

Feuille d'information

Décembre 2019

Des réacteurs innovants qui utilisent des sphères de combustible

Comme tous les domaines de la technique, la technologie nucléaire ne cesse de se développer. Ainsi, le concept de réacteur haute température à lit de boulets, éprouvé en Allemagne il y a des décennies déjà, connaît actuellement un nouvel essor en Chine. Ce système de réacteur innovant améliore la sécurité déjà très élevée des centrales nucléaires modernes: pour des raisons inhérentes aux lois de la nature, aucune fusion du cœur n'est possible en cas d'accident.

Plus de 50 tranches nucléaires sont actuellement en cours de construction dans le monde. Il s'agit essentiellement de réacteurs à eau légère de la troisième génération avancée, de forte puissance – les successeurs des réacteurs de

deuxième génération réputés pour leur grande fiabilité (il s'agit de ceux également utilisés en Suisse, qui par ailleurs ont été modernisés).

Parallèlement aux grosses installations, ces dernières années ont aussi été consacrées au développement des petits réacteurs modulaires (Small Modular Reactors, SMR – cf. feuille d'information «Les futurs systèmes de réacteurs»). On trouve notamment parmi eux le HTR-PM chinois, pour «High-Temperature Gas-Cooled Reactor – Pebble Bed Module». Les deux premiers prototypes de ce système innovant sont sur le point d'être mis en service sur le site de Shidao Bay, dans la province de Shandong.

Le pragmatisme chinois

Le HTR-PM est un réacteur refroidi à l'hélium de faible puissance (100 MW électriques seulement) – moins d'un tiers de la puissance des réacteurs de Beznau ou Mühleberg). Sa technologie repose sur des travaux pionniers effectués en Allemagne (cf. encadré p.4) et sur les expériences d'exploitation acquises dans le pays. Le type chinois a été développé à l'Université de Tsinghua, à Pékin, où un réacteur expérimental, le HTR-10, est en exploitation depuis 2003.

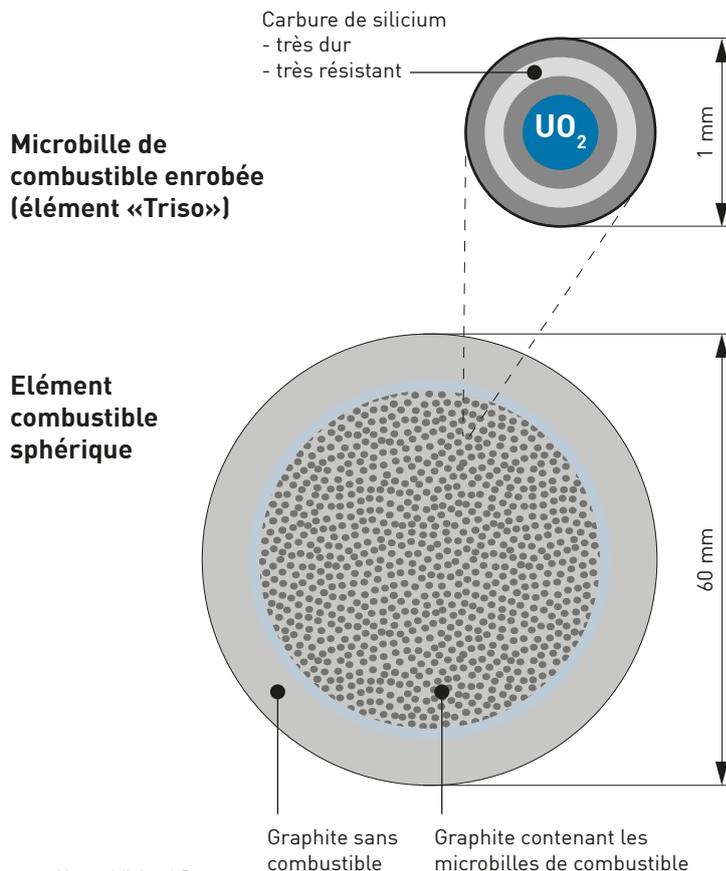
Les travaux de la Chine se distinguent par leur procédure pragmatique destinée à minimiser les risques de développement. La température de sortie de l'hélium a ainsi été limitée à 750 °C et dans un premier temps et aucune turbine à l'hélium n'est utilisée. L'hélium chaud dégagé par le réacteur est conduit jusqu'à un générateur de vapeur qui, comme dans les réacteurs à eau sous pression traditionnels, rejette de la vapeur d'eau qui alimente une turbine. L'installation de démonstration de



Une nouvelle étape franchie en Chine: livraison des premières sphères de graphite – ici sans uranium.

Photo: CNI 23 Construction Co. Ltd

Un combustible multicouche résistant



Source: Horst-Michael Prasser
© 2019 Forum nucléaire suisse

Des sphères à la place de tubes

Dans les réacteurs à eau légère traditionnels tels que ceux en exploitation en Suisse, le combustible est placé à l'intérieur de tubes fins de plusieurs mètres de long, reliés en faisceaux pour former des assemblages combustibles.

Comme son nom l'indique, dans les réacteurs à lit de boulets, le combustible prend la forme d'une sphère de la taille d'une balle de tennis. Ces sphères comportent plusieurs couches. Les particules dites Triso (tristructural-isotropic fuel) en constituent les éléments centraux. Il s'agit de microbilles d'environ un millimètre de diamètre à l'intérieur desquelles se trouve le combustible de dioxyde d'uranium (UO₂).

Dans un premier temps, ce noyau du combustible est entouré de plusieurs couches de graphite (carbone). Le graphite permet de

contrebalancer les changements de volume occasionnés par la formation de nouveaux éléments résultant du processus de fission nucléaire. Sans cela, les microbilles pourraient se casser. Une couche de protection en carbure de silicium, très résistante chimiquement, entoure les microbilles. Elle est elle-même ensuite entourée d'une couche composée d'un graphite spécial. Tout cela permet de maintenir confinés de manière fiable les produits de fission radioactifs.

Compressés en une balle de tennis

Ces microbilles bien protégées sont ensuite mélangées à de la poudre de graphite et compressées jusqu'à devenir une sorte de sphère de la taille d'une balle de tennis (les sphères ci-contre sont dans leurs dimensions réelles). Elles sont ensuite enrobées dans une nouvelle couche de graphite exempte de combustible. Le graphite dans lequel sont placées les microbilles agit – en association avec le réflecteur fixé à la paroi du réacteur – comme un modérateur et permet de freiner les neutrons afin de provoquer les réactions de fissions nucléaires. Il en résulte un combustible nucléaire capable de rester intact également à des températures extrêmes.

Le procédé à la base de la fabrication de ce combustible a été développé en Allemagne avant d'être repris par des ingénieurs chinois. Les expériences pratiques menées avec ce combustible dans les réacteurs expérimentaux en Allemagne (cf. encadré p. 4) et les tests effectués sur les sphères chinoises au centre de recherche néerlandais de Petten ont montré que si au moment de la fabrication et de l'exploitation, les directives de qualité sont respectées, ce combustible permet de protéger très efficacement contre la libération de matières radioactives, et ce aussi en cas d'accident grave.

Cet emballage extrêmement solide présente cependant l'inconvénient que le retraitement en vue du recyclage du combustible est complexe, et que pour une quantité de matières radioactives identique, le volume des déchets est comparativement important.

Shidao Bay doit permettre de développer des solutions en vue d'une utilisation industrielle. Elle devrait entrer en exploitation normale en 2020, et possède une durée de vie de 40 ans.

Le principe de base du réacteur à lit de boulets réside dans l'intégration continue des sphères de combustible par le dessus de la cuve du réacteur. Le caloporteur hélium circule entre les sphères, dans les interstices. Dans un même temps, les sphères déjà utilisées sont retirées par le dessous, également de manière continue. On mesure leur taux de combustion, et elles sont réintroduites dans le cœur du réacteur par le haut. Si la limite de combustion est atteinte, les sphères sont retirées et placées dans le dépôt destiné au combustible usé.

Ce mode d'exploitation offre l'avantage qu'il n'est pas nécessaire que la totalité du combustible soit présente simultanément dans la cuve du réacteur. Mais pour des raisons de sécurité, le concept du lit de boulets est adapté uniquement aux petits réacteurs du fait de ses spécificités techniques et physiques.

Si certaines limites sont respectées, ce réacteur présente une sécurité intrinsèque.

Une fusion du cœur impossible

La sécurité intrinsèque du HTR-PM résulte de différentes propriétés:

- **Un caloporteur non risqué:** Le caloporteur hélium n'est pas radioactif lorsqu'il traverse le réacteur et la contamination par les matières radioactives est très réduite. Par ailleurs, l'hélium est un gaz rare; il n'est ni nocif, ni inflammable, ni explosif.
- **Une densité énergétique faible:** Rapporté à sa production thermique, le cœur du réacteur possède un volume élevé. Ainsi, en cas de défaillance, une quantité importante de chaleur peut être stockée temporairement dans le réacteur avant d'être évacuée naturellement.
- **Des températures élevées possibles:** Si la température augmente en raison d'une défaillance, le processus de fission nucléaire s'arrête automatiquement. Etant donné que le graphite supporte des températures très élevées, aucune fusion du cœur en raison de la chaleur résiduelle dite de post-désintégra-



Une technologie d'avenir: livraison de la première cuve de pression destinée au réacteur de démonstration de Shidao Bay.

Photo: Xinhua

tion n'est possible. Il s'agit là d'un avantage considérable par rapport aux réacteurs à eau légère traditionnels.

Aucun courant de secours n'est nécessaire

Les caractéristiques de sécurité ont été attestées dans la pratique sur le réacteur expérimental AVR de Jülich (cf. encadré p. 4) et le HRT-10 de Pékin:

- L'élévation de la température du combustible en raison d'une défaillance avec perte totale du refroidissement n'occasionne aucune libération significative de matières radioactives.
- Si de l'eau ou de l'air pénètrent dans le réacteur, les réactions chimiques occasionnées se déroulent lentement et peuvent être arrêtées dans les jours ou semaines qui suivent. Aucune explosion d'hydrogène telle que celle survenue à Fukushima ne peut se produire.
- Le HTR-PM supporte également sans dommage des incidents tels que la perte de l'alimentation électrique externe (la cause de l'accident à Fukushima) ou la perte de la soufflante d'hélium principale. Aucun courant de secours n'est nécessaire.

Pour d'autres informations sur ce thème:

Forum nucléaire suisse, feuille d'information «Les futurs systèmes de réacteurs»: www.forumnucleaire.ch, lien «Faits et chiffres»

Tsinghua University, Institute of Nuclear and New Energy Technology: www.inet.tsinghua.edu.cn

X-Energy, Maryland, USA: www.x-energy.com

A ces caractéristiques de sécurité attrayantes s'ajoute le fait que la température de sortie de l'hélium, de 750 °C, est comparativement importante, ce qui offre un taux d'efficacité élevé dans le cadre de la production d'électricité, encourage une réutilisation de la chaleur de processus pour l'industrie ou pour alimenter les réseaux urbains de chaleur à distance.

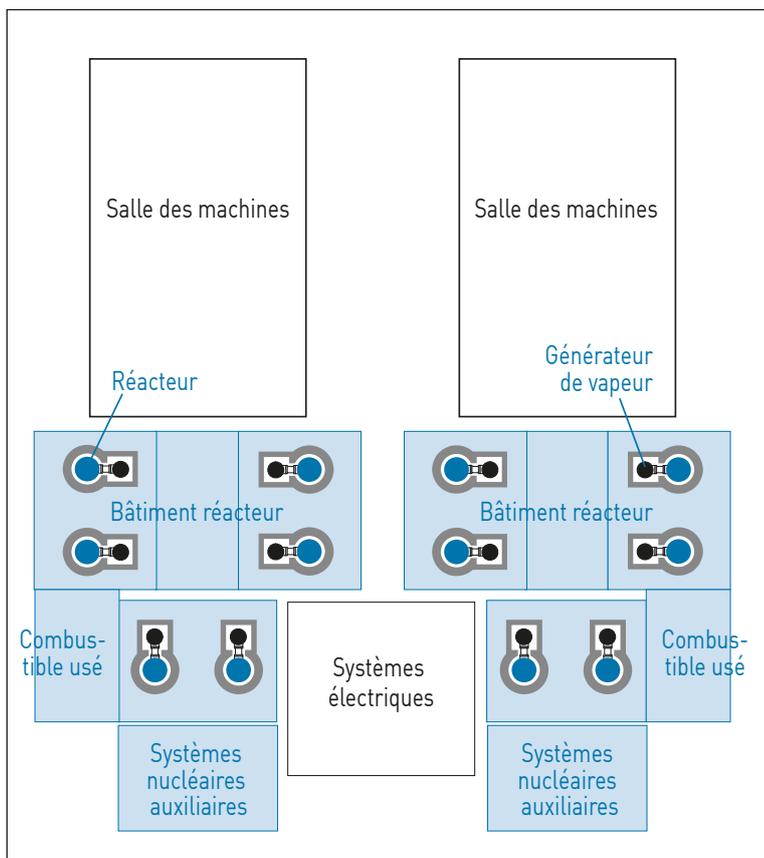
Flexible, modulaire, extensible

Le HTR-PM est un système modulaire pouvant au besoin comprendre plusieurs groupes de 200 mégawatts (équivalent de deux tranches nucléaires), jusqu'à atteindre 600 mégawatts. Il s'agit ici de l'installation standard HTR-PM600, composée de six réacteurs (soit trois modules) pour un seul groupe turbo-alternateur. Deux installations de ce type fournissent au total une puissance comparable à la centrale de Leibstadt, la plus grande de Suisse.

Forum nucléaire suisse
Frohburgstrasse 20
4600 Olten
Téléphone 031 560 36 50
info@forumnucleaire.ch
www.forumnucleaire.ch

La Chine s'intéresse tout particulièrement au réacteur à lit de boulets. Un premier site destiné à une installation commerciale a déjà été étudié: Ruijin, dans la province de Jianxi. Il s'agirait de la première centrale nucléaire du pays à être située dans les terres et non sur le littoral.

La Chine attend un succès à l'exportation de ce type de centrale adapté aux réseaux isolés, peu développés ou petits, mais aussi à la désalinisation de l'eau de mer. A l'heure actuelle, l'Arabie saoudite, les Emirats arabes unis, l'Indonésie, mais aussi l'Afrique du Sud, où un projet basé également sur une technologie allemande – le Pebble Bed Modular Reactor (PBMR) – est suspendu depuis 2010, ont manifesté leur intérêt pour ce type de réacteur. Concernant le PBMR, le caloporteur hélium aurait entraîné directement une turbine sans passer par un générateur de vapeur.



Agencement d'une centrale nucléaire de 1200 mégawatts composée de deux HTR-PM600. Dans une installation standard de ce type, trois modules placés en forme de T – composés de deux tranches nucléaires chacun – entraînent une turbine à vapeur et fournissent une puissance maximale de 600 mégawatts.

© 2019 Forum nucléaire suisse

A l'origine: l'Allemagne

Les réacteurs à lit de boulets sont nés de l'AVR (Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor) refroidi à l'hélium d'une puissance électrique de 13 mégawatts. Celui-ci avait été mis en service en 1967 au centre de recherche de Jülich près de Cologne. Il a été arrêté en 1988 dans le sillage de l'accident de Tchernobyl.

Suite à l'AVR, les travaux de construction d'un réacteur au thorium à haute température refroidi à l'hélium (THTR) d'une puissance électrique de 300 mégawatts ont également été lancés en 1971. En 1985, l'installation a été pour la première fois connectée au réseau à Hamm-Uentrop, en Rhénanie-du-Nord-Westphalie. Mais l'installation s'avéra trop grosse et trop complexe et de nombreux problèmes techniques firent leur apparition, notamment un problème survenu sur des sphères de combustible. Tout cela associé aux coûts d'exploitation élevés et au contexte politique négatif pour le nucléaire en Allemagne, le THTR fut donc arrêté en 1988.

La Chine n'est pas le seul pays à s'intéresser activement aux réacteurs à lit de boulets. C'est le cas aussi des Etats-Unis. Le ministère de l'Energie soutient ainsi le développement du Xe-100 de la société X-energy, d'une puissance électrique de 35 mégawatts.