la teneur en tritium la plus élevée de toute la centrale. Aucun autre système expose le  $D_2O$  à autant de neutrons. Le bombardement du modérateur est

continu et la concentration de neutrons thermiques est plus élevée que partout ailleurs.

### **12.6 Circuit principal du modérateur**

Le circuit principal du modérateur joue un rôle bien précis. Il maintient constante la température du modérateur dans la calandre. La température du modérateur se situe habituellement entre 60 °C et 80 °C.

Le circuit du modérateur alimente également en D<sub>2</sub>O plusieurs circuits auxiliaires.

Si la concentration de tritium est très faible, on peut effectuer certains travaux à condition de porter un filtre à air approprié, ou un appareil respiratoire convenable, mais pas de combinaison de plastique.

#### 12.6.1 Sources chaudes du modérateur

On a mentionné précédemment que l'efficacité globale d'une centrale est d'environ 30 %. Les condenseurs de vapeur rejettent environ 65 % de la chaleur produite et les échangeurs de chaleur du modérateur en rejettent environ 5 %. Même 5 % du total représente une grande quantité d'énergie. Si l'évacuation de chaleur du modérateur cesse, le modérateur contenu dans le réacteur à pleine puissance entre en ébullition après seulement quelques minutes. Même un réacteur à l'arrêt peut causer une surchauffe importante du modérateur.

Lorsque le réacteur fonctionne à pleine puissance, les sources chaudes du modérateur sont :

a) Le rayonnement prompt imputable à la fission (neutrons et rayons gamma) produit 70 % à 80 % de la chaleur dans le modérateur. Les neutrons contribuent habituellement à plus de la moitié de cette chaleur.

Le modérateur absorbe de l'énergie, ce qui ralentit les neutrons rapides. Les rayons gamma prompts qui accompagnent la fission déposent de l'énergie dans le modérateur et dans le blindage. Ils déposent également une certaine quantité d'énergie dans les structures (par exemple, les tubes de calandre) qui sont refroidies par le modérateur.

Cette source chaude disparaît lorsque la fission cesse.

b) Les rayons gamma issus de la désintégration des produits de fission et de la désintégration des produits d'activation dans les composants de réacteur produisent entre 15 % et 25 % de la chaleur

dans le modérateur. Cette chaleur diminue lentement après la mise à l'arrêt du réacteur.

c) Le chauffage classique (conduction, convection, rayonnement thermique et frottement) représente environ 3 % à 5 % du chauffage du modérateur.

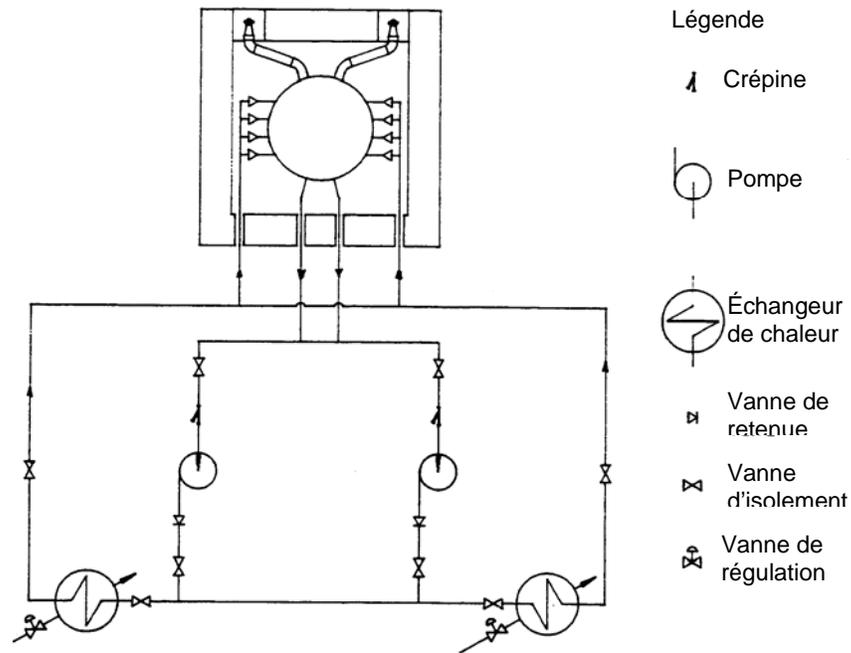
Le gaz annulaire n'isole pas parfaitement les tubes de force chauds.

La conduction et la convection transfèrent une certaine quantité d'énergie par le biais du gaz annulaire et le rayonnement thermique transfère une certaine quantité de chaleur à travers ce gaz. Les pompes du modérateur, lorsqu'elles fonctionnent, produisent également une certaine quantité de chaleur par frottement fluide.

L'opérateur peut réduire le chauffage classique du modérateur après la mise à l'arrêt d'un réacteur en refroidissant le circuit caloporteur.

Chaque neutron perd environ 2 MeV d'énergie et chaque fission génère, en moyenne, 2,5 neutrons. Cela représente environ 2,5 % de la chaleur produite par une fission.

La chaleur peut être transférée par le biais de la plaque tubulaire côté calandre vers le modérateur ou en provenance de ce dernier, selon la différence de température entre le modérateur et le bouclier d'extrémité.



**Figure 12.1**  
**Circuit principal du modérateur (type courant)**

L'exploitation sûre de la centrale exige que l'on puisse en tout temps éliminer la chaleur contenue dans le modérateur. L'examen des sources chaudes indique que la quantité de chaleur présente est grande, même lorsque le réacteur est à l'arrêt. Toutes les centrales comportent un certain type de mécanisme de refroidissement de secours afin d'éliminer la chaleur dans les cas où l'équipement normal ne fonctionne pas.

L'équipement de refroidissement de secours doit être suffisamment grand pour traiter la sortie de chaleur réduite après une mise à l'arrêt. Dans certaines centrales, il existe un circuit auxiliaire plus petit doté de pompes, de conduites et d'échangeurs de chaleur. Dans d'autres centrales, on trouve des pompes de secours ou des petits moteurs de secours qui alimentent les pompes principales.

### 12.7 Circuit du modérateur

La figure 12.1 illustre la disposition du circuit principal du modérateur.

Les pompes du modérateur exercent une fonction d'aspiration aux orifices de sortie au bas de la calandre. Elles retournent le D<sub>2</sub>O refroidi par les orifices d'entrée sur les côtés de la calandre. Les échangeurs de

chaleur en aval des pompes transfèrent la chaleur vers le circuit d'eau de service, qui est un système de refroidissement de l'eau ordinaire.

Le débit de l'eau de service dans les échangeurs de chaleur contrôle la température. Lorsque la température de sortie du modérateur est élevée, les vannes de contrôle de la température du modérateur dans les conduites d'eau de service s'ouvrent davantage. Cela augmente le débit d'eau de refroidissement, en éliminant davantage de chaleur. À mesure que la température diminue, les vannes se ferment, ce qui réduit l'évacuation de chaleur.

Deux sorties de calandre alimentent les pompes par une conduite commune, le collecteur d'aspiration. Un collecteur d'équilibrage raccorde les sorties de décharge des pompes. Ces raccords permettent une aspiration et des conditions de décharge communes pour chaque pompe, ce qui permet de maintenir un débit équilibré parmi les échangeurs de chaleur.

L'aménagement des conduites permet également d'éliminer la chaleur afin de continuer l'entretien après avoir isolé une pompe ou un échangeur de chaleur en vue de l'entretien. Remarquez l'emplacement des vannes de retenue (ayant pour but d'éviter le renversement du débit en cas de défaillance d'une pompe) et des vannes d'isolement (pour l'entretien).

Les échangeurs de chaleur et les pompes sont dotés de vannes de drainage qui permettent l'entretien. Dans certaines centrales, la température de l'eau de service peut baisser en dessous de 4 °C, point de congélation de l'eau lourde. Des dommages peuvent être causés aux échangeurs de chaleur lorsqu'ils sont isolés en vue de l'entretien, si l'eau de refroidissement froide n'est pas drainée.

Certaines centrales possèdent deux groupes de pompes de plus petite taille.

## **12.8 Notions principales**

- Le circuit principal du modérateur permet de contrôler la température du modérateur. Il permet également de réguler le débit dans les circuits auxiliaires du modérateur.
- La chaleur pénètre dans le modérateur en provenance de trois sources : le rayonnement nucléaire prompt, le rayonnement nucléaire retardé, et le transfert de chaleur classique. La chaleur du modérateur correspond habituellement à 5 % à peu près de la chaleur brute produite par le réacteur.

- Le rayonnement prompt issu de la fission produit environ 75 % du chauffage du modérateur. Plus de la moitié de cette chaleur provient du rôle joué par le modérateur : il ralentit les neutrons rapides. L'absorption de rayonnement gamma prompt constitue le reste.
- Le chauffage par rayonnement gamma de désintégration provient principalement de la désintégration des produits de fission dans le combustible.
- Le chauffage classique du modérateur représente moins de 5 % de la chaleur totale du modérateur. Il provient principalement des tubes de force chauds.
- Le circuit principal du modérateur élimine la chaleur du modérateur. Les pompes aspirent le D<sub>2</sub>O chaud au bas de la calandre et le retournent via les échangeurs de chaleur qui éliminent la chaleur.
- Étant donné que la quantité de chaleur produite dans le modérateur est très grande, même lorsque le réacteur est à l'arrêt, l'élimination de chaleur du modérateur doit se poursuivre en tout temps. L'équipement auxiliaire est disponible pour l'élimination de chaleur si l'équipement normal ne l'est pas.
- Les vannes de contrôle de température font varier le débit d'eau de service dans les échangeurs de chaleur afin de contrôler la température du modérateur. Cela permet d'ajuster le débit de refroidissement à la production de chaleur.

## 12.9 Exercices

1. Définir la teneur isotopique et donner la valeur type de la teneur isotopique du modérateur.
2. Quel problème survient lorsque la teneur isotopique du modérateur diminue de :
  - a) 0,1 %?
  - b) 0,5 %?
3. Que fait-on avec l'eau lourde à faible teneur isotopique?
4. Énumérer les trois principaux dangers d'irradiation associés au circuit du modérateur. Décrire les effets de chacun d'eux sur les travaux d'entretien.
5. Expliquer les énoncés suivants :
  - a) La production de tritium est plus élevée dans le modérateur que dans le caloporteur.
  - b) Le tritium provenant du caloporteur contribue davantage à la dose de rayonnement du personnel de centrale que le tritium issu du modérateur.
6. Quel est le rôle du circuit du modérateur outre celui d'éliminer la chaleur du modérateur?
7. Quelles sont les principales sources chaudes du modérateur dans un réacteur à l'arrêt?
8.
  - a) Quelle est la source chaude du modérateur la plus importante si le réacteur fonctionne à 50 % de la pleine puissance?
  - b) Qu'arrive-t-il à la vanne de contrôle de la température du modérateur lorsque la puissance du modérateur augmente?
9. Pourquoi est-il nécessaire de disposer d'un refroidissement de secours pour le circuit principal du modérateur?
10. Identifier les deux pompes principales, les deux échangeurs de chaleur et les vannes de contrôle de la température à la figure 12.1.