

Feuille d'information

Octobre 2015

Thorium: le combustible nucléaire de demain?

Depuis quelques temps, le thorium fait à nouveau parler de lui à l'échelle internationale en tant que combustible nucléaire. Malgré la construction de nombreux réacteurs d'essai fonctionnant déjà au thorium aux débuts de l'ère nucléaire, l'uranium naturel s'est imposé entre-temps comme combustible dominant. Actuellement, l'Inde et la Chine principalement mènent des programmes de développement à long terme sur des réacteurs destinés à l'utilisation au thorium. L'avenir dira si cette ressource énergétique abondante pourrait suffire à couvrir la soif d'énergie de l'humanité.

Comme l'uranium, le thorium est un élément faiblement radioactif présent naturellement dans les sols. Il a été découvert en 1828 par le chimiste suédois Jöns Jakob Berzelius, et était utilisé entre autres dans les manchons à incandescence des lampes à gaz étant donné qu'il émet une lumière claire et blanche lorsqu'il s'échauffe.

En soi, le thorium n'est pas fissible, mais il permet la surgénération de l'uranium 233, facilement fissible lui, par capture neutronique (graphique page 3). La fission de l'uranium 233 qui en résulte permet ensuite de libérer en moyenne plus de deux neutrons: l'un est utilisé pour la nouvelle fission d'un autre noyau d'uranium 233, l'autre pour transmuter de nouveau un noyau de thorium en uranium.

Dans un réacteur, ce processus produit davantage de matière fissible qu'il n'en consomme. Les spécialistes parlent donc de «surgénération». Il ne s'agit bien évidemment pas d'un «mouvement perpétuel», le processus de surgénération ne fonctionnant que jusqu'à consommation totale du thorium pour la transmutation en uranium 233 fissible.

Les principales propriétés

Sur le plan du bilan neutronique, l'uranium 233 constitue le combustible idéal, plus encore que les isotopes d'uranium 235 et de plutonium 239, facilement fissibles, utilisés dans les centrales nucléaires commerciales actuelles. Les propriétés nucléaires favorables de l'uranium 233 permettent la «surgénération thermique» avec neutrons ralentis et pauvres en énergie. Celle-ci peut être rencontrée dans les réacteurs à eau lourde, et en principe dans



Matière première pour la production d'énergie: le thorium est présent sur Terre dans différents composés chimiques, et est plus abondant que l'uranium. Photographie de la thorianite, espèce minérale (ThO_2).

les réacteurs à eau légère tels que ceux utilisés en Suisse. Pour ces derniers, les éléments combustibles doivent cependant faire l'objet de modifications importantes.

L'utilisation du thorium en tant que combustible nucléaire présente certaines spécificités par rapport à l'uranium naturel:

Une ressource énergétique abondante:

Dans la nature, le thorium est présent presque exclusivement dans l'isotope thorium 232, dont la teneur énergétique peut être exploitée dans un réacteur par le biais du processus de surgénération susmentionné. Le retraitement (recyclage) du combustible usé à base de thorium permet de libérer beaucoup plus d'énergie qu'avec une quantité identique d'uranium naturel, tel qu'il est utilisé aujourd'hui.

Cela est dû au fait que dans les réacteurs à eau légère actuels, moins de un pour cent de la teneur énergétique de l'uranium naturel est libérée. En effet, seul l'uranium 235 est directement fissile, l'uranium 238, présent majoritairement, subsiste quant à lui*. De plus, le thorium est trois à quatre fois plus présent dans la croûte terrestre supérieure que l'uranium, constituant ainsi une ressource énergétique abondante.

En termes de *sécurité*, un réacteur fonctionnant au thorium ne serait pas très différent d'un système similaire fonctionnant à l'uranium. Il n'est cependant pas possible ici de généraliser au vu du nombre important de réacteurs existants et de la nécessité d'étudier chaque système avant de pouvoir attester sa sécurité. Si par exemple le thorium est utilisé dans un réacteur sous forme de matière solide (comme l'est l'uranium actuellement), des mesures de préventions doivent être prises afin de pouvoir évacuer la chaleur de désintégration des produits de fission encore présents dans le combustible en cas de défaillance.

Des déchets radioactifs de plus courte durée:

La liste des produits de fission radioactifs à durée relativement courte, générés dans le réacteur lors de la fission de l'uranium 233, est certes semblable à celle de la fission de l'uranium 235. Mais un réacteur fonctionnant uniquement au thorium produit très peu d'éléments radioactifs à longue durée de

vie tels que le plutonium, l'américium et le curium.

Cependant, l'utilisation de thorium n'exempte pas du stockage des déchets radioactifs en couche géologique profonde. La durée de confinement jusqu'à décroissance de la radioactivité est en revanche moins importante. Les études montrent qu'après 500 ans, un cycle thorium/uranium 233 présenterait un combustible usé comparable d'un point de vue radiologique à celui de l'uranium naturel. Des recherches doivent encore préciser ici le rôle de certains isotopes à longue durée de vie.

Un puissant émetteur gamma:

Le thorium présente un inconvénient de taille: lors du processus de surgénération, de l'uranium 232 est produit. Cet isotope d'uranium n'est pas fissile et se désintègre avec une demi-vie d'environ 70 ans. Certains émetteurs alpha puissants interviennent au cours de la chaîne de désintégration engendrée. Etant donné que les uraniums 232 et 233 ne peuvent être séparés, le retraitement et la production de combustible à base d'uranium 233 nécessitent un blindage important contre les rayons gamma, ce qui complexifie le processus, et le rend plus onéreux.

Nécessité d'une aide au démarrage:

Un réacteur fonctionnant uniquement au thorium ne peut démarrer de manière autonome; il a besoin d'une «allumette nucléaire» qui fournisse les neutrons nécessaires pour les premiers processus de surgénération et de fission. Aujourd'hui, ce sont l'uranium 235 (la seule «allumette nucléaire» présente dans la nature), et le plutonium artificiel qui jouent ce rôle. Il sera bien sûr question à l'avenir de l'uranium 233 surgénéré à partir du thorium, dans le but de pouvoir se passer d'uranium 235, et en particulier de plutonium produit à partir de l'uranium 238, et de pouvoir utiliser un réacteur fonctionnant uniquement au thorium. Comme indiqué plus haut, cela présente l'avantage fondamental de pouvoir renoncer en grande partie aux produits de transmutation à longue durée de vie.

Un rendement énergétique élevé:

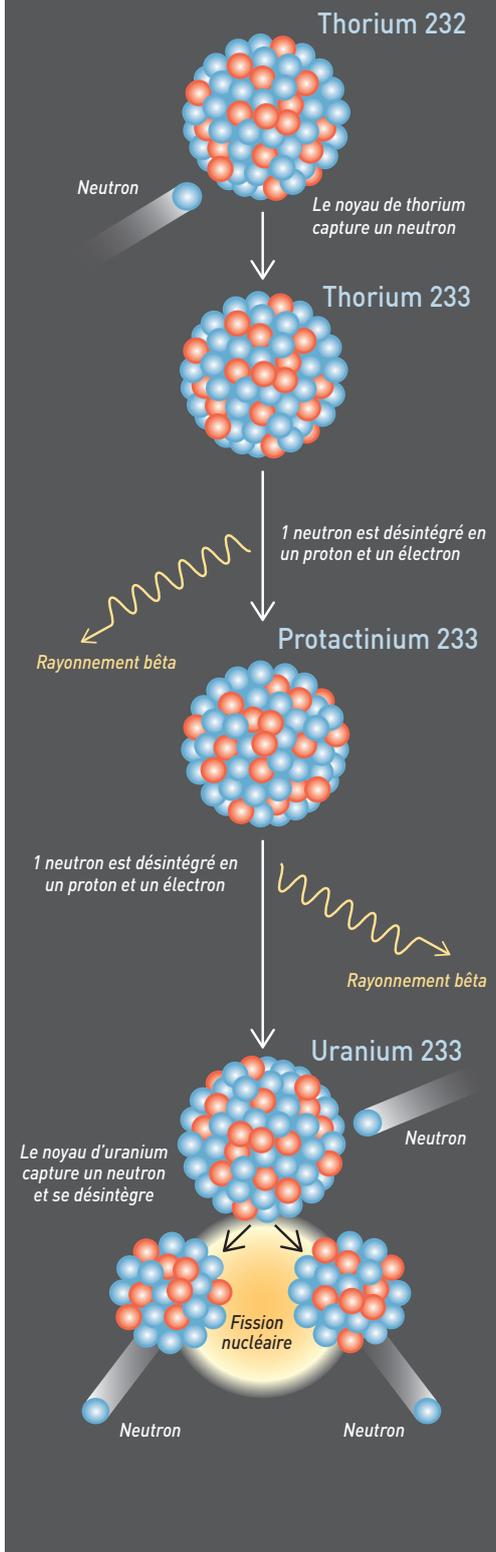
Le thorium, l'uranium et le plutonium peuvent être mélangés étant donné qu'ils forment des

* L'uranium naturel tel qu'il est extrait des gisements se compose à plus de 99% de l'isotope d'uranium 238 et de seulement 0,7% d'uranium 235 facilement fissile. Comme le thorium, l'uranium 238 n'est pas directement fissile mais peut être transmuté également par capture neutronique en un isotope facilement fissile: le plutonium 239.

Ce processus de surgénération nécessite cependant des réacteurs spéciaux avec neutrons rapides et haute-ment énergétiques (appelés «surgénérateurs à neutrons rapides»). Les réacteurs à eau légère traditionnels ne sont pas adaptés à ce processus.

Pour pouvoir exploiter la teneur énergétique de l'uranium naturel dans une mesure similaire au thorium, le parc nucléaire actuel devra être complété de «surgénérateurs à neutrons rapides» et d'un retraitement de combustible associé.

Production d'uranium à partir de thorium



oxydes très similaires. Cela permet d'une part des combustions élevées, en d'autres termes une très bonne exploitation de la teneur énergétique du combustible. L'inconvénient du retraitement fastidieux de ces oxydes mixtes est ainsi compensé. D'autre part, cela ouvre la voie à la fission du plutonium présent actuellement en vue de libérer de l'énergie sans créer simultanément de nouveaux atomes de plutonium.

Prolifération: Lors du cycle du thorium, l'uranium 233, qui se prête à un usage militaire, peut être séparé sur un plan chimique. Cependant, le fort rayonnement des produits de désintégration de l'uranium 232 toujours présent en plus de l'uranium 233 rend difficile un détournement de ce type et atténue cet inconvénient.

De nombreuses expérimentations

L'utilisation de thorium comme combustible nucléaire n'est pas quelque chose de nouveau. Dans les années 1950 à 1970, de nombreux prototypes de réacteurs au thorium ont été construits en Grande-Bretagne, France, Allemagne, Russie et aux Etats-Unis. Il avait alors été constaté que le thorium pouvait être utilisé dans la quasi-totalité des systèmes de réacteur. Les réacteurs haute température

Autres informations concernant le thorium sur

International Thorium Energy Organisation: <http://itheo.org>

Développement du combustible nucléaire à base de thorium: www.thorenergy.no

Définition des isotopes

La matière présente dans notre univers se compose d'atomes, eux-mêmes composés d'un noyau chargé positivement entouré d'un nuage électronique chargé négativement. Le noyau comprend à son tour de petites particules élémentaires: des protons, chargés positivement, et des neutrons, neutres.

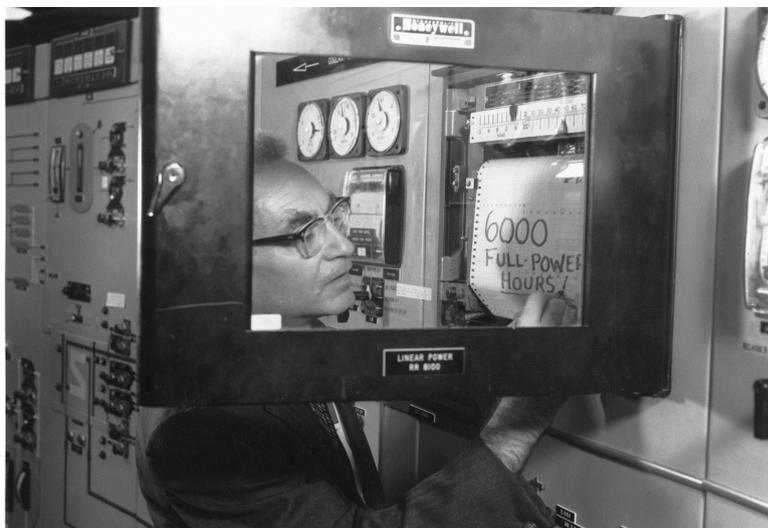
Il y a autant d'électrons que de protons. Leur nombre définit les propriétés chimiques d'un atome. Le plus petit noyau atomique composé d'un seul proton (et donc d'un seul électron) est l'hydrogène, avec les propriétés chimiques associées.

Deux protons forment ensuite l'hélium, gaz rare; six protons le carbone, et ainsi de suite. Le noyau

atomique le plus complexe présent naturellement sur Terre est l'uranium, avec 92 protons.

Tandis que les noyaux atomiques d'un élément chimique défini comportent toujours le même nombre de protons, leur nombre de neutrons diffère. Le noyau atomique de l'uranium 233 par exemple comprend 92 protons et 141 neutrons [92+141=233], et celui de l'uranium 235 comporte 92 protons et deux neutrons supplémentaires, soit 143 [92+143=235].

On parle alors de deux isotopes différents d'un même élément chimique. Les isotopes ne se distinguent généralement pas d'un point de vue chimique mais possèdent des propriétés nucléaires très différentes.



Expérimentations des débuts du nucléaire: le précurseur Alvin Weinberg inscrit le succès du réacteur à sels fondus d'Oak Ridge en 1967.

Photo: Oak Ridge National Laboratory

avaient fait l'objet d'une attention particulière, le thorium se prêtant très bien à cette technologie. Les installations suivantes sont les plus connues:

- le réacteur expérimental «Dragon», construit en Grande-Bretagne avec la participation de la Suisse (20 MW, en exploitation de 1966 à 1975),
- les réacteurs allemands à lit de boulets, au Centre de recherche de Jülich (AVR, 13 MW, 1967–1988) et à Hamm-Uentrop (THTR, réacteur à haute température au thorium, 300 MW, 1983–1989) ainsi
- qu'un prototype également industriel à Fort St Vain, Etats-Unis (330 MW, 1976–1989).

L'exploitation des deux réacteurs de haute capacité précités a montré que la technologie au thorium fonctionnait mais que certains problèmes techniques devaient encore être résolus, aussi bien en matière d'exploitation que de fabrication et de retraitement du combustible.

A la fin des années 1960, une autre expérimentation sur le réacteur à eau légère américain de Shippingport a révélé que ce réacteur, transformé pour tester le fonctionnement au thorium, générait légèrement plus de matière fissible que ce qu'il n'en consommait. Le thorium et les sources de neutrons ont été placés ici dans des zones différentes. La zone «Seed» contenait essentiellement de l'uranium 233, et la zone «Feed» du thorium 232.

Les essais effectués à Oak Ridge (USA) dans les années 1960 avec un réacteur à sels fondus fonctionnant à l'uranium (MSRE, Molten Salt Reactor Experiment) ont eux aussi été concluants. Ces expérimentations ont permis de démontrer la faisabilité de cette technologie et laissent supposer que ce type de réacteur pourrait également fonctionner sur une base de thorium et présenterait de très bonnes caractéristiques de sûreté.

Développements en Inde et en Chine

Malgré tous les essais dont a fait l'objet le thorium, l'uranium naturel s'est imposé comme combustible majeur au cours des dernières décennies: manipulation aisée, coûts bas, sans oublier le fait que l'industrie avait misé sur la technologie du combustible à base d'uranium pour le développement des réacteurs commerciaux, celle-ci ayant auparavant fait ses preuves dans la propulsion navale.

Aujourd'hui, la Chine et l'Inde principalement mènent des projets sur le thorium, toutes deux possédant des gisements de thorium naturels importants. L'Inde souhaiterait ainsi mettre en exploitation le premier réacteur à eau lourde avancé de 300 MW fonctionnant au thorium d'ici 2022 environ, et la Chine a décidé en 2011 de développer un réacteur à sels fondus à base de thorium.

Programmes internationaux

La Chine et l'Inde ne sont pas les seules à étudier le potentiel du thorium. C'est également le cas du «Generation IV International Forum» (GIF) qui rassemble 13 partenaires, dont la Suisse. Le GIF a pour objectif de développer des réacteurs et cycles de combustible novateurs pour la période après 2040. Le thorium est également à l'étude dans le cadre de l'«International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles» (Inpro) mené par l'Agence internationale de l'énergie atomique.

Actuellement, le thorium ne constitue pas une option éprouvée industriellement et réalisable à court terme pour des centrales nucléaires commerciales. Mais le développement de la technologie nucléaire bat son plein, et l'avenir dira quels systèmes pourront être implémentés dans les décennies à venir.