

HTGR: Développements possibles de la technologie et de l'expérience d'exploitation

Le programme de la République fédérale d'Allemagne apporte du nouveau

par R. Schulten

Les éléments combustibles entièrement céramiques utilisés dans les réacteurs à haute température refroidis par gaz (HTGR) peuvent supporter de très hautes températures sans libérer de produits de fission. On peut les employer dans des configurations de cœur à faible puissance volumique où les seuls phénomènes physiques suffisent à freiner les montées de températures et à limiter les températures maximales atteintes pendant l'évacuation de la chaleur de désintégration. Ces propriétés fondamentales, vérifiées par de longues études et par l'expérience d'exploitation de ces réacteurs, a permis de dégager un principe de sûreté entièrement nouveau: l'élément combustible lui-même devient un confinement pouvant retenir les produits de fission même dans le cas du plus grave accident hypothétique.

L'application de ce principe permet de concevoir des centrales simplifiées excluant le risque de dommages graves, plus transparentes, et pouvant être construites au moins en grande partie par les pays en développement, sans compter leur fiabilité et leur facilité d'entretien.

Expérience d'exploitation des HTGR en République fédérale d'Allemagne

L'exploitation en RFA de deux réacteurs à haute température AVR (Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktoren) et THTR (Thorium-Hochtemperatur-Reaktor) et le programme d'études associé ont beaucoup contribué au développement de la technologie de cette filière.

Le réacteur AVR fonctionne depuis 20 ans et produit 50 mégawatts thermiques (MWth). Il a été conçu pour démontrer que l'on peut réaliser et faire fonctionner un réacteur avec des éléments combustibles sphériques portés à haute température. Pendant cette période, plusieurs types différents d'éléments combustibles ont été essayés, les uns au mélange thorium-uranium et les autres à l'uranium faiblement enrichi. La plupart du temps, la température du gaz à la sortie du cœur atteignait 950°C. La qualité des éléments combustibles

s'améliorait chaque année et la contamination de l'hélium était très faible. Tous les composants ont fonctionné sans problème.

Grâce au coefficient de température fortement négatif, on a pu montrer qu'il serait possible, même sans barres de commande, de maîtriser tous les événements qui se produiraient en cours d'exploitation, y compris les accidents. La commande du réacteur s'est d'ailleurs faite en grande partie en utilisant l'effet de ce coefficient sur la réactivité.

Plusieurs problèmes d'exploitation ont été examinés. Il s'agissait en particulier de maintenir CO, H₂ et CH₄ à de faibles concentrations dans le circuit d'hélium pour éviter la corrosion. Dans les conditions normales de fonctionnement, les fuites d'eau et de vapeur au niveau du générateur de vapeur ont été insignifiantes. Il s'est produit une seule fuite importante due à la rupture d'un tube, mais elle a été maîtrisée sans avoir causé de dommage. Après évacuation de l'eau et réparation du tube, le réacteur a pu fonctionner de nouveau à plein régime.

Le chargement et le déchargement continus en marche des galets de combustible se sont faits sans aucune difficulté après quelques réparations sur la machine manipulatrice. En 20 ans, environ deux millions d'éléments combustibles ont été utilisés et la proportion d'éléments endommagés est négligeable.

Le problème de la poussière dans le circuit primaire a également été réglé. L'équipe a beaucoup appris sur le comportement des produits de fission et a examiné de près les phénomènes de désorption et d'absorption de divers produits de fission par le graphite. Il s'est avéré que les éléments combustibles à taux de combustion élevé (100 000 MWd/t) libéraient des quantités négligeables de produits de fission à des températures atteignant 1600°C. Il faut noter que les expériences qui ont été faites pour vérifier la sûreté ont montré qu'en cas de défaillance tant du circuit de refroidissement que des dispositifs de réglage de la réactivité le réacteur s'est stabilisé uniquement grâce au coefficient négatif de température et la chaleur de désintégration s'est évacuée par conduction et par rayonnement, sans endommager le réacteur, qui a pu être remis en marche quelques jours après la fin des expériences.

M. Schulten est directeur de l'Institut pour l'étude des réacteurs du Kernforschungszentrum de Juliers, en République fédérale d'Allemagne.

Le réacteur au thorium de 300 MWe fonctionne depuis 1985 et continue de confirmer l'excellence de la technologie du réacteur à haute température refroidi par gaz. Le fait que les émissions de produits de fission sont réduites a eu pour conséquence, entre autres effets positifs, de n'exposer le personnel d'exploitation et d'entretien qu'à une faible dose collective de rayonnement. Par ailleurs, tous les calculs de paramètres physiques et techniques se sont avérés justes.

Dans les premiers temps, il s'est posé deux problèmes d'ordre mécanique dont les causes ont pu être aisément déterminées. Le premier était le nombre plus élevé que prévu d'éléments combustibles endommagés dans la charge initiale du réacteur. On a pu l'attribuer à une compaction excessive de cette première fournée due à ce que l'on avait autorisé le personnel à pénétrer dans le cœur et à marcher sur les boulets pendant le chargement. De plus, on avait procédé à plusieurs essais des barres de sécurité dont la pénétration dans le lit de boulets avait encore aggravé le tassement. Le cyclage continu du combustible a permis d'extraire la plupart des galets endommagés et de ramener le cœur à une densité normale en l'allégeant. La proportion d'éléments combustibles endommagés a diminué progressivement jusqu'au niveau prévu. L'autre problème était la diminution du débit de galets à mesure que le réacteur montait en puissance. On l'a résolu en installant une dérivation sur la base d'extraction. La détérioration récemment découverte des boulons de fixation de l'isolement des conduites qui relient le réacteur au générateur de vapeur n'a pas compromis le fonctionnement normal de l'installation et l'on peut dire qu'aucun des problèmes mentionnés n'a nui au prestige de la technologie de base de ce type de réacteur.

Conception de la sûreté du HTGR

Les systèmes de sûreté des centrales nucléaires classiques sont une combinaison judicieuse de dispositifs actifs et passifs. Les systèmes actifs fonctionnent par interaction de cellules sensibles et de mécanismes de commande dépendant d'une source d'énergie. Ils doivent répondre à des normes très strictes de fabrication et de fonctionnement. Les systèmes passifs, eux, n'exigent pas une très grande précision lors de leur construction, ni une étroite surveillance. Les plus intéressants sont ceux qui exploitent des phénomènes naturels. Aussi, la technologie future de la sûreté s'efforcera-t-elle de recourir le plus possible à ces systèmes.

Le HTGR est déjà équipé dans ce sens et peut même résister à des accidents plus graves que les accidents de référence. Du fait de la grande capacité thermique de ce réacteur, les températures montent très lentement. Il s'ensuit qu'il n'est pas nécessaire d'intervenir immédiatement après un accident, mais il faut éventuellement limiter les températures maximales pour éviter le dégagement de produits de fission.

La sûreté de ce réacteur peut-elle dépendre uniquement de moyens passifs? Les connaissances actuelles et les prévisions permettent de répondre par l'affirmative. Les mesures de sûreté ont surtout pour objet de prévenir le rejet de produits de fission en quantités dangereuses et consistent à limiter la température des éléments combustibles à des niveaux inoffensifs et à empêcher la

corrosion. Ces phénomènes peuvent résulter de l'augmentation de la réactivité, de la chaleur de désintégration et de l'action de la vapeur ou de l'air sur les métaux. Dans la mesure où les éléments combustibles sont suffisamment protégés contre ces attaques, les alentours de la centrale ne peuvent pas subir de dommages.

Si le combustible est à l'uranium faiblement enrichi, il ne subira pas de contraintes excessives résultant d'un accroissement de la réactivité et de l'échauffement consécutif. Toutes les poussées de réactivité, y compris celles qui sont imputables à une fuite de vapeur, sont compensées par le coefficient de température négatif, sans qu'il soit besoin d'actionner le dispositif de mise à l'arrêt. Il s'ensuit que les accidents de réactivité ne peuvent pas entraîner d'augmentation dangereuse de la température qui aurait pour effet d'endommager les éléments combustibles et de libérer des produits de fission. Cette correction obéit à des lois physiques et opère passivement.

Le combustible à l'uranium faiblement enrichi présente plusieurs autres avantages. Par exemple, en cas de fuite de vapeur dans le circuit primaire, on peut réduire la variation de réactivité au minimum en ajustant en conséquence l'efficacité du modérateur. Le cycle du combustible à l'uranium fortement enrichi/thorium a été remplacé il y a quelques années par un cycle à l'uranium faiblement enrichi, car on s'est rendu compte que, dans les conditions de l'offre d'uranium, le cycle au thorium à taux élevé de conversion cesserait d'être économique puisqu'il implique un recyclage. En revanche, avec un cycle à l'uranium faiblement enrichi, l'uranium peut être exploité comme pour un réacteur à eau légère, avec recyclage. En outre, le stockage immédiat du combustible épuisé sans retraitement est possible et rentable, car le revêtement céramique suffit à empêcher le dégagement de produits de fission.

En cas de défaillance du circuit de refroidissement, la chaleur de désintégration du combustible est, elle aussi, évacuée passivement selon les lois physiques. En fonction de la puissance, on peut combiner la capacité thermique du réacteur, le transfert de chaleur et la configuration du cœur de telle manière qu'une température maximale déterminée ne puisse être dépassée. Rappelons encore que l'obstacle au dégagement des produits de fission est suffisant.

La corrosion des éléments combustibles par l'eau ou la vapeur en cas de fuite dans le cœur a également fait l'objet d'une étude approfondie. Comme on l'a vu, l'accroissement de la réactivité dans ce cas peut être maîtrisé par un ajustement judicieux de l'intervention du modérateur. Il s'ensuit que l'on peut aussi faire face à ce genre d'accidents sans recourir aux moyens nucléaires de mise à l'arrêt. Comme toutes les conséquences de ce genre de fuite se déroulent en l'espace d'une heure et que, dans ce laps de temps, la température des éléments combustibles varie peu par rapport à la normale, la corrosion qui en résulte est insignifiante et ne risque pas de donner lieu à un dégagement important de produits de fission radioactifs. La corrosion par l'air n'est possible qu'après une baisse de pression, c'est-à-dire à la suite d'une perte de fluide de refroidissement qui rétablit l'équilibre entre la pression interne et la pression externe. Dans ce cas, les phénomènes de diffusion et de convection amèneront de l'air dans la

cuve du réacteur, mais sous faible débit, du fait de la section toujours réduite de la brèche étant donné la qualité des aciers ou du béton précontraint utilisés. La corrosion des éléments combustibles sera donc lente et superficielle, et le cœur ne sera jamais gravement endommagé. Actuellement, la technologie du système de sûreté d'un petit HTGR prévoit uniquement deux composants passifs: les éléments combustibles parfaitement fiables à haute température et la cuve du réacteur qui contient le circuit primaire.

Or, il semble que l'on pourrait encore simplifier et affiner cette technologie. Il serait possible par exemple d'enduire ou d'imprégner les éléments combustibles avec du carbure de silicium (SiC), afin de les protéger de la corrosion par l'air ou l'eau qui s'introduirait dans le circuit primaire en cas d'accident. Cette corrosion, déjà faible comme nous l'avons vu, deviendrait alors négligeable. Dans ces conditions, même l'intégrité de la cuve du réacteur cesserait d'être un paramètre critique de la sûreté; ce sont les éléments combustibles eux-mêmes qui prendraient la relève dans tous les cas d'accident. L'ensemble des composants du réacteur, les systèmes de commande et le personnel ne serviraient plus qu'à assurer la disponibilité de l'installation, et leur fonction de sûreté serait extrêmement réduite. Cette conception devrait permettre de réaliser des centrales nucléaires plus simples encore. Les normes de qualité exigées jusqu'à présent pour la fabrication et la surveillance des composants pourraient être considérablement assouplies. En même temps, confier aux éléments combustibles le soin de faire obstacle aux accidents graves est un moyen simple et pratique d'éviter les catastrophes et de réduire très sensiblement le coût d'une centrale nucléaire.

L'adjonction du carbure de silicium permettrait aussi de supprimer éventuellement un circuit intermédiaire étant donné que, en cas de rupture de conduite, le cœur resterait toujours suffisamment protégé contre l'effet corrosif de la vapeur ou de l'air qui s'y introduirait. Le même avantage résulterait de l'emploi de turbines à gaz en circuit direct qui assureraient un excellent rendement en vue d'une coproduction.

La maîtrise des accidents de réactivité grâce au coefficient de température négatif, l'évacuation de la chaleur de désintégration par conduction et rayonnement et, enfin, le traitement anticorrosion au carbure de silicium sont donc en résumé les caractéristiques de conception pour la sûreté dont nous venons de parler, et dont on peut envisager l'application à des réacteurs de plus grande puissance. Dans ce cas, la surface du cœur du réacteur doit être suffisamment développée par rapport à son volume, ce que l'on peut obtenir avec diverses géométries. En l'occurrence, une formule particulièrement bien adaptée serait la forme torique. A titre d'exemple, un tore de 16 mètres de diamètre, huit mètres de haut et deux mètres d'épaisseur avec une puissance volumique de trois mégawatts par mètre cube donnerait une puissance totale de l'ordre de 1000 MWe.

Le confinement pourrait être soit un caisson en béton précontraint, soit une cuve précontrainte composée d'un assemblage de plaques d'acier coulé. La technologie de ces cuves n'a plus de secret. Un modèle réduit (1:10) de la cuve précontrainte du dernier type a été soumis à des essais. L'étanchéité est assurée par des joints soudés

unissant les plaques, dont la tenue a été bonne lors des essais. Les températures de travail peuvent aller jusqu'à 300°C. L'hélium est en contact avec la paroi intérieure de la cuve et peut ainsi la refroidir, car sa température de retour au réacteur est de 250 à 270°C. Les plaques d'acier se fabriquent selon la technique classique, en usine; elles sont assemblées, précontraintes et soudées sur le site. Il est donc possible de conférer aux réacteurs fabriqués les caractéristiques de sûreté des petits réacteurs modulaires et d'obtenir ainsi de plus grandes puissances.

Utilisation de la chaleur industrielle nucléaire

Jusqu'à maintenant, la démarche fondamentale du nucléaire était de remplacer les ressources fossiles d'énergie utilisées pour produire de l'électricité. Dans l'avenir, cette tendance devra s'imposer si l'on veut minimiser les émissions de CO₂ et protéger notre atmosphère. Jusqu'à maintenant, ce sont principalement les pays industriels qui ont construit et exploité des centrales nucléaires mais, dans l'avenir, les pays en développement se verront contraints de recourir à cette technologie. Cela dit, leur application à la seule production d'électricité ne suffira probablement pas à réduire les émissions de CO₂ dans la mesure voulue. L'énergie nucléaire peut — et devra probablement — servir à produire de la chaleur industrielle et à transformer les combustibles fossiles en produits moins polluants. Jusqu'à présent, ce n'est pas le cœur du réacteur mais les conduites et les échangeurs de chaleur qui empêchent d'atteindre les températures nécessaires à ces productions. Or, vu les progrès rapides des sciences des matériaux, notamment en ce qui concerne les produits céramiques, il est probable que l'on ne tardera pas à disposer d'une technologie permettant d'élever considérablement les températures de travail.

Conclusions

L'économie du réseau énergétique mondial appelle des centrales nucléaires simples, économiques, faciles à construire et comportant des caractéristiques de sûreté qui excluent le risque de graves dommages. La simplicité s'impose si l'on veut assurer le financement de la construction de centrales nucléaires partout dans le monde et faciliter la fabrication de composants dans les pays en développement. Cet objectif peut être atteint en souplesse si la plupart des systèmes complexes de sûreté qui équipent les centrales nucléaires actuelles peuvent être remplacés par des dispositifs de sûreté passifs dont la réalisation n'exige pas une grande précision et correspond mieux aux possibilités de ces pays.

La demande croissante d'énergie dans le monde et l'inquiétude que suscite l'impact sur l'environnement des combustibles fossiles utilisés pour la satisfaire exigent que l'on confie au nucléaire une plus grande part de la production future. La technologie du réacteur à haute température refroidi par gaz, en vertu même des principes de sûreté qui lui sont propres et des simplifications qu'elle permet d'opérer et dont on envisage la généralisation, semble parfaitement adaptée aux besoins de l'avenir.