

# Technologie et conception avancées des réacteurs à eau lourde

*Plusieurs pays investissent dans le développement des HWR*

J.J. Lipsett et J.T. Dunn

On compte actuellement, répartis entre six pays, 44 réacteurs à eau lourde (HWR) industriels en exploitation ou en construction. Depuis un certain nombre d'années, ces HWR sont en tête du palmarès mondial par leurs facteurs de disponibilité élevés pendant toute leur durée utile; ils ont ainsi fait la preuve qu'ils pouvaient valablement concurrencer les réacteurs à eau légère.

Outre qu'ils permettent d'obtenir des facteurs de disponibilité élevés dans les centrales de base, les réacteurs à eau lourde permettent aussi, au besoin, d'obtenir un très bon suivi de charge. Leur performance d'exploitation, sur des points essentiels comme le combustible et les générateurs de vapeur, est excellente et, fonctionnant à l'uranium naturel, ils permettent de très grosses économies au poste combustible.

Les réacteurs à eau lourde représentent une technologie relativement nouvelle et leur potentiel de développement est activement exploré, avec l'étude de modèles avancés en Argentine, au Canada, en Inde et au Japon.

## Caractéristiques fondamentales des réacteurs à eau lourde

Deux modèles industriels ont été mis au point. Le premier, étudié par Siemens/KWU en République fédérale d'Allemagne, comporte une cuve à pression dans laquelle est enfermé le cœur du réacteur tout entier. L'autre type, le réacteur Candu, a été étudié au Canada par l'Energie atomique du Canada, Limitée (EACL) en collaboration avec Ontario Hydro et diverses entreprises canadiennes\*. La cuve unique est remplacée par plusieurs centaines de tubes de force. Ces deux réacteurs sont modérés à l'eau lourde et présentent plusieurs caractéristiques de base communes:

- Une excellente économie des neutrons permet d'appliquer en pratique un cycle du combustible (uranium naturel) à passage unique. Les autres options de cycle du combustible également possibles sont très nombreuses.

- Le rechargement en marche offre plusieurs avantages essentiels: facteurs de disponibilité plus élevés, les arrêts périodiques pour rechargement étant éliminés; réduction du nombre de dispositifs de commande de la réactivité et de la distribution du flux; remplacement en charge du combustible défectueux; enfin, bonne accessibilité pour l'inspection en service.

M. Lipsett et M. Dunn collaborent au projet du réacteur Candu avancé des Laboratoires nucléaires de Chalk River (Canada).

\* «Candu» est une marque déposée.

## Réacteurs industriels à eau lourde actuellement en exploitation ou en construction

	Nombre de tranches	Production brute (MWe)
<i>Type à cuve</i>		
Argentine	2	367-750
<i>Type à tubes de force</i>		
Argentine	1	648
Canada	22	540-935
Inde	12	220-250
Pakistan	1	137
République de Corée	1	679
Roumanie	5	705
<b>Total</b>	<b>44</b>	<b>25 013</b>

- Les variations de réactivité dans toutes les conditions d'exploitation, de l'arrêt à froid à la pleine puissance, sont faibles, ce qui permet de réduire l'antiréactivité des dispositifs de commande et de minimiser les perturbations locales de distribution du flux, éliminant de ce fait les problèmes potentiels dus à des transitoires localisés de surchauffe du combustible. Cela facilite aussi la commande automatique de la réactivité en circuit fermé, ce qui donne plus de souplesse au suivi de charge.

Le pas relativement grand du réseau du cœur permet de séparer physiquement le caloripporteur du modérateur. L'eau lourde sous pression est utilisée comme caloripporteur dans tous les HWR industriels actuellement en exploitation; toutefois, des exemplaires expérimentaux et des prototypes de réacteurs à eau lourde à tubes de force ont été construits dans plusieurs pays pour juger des mérites de l'anhydride carbonique, de l'eau légère et de fluides organiques comme caloripporteurs. Le Japon a récemment fait connaître son intention de construire un réacteur de démonstration de taille industrielle (600 MWe) utilisant comme caloripporteur l'eau légère bouillante.

Pour la plupart des réacteurs à eau lourde, on utilise actuellement comme combustible de l'uranium naturel, souvent par souci d'indépendance vis-à-vis des installations d'enrichissement de l'uranium. L'utilisation d'uranium légèrement enrichi se traduit par une amélioration sensible des coûts du cycle du combustible et de l'utilisation de l'uranium. Le plutonium et/ou l'uranium provenant du combustible irradié des réacteurs à eau légère (LWR) peuvent aussi être efficacement brûlés dans les

HWR actuels, établissant ainsi une synergie entre les HWR et les LWR. A longue échéance, la dépendance vis-à-vis de l'uranium pourrait être sensiblement réduite en utilisant du thorium.

### Objectifs de conception et de développement

Le défi que doivent relever les programmes actuels de conception et de développement consiste à réduire les coûts de production de l'électricité tout en maintenant un niveau élevé de sûreté nucléaire et une bonne performance d'exploitation. Il importe aussi de parvenir à un degré supérieur de confiance dans la sûreté des réacteurs avancés à eau lourde comme on cherche à le faire partout dans le monde pour tous les types de réacteurs. Il faudra donc établir que cette sûreté accrue est fondée sur l'expérience d'exploitation, des techniques éprouvées et des travaux de recherche-développement concluants.

**Amélioration de la sûreté.** Les réacteurs à eau lourde ont déjà fait la preuve de leur sûreté d'exploitation. La sûreté des centrales déjà en service est quant à elle améliorée en permanence, à mesure que l'on y incorpore les résultats de l'expérience et de l'évolution technologique. Pour les centrales futures, divers pays ont défini un certain nombre d'objectifs intéressant le maintien ou l'amélioration du niveau de sûreté de la centrale, des travailleurs et du public, et visant à renforcer la confiance dans cette sûreté.

Plusieurs programmes nationaux cherchent aussi à réduire la radioexposition du personnel d'exploitation et d'entretien. Pour cela, on s'efforce d'optimiser dans le détail la gestion du tritium, de déceler rapidement les fuites, de localiser et d'extraire promptement, en marche, le combustible défaillant, d'améliorer la décontamination des écrans et du fluide calorporteur, et de mieux surveiller les matériaux d'étanchéité. Quelques pays se sont fixés pour objectif de maintenir les rejets normaux de la centrale à leur valeur actuelle, ou de les réduire encore, alors qu'ils sont normalement déjà inférieurs à 1% de la limite réglementaire.

Des centres de commande pour les nouveaux réacteurs Candu sont actuellement mis en place pour améliorer l'efficacité de l'opérateur et réduire le risque d'erreurs de conduite. Ces centres bénéficient de la longue expérience acquise avec des réacteurs Candu industriels équipés de dispositifs numériques de commande. Les solutions nouvelles feront appel aux systèmes experts et autres techniques assistées par ordinateur et permettront de réduire la charge de travail de l'agent de conduite tout en améliorant la qualité de l'information dont il disposera.

De par leur conception même, les réacteurs à eau lourde multiplient les facteurs de sûreté passive. Le rapport eau/combustible élevé est particulièrement intéressant, car le modérateur lui-même constitue une source froide avec circuit de refroidissement distinct. Le modérateur froid des HWR à tubes de force procure également un milieu inoffensif pour les dispositifs de contrôle de la réactivité, et permet de faire appel à des systèmes complètement indépendants de mise à l'arrêt par barres à insertion rapide et par injection de poison liquide, ce qui concourt à abaisser la probabilité de fusion du cœur.

On estime que, pour améliorer encore le système de refroidissement du modérateur, il est logique de cher-

cher à y ajouter des dispositifs passifs. Le rejet dans l'environnement de la chaleur résiduelle par un système de refroidissement de l'enveloppe de confinement ou du modérateur réduirait sensiblement la probabilité d'accidents graves et prolongerait le délai de grâce du réacteur.

**Réduction des coûts.** Les capitaux investis dans une centrale sont la principale composante des coûts de production de l'électricité. Pour réduire sensiblement l'investissement, il faut abaisser à fois le coût du matériel et de la main-d'œuvre, et minimiser les intérêts à payer pendant la phase de construction. Il existe plusieurs moyens d'atteindre ces objectifs: 1) modifier fondamentalement les plans de la centrale de manière à réduire sensiblement la durée des travaux; 2) mettre au point des éléments modulaires de tuyauterie ou de structure pouvant être réalisés en usine et transportés, par voie d'eau ou autres moyens de surface, ce qui permet non seulement de réduire les coûts, mais aussi d'améliorer les délais et le contrôle de la qualité; 3) étudier des modèles normalisés de centrales adaptables à des sites très variés, et des dispositions contractuelles permettant de réduire les coûts et les délais; 4) informatiser la conception, le dessin, la documentation et la gestion pour réduire le coût direct de la main-d'œuvre et améliorer la qualité du travail.

**Performance améliorée de la centrale.** Pour maintenir un niveau élevé de disponibilité, certaines améliorations de conception sont nécessaires. Par exemple, on cherche à atteindre, pour certains nouveaux modèles de réacteurs, un facteur de disponibilité de 94% sur la durée totale d'utilisation. Dans les dix prochaines années, à mesure qu'augmentera le nombre de réacteurs atteignant l'âge de la retraite, les compagnies d'électricité se préoccuperont davantage de la durée utile à prévoir pour les installations et des moyens de prolonger leur exploitation en remplaçant ou en remettant en état certains composants. Etant donné qu'une centrale nucléaire se caractérise par un gros investissement initial et de faibles coûts d'exploitation, la possibilité de la maintenir plus longtemps en exploitation présente un avantage économique certain.

### Perspectives de développement et de diffusion

Les prévisions énergétiques indiquent que la demande mondiale d'électricité augmentera régulièrement au cours du prochain siècle en raison de la croissance démographique, de l'urbanisation accélérée et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant, en particulier dans les pays qui sont au seuil de l'industrialisation. L'électrotechnique est souple, propre, sûre, et d'un bon rendement dans ses applications tant domestiques qu'industrielles. Un approvisionnement fiable et bon marché en électricité d'origine nucléaire est une garantie d'emplois dans le secteur nucléaire lui-même, mais aussi dans tous les secteurs techniques avancés où l'on cherche une implantation permettant d'abaisser les coûts de production.

**Centrales HWR de grande et moyenne puissance.** La plupart des réacteurs à eau lourde exploités commercialement ont une puissance brute de 540 à 935 MWe. Cette gamme de puissances continuera certainement

d'intéresser les pays qui disposent d'un réseau étendu bien aménagé et ceux qui prévoient un taux de croissance relativement fort.

La conception de la centrale Candu-6 normalisée (autrefois Candu-600) à tranche unique est issue de la centrale Pickering A (4 × 540 MWe), en Ontario, dont le grand succès fait référence. Actuellement, quatre centrales de ce type sont en service (deux au Canada, une en Argentine et une en Corée du Sud), tandis que cinq autres sont en construction en Roumanie. Ces neuf tranches ont une puissance nominale de 640 à 680 MWe. Ces cinq dernières années, le modèle Candu-6 a été amélioré, pour devenir Candu-6 Mark 2, dont la puissance a été portée à environ 800 MWe. Les améliorations portent sur la sûreté, le facteur de disponibilité et les conditions d'exploitation. Diverses modifications ont aussi permis de réduire l'investissement initial et d'abrégé les délais de construction.

La construction de la centrale nucléaire de Darlington, en Ontario, au Canada (4 × 935 MWe bruts) est presque achevée. Cette centrale est le fruit d'une amélioration permanente des centrales Candu à plusieurs tranches, elles-mêmes dérivées de Bruce-A (4 × 826 MWe) et Bruce-B (4 × 845 MWe), en service depuis de longues années. L'effort de conception a surtout porté sur l'amélioration des structures principales, la réduction du nombre de composants des systèmes principaux, l'accessibilité des composants et des systèmes, et l'informatisation de la commande de la centrale, du fonctionnement des systèmes de sûreté et de leur surveillance.

En République fédérale d'Allemagne, la filière HWR à eau sous pression de Siemens est issue du réacteur de recherche polyvalent MZFR (57 MWe). Les modèles de cette gamme à cuve sous pression ont pour héritiers les réacteurs à eau lourde Atucha-1 et Atucha-2 de 750 MWe, actuellement en construction en Argentine; les améliorations: réduction de la teneur en tritium, barres de commande à commande hydraulique, capacité accrue de stockage du combustible, et différentes options de cycle du combustible.

En Inde, le programme HWR est fondé sur des réacteurs à tubes de force d'une puissance nominale de 235 MWe. On y étudie actuellement de nouveaux modèles pour tranches jumelles de 500 MWe; 6 tranches de 500 MWe sont actuellement en commande, leur exploitation commerciale étant prévue pour 1997. Les modèles de 500 MWe présenteront des améliorations en ce qui concerne le plan de la centrale, le confinement, les systèmes, la manutention du combustible et le rechargement en marche, ainsi que les systèmes de sûreté. Le programme indien se caractérise toujours par la volonté d'acquiescer une autonomie nationale dans tous les domaines: recherche-développement, ingénierie, fabrication industrielle, construction et exploitation, comme en témoignent l'intégration de modifications dictées par l'évolution des techniques et la normalisation de plusieurs caractéristiques de conception.

Au Japon, un réacteur thermique avancé (ATR), modéré à l'eau lourde et refroidi à l'eau légère bouillante, est étudié pour utiliser le plutonium. Sa concep-

tion se fonde sur le réacteur Fugen, prototype de 165 MWe, exploité commercialement depuis 1979. La performance escomptée du combustible MOX a été démontrée avec succès par l'exploitation de Fugen. La centrale de démonstration ATR de 606 MWe devrait entrer en phase d'exploitation industrielle en 1997.

**Centrales HWR de faible puissance.** Les tranches de moindre puissance semblent mieux convenir lorsque le taux de croissance de la charge est faible, le réseau de distribution électrique limité et le problème du financement contraignant. Or, ces facteurs se trouvent réunis dans nombre de pays.

Le réacteur Argos, nouvel HWR de 380 MWe, actuellement étudié par une société de génie nucléaire, en Argentine, en coopération avec Siemens, est un modèle de pointe de la gamme PHWR de Siemens; il comporte plusieurs éléments visant à améliorer la sûreté, à assurer l'économie d'exploitation et à limiter les investissements.

Au Canada, l'Energie atomique du Canada, Limitée, développe un nouveau modèle CANDU, le CANDU-3, d'une puissance électrique brute de 480 MWe. La conception de ce modèle vise une sûreté accrue, un facteur de disponibilité de 94% sur la durée totale d'utilisation, un délai de construction de 30 mois, et l'adaptabilité à la plupart des sites, dans le monde entier, en centrales à une ou plusieurs tranches. Des pourparlers sont en cours avec les compagnies d'électricité canadiennes et avec les autorités de plusieurs pays, et devraient se traduire prochainement par une ou plusieurs commandes.

En Inde, la base actuelle de quatre HWR à tubes de force de 235 MWe s'augmentera des huit tranches actuellement en construction et de quatre autres, dont la mise en service est prévue pour après 1996.

Par delà la production fiable d'électricité bon marché, les HWR pourraient servir au chauffage urbain et à la production de chaleur industrielle, adaptée par exemple à l'extraction sur place du pétrole des gisements de sables bitumineux.

### En résumé

Les réacteurs à eau lourde industriels ont fait la preuve de leurs nombreux mérites pour la production d'électricité. On relève notamment un excellent bilan de sûreté, des facteurs élevés de disponibilité pendant toute la durée utile du réacteur, le faible coût du combustible et la qualité des performances sur de nombreux autres plans, l'ensemble indiquant que cette technologie est fondamentalement saine.

Cette filière offre d'excellentes perspectives d'évolution. La séparation des circuits caloripporteurs et modérateurs permet d'améliorer encore les caractéristiques de sûreté. Les capacités connues mais non encore pleinement exploitées et l'avenir prometteur qu'annonce la faculté d'adaptation de ces réacteurs à des cycles avancés du combustible et à diverses applications permettent de penser que la technologie HWR continuera de prospérer et récompensera généreusement l'investissement dans la recherche, le développement et les études de conception.

