

## 16 Le combustible CANDU

### 16.1 Introduction

Dans ce module, nous apprendrons comment l'on a choisi la matière première des grappes de combustible et comment les assembler de façon sûre et économique. Nous parlerons également du comportement du combustible et de certaines caractéristiques du fonctionnement d'un réacteur.

L'utilisation économique du combustible exige que les grappes produisent de l'énergie thermique continûment pendant une longue période, et ce, dans le milieu hostile du réacteur. Une bonne conception du réacteur permet d'extraire l'énergie sans rejeter de produits de fission, pendant l'exploitation normale de la centrale.

Un combustible bien conçu devrait empêcher ou limiter le rejet de produits de fission lors d'accidents. Toutefois, il n'est pas possible de concevoir un combustible qui empêcherait tout rejet, quelles que soient les circonstances. La prévention des rejets provient de l'association d'une bonne conception du carburant, de son comportement et de l'adoption de pratiques d'exploitation sécuritaires.

Parfois, une grappe de combustible se brisera pendant le fonctionnement normal. On dit que le combustible est défectueux ou qu'il est brisé, s'il laisse s'échapper des produits de fission dans le circuit caloporteur. Le terme défectuosité est général, il englobe aussi bien les petits trous dans des grappes mal usinées que de larges fissures.

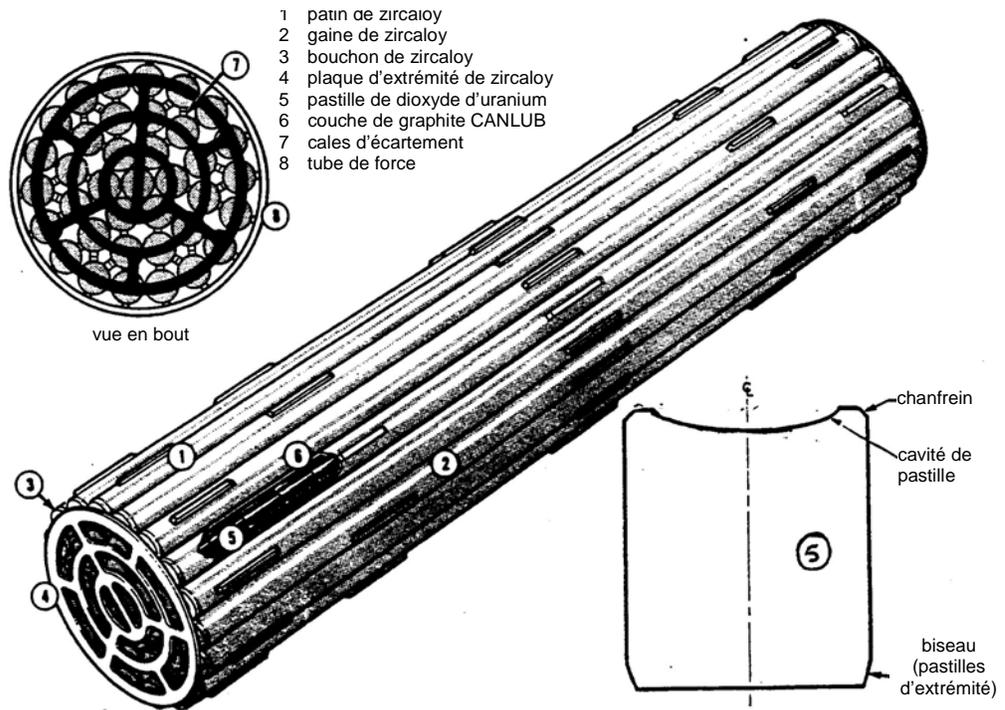
On peut voir à la figure 16.1 la grappe de combustible conçue pour l'alimentation ordinaire des réacteurs CANDU : le combustible CANLUB. L'expérience de plusieurs années de fonctionnement sans problème a démontré que l'utilisation de ce combustible était sûre et économique dans le cadre d'une exploitation normale.

Jusqu'à maintenant, aucun accident n'a soumis le combustible CANDU à des conditions extrêmes. Des essais et des analyses permettent de penser que la plupart des produits de fission seront bien confinés dans ces conditions.

La grappe illustrée à figure 16.1 est principalement composée de dioxyde d'uranium ( $UO_2$ ) confiné dans une gaine de zircaloy. Le zircaloy 4, l'alliage utilisé dans le combustible CANLUB, est composé de 98 % de zirconium et de 1,7 % d'étain. Le  $UO_2$  se présente sous la forme de pastilles très denses. Chaque crayon de combustible est

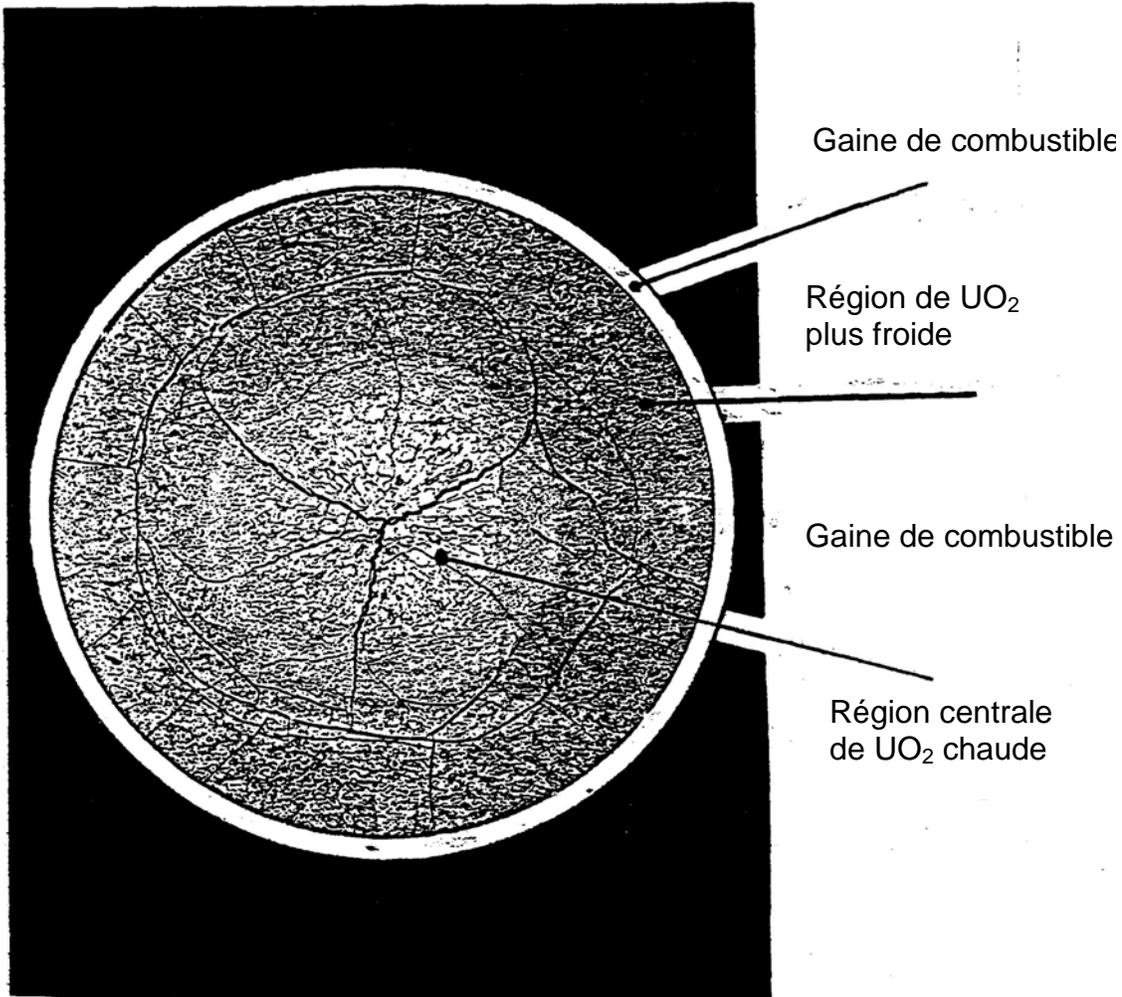
formé d'un tube mince de zircaloy — la gaine de combustible — rempli de pastilles de combustible. Le nom de marque du combustible, CANLUB, provient de la mince couche lubrifiante de graphite entre la pastille et la gaine.

Un bouchon soudé à chaque extrémité du tube assure l'étanchéité de l'ensemble. L'agencement correct des crayons est assuré par les plaques d'extrémité. Des espaceurs brasés (soudés) aux crayons permettent de maintenir l'espacement prévu. Des patins brasés aux crayons externes guident la grappe dans le canal du combustible.



**Figure 16.1**  
**Grappe CANLUB de 37 crayons et pastille de combustible**

Les grappes de 37 crayons du type montré en figure 16.1 alimentent la majorité des CANDU. La centrale de Pickering consomme des grappes formées de 28 crayons plus épais. Cependant, les grappes de 28 et 37 crayons ont les mêmes dimensions et contiennent la même quantité d'uranium.



**Figure 16.2**  
**Coupe d'une pastille de combustible CANDU**

### 16.2 Notions principales

- Le combustible brisé laisse s'échapper des matières radioactives. Pour que le réacteur fonctionne de façon sûre et économique, le combustible doit être bien conçu et bien fabriqué.
- L'exploitation sécuritaire d'un réacteur impose que le combustible ne laisse pas s'échapper de produits de fission ni

pendant l'exploitation normale ni lors d'accidents ou d'excursions de puissance.

- Une exploitation économique implique que chaque grappe contribue à la puissance thermique pendant une longue période. Les aspects économiques supposent que le réacteur fonctionne de façon sécuritaire.
- Les grappes sont composées de crayons de combustible. Ceux-ci sont composés de pastilles d'oxyde d'uranium naturel insérées dans des tubes de zircaloy scellés. Les plaques d'extrémité, les espaceurs et les patins assurent l'espacement conforme des éléments.
- Le combustible CANLUB est caractérisé par la présence d'une fine couche de graphite entre les pastilles de combustible et la gaine.

### 16.3 Matériau et fabrication

Lors de la conception des réacteurs, on a suggéré différents combustibles, notamment l'uranium métallique, ses alliages ou ses composés, et on a procédé à des expérimentations. La combinaison du dioxyde d'uranium ( $\text{UO}_2$ ) comme matière fissile et du zircaloy pour les gaines et les éléments de structure est le choix le plus répandu pour les réacteurs de puissance commerciaux.

#### 16.3.1 La matière fissile

Le combustible devrait posséder plusieurs propriétés particulières :

Forte concentration de matière fissile

La concentration d'uranium des pastilles de  $\text{UO}_2$  à haute densité est moitié moindre de celle de l'uranium métallique. Le recours à l'eau lourde comme modérateur permet d'obtenir un réacteur « critique », malgré la faible concentration d'atomes fissiles dans l'uranium naturel (soit 0,7 % de  $^{235}\text{U}$ ).

L'utilisation d'autres modérateurs exige un enrichissement entre 2 et 5 % de la teneur en  $^{235}\text{U}$  du  $\text{UO}_2$ . Il serait possible d'utiliser l'uranium métallique naturel comme combustible et, comme modérateur, le graphite, une substance moins coûteuse. Toutefois, l'uranium métallique est un combustible difficile à utiliser, pour plusieurs raisons qui seront apparentes lorsque nous comparerons ses propriétés avec celles du dioxyde d'uranium.

On pourrait augmenter la concentration de l'isotope 235 de l'uranium naturel (0,7 %) en séparant l'uranium 238 et en l'extrayant. Un réacteur CANDU produirait plus d'énergie par gramme d'uranium 235 si l'on utilisait un combustible enrichi entre 1 et 2 %.

Une consommation plus complète de l'uranium pourrait toutefois ne pas compenser pour le coût de son enrichissement. Même sans enrichissement, le réacteur CANDU utilise 15 % moins d'uranium qu'un réacteur à l'eau légère équivalent.

#### Transfert efficace de la chaleur

La faible conductivité thermique du dioxyde d'uranium constitue son inconvénient principal. Ainsi, l'intérieur des pastilles est beaucoup plus chaud que leur extérieur. Dans le cœur du réacteur, la température des crayons les plus chauds d'une grappe de 37 éléments avoisine les 1800 °C et, dans une grappe de 28 éléments, les 2200 °C.

Une des extrémités de chaque pastille porte une cavité servant à accommoder l'expansion thermique. L'intérieur surchauffé de chaque pastille se dilate plus que l'extérieur. En outre — la cavité montrée à la figure 16.1 — permet d'accumuler des produits de fission gazeux.

Le dioxyde d'uranium chaud n'est pas friable. Les zones ombrées de la figure 16.2 indiquent les régions internes et externes de la pastille. Lorsque la pastille est dans le cœur du réacteur, la région intérieure de la pastille ne contient pas de fissures. Les contraintes thermiques causent l'apparition de fissures radiales permanentes dans la partie externe de la pastille. Ces fissures peuvent exercer une contrainte sur la gaine, mais il est peu probable qu'elles conduisent au bris du combustible dans les conditions normales.

#### Confinement des produits de fission

Le dioxyde d'uranium conserve dans sa structure 95 % des produits de fission. La plupart des produits de fission libérés proviennent de la région chaude au cœur de la pastille. Ils se diffusent par les fissures dans la partie plus froide des pastilles et s'échappent dans les cavités entre les pastilles. Une partie des substances libres s'échappera si le crayon de combustible se brise.

La pastille est la première barrière contre la libération de produits de fission. Même un rejet de seulement 5 % n'est pas acceptable. Par exemple, l'explosion d'un des réacteurs à Tchernobyl a libéré dans l'atmosphère entre 5 et 10 % des produits de fission du cœur.

### Compatibilité chimique avec l'environnement

Le dioxyde d'uranium résiste mieux à la corrosion que la plupart des matériaux. En revanche, l'uranium métallique chaud est très corrosif s'il est plongé dans l'eau chaude. Les réacteurs commerciaux à l'uranium métallique sont refroidis par du gaz et modérés par du graphite. Le dioxyde d'uranium ne réagit pas avec le matériau de sa gaine. Si elle se brise, le  $\text{UO}_2$  réagit faiblement avec l'eau. Dans des conditions normales, la corrosion ne constitue pas un problème.

Le dioxyde d'uranium réagit avec l'oxygène, ce qui pourrait constituer un problème si, après un accident de réacteur, l'air entrainé en contact avec les pastilles de combustible. Le bris des pastilles libérerait des produits de fission.

### Température élevée de fusion

La température de fusion du dioxyde d'uranium est très élevée, elle dépasse les  $2700\text{ }^\circ\text{C}$ . Cet avantage compense l'inconvénient de sa faible conductivité thermique. Bien que la température au centre de la pastille soit élevée, il existe une grande marge entre la température normale de fonctionnement et la température de fusion.

En cas d'accident, la surface de la grappe peut être recouverte de vapeur ce qui réduit le transfert de chaleur et provoque la fusion du centre des pastilles de dioxyde d'uranium. Dans ces conditions, deux phénomènes peuvent causer le bris des crayons de combustible : la contrainte exercée sur la gaine par l'expansion thermique du  $\text{UO}_2$  fondu et la perforation de la gaine en contact avec le  $\text{UO}_2$  fondu. Il est essentiel que le combustible soit toujours *mouillé*, parce que le refroidissement à l'eau prévient normalement le bris.

### Stabilité dans le cœur du réacteur

Le dioxyde d'uranium reste stable même s'il est soumis à de fortes variations de températures ou à un rayonnement intense de neutrons et de rayons gamma. Certaines substances réagissent mal au rayonnement.

Le principal inconvénient de l'uranium métallique est qu'il change de forme et de volume lorsqu'il est irradié dans un réacteur. Le premier réacteur de puissance commercial, à Calder Hall au Royaume-Uni consommait de l'uranium métallique. Le combustible était fait d'uranium métallique naturel moulé, recouvert d'un alliage de magnésium. Puisque l'on devait retirer systématiquement le combustible avant qu'il ne soit déformé, le séjour trop court du combustible rendait trop onéreuse la consommation de l'uranium métallique.

#### Facilité de fabrication

Le dioxyde d'uranium est une poudre noire chimiquement inerte. On prépare les pastilles de  $UO_2$  comprimées avec un poinçon et une matrice à découper. À ce stade, elles sont à la fois trop grosses, trop délicates et insuffisamment denses pour être utilisées comme combustible. Le frittage de ces pastilles à haute température dans une atmosphère d'hydrogène réduit leur volume de 25 % et produit des pastilles « cérames », denses et solides. Elles sont soumises à un polissage qui leur donnera leur taille définitive et qui facilitera le contact thermique avec la gaine.

À titre de comparaison, la fabrication de combustible métallique est plus complexe et, conséquemment, plus onéreuse. On peut machiner l'uranium métallique, mais les tournures s'enflamment spontanément au contact de l'air et la limaille et la poussière sont dangereuses, car l'uranium métallique est chimiquement toxique en plus d'être radioactif.

#### 16.3.2 Le matériau de la gaine

La gaine du combustible est la seconde barrière contre le rejet des produits de fission. Le zircaloy présente les propriétés désirées.

#### Faible absorption des neutrons

Le zircaloy absorbe peu les neutrons. La plupart des autres substances doivent être éliminées à cause de leur section efficace élevée. Le fer, par exemple, a de bonnes propriétés structurelles, mais absorbe trop de neutrons. Une trop grande absorption implique une plus grande consommation de combustible.

#### Résistance mécanique

En condition normale d'exploitation, la rigidité et la ductilité du zircaloy sont bonnes. L'aluminium pourrait aussi être un bon matériel pour les gaines. Il est moins cher, mais ne résiste pas bien aux températures élevées.

Lorsqu'ils sont soumis à des changements de température, le dioxyde d'uranium et la gaine ne se dilatent pas et ne se contractent pas dans les mêmes proportions. Le frottement du combustible sur la gaine peut étirer et affaiblir cette dernière. Dans le combustible CANLUB, une fine couche de graphite, disposée entre les pastilles et la gaine réduit la friction et les contraintes exercées sur la gaine.

Le zircaloy s'affaiblit aux températures élevées. Il fond à une température supérieure à 1800 °C, mais commence à s'affaiblir au-dessus de 1000 °C. À basse température, sous 1500 °C environ, il

devient cassant. Les gaines de combustible irradié sont particulièrement fragiles. C'est pourquoi on ne devrait jamais retirer du combustible d'un cœur froid.

#### Bonne conductivité thermique

La gaine de zircaloy a une bonne conductivité thermique. Cependant, l'espace entre les pastilles et la gaine entrave l'évacuation de la chaleur. En condition normale, la pression du circuit caloporteur plaque la gaine contre la surface douce des pastilles. La couche de graphite CANLUB peut améliorer le contact thermique.

Un accident peut diminuer la capacité d'évacuation de la chaleur de certains crayons de combustible. Si la pression du circuit caloporteur est basse, la pression des gaz accumulés dans le crayon peut soulever la gaine et la détacher des pastilles. Seules les vieilles grappes contiennent assez de produits de fission gazeux pour produire un tel décollement. Le gaz soumis aux températures élevées découlant d'un accident se dilate et déforme la gaine.

Lors d'un *accident de perte de réfrigérant primaire (APRP)* grave, les contraintes mécaniques causeront des bris du combustible. Les contraintes proviennent de la pression des gaz enfermés ou de l'expansion thermique du dioxyde d'uranium. Lors d'un accident, la combinaison de cette pression mécanique et de l'affaiblissement de la gaine à haute température provoque le bris du combustible.

#### Compatibilité chimique du combustible et du caloporteur

Aux conditions normales d'exploitation, le zircaloy résiste bien à la corrosion par l'eau. Il est compatible chimiquement avec le dioxyde d'uranium, mais est corrodé par certains produits de fission. La couche de graphite CANLUB retient certains des produits de fission les plus corrosifs, ce qui protège partiellement la gaine de l'agression chimique.

Lors d'un accident, la vapeur très chaude oxyde rapidement la gaine de zircaloy. Puisque l'oxydation rend la gaine cassante, le combustible peut se briser lors d'un accident de perte de réfrigérant primaire.

### **16.4 Notions principales**

- Le dioxyde d'uranium ( $\text{UO}_2$ ) est une substance céramique noire, facile à fabriquer.
- Le dioxyde d'uranium résiste aux conditions intenses de température et de rayonnement dans le cœur du réacteur.

- Le dioxyde d'uranium est chimiquement compatible avec le matériau de la gaine et le caloporteur chaud.
- La pastille de combustible est la première barrière contre le rejet de produits de fission. La matrice céramique du  $\text{UO}_2$  retient 95 % des produits de fission.
- La concentration d'uranium dans le  $\text{UO}_2$  est la moitié de celle de l'uranium métallique. Cette concentration est suffisante pour permettre le fonctionnement d'un réacteur modéré, sans qu'il soit nécessaire de l'enrichir.
- À cause de la faible conductivité thermique du dioxyde d'uranium, le combustible est porté à une température élevée, ce qui est acceptable étant donné la haute température de fusion de ce composé.
- La gaine du combustible constitue la seconde barrière contre le rejet de produits de fission. Le zircaloy possède la meilleure combinaison de caractéristiques nécessaires pour une bonne gaine de combustible.
- Le zircaloy présente une faible section efficace d'absorption de neutron, une bonne résistance mécanique et une conductivité thermique adéquate.
- En condition normale, le zircaloy résiste à la corrosion.
- Une mince couche de graphite disposée entre les pastilles et la gaine réduit les interactions chimiques et mécaniques destructives entre ces composantes.
- À basse température, le zircaloy est cassant. Le déplacement du combustible dans un cœur chaud pourrait le briser.
- À haute température, le zircaloy s'affaiblit. En outre, la vapeur chaude l'oxyde ce qui le rend cassant.

## **16.5 Manutention du combustible**

### **16.5.1 Manipulation du combustible frais**

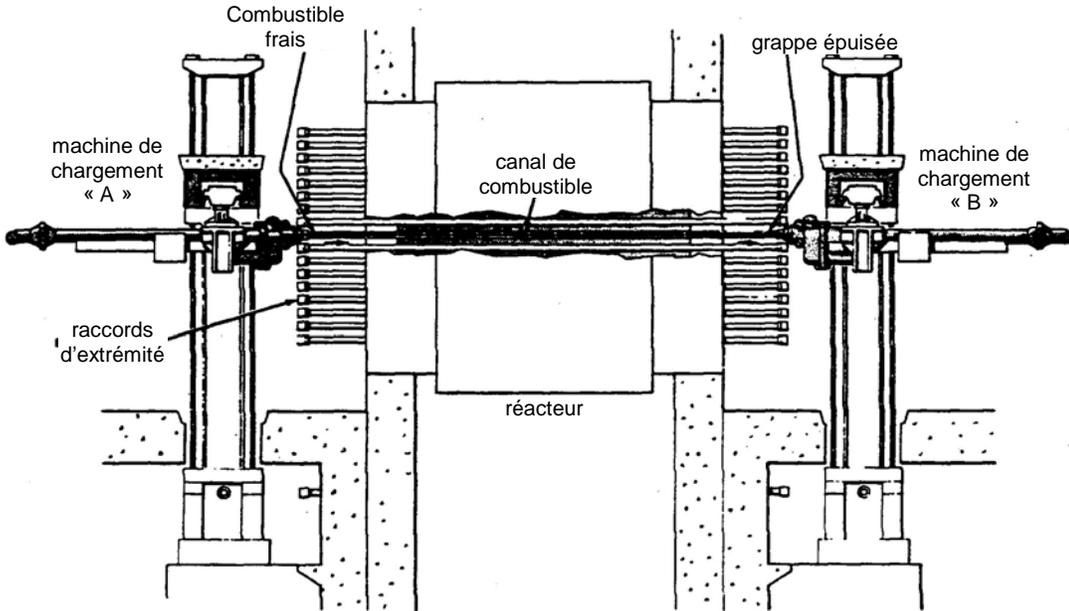
La céramique de dioxyde de d'uranium est cassante et peut s'écailler si l'on manipule brutalement les grappes. Les éclats ou les bords écaillés sont pointus et peuvent transpercer la gaine.

En ajoutant des grappes fraîches, on ne devrait pas introduire de contaminants dans le circuit caloporteur, ce qui pourraient augmenter la corrosion ou endommager, par érosion, le combustible ou le circuit. De petits éclats entraînés dans l'écoulement turbulent des canaux de combustible ont déjà perforé des gaines.

Pour éviter les problèmes susmentionnés, on devra prendre les précautions suivantes lors de la manipulation du combustible frais :

- a) On conservera les grappes dans leur conteneur d'origine, sur leur palette d'expédition jusqu'à ce que l'on soit prêt à les charger dans le cœur. Des accéléromètres attachés au conteneur d'expédition permettent de vérifier, avant l'introduction des grappes, si elles ont reçu des chocs violents pendant leur manutention.
- b) On déballera les grappes par groupe et on les inspectera. On manipulera les grappes horizontalement, puisque les pastilles pourraient s'entrechoquer et s'écailler si l'on retourne les grappes.
- c) Lors de l'introduction de la grappe, on veillera à ne pas l'exposer à l'écoulement transversal du caloporteur dans le raccord d'extrémité plus longtemps que la période maximale prévue. On ne devra pas introduire dans le réacteur une grappe ayant subi des vibrations excessives.
- d) Avant de choisir une grappe pour alimenter le réacteur, on devra contrôler avec soin ses dimensions. Si son diamètre externe est trop petit, l'écoulement du caloporteur la fera vibrer dans le canal de combustible ce qui pourrait entraîner l'écaillage des pastilles ou n'endommagera pas, par frottement, la gaine ou le tube de force. Si le diamètre est trop large, il faudra exercer une force excessive pour mouvoir la grappe. Les tubes de force étant légèrement fléchis, une grappe trop grosse pourrait se coincer lorsqu'on la fera glisser.
- e) On nettoiera les grappes de la poussière visible avec un linge propre afin de ne pas introduire de contaminants dans le circuit caloporteur.
- f) Pour éviter la contamination de la sueur, on manipulera les grappes avec des gants de coton propres.

- g) On charge le combustible frais à la main dans le système d'alimentation en combustible frais. Ce système de transfert charge la grappe dans la machine de chargement du combustible au travers d'un hublot blindé.



**Figure 16.3**  
**Utilisation des machines de chargement**

#### 16.5.2 L'alimentation

L'alimentation d'un réacteur CANDU est une activité routinière. Un couple de machines de chargement télécommandées insère une grappe fraîche et retire une grappe épuisée pendant que le réacteur fonctionne. On peut voir à la figure 16.3 l'alignement des deux machines avec le tube de combustible.

Les deux machines s'alignent de part et d'autre du réacteur. Chaque machine est munie d'un bec qui se verrouille sur le raccord d'extrémité du canal que l'on doit alimenter. Lorsque le raccord est hermétique, on augmente la pression à l'intérieur des machines jusqu'à ce qu'elle soit égale à celle du circuit caloporteur.

Derrière le bec de la machine, on trouve un barillet rotatif percé de chambres et analogue au barillet d'un revolver. Chaque machine est

dotée d'un outil, le ringard qui permet de retirer la plaque d'obturation et le bouchon d'extrémité avant l'avitaillement du réacteur. Pendant cette opération, le barillet conserve la plaque et le bouchon.

Dans chaque machine, différentes chambres du barillet contiennent des paires de grappes fraîches. Les chambres en vis-à-vis de l'autre machine sont vides. Le ringard insère deux grappes fraîches à la fois, et pousse les grappes irradiées dans la chambre vide de l'autre machine.

Après l'avitaillement, le ringard replace la plaque et le bouchon et les deux machines sont dégagées du canal.

L'une ou l'autre machine peut recevoir ou charger des grappes. Le sens de déplacement des grappes alterne d'un canal voisin à l'autre. Selon le modèle de réacteur, l'alimentation en combustible se fait dans le même sens que l'écoulement du fluide caloporteur, ou dans le sens opposé.

Normalement, à chaque visite, on remplace entre quatre et huit grappes par canal. Les ingénieurs en alimentation peaufinent la stratégie d'alimentation. L'alimentation de chaque canal nécessite normalement entre deux et trois heures. À pleine puissance, entre 100 et 140 grappes sont consommées chaque semaine (environ une douzaine de canaux sont avitaillés).

### 16.5.3 Manutention du combustible irradié

La désintégration des produits de fission porte le combustible irradié à une haute température. Les grappes qui viennent d'être retirées sont donc très chaudes. Le refroidissement à l'eau des grappes se poursuit au cours de leur déchargement, de leur transfert et pendant leur stockage. En effet, un contact de quelques minutes à l'air suffirait à les endommager.

Le combustible tiré du réacteur est mortellement radioactif. On doit le manutentionner à distance dans une enceinte blindée. La machine de chargement sort le combustible épuisé qui est pris en charge par un appareillage télécommandé. Le système de transfert du combustible épuisé déplace les grappes aux installations blindées pour le stockage du combustible épuisé. Le stockage dans l'eau assure à la fois le blindage et le refroidissement.

Le combustible épuisé, une fois refroidi, est cassant. On réduit sa manutention en le plaçant dans des plateaux qui serviront également à son stockage.

On devrait retirer le combustible défectueux du réacteur, car l'y laisser entraînerait une augmentation des défauts, ce qui pourrait se traduire par plusieurs conséquences graves. En effet, le rejet de produits de fission dans le caloporteur accroît l'intensité du rayonnement subi par le personnel de la centrale. À cause de la plus grande intensité du rayonnement, les travailleurs ne pourront pas passer autant de temps dans la centrale ce qui entraîne une augmentation du coût du travail routinier dans la centrale.

Une concentration élevée de produits de fission dans le liquide caloporteur accroît les risques d'un rejet auquel le public serait soumis. Une concentration trop élevée d'iode 131 entraînerait la fermeture de la centrale.

La contamination du fluide et du circuit caloporteur augmente le rayonnement de fond et complique la détection et la localisation de la prochaine défektivité.

Une fois que l'on a retiré la grappe endommagée, elle est enfermée dans un conteneur scellé, rempli d'eau. Comme les grappes intactes, elle sera ensuite stockée sous l'eau, aux fins de blindage et de refroidissement.

Le permis d'exploitation de la centrale impose une limite à la quantité de produits de fission radioactifs dans le caloporteur.

### **16.6 Combustible appauvri et aplanissement du flux neutronique**

Dans les centrales, on utilise parfois du combustible CANLUB appauvri dans un but particulier. Les grappes de combustible appauvri sont identiques aux grappes d'uranium naturel mais, alors la concentration en  $^{235}\text{U}$  de ces dernières atteint 0,7 %, elles n'en contiennent que 0,4 ou 0,5 %.

En cours de fonctionnement normal, sur une longue période, l'exposition du combustible aux neutrons varie d'un endroit à l'autre du réacteur. Pour égaliser la disponibilité des neutrons dans le cœur, l'ingénieur responsable de son alimentation choisit le moment où l'on remplacera des grappes et dans quel emplacement les insérera-t-on. Ce travail s'appelle l'aplanissement du flux. Parce que le combustible plus vieux absorbe inutilement un grand nombre de neutrons, on le laisse plus longtemps dans les régions du cœur où le flux de neutron est spontanément plus élevé. On insère le combustible frais, dont le nombre de fissions par neutron est plus élevé, dans les régions où le flux de neutron est moins élevé.

On utilise du combustible appauvri pour aplanir le flux dans les réacteurs récemment avitaillés. Dans un réacteur nouveau ou dont on a changé les tubes, tout le combustible est frais. Pendant le premier, voire le deuxième mois de fonctionnement, le contenu en uranium du cœur est élevé. L'élaboration de produits de fission qui absorbent les neutrons est longue. Au départ, la concentration de plutonium fissile augmente rapidement puisque aucune grappe très irradiée ne peut aplanir le flux. Pour aplanir le flux, on insère habituellement une grappe de combustible appauvri près du milieu de chaque canal au milieu du cœur.

Afin d'aplanir le flux, lorsque l'on retire une grappe endommagée d'un canal, on place souvent une grappe appauvrie. Remplacer le combustible avant qu'il soit épuisé provoque souvent l'apparition d'un « point chaud ». L'ingénieur responsable de l'alimentation choisit où l'on devra insérer les grappes appauvries. On place l'uranium appauvri dans les canaux, afin de maintenir une production constante d'énergie.

On ne remplace pas dans le canal, le combustible irradié que l'on doit retirer pour prélever la grappe endommagée : le combustible irradié pourrait être endommagé s'il est soumis à trop de manipulations.

### **16.7 Notions principales**

- On manipule le combustible frais à l'horizontale, avec des gants de coton. On doit enlever la poussière visible avec un linge propre. La manipulation méticuleuse des grappes permet de réduire l'écaillage des pastilles et l'endommagement des gaines, elle prévient également la contamination chimique.
- On ne peut laisser une nouvelle grappe dans l'écoulement transversal du caloporteur, plus que pendant un temps limité : les vibrations causées par l'écoulement transversal pourraient écailler les pastilles.
- Pour prévenir les dommages aux tubes de force et aux grappes, il est important que les dimensions de ces dernières soient exactes. Les grappes trop petites vibreront dans le canal. Les grappes trop serrées exigent une force excessive pour les déplacer dans les canaux.
- L'alimentation est réalisée à l'aide de deux machines de chargement qui se verrouillent de part et d'autre des canaux. Une machine insère la grappe fraîche et l'autre reçoit la grappe irradiée.

- Une machine de chargement comporte un bec, un barillet rotatif et un ringard. Un bec permet de relier la machine de chargement au canal. Le ringard retire la plaque, le bouchon et les grappes de combustible et les place dans une chambre du barillet.
- Le combustible irradié doit être refroidi et être placé dans un blindage. Puisque le combustible irradié est cassant, on doit le manutentionner le moins possible. On dispose le combustible irradié sur les plateaux pour son stockage sous l'eau. Les grappes endommagées sont placées dans des contenants scellés avant d'être stockées sous l'eau.
- Les produits de fission issus de grappes endommagées augmentent la dose de rayonnement subie par le personnel de la centrale et rendent plus difficile la détection et la localisation d'autres grappes défectueuses. De fortes concentrations de produits de fission entraînent l'arrêt du réacteur afin de réduire le risque couru par le public.
- Pour aplanir le flux neutronique, l'ingénieur chargé de l'alimentation utilise du combustible appauvri, dont la concentration en  $^{235}\text{U}$  est de 0,4 ou 0,5 %, plutôt que 0,7 %. Le recours à ce combustible est nécessaire si le réacteur ne contient que du combustible frais. On ajoute aussi ces grappes appauvries lorsque l'enlèvement d'une grappe défectueuse entraîne le rechargement prématuré d'un canal.

### 16.8 Exercices

1. Le texte mentionne les propriétés désirables du combustible : la teneur en matière fissile et les caractéristiques de la gaine. Pour chacune de ces propriétés mentionnées, précisez si elle est importante pour des raisons économiques ou de sûreté en conditions normales.
2. Pour chacune des propriétés pour lesquelles, en réponse à la question 1, vous avez indiqué qu'elles concernaient la sûreté du fonctionnement, indiquez comment le combustible se comporterait en cas d'accident.
3. Pendant l'exploitation normale, comment la couche de graphite CANLUB prévient-elle les dommages au combustible CANDU?
4. Donnez deux raisons pour lesquelles on utilise du combustible appauvri.
5. Quelles sont les trois conséquences sur le fonctionnement d'une centrale de ne pas recharger un canal qui contient une grappe endommagée?
6. Décrivez comment l'on recharge un canal, en n'oubliant pas le déchargement du combustible irradié.
7. Comparez la manutention de grappes fraîches et épuisées.