

# Evolution du réacteur à haute température refroidi par gaz

*Aux Etats-Unis comme ailleurs, on mise sur les petites unités modulaires*

par L.D. Mears et A.J. Goodjohn

Les réacteurs refroidis par gaz ne datent pas d'hier et leur passé assez mouvementé remonte aux premiers temps de l'énergie nucléaire. La plupart des projets d'alors étaient des réacteurs à basse température modérés au graphite, refroidis à l'anhydride carbonique et utilisant un combustible à gaine métallique. Les premiers réacteurs industriels de ce type ont été mis en service vers le milieu des années 50, plus spécialement au Royaume-Uni et en France; il s'agissait de réacteurs Magnox à uranium naturel auxquels a fait suite, au Royaume-Uni seulement et à partir du milieu des années 70, un réacteur avancé à haute température refroidi par gaz (AGR) utilisant un combustible à l'uranium faiblement enrichi. Ces deux programmes d'avant-garde en sont à leur fin avec le déclassement de plusieurs des réacteurs Magnox de première génération et la récente mise en service de la dernière génération de réacteurs AGR aux centrales de Heysham-2 et de Torness. Les 1000 années de réacteur accumulées ont permis de recueillir une abondante documentation fort utile aux travaux actuels sur le réacteur à très haute température.

On a compris dès le début que le refroidissement par gaz (qui permettait déjà à l'époque d'obtenir de la vapeur de même qualité que celle produite par les centrales modernes à combustible fossile, améliorant ainsi le rendement électrique) présenterait encore plus d'intérêt si l'on pouvait atteindre des températures plus élevées. Cette démarche, qui laissait aussi entrevoir la possibilité, grâce aux hautes températures, d'élargir le champ d'application de l'énergie nucléaire en produisant de la chaleur industrielle, a mené à l'étude du réacteur à haute température refroidi par gaz (HTGR), caractérisé par un cœur à combustible céramique modéré au graphite et refroidi par un gaz inerte, en l'occurrence l'hélium.

C'est vers le milieu des années 50 que le projet s'est concrétisé, aux Etats-Unis et en République fédérale d'Allemagne. Les accords de coopération conclus entre les gouvernements et les établissements industriels des deux pays ont eu pour effet d'orienter les programmes d'étude dans le même sens. La seule différence fondamentale se situait au niveau de l'élément combustible. A l'heure actuelle, le combustible de cette filière se

présente sous forme de petits noyaux sphériques entourés de plusieurs couches successives de pyro-carbone et de carbure de silice, tous deux matériaux réfractaires. En République fédérale d'Allemagne, ces particules enrobées sont agglomérées en forme de boulets de 6 cm de diamètre, qui constituent l'élément combustible, et le chargement du réacteur se fait en continu. Aux Etats-Unis, des particules analogues sont noyées dans un liant au graphite pour former des barreaux de combustible que l'on insère dans des canaux aveugles percés dans des blocs de graphite hexagonaux de 36 cm de section entre les faces opposées et près de 80 cm de longueur, mais le chargement du modèle américain se fait à l'arrêt.

Comme nous le verrons plus loin, ce sont les propriétés très particulières de cette forme de combustible qui sont à l'origine des diverses versions modulaires du réacteur à haute température qui ont été mises au point en République fédérale d'Allemagne et aux Etats-Unis.

## Etude de conception du réacteur

Les premiers HTGR construits et exploités sont les suivants: Dragon (Royaume-Uni), réacteur de recherche de 20 MWth; Peach Bottom-1 (Etats-Unis), centrale expérimentale de 40 MWe; AVR (République fédérale d'Allemagne), installation expérimentale de 15 MWe. Ces trois modèles ont été mis en service vers le milieu des années 60 et ont tous donné d'excellents résultats. Le réacteur Dragon et celui de Peach Bottom ont été déclassés après avoir atteint leurs objectifs. L'AVR a cessé de produire de l'électricité à la fin de 1988 après avoir servi pendant 20 ans à l'essai de combustible et à des expériences de sûreté intéressant le projet modulaire.

Vint ensuite le réacteur de Fort St. Vrain (Etats-Unis) de 330 MWe mis en service en 1979 et le THTR-300 (République fédérale d'Allemagne) de 300 MWe mis en service en 1987. Le premier n'a pas donné satisfaction à tous égards: la performance du combustible est excellente et la radioexposition du personnel est pratiquement insignifiante, mais le facteur de disponibilité est décevant, essentiellement à cause de la conception très spéciale des soufflantes du circuit d'hélium dont les paliers sont lubrifiés à l'eau. Ce problème de fiabilité, auquel s'ajoutent les coûts élevés d'exploitation et de combustible quand il s'agit d'une installation unique en

M. Mears est directeur général de Gas-Cooled Reactor Associates, société patronnée par des compagnies d'électricité des Etats-Unis. M. Goodjohn y est consultant pour les questions de personnel.

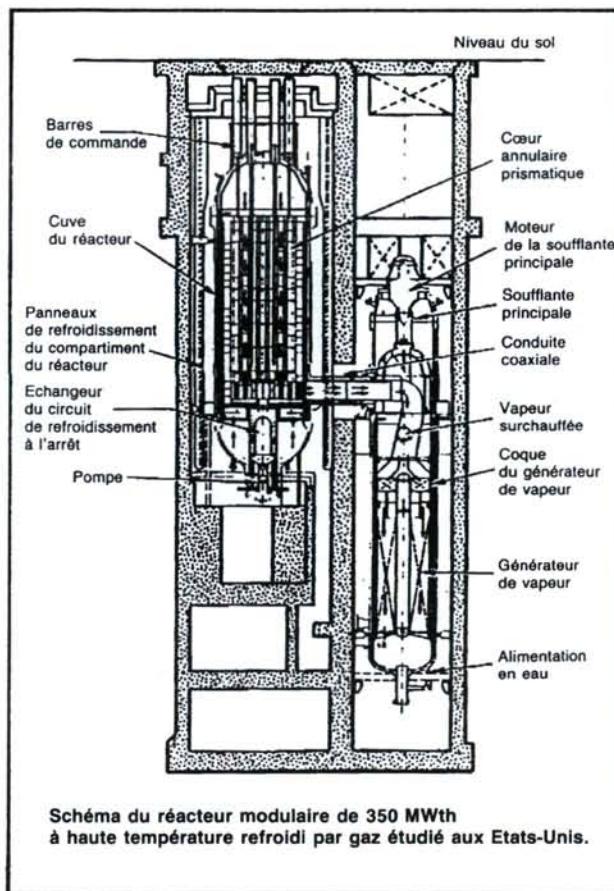
son genre, fait que l'on envisage de la mettre à l'arrêt en juin 1990. Dans l'ensemble, le THTR-300 a donné de bons résultats, avec cependant quelques problèmes techniques auxquels ont donné lieu les manipulateurs de combustible, l'isolement des gaines de sortie et les fixations du fond en graphite. Dans ce cas également, le coût élevé de la production, l'incertitude de l'approvisionnement en combustible et l'absence d'appui financier de la part de l'Etat font envisager l'arrêt de la centrale probablement en 1991.

Fort St. Vrain mis à part, dix HTGR industriels de grande puissance (cinq centrales à deux unités chacune) ont été commandés aux Etats-Unis. Les centrales n'ont cependant été achevées que vers le milieu des années 70 à cause de la récession économique consécutive à l'embargo des pays arabes sur les livraisons de pétrole. En République fédérale d'Allemagne, l'étude du réacteur HTR-500 de 550 MWe s'est poursuivie, mais les exploitants n'ont pas passé commande.

L'absence de commande de nouvelles centrales nucléaires qui s'est prolongée aux Etats-Unis jusque dans les premières années 80 et les séquelles de l'accident de Three Mile Island ont amené les milieux compétents à considérer qu'il fallait adopter une nouvelle approche pour résoudre les problèmes techniques et institutionnels associés à l'énergie d'origine nucléaire. Dans ce contexte, il y eut un regain d'intérêt pour les réacteurs possédant de meilleures caractéristiques de sûreté qui contribueraient à rendre confiance au public et à faciliter les homologations. Aussi a-t-on commencé à prendre des dispositions en vue d'étudier des centrales nucléaires avancées. Cette initiative mettait en jeu plusieurs facteurs dont les plus importants quant à l'orientation des travaux à entreprendre étaient évidemment les considérations de puissance et de sûreté des futures centrales.

En ce qui concerne la puissance, le fléchissement de la croissance de la charge a été parmi les effets les plus marquants de la situation créée pendant les années 70 par la crise pétrolière, du ralentissement des affaires et de la politique de conservation de l'énergie. De plus, les risques associés aux investissements massifs, les longs délais de construction et la complexité croissante de la réglementation qu'impliquent les grandes installations compliquaient la situation à l'extrême, de sorte que, pour la plupart des compagnies d'électricité, les centrales équipées d'un seul réacteur de grande puissance n'étaient plus une solution de tout repos. On commençait à penser qu'il était essentiel, en présence des incertitudes de l'avenir, de recourir à des installations qui permettraient des adjonctions plus modestes à la puissance installée, pourraient être construites en moins de temps et exigeraient des investissements moins importants. De surcroît, les centrales de moindre puissance et de conception simplifiée étaient de toute évidence mieux adaptées aux besoins des pays en développement.

Quant à la sûreté, on constatait que l'accident de Three Mile Island avait réveillé les inquiétudes du public. Des mesures de sûreté supplémentaires étaient exigées pour les centrales en service et celles de l'avenir, et la planification de l'évacuation et de la protection en cas d'urgence des populations vivant à proximité des centrales avait pris toute son importance. En outre, cet accident avait infligé des pertes économi-

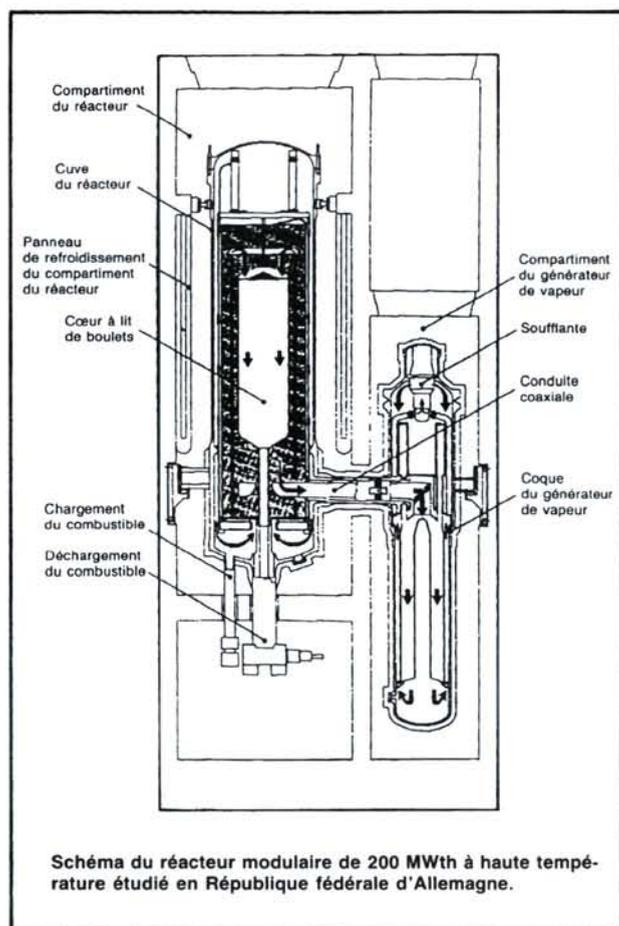


ques très sensibles à l'exploitant alors que ses effets réels sur la santé et la sécurité du public avaient été minimes. Les choses en étant là, il semblait souhaitable de s'en remettre davantage à la sûreté passive pour apaiser les craintes du public et de l'investisseur et faciliter l'homologation. De même, la moindre sensibilité de ce type de centrales aux erreurs des opérateurs ou aux défaillances du matériel semblait aussi un avantage certain.

Dans le cadre du programme des Etats-Unis, une rigoureuse évaluation a fait choisir le projet modulaire comme modèle de référence pour les études de conception entreprises en commun par le Département de l'énergie et l'industrie. Des considérations analogues motivaient l'orientation du programme allemand vers l'étude de projets de moyenne puissance et le développement du HTR modulaire (voir figures). Nous examinerons plus particulièrement dans cet article le projet modulaire des Etats-Unis, car il est représentatif.

### La conception du HTGR modulaire

L'âme de ce réacteur est la particule de combustible. Les petites sphérules d'oxycarbure d'uranium, d'environ un demi-millimètre de diamètre, sont entourées de plusieurs couches de substance réfractaire (pyrocarbone et carbure de silicium) qui emprisonne le combustible proprement dit et retient les produits de fission engendrés par les réactions nucléaires lorsque le réacteur est en marche; ce revêtement est en somme une épaisse enceinte de confinement en miniature. Les caractéristiques de sûreté du réacteur découlent des



propriétés inhérentes à ces grains de combustible, qui peuvent supporter des températures élevées sans dommages appréciables, et de la limitation passive de la surchauffe du combustible lors des transitoires provoqués par un grave accident hypothétique.

Le cœur du réacteur est conçu de telle sorte que les éléments combustibles sont disposés selon une géométrie annulaire avec réflecteur en graphite à l'intérieur et à l'extérieur. Cette configuration a été choisie afin d'augmenter le rapport surface/volume permettant d'atteindre une puissance de 350 MWth tout en conservant la possibilité de dissiper la chaleur de désintégration par des moyens passifs.

Chaque module comprend la cuve en acier contenant le cœur annulaire du réacteur, reliée par une conduite coaxiale à un seul générateur de vapeur à tubulure hélicoïdale à passage unique, monté parallèlement à la cuve du réacteur mais décalé vers le bas. La soufflante principale, mue par un moteur électrique à vitesse variable, est située au sommet du générateur. Pour évacuer la chaleur de désintégration au cours des opérations de maintenance, lorsque le circuit calorporteur principal est annulé, le projet prévoit au fond de la cuve un petit échangeur de chaleur hélium/eau équipé d'un accélérateur électrique. Le dôme qui surmonte la cuve comporte des pénétrations pour les barres de commande et leurs mécanismes, et pour les injecteurs de poisons nucléaires. Ces pénétrations servent également au rechargement du réacteur à l'arrêt.

Dans les conditions normales d'exploitation, l'hélium circule de haut en bas par les conduits ménagés dans les éléments combustibles au graphite, se rassemble dans le collecteur annulaire situé sous le cœur et emprunte ensuite la veine centrale de la conduite coaxiale jusqu'au générateur de vapeur. Après avoir franchi la tubulure hélicoïdale, il remonte par la colonne annulaire entre la bache intérieure et la coque du générateur, est repris par la soufflante qui le renvoie sous pression vers le réacteur par la veine extérieure de la conduite coaxiale qui débouche sur l'espace annulaire compris entre l'enveloppe du cœur et la paroi de la cuve, et remonte jusqu'au sommet du cœur, baignant ainsi continuellement les trois enveloppes du circuit. Le générateur de vapeur est alimenté en eau par le bas et la vapeur surchauffée à 540°C sous une pression de 175 kg/cm<sup>2</sup> sort par la buse montée sur le flanc haut de la coque.

La centrale proprement dite se compose de plusieurs modules alignés côte à côte, chacun dans son compartiment, sous le niveau du sol. Le nombre de modules et le calendrier de leur mise en œuvre sont déterminés en fonction de la charge et des possibilités financières. L'énergie produite par chaque module sous forme de vapeur passe dans la salle des turbo-alternateurs adjacente. Le rapport de conversion étant d'environ 38%, chaque module peut assurer une production nette d'électricité de 135 MWe, soit, pour une centrale type à quatre modules, un total de 540 MWe.

#### Conception de la sûreté passive du HTGR modulaire

Trois moyens sont prévus pour évacuer la chaleur de désintégration. Le premier est le circuit calorporteur principal, sans fonction de sûreté, qui amène la chaleur jusqu'au générateur de vapeur et, de là, jusqu'au condenseur par l'intermédiaire d'une dérivation contournant la turbine. Au cas où ce circuit serait mis hors service (opération normale de maintenance ou défaillance), la chaleur de désintégration serait évacuée par le circuit de refroidissement du réacteur à l'arrêt, sans fonction de sûreté lui non plus, composé d'un circuit fermé à eau passant par des échangeurs à ventilation forcée.

Si aucun de ces deux circuits actifs n'était en état de fonctionner, la chaleur serait évacuée par le troisième système prévu pour assurer le refroidissement du compartiment du cœur et qui, lui, est un système passif ayant une fonction de sûreté en continu. De l'air extérieur est amené par un registre entrée/sortie à gaines coaxiales jusqu'à une batterie de panneaux située dans le compartiment du réacteur où l'air s'échauffe sous l'effet de la chaleur transmise par conduction et rayonnée par le réacteur, et retourne à l'extérieur par la veine intérieure des gaines coaxiales. Grâce à ce système, les cotes nominales du combustible ne sont pas dépassées, et l'installation ne peut subir de dommage, même en cas de perte de charge du courant d'hélium ou de dépressurisation du circuit primaire.

Cette fonction, combinée au coefficient de température constamment négatif qui déclenche automatiquement l'arrêt du réacteur lorsque la température augmente, pour ne laisser subsister que la chaleur de désintégration, est une caractéristique passive particulière à la conception de cette filière modulaire. Bien que

la probabilité d'une défaillance simultanée de ces trois systèmes soit pratiquement nulle, on est allé jusqu'à évaluer les effets de son éventualité, qui dépasse le cadre des événements de référence, et l'on a constaté qu'à part quelques dommages causés aux installations la chaleur de désintégration serait passivement évacuée dans le sol et les températures atteintes par le combustible ne seraient pas sensiblement supérieures à celles que maintiendrait le système de refroidissement du compartiment du réacteur. De surcroît, à la demande des services d'homologation des Etats-Unis, on a aussi évalué les conséquences de plusieurs autres accidents dépassant en gravité les événements de référence spécifiés aux fins d'homologation, notamment le retrait de toutes les barres de commande avec déclenchement retardé de l'arrêt d'urgence, pénétration illimitée d'air et d'eau, et panne simultanée de tous les systèmes d'évacuation de la chaleur en coïncidence avec une rupture totale de la cuve au niveau de la conduite coaxiale. Dans tous les cas, la radioactivité n'a pas dépassé les niveaux d'intervention prévus, même à la limite de la zone d'exclusion dans l'hypothèse d'un site de 425 mètres de rayon. Les données techniques permettent donc de se passer d'un système de notification rapide (alerte par sirènes, etc.) et des exercices d'évacuation et de mise à l'abri d'urgence dans le cadre du plan d'intervention hors site. En outre, les résultats indiqués peuvent être obtenus sans recours à des dispositifs alimentés en courant alternatif, sans intervention des opérateurs, tandis que le revêtement des particules de combustible assure seul le confinement des produits de fission. L'application intégrale du principe de la sûreté passive à la conception du HTGR modulaire garantit donc un niveau de sûreté sans précédent.

### L'économie

Chaque fois que l'on parle d'un retour aux petites centrales, on soulève le problème de leur compétitivité économique. Pendant les années 60 et les premières années 70, et aujourd'hui encore dans la plupart des pays industriels, la concurrence a forcé l'offre de centrales nucléaires de plus en plus puissantes en raison des économies d'échelle effectivement possibles avec des installations impliquant une aussi forte intensité de capital. L'expérience a montré que l'engagement à long terme de capitaux aussi importants comportait néanmoins de trop grands risques. Dans de nombreux pays, et plus particulièrement aux Etats-Unis, les conséquences économiques ont été désastreuses et, même si les risques ne se matérialisent pas, il sont à prendre en considération dans toute évaluation.

La compétitivité économique du HTGR modulaire dépend de trois facteurs principaux: la simplification résultant de la sûreté passive, la normalisation facilitée par la conception modulaire et la fabrication en usine, et l'atténuation des risques.

La sûreté passive permet d'éliminer bon nombre de systèmes de sûreté onéreux et de faire en sorte que les

éléments de sûreté et de protection des réacteurs soient à la fois physiquement séparés et fonctionnellement désolidarisés du groupe des turbo-alternateurs. Il en résulte que seul le bloc nucléaire, comprenant les réacteurs modulaires et tous ses systèmes et circuits annexes, doit répondre à des normes nucléaires, alors que les turbo-alternateurs peuvent être fabriqués selon les normes habituelles. Il est également possible d'entourer le bloc nucléaire d'une clôture de sécurité.

La modularisation, appliquée non seulement aux réacteurs de faible puissance mais aussi aux composants, systèmes, conduites et tubulures, instruments, organes de commande, etc., permet de fabriquer et d'assembler en usine une grande partie de l'installation. Cette préfabrication facilite le contrôle de la qualité, et l'expérience montre que les coûts sont bien inférieurs à ceux de la fabrication et de l'assemblage sur place. De plus, la réduction des coûts résultant de la répétition des opérations est plus évidente en usine.

A noter aussi que la mise en place de centrales de moindre puissance et la possibilité d'atteindre la puissance voulue en ajoutant module après module modèrent les engagements financiers. C'est peut-être là le facteur le plus tangible et le plus important de l'atténuation du risque, quoique d'autres facteurs moins concrets tels que la facilité d'homologation et la meilleure disposition du public aient également leur rôle à jouer.

Les analyses économiques relatives aux HTGR modulaires ont évidemment tenu compte de tous ces facteurs qui, croit-on, devraient se traduire par des différences de prix appréciables. Elles ont montré, notamment, que la centrale type de 540 MWe à quatre modules sera compétitive par rapport aux centrales au charbon les plus modernes, et ce dans la plupart des zones charbonnières prévues sur le territoire des Etats-Unis. Rappelons que les divers éléments qui interviennent dans ces comparaisons sont très variables selon les conditions locales à l'intérieur du pays ou de la région qui envisage l'option nucléaire, et qu'il faut donc les analyser avec le plus grand soin.

### L'horizon

Le monde attend des centrales nucléaires moins puissantes dotées de dispositifs passifs de sûreté. A cause surtout de son apparente simplicité et de son comportement inoffensif, le HTGR modulaire est une option idéale qui peut contribuer à satisfaire ce besoin. Une installation pilote ou de démonstration s'impose si l'on veut faire la preuve formelle des performances prévues (en ce qui concerne la sûreté, la fiabilité, la facilité d'exploitation, etc.). Plusieurs projets dans ce sens sont à l'examen aux Etats-Unis (un module HTGR avec participation industrielle de la République fédérale d'Allemagne) et en URSS (une variante du module HTR avec participation du Gouvernement et de l'industrie de la République fédérale d'Allemagne). On prévoit que les modèles industriels seront mis en concurrence sur le marché au début du siècle prochain.

