

# TECHNOLOGIE ET PERFORMANCE DU COMBUSTIBLE NUCLEAIRE: DES OBJECTIFS PLUS AMBITIEUX

PAR VLADIMIR ONOUFRIEV ET PATRICK MENUT

Les centrales nucléaires nécessitent un investissement initial élevé mais leurs coûts en combustible sont faibles par rapport à ceux des centrales électriques qui utilisent des combustibles fossiles. Par exemple, une centrale nucléaire de 1 000 MW consomme environ 30 tonnes d'uranium par an alors qu'une centrale au charbon de même puissance a besoin d'environ 2,6 millions de tonnes de charbon et une centrale au fuel d'environ 2 millions de tonnes de fuel.

Le marché de l'énergie est aujourd'hui en pleine évolution et de plus en plus de pays où ce marché était auparavant réglementé s'efforcent de l'ouvrir à la concurrence. Par conséquent, pour que l'énergie nucléaire reste compétitive, il faudra notamment que les coûts liés au combustible restent inférieurs aux coûts correspondants des centrales à combustibles fossiles. Les contraintes économiques ainsi que les impératifs environnementaux ont donc donné une impulsion aux efforts visant à améliorer la technologie et la performance du combustible nucléaire sans compromettre la sûreté des centrales.

Des études approfondies et détaillées visant à assurer une utilisation plus efficace du combustible dans les centrales nucléaires sont en cours. Ces études comprennent des évaluations de la conception, du comportement, de la performance et de la fiabilité des éléments combustibles dans différentes conditions d'exploitation et dans différents types de réacteurs de puissance. Une attention particulière a été accordée à la prolongation de la durée de vie des combustibles nucléaires et, au cours des dernières décennies, on a eu tendance à accroître les "taux de combustion" dans la plupart des types de réacteurs. Cela

s'est traduit par des réductions globales des coûts liés au combustible et par une diminution des quantités de combustible usé déchargées des réacteurs dont il faut assurer la gestion. Cependant, un taux de combustion élevé nécessite une meilleure performance du combustible. Par conséquent, des recherches sont en cours pour évaluer le comportement du combustible à différents taux de combustion envisagés. Les autorités compétentes n'autorisent l'augmentation progressive du taux de combustion que si on leur apporte la preuve que cela est possible sans compromettre la sûreté ou la fiabilité du combustible. La recherche est focalisée sur un certain nombre de phénomènes qui pourraient limiter la durée de vie du combustible dans différentes conditions d'exploitation.

Dans le cadre du Groupe de travail international sur la performance et la technologie du combustible des réacteurs à eau, l'AIEA appuie des travaux menés en collaboration par des experts nationaux et internationaux dans ce domaine. En outre, elle organise des programmes de recherche coordonnée auxquels participent des établissements nationaux qui étudient des aspects techniques précis et elle exécute des projets de coopération technique ayant pour objet de transférer des technologies et des compétences. Le présent article donne un aperçu de certaines de ces activités, et en particulier de celles ayant trait à l'accroissement du taux de combustion.

## EXPERIENCE DANS LE DOMAINE DU COMBUSTIBLE

Dans les conditions d'exploitation, les assemblages combustibles sont soumis à des milieux agressifs où s'exercent les

effets synergiques des contraintes, de la chaleur, de la chimie de l'eau de refroidissement et de l'irradiation. Ces effets entraînent une dégradation progressive des propriétés mécaniques et physiques des matériaux de gainage du combustible et d'autres composants structurels des assemblages combustibles et des assemblages de commande. L'augmentation du taux de combustion accroît ces sollicitations physiques et mécaniques, et un important effort de recherche-développement est consacré à l'élaboration de matériaux avancés et notamment de matériaux plus résistants à la corrosion.

D'une manière générale, la fiabilité du combustible nucléaire s'est constamment améliorée au cours des dernières années. Dans le cas des réacteurs à eau ordinaire, la principale filière exploitée dans le monde, le taux de défaillance du combustible s'est établi à  $10^{-5}$ , soit environ dix défaillances par an par million de barres de combustible en service. Les efforts visant à atténuer et à limiter les défaillances du combustible répondent à des considérations économiques et à des impératifs de sûreté. Les compagnies d'électricité et les fournisseurs de combustible se sont fixé comme objectif à court terme un taux de défaillance zéro, ce qui, dans la pratique, signifierait que ce taux serait ramené à  $10^{-6}$ .

Jusqu'à maintenant, les défaillances du combustible ont principalement été dues à des problèmes de conception initiale et de fabrication. Pour y faire face, on est en train de développer et de mettre en oeuvre de

---

*M. Onoufrieu et M. Menut travaillent à la Division du cycle du combustible nucléaire et de la technologie des déchets de l'AIEA.*

nouveaux modèles de barres et d'assemblages combustibles. Par exemple, on sait que, dans les réacteurs à eau ordinaire, les débris métalliques présents dans le circuit de refroidissement primaire sont à l'origine d'une fraction importante des défaillances du combustible (environ 40 à 50 %). Par conséquent, les compagnies d'électricité ont élaboré des programmes visant à déterminer les sources de débris et à les éliminer, et les fournisseurs de combustible proposent des modèles de combustible "résistant aux débris".

Des études appelées "examens après irradiation" sont effectuées afin de surveiller la performance du combustible à des taux de combustion élevés et d'obtenir des données permettant de valider des codes de calcul prédictifs. Il peut s'agir aussi bien d'activités de surveillance non destructives que d'examens et de mesures destructives plus complexes. Il est nécessaire de valider à la fois les nouveaux types de combustible et les nouveaux matériaux de gainage.

Les études de modélisation du combustible sont importantes du point de vue économique et du point de vue de la sûreté. Des prévisions fiables du comportement du combustible dans toutes les situations sont nécessaires pour les calculs de sûreté au stade de la conception. Des codes informatiques ont été mis au point à cet effet. Les connaissances dont on dispose au sujet du comportement du combustible dans des conditions normales et anormales permettent de définir des règles d'exploitation visant à éviter les défaillances du combustible et le relâchement éventuel de produits de fission dans l'environnement ou, dans des cas extrêmes, à prévenir un endommagement grave du combustible et du cœur et tout danger qui pourrait en résulter. Dans ce contexte, la gaine du combustible constitue la première barrière de sûreté.

Même les codes de calculs les plus simples permettent de déterminer des

limites opérationnelles adéquates pour garantir la sûreté d'exploitation, à condition que des limites prudentes soient fixées. La modélisation de la performance du combustible et l'incorporation des connaissances ainsi obtenues dans les codes sont également importantes pour établir des prévisions plus réalistes du comportement du combustible susceptibles de contribuer à améliorer la rentabilité de l'exploitation des réacteurs.

## RECHERCHE COMMUNE

Dans le cadre du groupe de travail de l'AIEA, des experts ont examiné les résultats des recherches et l'expérience en matière d'exploitation et ont conclu que la performance du combustible répondait aux exigences opérationnelles actuelles des réacteurs à eau.

Toutefois, pour appuyer les efforts actuels visant à atteindre des taux de combustion encore plus élevés, de nouvelles recherches doivent être entreprises dans plusieurs domaines, à savoir:

### *Contrôle de la chimie de l'eau.*

A haute température, l'eau est un milieu agressif lorsqu'elle se trouve en contact avec les matériaux de structure. Cela signifie que la fiabilité des assemblages combustibles ainsi que des autres systèmes des centrales nucléaires dépend de la chimie de l'eau circulant dans les systèmes de refroidissement. La corrosion est l'un des principaux processus conduisant à la dégradation des barres de combustible. Au cours des années 80, les spécifications concernant la chimie de l'eau sont devenues progressivement plus strictes et cette démarche privilégiant la pureté s'est traduite par des améliorations importantes, mais il demeurait évident qu'il fallait réduire encore la corrosion.

Depuis, des chimistes ont modifié les spécifications, généralement en ajoutant des produits chimiques au réfrigérant. Des recherches ont en outre permis de mieux comprendre le

mécanisme de la corrosion. Aujourd'hui, les processus de régulation de la chimie de l'eau sont davantage adaptés aux particularités de la centrale — par exemple, les opérateurs disposent de nouveaux outils (codes de calcul et programmes) qui permettent d'optimiser les paramètres et les processus de régulation de la chimie de l'eau dans les limites autorisées par les spécifications tout en tenant compte des particularités de la centrale. Ces questions sont également examinées dans le cadre de programmes de recherche coordonnée de l'AIEA.

**Anomalies de fonctionnement.** Dans les années 90, plusieurs pays ont signalé que la déformation des assemblages combustibles et l'abaissement des barres de commande lors de l'arrêt des centrales posaient des problèmes. Bien que le temps de chute des barres soit toujours largement resté dans les limites prévues par les spécifications techniques des réacteurs en question, ces anomalies ont été soigneusement analysées. L'étude des anomalies en question, et notamment du phénomène des lames d'eau entre les assemblages combustibles, se poursuit. Certaines mesures ont été prises pour éviter qu'elles ne se reproduisent.

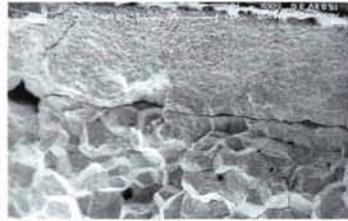
**Irradiation et autres effets.** Des études sont en cours sur un certain nombre de phénomènes liés à l'irradiation du combustible nucléaire lorsqu'on augmente le taux de combustion. Une analyse détaillée de l'évolution des microstructures résultant de l'irradiation est cruciale pour comprendre et prévoir la dégradation des propriétés physiques et mécaniques induite par l'irradiation. (Voir la figure.) Grâce notamment à l'amélioration des connaissances théoriques fondamentales concernant certains phénomènes radio-induits, les prévisions concernant la déformation des tubes de pression continuent à gagner en exactitude, et cela facilite la mise au point de tubes ayant une plus grande longévité.

## ETUDES SUR LE COMPORTEMENT ET LA STRUCTURE DU COMBUSTIBLE

La formation de gaz de fission est directement fonction de la durée d'irradiation du combustible. A des taux de combustion élevés, ces gaz peuvent avoir des effets indésirables et notamment entraîner une montée de la pression à l'intérieur des barres. Des études de ce phénomène sont en cours afin de déterminer les facteurs à prendre en considération pour améliorer les prévisions relatives au comportement du combustible à des taux de combustion élevés. Des chercheurs participant à un programme de recherche coordonnée de l'AIEA sur la modélisation du combustible contribuent à ces études. Dix-neuf codes différents ont été étudiés et ces travaux ont permis d'améliorer et de valider des modèles et des codes élémentaires.

Parallèlement, un code plus avancé de modélisation de la performance du combustible a été transféré à dix pays d'Europe orientale auxquels on a également donné des conseils aux fins de l'application de ce code à l'évaluation de l'exploitation et de la sûreté des réacteurs. Il est actuellement procédé dans le cadre d'un projet de coopération technique de l'AIEA à l'adaptation de ce code afin de pouvoir prévoir le comportement du combustible des réacteurs de type VVER dans des conditions normales et transitoires. Une autre cause de modification de la structure du combustible liée à la formation de plutonium lors de l'irradiation fait également l'objet de recherches. Un certain nombre de pays étudient ce phénomène dans le cadre d'études de sûreté.

**Comportement du combustible dans des conditions accidentelles.** Pour améliorer les connaissances relatives au comportement du combustible dans différentes conditions, des essais de combustible sont effectués dans des conditions d'accident simulées. Deux scénarios d'accident sont étudiés: l'apport de réactivité et la perte de réfrigérant; les deux scénarios comprennent des essais



➔ Couche périphérique

➔ Structure normale du combustible



Des études ont montré qu'à des taux de combustion élevés la structure du combustible est modifiée comme l'indiquent ces vues fortement grossies à l'aide d'un microscope électronique. Il se forme une couche périphérique caractérisée par des grains ultrafins, une forte porosité (comprise entre 10 et 20 %) et la présence de plutonium. Le cercle ci-contre est une vue rapprochée de la structure normale du combustible.

destinés à vérifier la performance du combustible à des taux de combustion élevés. Les résultats préliminaires des recherches menées à ce sujet dans certains Etats Membres ont été présentés en mai 1997 lors d'une réunion du groupe de travail de l'AIEA. On estime que les résultats définitifs de ces recherches seront décisifs pour parvenir à augmenter les taux de combustion comme on le souhaite au cours des prochaines années.

### DEFIS TECHNIQUES

On compte que la tendance à augmenter les taux de combustion se poursuivra au cours de la prochaine décennie, principalement pour des raisons économiques. On table sur des augmentations d'au moins 32 % d'ici 2010 pour différents types de combustible utilisés dans les réacteurs à eau. Des essais et des travaux de qualification seront nécessaires avant que l'utilisation de ces combustibles à des taux de combustion progressivement plus élevés puisse être autorisée. Dans certains domaines, des travaux de recherche-développement considérables sont nécessaires car on n'est pas encore entièrement parvenu à déterminer, même après examen, la cause de certaines défaillances du combustible. En outre, bien que les combustibles à mélange d'oxydes n'aient connu que

peu de défaillances, on a besoin de davantage de données expérimentales pour étudier le comportement des barres de combustible à mélange d'oxydes défectueuses, en particulier pour des taux de combustion élevés et des temps d'irradiation plus longs.

Le Groupe de travail de l'AIEA sur la performance et la technologie du combustible des réacteurs à eau, qui comprend des experts de 26 pays et de trois organisations internationales, est l'un des mécanismes par lesquels l'AIEA aide les pays à tirer mutuellement parti de leur expérience et de leurs réalisations technologiques en concentrant leurs efforts sur des sujets et des besoins particuliers. Par exemple, conjointement avec l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économiques, l'AIEA a créé une base internationale de données expérimentales sur la performance du combustible comprenant des données provenant d'expériences effectuées sur plus de 300 barres de combustible qui sert à appuyer les recherches menées dans les pays participants. Conjointement avec d'autres initiatives, ces activités contribuent aux efforts collectifs entrepris pour relever les défis techniques futurs et pour assurer une exploitation plus efficiente des centrales nucléaires. □