

Conférence débat organisée par les clubs professionnels

Mines Energie

et

Mines Environnement et Développement Durable

Réacteurs à sels fondus de thorium

23 Juin 18h30 à l'école des mines de Paris

Cette conférence a permis de faire le point sur le développement des réacteurs nucléaires à combustibles liquides aux sels fondus de thorium. Alternative ou complémentaire à la filière uranium, la filière thorium présente des caractéristiques qui la rendent intéressante du point de vue de la sécurité, de la gestion des déchets, ou de l'approvisionnement en combustible notamment. Elle a pour cela été inscrite parmi les six pistes à étudier pour les réacteurs du futur par le forum GIF de coopération internationale sur les réacteurs de 4^{ème} génération.

Deux intervenants ont animé cette conférence qui a accueilli une cinquantaine d'auditeurs, dont certains venus de l'étranger :

Daniel Heuer :

Directeur de recherche au CNRS affecté au LPSC (Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie) de Grenoble, titulaire d'une Thèse d'état en Physique à l'UJF de Grenoble, spécialiste des réacteurs à combustibles liquides et de la filière thorium. Il a publié récemment : «Nucléaire : quels scénarios pour le futur ?» en commun avec trois autres auteurs : Patrick Criqui (économiste), Michel Chatelier (physicien spécialiste de la fusion) et Sylvestre Huet (journaliste scientifique).

Alain Gerber :

Ingénieur ECAM Lyon et titulaire d'une thèse en mécanique des fluides à l'Ecole centrale de Lyon. Expert architecture et conception de systèmes/composants, il travaille depuis 1988, dans l'ingénierie nucléaire AREVA, essentiellement dans la 4^{ème} génération : SFR, VHTR et sur MSFR (Molten Salt Fast Reactor)

Le débat actuel sur le nucléaire en France se focalise sur la fermeture de Fessenheim et la décision allemande de sortir du nucléaire prise suite à l'accident de la centrale de Fukushima Daïchi. Pendant ce temps, compte tenu notamment des contraintes liées à la nécessaire réduction des émissions de gaz à effet de serre, la communauté scientifique et technique internationale continue de se projeter dans un avenir où le nucléaire prendra sa part dans la production d'énergie. Le GIF (Generation IV International Forum, organisation de coopération internationale sur le développement des réacteurs de 4^{ème} génération) dont la France est membre fondateur, a sélectionné six technologies sur lesquelles porte cette coopération. Parmi elles, les réacteurs à sels fondus présentent des caractéristiques qui en font un candidat pour disposer d'une énergie sûre.

Les réacteurs à sels fondus à spectre rapide (Molten Salt Fast Reactor - MSFR) ont pour caractéristiques d'utiliser le thorium comme source d'énergie, par sa transformation dans le spectre de neutrons rapides en isotope 233 d'uranium qui lui est fissile. Ceci permettrait de pallier un inconvénient majeur des technologies actuelles qui utilisent le seul isotope fissile présent dans la nature qui est l'isotope 235 de l'uranium. Cet isotope ne constitue que 0,7% environ de l'uranium naturel. Un autre moyen est fourni par les concepts classiques de réacteurs à spectre de neutrons rapides qui transforment l'uranium naturel en plutonium qui est fissile.

Un des avantages évoqués à propos du cycle thorium est une production d'actinides mineurs (déchets nucléaires à vie longue et de haute activité) réduite. Il est même envisageable de traiter les actinides mineurs produit par les réacteurs classiques en les « incinérant » avec des réacteurs à sels fondus, au lieu de les immobiliser dans du verre, ce qui est le mode de traitement actuel des déchets de haute activité.

Le cycle thorium-uranium ($^{232}\text{Th} - ^{233}\text{U}$) est plus adapté que le cycle uranium-plutonium ($^{238}\text{U} - ^{239}\text{Pu}$) aux systèmes à combustibles liquides, pour des raisons de compatibilité avec les sels fondus. Les systèmes à combustible liquide présentent également d'autres particularités : un seul liquide à la fois combustible et caloporteur, ce qui pourrait permettre de réduire la taille des installations, un combustible liquide qui facilite le chargement et l'extraction, le contrôle de la réactivité du cœur par la vidange du combustible vers un réservoir.

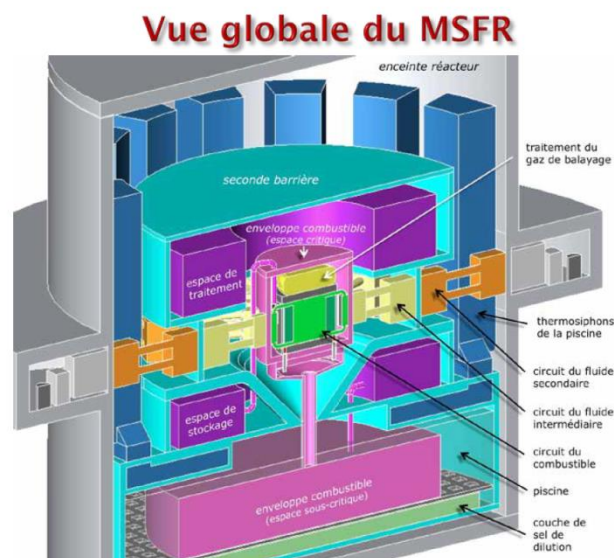


Illustration MSFR : LSPC

Une autre caractéristique potentielle des réacteurs à sels fondus est leur flexibilité et leur réactivité pour s'adapter rapidement à une demande de puissance variable. Cette caractéristique permettrait de faire de ce type de réacteur un complément utile pour lisser une production d'énergie intermittente, notamment à cause de la part des énergies renouvelables. Le développement de tels réacteurs suppose évidemment qu'ils soient économiquement rentables.

Les points de vigilance sont liés aux risques de dégradation des matériaux à cause du pouvoir corrosif des sels fondus et de leur très haute température, d'au moins 700°C, même s'il n'y a pas d'éléments de structure dans le cœur même du réacteur. Des solutions à l'étude consistent à régler le potentiel Red/Ox du liquide, et à choisir des matériaux non oxydés à ce potentiel.

Uranium ou thorium : pas d'autre alternative pour un développement massif de réacteur de fission. Pour produire les matériaux fissiles nécessaires à la réaction de fission, les ressources naturelles disponibles sont l'uranium et le thorium. L'uranium 235 fissile est présent à l'état naturel, mais ne représente que 0,7% en proportion de l'uranium naturel, et nécessite donc des opérations industrielles d'enrichissement, pour obtenir un combustible utilisable. Le thorium et l'uranium 238 présents dans la nature ne sont pas fissiles, mais ils sont ce qu'on appelle « fertiles ». En réaction à un bombardement de neutrons, ils produisent respectivement de l'uranium 233 et du plutonium 239 qui eux sont fissiles, et peuvent être utilisés comme combustible. Le thorium et l'uranium sont disponibles en grande quantité. Le thorium est notamment un sous-produit de l'exploitation des terres rares. Il est même stocké comme « déchet » par des entreprises productrices de terres rares comme Rhodia (maintenant Solvay), qui en a accumulé 8000 tonnes en France. Les terres rares sont utilisées notamment pour la fabrication des grandes éoliennes et des aimants pour les générateurs électriques. On se prend à imaginer de l'électricité nucléaire au thorium sous-produit de la construction des éoliennes...

Le réacteur au thorium ne démarre pas tout seul, il faut amorcer la réaction avec un matériau fissile. Ce matériau fissile peut être soit de l'uranium 235 naturel, soit de l'uranium 233 que l'on peut créer dans les réacteurs classiques en y introduisant du thorium fertile. Comme indiqué plus haut, le plutonium qui est aussi fissile pose des problèmes de compatibilité avec les sels fondus.

Areva considère que le potentiel offert par le cycle thorium confère aux réacteurs à sels fondus un potentiel intéressant, et soutient le CNRS pour ses études dans ce domaine, en soulignant que les questions sur la sûreté et l'industrialisation de ces systèmes devront être résolues. Ces études devraient être réalisées dans un cadre de coopérations internationales. La perspective de déploiement commercial est à envisager à très long terme, pas avant la fin du siècle actuel. NB : d'autres organismes envisagent une commercialisation à plus courte échéance, voir ci-dessous.

Le concept des réacteurs à sels fondus a été imaginé dès les années 1950 aux Etats-Unis. Des démonstrateurs ont été mis au point, en spectre thermique, d'abord en utilisant de l'uranium 235, puis de l'uranium 233, puis du plutonium 239, et enfin en mode surgénérateur avec du thorium comme élément fertile.

Ces dernières années, le concept a bénéficié d'un regain d'intérêt dans différents pays :

En Russie, le projet MOSART (Molten Salt Actinide Recycler & Transmuter). En Chine le projet TMSR (Thorium Molten Salt Reactor) est l'un des plus ambitieux, lancé en 2005 avec des moyens

importants et avec une feuille de route prévoyant une phase d'apprentissage sur un réacteur en spectre thermique, en cycle ouvert avant de passer en cycle surgénérateur. Un démonstrateur est prévu en 2035.

L'Inde, qui ne fait pas partie du GIF, dispose de ressources importantes en thorium et s'est également fixé une stratégie de long terme ambitieuse et progressive : utiliser le parc actuel pour constituer un inventaire en uranium 233 pour démarrer à terme les réacteurs au thorium destinés à fournir l'énergie de façon durable, sous forme d'électricité et d'hydrogène utilisable pour le secteur des transports.

Les Etats-Unis (projet FHR pour Fluoride salt-cooled High temperature Reactor) et le Japon (projet FUJI développé en coopération avec la République Tchèque) ne sont pas en reste.

En Europe, le projet EVOL (Evaluation and Viability of Liquid fuel fast reactor) piloté par le CNRS a laissé place en 2015 au projet SAMOFAR (a paradigm shift in nuclear reactor SAFety with the MOLten FAsT Reactor), basé sur EVOL et piloté désormais par l'Université de Delft au Pays Bas, avec l'implication de plusieurs industriels et universitaires, et mettant l'accent sur les études de sûreté.

Il existe d'autres projets en Europe, notamment en République Tchèque, au Royaume Uni, au Pays Bas.

En France, Daniel Heuer lui-même démontré en 2004-2006 les avantages du spectre rapide pour cette filière, lui et son équipe du LSPC travaillent depuis au design du MSFR .

Au Canada le projet IMSR (Integral Molten Salt Fast Reactor) s'inscrit dans une stratégie de mise au point de réacteurs plus petits et modulaires. Il est porté par une société privée, Terrestrial Energy Inc. fondée en 2012 et qui a pu lever des fonds, avec l'objectif de réaliser un démonstrateur et de commercialiser dès 2021 une technologie devant permettre de produire de l'électricité à très bas coût.

Les avantages combinés du thorium et des systèmes à combustibles liquides n'évident pas les questions qui se posent en matière de sûreté et d'ingénierie, notamment sur le plan des matériaux. Cependant les initiatives internationales publiques ou privées pour développer ces systèmes, sont des indices d'un possible intérêt. En France, la stratégie nucléaire pour le long terme est basée sur la mise au point de réacteurs de quatrième génération sur la base d'un cycle uranium/plutonium en phase solide (projet Astrid) en continuité des expériences acquises sur le cycle du combustible oxyde et sur les réacteurs Phénix et Superphénix. Pour les autres systèmes comme les réacteurs à sels fondus, la France exerce une veille technologique active, dans le cadre de la coopération internationale, mais avec des moyens assez limités. Ne sommes-nous pas trop dans la continuité du passé, à vouloir valoriser notre expertise acquise sur les filières classiques ? En faisons-nous assez pour ne pas être décrochés dans la mise au point d'une filière prometteuse ? Nos décideurs dans le domaine de l'énergie sont ils suffisamment conscients et avertis de ces questions ?

Les organisateurs de la conférence, les clubs professionnels Mines Energies et Mines Environnement et Développement Durable remercient les intervenants pour leur exposé, et les auditeurs pour leur participation active au débat, sur un sujet clé de notre stratégie énergétique.