

## Chine: la tranche de démonstration du réacteur à lit de boulets est connectée au réseau

Le 20 décembre 2021, la première centrale nucléaire équipée de réacteurs à lit de boulets a été mise en service en Chine. Cette conception de réacteur, testée en Allemagne il y a plus de cinquante ans déjà, présente un certain nombre de spécificités. Le professeur émérite Horst-Michael Prasser en explique les avantages et les inconvénients.

Le HTR-PM (High-Temperature Gas-Cooled Reactor – Pebble Bed Module) est implanté à Shidao Bay, dans la province chinoise de Shandong, à environ 600 kilomètres au sud-est de Pékin. Il s'agit d'une tranche refroidie à l'hélium d'une puissance électrique de 100 MW. Sa technologie repose sur des travaux menés initialement en Allemagne et sur l'expérience en matière d'exploitation acquise dans ce pays (cf. encadré 2). L'université Tsinghua à Pékin, où le réacteur expérimental HTR-10 est exploité avec succès depuis 2003, a tiré parti de ce socle de connaissances pour poursuivre le développement du réacteur à lit de boulets.

### 1<sup>er</sup> atout: excellent confinement du combustible

Horst-Michael Prasser, qui a été professeur ordinaire dans la branche des systèmes d'énergie nucléaire à l'EPF de Zurich de 2006 à 2021 et directeur du laboratoire de thermohydraulique de l'Institut Paul Scherrer (PSI) de 2007 à 2017, explique comme suit les principales différences avec les réacteurs à eau légère (LWR) conventionnels: «Dans les réacteurs à lit de boulets, le combustible se trouve dans des microbilles d'environ 0,5 mm de diamètre, entourées d'une couche de carbure de silicium mince mais résistante et largement imperméable. Environ dix mille de ces microbilles dites «coated» (enrobées) sont encapsulées dans des sphères de graphite de la taille d'une boule de billard».

La couche de carbure de silicium remplace la gaine des crayons combustibles que l'on trouve dans les réacteurs à eau légère. Elle résiste à des températures bien plus élevées que le zirconium dont sont constituées ces gaines. «Les composants radioactifs du combustible, notamment les radioisotopes volatils des gaz rares krypton et xénon ainsi que l'iode 131 radioactif et les isotopes 137 et 134 du césium, particulièrement problématiques, qui ont contaminé de vastes portions de territoire dans le cas de Fukushima, sont confinés de manière fiable par la couche de carbure de silicium», explique le professeur Prasser.

### 2<sup>e</sup> atout: fonte du cœur impossible

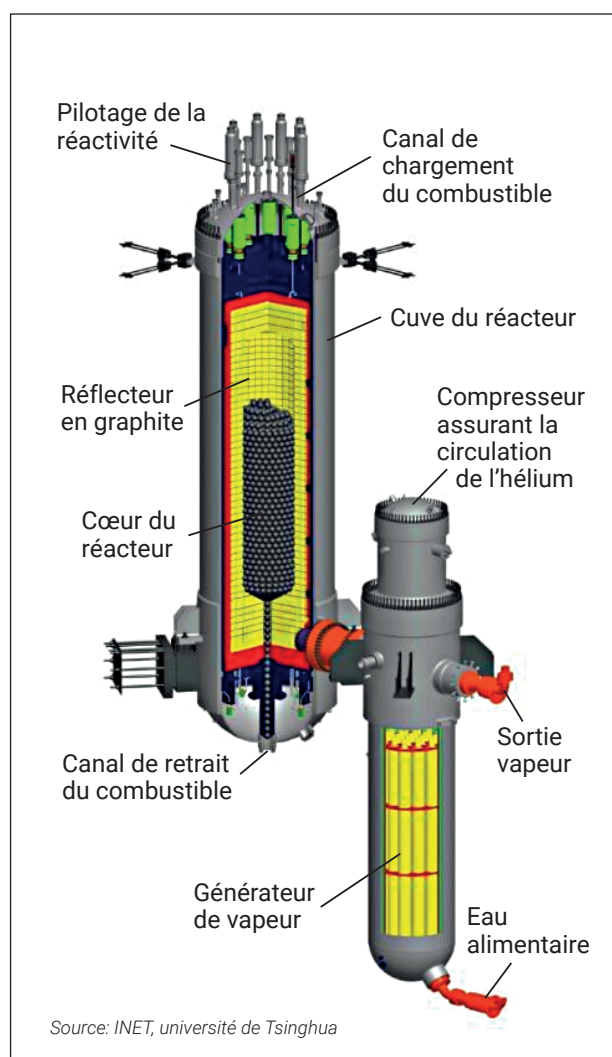
Les sphères de combustible sont chargées dans la cuve du réacteur par le dessus, jusqu'à ce que la masse critique soit atteinte à la température de fonctionnement souhaitée (cf. graphique à la page 7). La combustion n'est pas compensée par le retrait continu d'absorbants de neutrons comme dans le cas des LWR, mais par l'apport constant de nouvelles sphères. On prélève en permanence des sphères par le dessous de la cuve, leur taux de combustion est mesuré et, selon le résultat, elles sont réintroduites dans la cuve par le haut ou retirées. Après quinze passages en moyenne, le taux de combustion prévu est atteint. «Il y a toujours dans le réacteur exactement la quantité de matière fissile nécessaire à une réaction en chaîne autoentretenu, pas plus», explique Horst-Michael Prasser. «En combinaison avec les fortes rétroactions négatives qui atténuent la réaction en chaîne lorsque la température augmente, cela amène une autre caractéristique de sûreté importante: même en cas de perte totale du refroidissement – par exemple en raison d'une panne du compresseur d'hélium ou si de l'hélium s'échappe du réacteur à cause d'une fuite – il n'y a pas, à la différence de ce qui peut se passer dans les réacteurs à eau légère, de surchauffe excessive du combustible ou de fonte du cœur».

La raison en est qu'en cas de hausse de la température, la puissance du réacteur chute automatiquement, pour des raisons physiques – sans intervention des systèmes de protection ou des opérateurs – à un niveau auquel la chaleur qui se dégage encore peut être évacuée par la paroi du réacteur dans l'enceinte de confinement, même en l'absence d'arrêt provoqué par les barres de contrôle. «Le HTR-PM ne peut toutefois pas se passer complètement de système de refroidissement, car la chaleur supplémentaire doit être évacuée de la caverne du réacteur. Le système nécessaire fonctionne toutefois sans alimentation électrique de secours, c'est un système de sûreté passif.

Relevons encore que ce concept de refroidissement de secours ne peut fonctionner que parce que le cœur du réacteur a un grand volume par rapport à sa production de chaleur, donc une densité de puissance beaucoup plus faible que celle d'un LWR.»

### Très faible puissance, mais possibilités d'extension modulaires

«En d'autres termes, le réacteur proprement dit est intrinsèquement sûr en cas de perte du refroidissement», ré-



Le HTR-PM chinois et son générateur de vapeur en position basse. La température de l'hélium à la sortie du réacteur est de 750 °C, la température de la vapeur est de 570 °C.

sume le professeur Prasser. «Toutefois, sa puissance thermique doit être limitée à un ordre de grandeur de 200 à 300 MW, faute de quoi la température maximale dans le réacteur ne peut pas être maintenue en dessous de 1600 °C». À des températures plus élevées, l'iode et le césium pourraient traverser la couche de carbure de silicium, passer dans le circuit d'hélium et de là, dans des conditions défavorables, être relâchés dans l'environnement. «D'où la modularité des centrales nucléaires à réacteurs à lit de boulets: plusieurs réacteurs produisent de la chaleur pour une turbine commune. La température de sortie de la vapeur est d'environ 570 °C, ce qui a l'avantage de permettre l'utilisation d'une turbine à vapeur normale plutôt que de turbines optimisées pour la vapeur saturée comme dans le cas des réacteurs à eau légère.» La vapeur surchauffée porte le rendement de la centrale à plus de 40%.

### Des systèmes de sûreté restent nécessaires

Le réacteur à lit de boulets ne peut toutefois pas se passer entièrement de systèmes de sûreté, car il faut aussi maîtriser des scénarios d'accident autre que la perte de refroidissement évoquée plus haut. «Si, par exemple, de l'eau pénètre dans le cœur et comprime l'hélium, le graphite des sphères de combustible est susceptible de réagir avec la vapeur d'eau, produisant de l'hydrogène et du monoxyde de carbone. En outre, la pénétration d'eau rendrait le réacteur supercritique. C'est ce à quoi il faudrait s'attendre en cas de rupture d'un tube de chauffage du générateur de vapeur», explique le professeur Prasser. «En pareil cas, un dispositif de fermeture de l'arrivée d'eau s'enclencherait automatiquement. En outre, le générateur de vapeur du HTR-PM, contrairement à celui de l'AVR de Jülich (cf. encadré à la page 10), est situé en dessous du cœur du réacteur. La vapeur d'eau étant plus lourde que l'hélium, elle ne peut pénétrer que lentement dans la cuve du réacteur.»

Un autre scénario envisage une entrée d'air. En pareil cas, les structures en graphite et les sphères de combustible seraient endommagées en l'absence de contre-mesures. Le professeur Prasser précise qu'une entrée massive d'air serait tout au plus envisageable en cas de survenue d'un événement extrême très improbable, comme un mégaséisme. «L'avantage par rapport à d'autres types de réacteurs est néanmoins que de tels incidents n'évolueraient que très lentement, de sorte qu'il resterait beaucoup de temps pour appliquer les contre-mesures.»

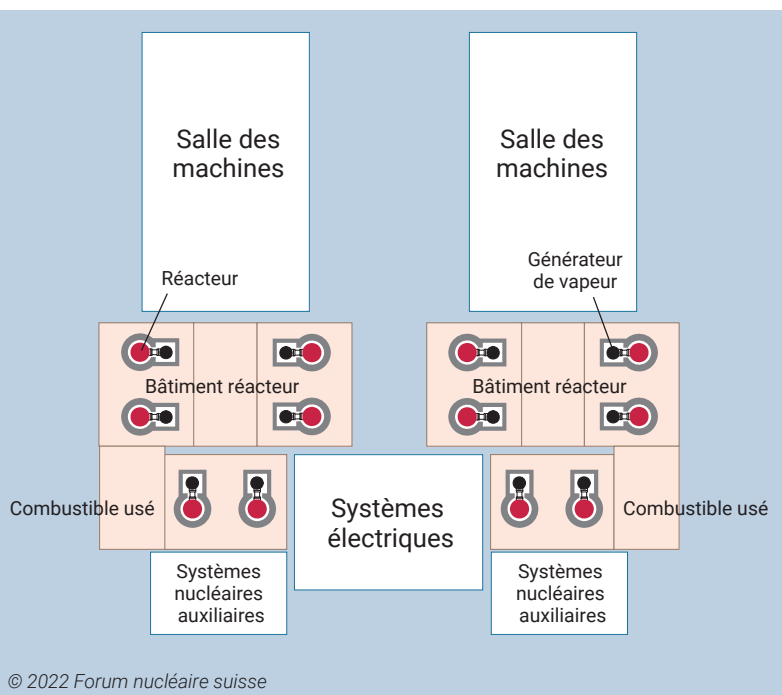
Atout supplémentaire: l'hélium en circulation dans le réacteur ne devient pas radioactif pendant le fonctionnement de ce dernier. En outre, il n'est pas toxique et ne peut ni brûler ni exploser. Au cas où le pire accident possible se produisait et que de l'hélium était relâché dans l'environnement, il pourrait certes entraîner avec lui des poussières radioactives et des traces de produits de fission volatils qui auraient diffusé à travers la couche de carbure de silicium des microbilles, mais cela n'aurait rien de comparable avec les rejets qui se sont produits à Fukushima», relève Horst-Michael Prasser.

### Une grande sûreté, mais peu de surgénération et aucune transmutation

De 2015 à 2019, le professeur Prasser a dirigé un projet financé par Swisselectric et Swissnuclear sur la technologie du réacteur à lit de boulets. Il a réussi à s'adjoindre le partenariat du développeur de ce type de réacteur, l'Institut des technologies nucléaires et des nouvelles énergies (INET) de l'Université de Tsinghua, à Pékin. L'un

des principaux objectifs du projet était le maintien du savoir-faire. De nombreux étudiants du programme de master en génie nucléaire des EPF de Zurich et Lausanne ont gagné leurs premiers galons scientifiques en apportant leur contribution à ce projet. «Nous avons en outre rempli notre mission de suivi de l'évolution des nouveaux concepts de réacteurs», ajoute Hans-Horst Prasser.

Les thèmes abordés comprenaient les aspects sécuritaires, d'éventuels combustibles alternatifs (thorium, p. ex.), des scénarios de gestion des déchets et des estimations de coûts. Selon le professeur Prasser, le HTR-PM n'est pas à proprement parler un réacteur de génération IV, bien qu'il soit souvent considéré comme tel avec une certaine justification, car il n'utilise pas d'eau comme caloporteur: «Il n'est toutefois pas basé sur les neutrons rapides et ne peut donc pas couvrir l'ensemble du programme, de la surgénération à la transmutation. On peut certes utiliser du thorium 232, mais on peut aussi le faire avec un réacteur à eau lourde du type canadien Candu. De plus, comme la température de sortie de l'hélium est limitée à 750 °C pour des raisons de sûreté, il ne s'agit pas d'un véritable réacteur à haute température. Il ne permet pas de bien conduire un processus combiné de turbine à gaz et de turbine à vapeur ni de produire directement de l'hydrogène gazeux.» Un cycle basé sur l'acide sulfurique et l'iode comme catalyseurs, qui s'accommode de températures de processus relativement basses, est évoqué depuis longtemps comme candidat potentiel, mais nécessite tout de même au moins 800–900 °C selon les données chinoises. «Il sera certainement possible d'optimiser la température vers des valeurs plus élevées ultérieurement, lorsque l'on disposera de plus d'expérience en matière d'exploitation», espère le professeur Prasser.



© 2022 Forum nucléaire suisse

Agencement schématique d'une centrale nucléaire de 1200 MW, composée de deux HTR-PM600 standard. Dans chaque HTR-PM600, trois modules de deux tranches chacun, disposés en T, entraînent une turbine à vapeur commune qui délivre une puissance électrique maximale de 600 MW.

### Inconvénient: le volume des déchets

Les avantages des sphères de combustible sont par ailleurs contrebalancés par un inconvénient: «Par rapport à un LWR, le volume du combustible usé – donc des déchets de haute activité dans un pays qui pratique une gestion des déchets ne comportant pas de retraitement – est 30 à 50 fois plus important par kilowattheure produit», relève Horst-Michael Prasser. «Le fait que l'activité rapportée au volume soit plus faible ne change pas grand-chose.»

### Une installation standard de 600 MW<sub>el</sub>

Les deux HTR-PM mis en service fin 2021 sur le site de Shidao Bay ont chacun une puissance thermique de 250 MW et une puissance électrique nette de 100 MW. Qualifiées de projets de démonstration, ces deux tranches alimentent une turbine à vapeur commune. Elles sont conçues pour une durée d'exploitation de 40 ans.

L'objectif stratégique de la Chine est d'exploiter de manière ciblée les atouts du HTR-PM: sûreté intrinsèque élevée, grande efficacité énergétique, température de vapeur élevée, construction modulaire et grande liberté de choix du site (pas besoin d'eau de refroidissement). L'objectif principal est de produire de la chaleur industrielle et de remplacer les centrales à charbon actuelles qui fournissent à la fois de l'électricité et de la chaleur à distance à des villes avoisinantes. À terme, il est aussi question d'utiliser ce type de réacteur pour la production d'hydrogène.

La prochaine étape consistera à assembler les tranches de base en groupes allant jusqu'à 600 MW<sub>el</sub>, selon les besoins. L'installation standard HTR-PM600 en projet se compose de six réacteurs et d'un seul groupe turboalternateur. La conjonction de deux installations de ce type donne une puissance comparable à celle d'un grand LWR conventionnel (cf. graphique 2). Selon les indications fournies par la Chine, il est prévu d'exporter ce type de réacteur, par exemple dans les pays arides, où il pourrait être implanté loin des rivières et des rivages maritimes, ou utilisé pour le dessalement d'eau de mer.

Les sphères de combustible ont néanmoins l'avantage de pouvoir être entreposées relativement facilement dans un dépôt intermédiaire sec refroidi à l'air sur le site de la centrale. Dans un dépôt en profondeur, leur besoin

de place serait beaucoup trop important en raison de la forte teneur en graphite des sphères. Bien que la stabilité de la couche de carbure de silicium entourant les microbilles de combustible ainsi que l'enrobage de graphite des sphères constituent de très bonnes barrières, le professeur Prasser part du principe que l'on ne pourrait pas faire l'économie du confinement des déchets dans des conteneurs à parois épaisses adaptés au stockage en profondeur, une opération courante selon les normes actuelles.

### Une option pour la Suisse?

Le HTR-PM pourrait-il constituer une option pour la Suisse? Le professeur Prasser répond sans détour: «Dans les pays où le retraitement du combustible nucléaire usé est interdit par la loi, un volume élevé de déchets de haute activité constitue un problème. Il faudrait, à tout le moins, conditionner le combustible usé, car le HTR-PM n'a pas d'avenir en cas de stockage direct en profondeur. Il faudrait au moins récupérer le graphite entourant les microbilles. On pourrait envisager de le réutiliser pour la production de nouvelles sphères.»

Dans le cadre du projet de recherche évoqué plus haut, une procédure de fragmentation expérimentale, au moyen d'une technologie développée en Suisse, de vraies sphères de combustible usées, et donc de haute activité, a été définie. Le professeur Prasser juge toutefois extrêmement minces les chances de mettre sur pied une expérience dans ce domaine en Suisse, pour ne rien dire de la construction du type de réacteur en question. Pour tirer parti des avantages du HTR-PM, il faut «passer par la case politique», comme pour tout autre réacteur nucléaire. Une alternative au conditionnement des déchets en Suisse serait de renvoyer les sphères de combustible usées à leur fabricant. «À l'heure actuelle, les sphères contenant de l'uranium enrichi à environ 9% ne sont produites qu'en Chine», indique Horst-Michael Prasser. «Il en faut 420'000 pour un chargement du cœur et, chaque jour, 400 sphères atteignent le taux de combustion ciblé et doivent donc être remplacées par de nouvelles sphères.»

C'est la raison pour laquelle la cuve de réacteur du HTR-PM est quatre fois plus grande que celle d'un LWR: elle fait 25 m de haut sur 5,7 m de diamètre. Si le HTR-PM

### À l'origine: l'Allemagne

C'est en Allemagne que les premiers prototypes de réacteurs à lit de boulets ont été construits. Baptisé AVR (Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor), le tout premier d'entre eux était refroidi à l'hélium et offrait une puissance électrique de 13 mégawatts. Il a été mis en service en 1967 au centre de recherche de Jülich, près de Cologne. Globalement très réussi, l'AVR présentait néanmoins quelques solutions technologiques peu abouties, dont un générateur de vapeur placé au-dessus du cœur du réacteur, avec à la clé le risque qu'en cas de rupture d'un tube de chauffage, la vapeur descende dans le cœur du réacteur puisqu'elle est plus lourde que l'hélium qui y circule. L'AVR a été arrêté en 1988 dans le sillage de l'accident de Tchernobyl.

En 1971, la construction d'un réacteur au thorium à haute température refroidi à l'hélium (THTR) d'une puissance électrique de 300 mégawatts a été lancée. L'installation a été pour la première fois connectée au réseau en 1985, à Hamm-Uentrop, en Rhénanie-du-Nord-Westphalie. Mais elle se révéla trop grosse et trop complexe, et de nombreux problèmes techniques firent leur apparition. Ainsi, en raison de ce qui s'avéra être un défaut de construction, les barres de contrôle s'abaissaient directement dans le paquet de sphères de combustible, ce qui provoqua le blocage de certaines d'entre elles. Des coûts d'exploitation élevés et le contexte politique défavorable au nucléaire en Allemagne ont fait le reste, si bien que le THTR fut arrêté définitivement en 1988.

Les connaissances et l'expérience acquises par l'Allemagne au travers de ces prototypes ont ensuite été reprises par la Chine et l'Afrique du Sud. Contrairement à la Chine, qui a prudemment misé sur un générateur de vapeur et une turbine à vapeur, l'Afrique du Sud prévoyait, pour son «Pebble Bed Modular Reactor» (PBMR), que le caloporteur hélium actionne directement une turbine à gaz. Ce projet a été provisoirement arrêté en 2010.

est considéré comme un «petit réacteur modulaire», c'est donc en raison de sa puissance, non de sa taille. En revanche, les sphères sont plus faciles à fabriquer que les crayons combustibles d'un LWR. «Pour une utilisation en Suisse, il faudrait que la question de l'approvisionnement et de la gestion des déchets soit résolue», souligne le professeur Prasser. «Sinon, nous serions dépendants de la Chine à ces deux égards. Au vu du cadre légal et des conditions politiques actuelles, un réacteur à lit de boulets a peu de chances de voir le jour en Suisse, même dans l'hypothèse où l'interdiction de construire de nouvelles centrales nucléaires était levée», conclut-il.

Selon l'Université de Tsinghua, le prix de revient de l'électricité produite par le premier HTR-PM (first of a kind, FOAK) devrait être 15 à 20% plus élevé que celui d'un réacteur à eau sous pression de même puissance. Pour la première installation HTR-PM600 standard, le prix de revient devrait descendre à 75% et à moins de 40% lorsque la production commerciale en série sera lancée. Le principal avantage des réacteurs à lit de boulets serait leur meilleure adéquation aux sites éloignés de la mer et relativement proches des agglomérations. (M.S./D.B.)

#### Bibliographie complémentaire (sources chinoises)

- Zhang Zuoy et al. (2019): Development Strategy of High Temperature Gas Cooled Reactor in China. In: Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, Vol. 21, Issue 1, pp 12–19.  
DOI: 10.15302/J-SSCAE-2019.01.003
- Zhang Ping et al. (2019): Nuclear Hydrogen Production Based on High Temperature Gas Cooled Reactor in China. In: Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, Vol. 21, Issue 1, pp 20–28.  
DOI: 10.15302/J-SSCAE-2019.01.004