Le réacteur nucléaire à onde de combustion

e monde subit aujourd'hui une grave crise économique, avec un déficit de plus en plus considérable en production électrique. Si l'on veut amener la population mondiale au niveau de vie des nations industrielles, il faudra construire 10 000 centrales électriques de 1 GW chacune (1 milliard de watts). Les scientifiques du Lawrence Livermore National Laboratory en Californie ont développé un nouveau concept de réacteur souterrain intrinsèquement sûr et fiable, entièrement automatique, qui pourra contribuer à atteindre cet objectif.

Ce réacteur utilise un nouveau concept de *fission à onde de combustion* qui découle des études menées sur les bombes nucléaires. En effet, celles-ci utilisent le combustible nucléaire trente fois plus efficacement que les réacteurs industriels actuels.

On doit cette idée à une équipe de scientifiques du nucléaire travaillant sous la direction du célèbre Edward Teller. Il s'agit de John Nuckolls, Lowell Wood, Muriel Ishikawa et Roderick Hyde. Le concept a été présenté pour la première fois dans une note technique distribuée lors de la Conférence internationale sur l'énergie nucléaire qui s'est déroulée en Russie en juin 1996, sur le thème « Réacteurs nucléaires entièrement automatiques pour une mise en opération de long terme II: vers la conception d'un réacteur à haute température refroidi au gaz pour centrale électrique ».

Qu'est-ce qui fait la différence ?

Le concept d'onde de combustion est le résultat de plus de cinq décennies de recherches militaires dans les explosifs nucléaires. Ce qui permet d'avoir un réacteur si petit et si ef-

CHARLES STEVENS

ficace, c'est qu'il n'utilise pas la traditionnelle masse critique statique pour entretenir la réaction en chaîne. Dans un réacteur nucléaire conventionnel, une quantité suffisante d'uranium enrichi est amassée de manière à ce qu'un neutron produit par une réaction de fission puisse amorcer une autre réaction de fission avant de s'échapper du cœur. En général, après un fonctionnement de deux ans, un réacteur nucléaire industriel a « brûlé » une certaine quantité d'uranium 235 et les éléments combustibles doivent alors être remplacés – c'est-à-dire que le réacteur doit être arrêté pour être

Dans un surgénérateur, les neutrons qui s'échappent sont utilisés pour produire du combustible à partir d'un matériau sur la couverture entourant le cœur. Malgré tout, ce nouveau combustible doit être extrait de la couverture et être retraité avant de pouvoir être utilisé dans un réacteur.

Par contre, dans le réacteur nucléaire à onde de combustion (ROC), on place un petit igniteur en uranium enrichi à 20 % au centre d'un cylindre de 75 à 100 t de thorium. Quand l'allumage critique intervient, une onde de combustion se propage vers les deux extrémités du cylindre. Les neutrons rapides (ceux de grande vélocité et de haute énergie) issus de cette région critique de l'igniteur, vont produire un nouveau matériau fissible dans le thorium immédiatement adjacent. Ainsi, dès qu'une région d'ignition s'éteint faute de combustible, une suivante apparaît juste à côté - une véritable « onde de combustion» autoentretenue de fission.

Ainsi, le ROC peut produire la même quantité d'énergie qu'un réacteur conventionnel avec seulement 100 t de combustible. Par comparaison, un réacteur à eau légère réclame entre 3 000 et 4 500 t de combustible. La combustion en vague apporte aussi un meilleur taux de combustion, supérieur à 50 %.

Le schéma de référence

Le cœur du ROC est entièrement entouré d'un réflecteur de neutrons et d'un bouclier de protection. Les nombreux modules thermostatiques (Figure 1) sont destinés à maintenir une température uniforme dans tout le cœur. Chaque module, composé d'ampoules de l'élément léger lithium 6, absorbe des neutrons en forte quantité dès que le cœur dépasse une certaine température limite. Les modules thermostatiques sont injectés dans n'importe quelle partie du réacteur pour absorber les neutrons et ralentir ainsi immédiatement la réaction en chaîne. Si beaucoup de lithium 6 est injecté, la réaction en chaîne peut même être complètement interrompue. Dans le cas inverse, où la température passe en dessous d'une certaine limite, les ampoules de lithium 6 peuvent être extraites afin de faire redémarrer la réaction en chaîne. De cette manière, la réaction en chaîne est autorégulée; elle continue seulement lorsque l'on extrait de la chaleur du cœur, et une homéostasie thermique totale est automatiquement maintenue.

La chaleur du cœur est extraite par un circuit primaire de gaz hélium. Il y a une triple redondance de ce système, c'est-à-dire qu'il y a trois circuits indépendants d'hélium, chacun étant à même de transporter *toute* la chaleur engendrée par le réacteur. Un circuit secondaire, utilisant aussi de l'hélium, apporte cette énergie en surface pour une utilisation industrielle ou une turbine électrique.

FUSION N°76 - MAI - JUIN 1999

Le schéma de référence prévoit aussi un autre système, triplement redondant, d'évacuation de la chaleur. Il s'agit de transporter passivement la chaleur résiduelle en cas de perte de réfrigérant ou à la fin de la vie opérationnelle du réacteur.

Le réacteur est conçu pour une vie de trente années de production. Après ce laps de temps, le chargement initial de thorium ou d'uranium appauvri aura été consommé. L'extinction finale du réacteur se fera par l'injection dans le cœur d'un absorbeur de neutrons. Le combustible usé subira une désintégration bêta dans le réacteur. Le réacteur est entouré de sable chaud et sec – un puits de chaleur – assurant ainsi une protection à long terme contre toutes les circonstances environnementales susceptibles d'amener à relâcher de la radioactivité résiduelle dans l'atmosphère.

Pourquoi des neutrons rapides ?

Les réacteurs à thorium sont les mieux indiqués pour être produits en masse car le thorium est à la fois bon marché et il en existe d'importants gisements un peu partout dans le monde. Le réacteur doit être un surgénérateur afin, d'une part, d'utiliser au mieux le combustible nucléaire et, d'autre part, de minimiser les quantités d'isotopes à enrichir pour faire fonctionner ces centrales. Un mode de fonctionnement en surgénérateur est indispensable car les neutrons lents (ou thermiques) utilisés dans les réacteurs conventionnels sont rapidement absorbés par les produits de fission. Aussi, afin de produire et de régénérer, le ROC utilise le mode surgénérateur dans lequel les neutrons sont de haute énergie et ne souffrent pas de taux trop élevés d'absorption par les produits de fission.

Ainsi, le ROC parvient à une durée de vie opérationnelle de trente années sans aucun rechargement. La présence humaine de techniciens près du cœur s'avère inutile. De plus, le concept même de ce système empêche toute possibilité de détournement de matière fissile à des fins militaires.

Les neutrons de fission ont une énergie de 1 million d'électronvolts, ce qui correspond environ à une température de 10 milliards de kelvins. Le ROC est conçu pour maintenir ces neutrons à approximativement 10 % de ce niveau énergétique, soit 100 000 eV. Ce sont des neutrons rapides.

Il existe de nombreux avantages à travailler avec des neutrons rapides :

- La section efficace de combustible à régénérer est plus importante.
- Une section efficace plus importante apporte un meilleur taux de combustion.
- Des matériaux qui absorbent moins les neutrons rapides que les neutrons lents, comme le niobium et le tantale, peuvent être utilisés pour le cœur, permettant à celui-ci de fonctionner plus efficacement durant ses trente années de vie.
- Le taux de production de neutrons par réaction de fission est beaucoup plus élevé pour les neutrons rapides que pour les thermiques. C'est en particulier le cas pour l'uranium 233, qui est le combustible primaire du ROC. Quand le thorium 232 absorbe un neutron, il se transforme en uranium 233. C'est le combustible primaire engendré dans le cœur qui brûlera toute la vie d'un réacteur à thorium.
- Les neutrons rapides engendrent aussi des réactions de fission du thorium 232 ou de l'uranium 238. Bien que peu nombreuses par rapport à la fission de combustibles fissiles (uranium 233, uranium 235 et plutonium 239), la quantité n'est pas négligeable sur les trente années de vie du réacteur.

Le cœur

Pour produire 1 GW d'électricité pendant trente ans, le cœur du ROC doit avoir la forme d'un cylindre de 3 m de diamètre et de 10 m de haut. Si on voulait que le réacteur fonctionne pendant cent ans, il suffirait de le faire de 33 m de haut, et pour dix ans de fonctionnement, il faudrait le construire avec une hauteur de 3,3 m; mais le diamètre devra toujours être de 3 m.

Une petite zone d'ignition se trouve au centre du cylindre et contient de l'uranium 235. Cet igniteur est entouré par une zone plus grande de surgénération contenant soit du thorium 232 soit de l'uranium 238. Cette zone de surgénération finira elle-même par brûler après que le combustible aura été régénéré. Le processus se passe de la manière suivante. L'ignition se reproduit et s'éloigne vers les deux

extrémités du cylindre. Mais, pendant son fonctionnement, seulement 1 % du cœur sera composé de matériaux fissiles. C'est le pourcentage que l'on trouve dans les gisements d'uranium naturel. Etant donné la possibilité d'établir un taux de combustion élevé, supérieur à 50 %, les besoins en combustible pour une durée de vie de trente ans s'élèvent à 100 t. Comme nous l'avons noté plus haut, c'est beaucoup moins que les 3 000 ou 4 500 t d'uranium requis pour un réacteur industriel à eau légère de 1 GW pendant la même durée.

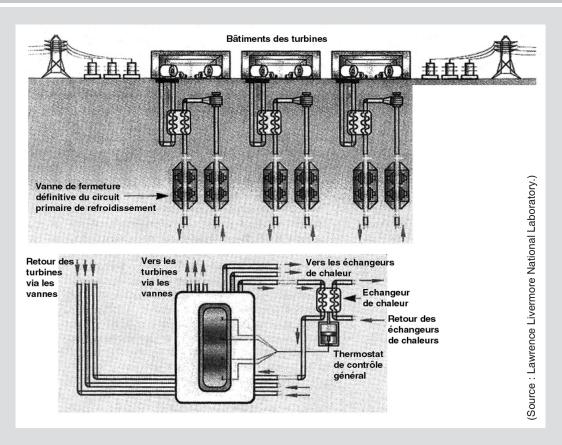
Le cœur est refroidi à l'hélium, ce qui lui permet de fonctionner à une température bien plus élevée que les réacteurs conventionnels refroidis à l'eau, car cela évite tous les problèmes de réaction de l'eau avec les matériaux à haute température. De plus, utiliser l'hélium rend la réactivité neutronique indépendante du fluide caloporteur, évitant ainsi toute mésaventure qui pourrait advenir lors d'une perte de réfrigérant.

Les matéraiux qui composent le cœur sont le niobium, le tantale, le tungstène et le rhénium. Ces métaux sont largement disponibles et se comportent bien à long terme. Ils ont de bonnes qualités chimiques et mécaniques à haute température qui peuvent, dans une certaine mesure, bien se maintenir sous le flux neutronique intense du réacteur.

Allumer l'onde de combustion

On démarre l'ignition avec le retrait de matériaux qui absorbent les neutrons. Cette opération n'a lieu qu'une seule fois et consiste à évacuer le « poison » à neutrons qui empêchait l'igniteur de devenir critique. Les réactions nucléaires commencent dans l'igniteur et, au même moment, la régénération à haut gain commence à se produire dans la zone adjacente à l'igniteur. L'onde de combustion se forme ainsi dans la zone de combustible non enrichi. D'abord, l'onde de combustion se propage de manière sphérique, jusqu'à ce qu'elle atteigne le bord du cylindre. La propagation se fait ensuite dans les deux directions opposées axiales, vers les extrémités du cylindre. La lenteur à laquelle se propage cette onde est déterminée

Figure 1. Configuration du réacteur et qualités distinctives de sûreté



Le réacteur est conçu avec deux ensembles de circuits de refroidissement : un grand circuit primaire qui assure le fonctionnement normal, et un second plus petit conçu pour l'extraction de chaleur après l'arrêt définitif ou pendant un accident où il y aurait perte de réfrigérant primaire.

Il y a six nouveautés dans ce type de réacteur qui ont pour but, selon le concepteur, « de rendre évident à toute personne raisonnable sa grande sûreté en tant que source puissante de chaleur de qualité » :

- Trois boucles de refroidissement indépendantes, séparées physiquement, chacune à même de faire tout le travail à pleine charge. Elles constituent la première ligne de défense contre tout accident de perte de réfrigérant.
- Les boucles de refroidissement sont munies d'un dispositif de fermeture définitive d'urgence, commandé automatiquement et fermant des valves mécaniques. Cela empêche tout risque d'échappement de produits de fission qui se seraient retrouvés véhiculés par le gaz de refroidissement.
- Le réacteur est enterré à plus de 100 m de profondeur, ce qui offre une grande distance entre l'atmosphère et le

cœur radioactif. Cela permet de s'adjoindre plusieurs systèmes de sécurité indépendants et performants, passifs ou actifs, dans l'éventualité d'un accident. Cela évite aussi toute possibilité de détournement des produits de fission à des fins militaires.

- Le puits de sable dans lequel le réacteur est enterré est aussi le puits de chaleur permanent du réacteur, sans intervention humaine. Il absorbera éternellement toute la chaleur résiduelle du cœur (peu importe la situation du réacteur). En fait, le puits de chaleur est conçu pour que l'homme n'ait pas à intervenir.
- La seconde ligne de défense contre toute perte de réfrigérant est constituée par un réseau dense et redondant de thermostats du réacteur. Ils ajustent, automatiquement et rapidement, la température de la charge de combustible avec celle de l'échangeur de chaleur.
- Ce réseau redondant de thermostats du cœur permet la conduite entièrement automatique du réacteur sur toute sa gamme de puissance, de 0 à 100 %, depuis l'ignition jusqu'à l'extinction finale. Cela empêche tout risque d'erreur humaine.

par le taux d'extraction de la chaleur, c'est-à-dire la demande en électricité. Au plus fort, la puissance est suffisante pour délivrer 2 GW thermiques. (Dans le cas d'un réacteur au thorium, la vitesse maximale de propagation est conditionnée par la désintégration bêta du protactinium 233, qui est assez lente et qui influe sur le taux

de transmutation du thorium 232 en uranium 233.)

La régulation automatique de la puissance nucléaire est assurée par des thermostats redondants et uniformément répartis. Ils ont pour fonction d'absorber massivement le flux de neutrons local dès que la température locale dépasse une valeur critique prévue. Ainsi, cette action ralentit la réaction nucléaire et assure une homéostasie thermique de chaque partie du cœur. Cette homéostasie est maintenue indépendamment des types différents de refroidissement, de la température générale, de la composition du combustible et du flux de neutrons.

FUSION N°76 - MAI - JUIN 1999

Chaque module thermostatique fonctionne en injectant ou retirant automatiquement un liquide au lithium 6 absorbeur de neutrons, dans de petits compartiments situés dans le fluide réfrigérant. Ce liquide est stocké dans un récipient extérieur à l'enceinte de confinement et il est poussé par un autre liquide de lithium 7 qui, lui, n'absorbe pas les neutrons. Ce lithium 7 se trouve dans une

autre partie adjacente du cœur, dans le combustible sensiblement plus chaud. Un réseau tridimensionnel de tels modules thermostatiques, indépendants les uns des autres, régule les températures partout et à tout moment (**Figure 1**).

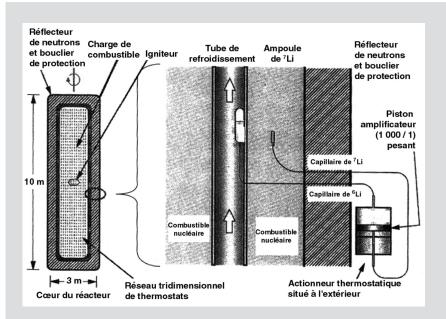
Quand on réduit l'extraction de chaleur, ou qu'on la ramène à zéro, on obtient une stabilisation de l'onde de combustion. Si la demande en chaleur est accrue, le matériau du cœur se refroidit, le lithium 6 est retiré du cœur par l'action des thermostats et le flux de neutrons se trouve renforcé. La réactivité neutronique redevient légèrement positive et l'onde de combustion redémarre.

A l'arrière de chaque onde de combustion, deux régions de matériaux modérément enrichis continuent à se former. Ces masses de combustible fissile continuent de brûler jusqu'à ce que l'accumulation de cendres de combustion et l'épuisement de combustible étouffent le foyer neutronique local. Un taux de combustion de 50 % est ainsi atteint. La **figure 2** illustre l'évolution de cette onde de combustion.

La chaleur du cœur est extraite par de l'hélium à haute pression à 1 200 K. Un réseau hexagonal bidimensionnel de tubes permet à l'hélium de circuler dans l'axe du cœur. Autour de ces tubes sont répartis les éléments combustibles qui chauffent, par simple conduction, l'hélium. On construit un triple réseau d'un tel circuit de refroidissement qui, en conditions normales, est mis en circulation par des pompes à la surface. Ce réseau de tubes de refroidissement, qui est la structure primaire dans le cœur, est fait d'un alliage de tantale capable de résister à de telles températures sur le long terme.

L'ensemble du cœur est placé dans une enceinte de confinement. Comme cette enceinte n'est pas atteinte par les neutrons rapides, elle peut être réalisée en alliages d'acier conventionnels.

Figure 2 - Les thermostats



La densité de puissance du cœur est continuellement régulée par l'action collective d'un réseau de thermostats indépendants. Ils maintiennent un coefficient de température négatif juste au-dessus de la température de fonctionnement prévue. Ils peuvent fonctionner avec une grande variété de ux et de spectres des neutrons, ainsi qu'avec d'importantes différences dans la composition du combustible et la puissance fournie du réacteur.

Les modules thermostatiques sont répartis selon un réseau tridimensionnel. Chaque module comporte une paire de compartiments métalliques reliés à un capillaire. L'ampoule disposée dans le combustible contient toujours du lithium 7 liquide qui n'absorbe quasiment pas les neutrons rencontrés dans ce réacteur. Une ampoule plus grosse est posée à l'intérieur du tube de refroidissement. Elle contient une quantité variable de lithium 6 qui a la propriété d'absorber fortement les neutrons.

Lors d'une hausse excessive de la température, le volume de lithium 7 se dilate et s'échappe un peu par le capillaire. Cette faible quantité de lithium 7 sous pression actionne un piston amplificateur qui repousse environ trois fois son volume de lithium 6. Celui-ci transite par son capillaire vers l'ampoule adjacente à la première. Elle est néanmoins plus froide car directement dans le circuit de refroidissement. Là, le lithium 6 va absorber le ux neutronique, diminuer la densité de puissance locale et ralentir la réaction. Lorsque la température sera redevenue normale, le lithium 6 sera aspiré dans le piston par le poids de ce dernier, tandis que le lithium 7 aura retrouvé sa situation première. Cet arrangement permet un *feed-back* négatif très efficace, un pilotage très souple et rapide de la température locale juste au-dessus du point de fonctionnement, comme de la densité de puissance nucléaire locale. Des thermostats équivalents connectent passivement l'échangeur de chaleur et le cœur pour le pilotage général du réacteur.

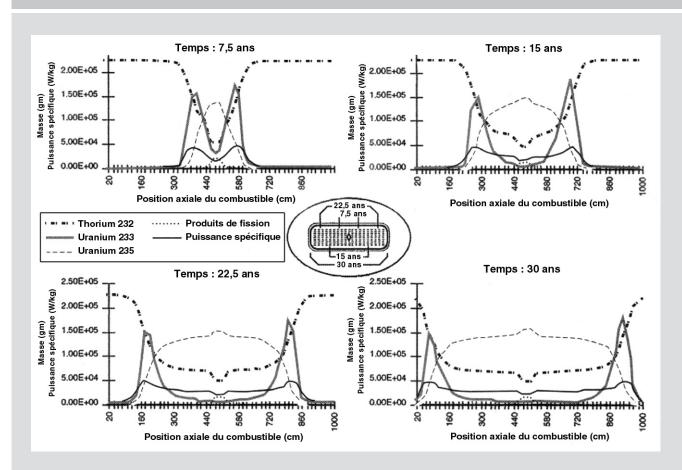
Les six niveaux de redondance

Le système triplement redondant de refroidissement primaire réduit fortement tout risque de perte de fluide réfrigérant accidentel. Chacun de ces trois systèmes est capable d'extraire toute la chaleur du cœur.

Un système de refroidissement supplémentaire, totalement indépendant du premier, a été prévu. C'est un système passif, sans pompe de circulation, qui entoure le cœur. En cas de panne des trois systèmes normaux de refroidissement, ce système d'urgence extraira la chaleur. Ce puits de chaleur est aussi triplement redondant. Il est

24

Figure 3 - Evolution de l'onde de combustion



On peut voir ici quatre moments de l'évolution de la charge de combustible du réacteur proposé, durant sa vie opérationnelle, avec une demande complète et continue de 2 GW thermiques. La masse des différents isotopes est exprimée en grammes et la puissance spécifique du combustible est en watts par kilo. L'axe horizontal donne la position du combustible sur les 10 m de hauteur du cylindre. Au centre, l'encart montre la position de l'onde de combustion dans le temps (le cylindre est couché).

Notez que le ux de neutrons issu de la région qui brûle le plus à l'arrière de l'onde de combustion va régénérer à l'avant de cette onde une partie fissile, et permettre l'avancée de l'onde. Après le passage de cette dernière, la concentration en atomes fissiles va augmenter un peu

jusqu'à atteindre un maximum avant de décroître. Ce sera au moment où les neutrons auront plus de chance d'être capturés par un produit de combustion que par un noyau fertile. La densité de puissance nucléaire augmente évidemment toujours dans cette région du cœur.

Finalement, bien en arrière de l'onde de combustion, la part des produits de fission (dont la masse atomique est en moyenne la moitié de celle des matériaux fissiles) rend la section efficace générale de capture du matériau proche de celle des matériaux de fission, la réactivité neutronique locale tombe et la combustion comme la régénération s'arrêtent – comme on peut le voir clairement sur les différents graphiques.

(Source: Lawrence Livermore National Laboratory.)

conçu pour évacuer la chaleur résiduelle après la fermeture du réacteur. De toute façon, en cas d'accident, ce système est suffisant pour refroidir le cœur par convection passive.

Des vannes d'arrêt sur le circuit de refroidissement permettent une séparation étanche entre le réacteur et la biosphère, que se soit en cas d'accident ou lors de l'extinction finale. Ces vannes se ferment automatiquement et définitivement si des produits radioactifs sont relâchés accidentellement dans le circuit d'hélium.

Ce concept révolutionnaire de centrale nucléaire à fission est capable, en prenant en compte les réserves en uranium et en thorium, de pourvoir le monde entier en électricité et en énergie thermique à des niveaux de consommation individuelle équivalents à ceux des Américains, et ce pour plus d'un siècle. De plus, avec ce concept, très peu de combustible « enrichi » (tel que celui qui est utilisé pour les bombes) est nécessaire. Enfin, le ROC est entièrement autorégulé et automatique, et ne requiert pas de maintenance sur ses trente années

de vie opérationnelle. Sa taille et son poids relativement petits font que ce réacteur pourra être produit en grandes quantités et sera facilement transportable.

Comme les concepteurs du projet l'on fait remarquer dans leur dossier technique, un « regard totalement neuf doit être porté sur la production d'énergie nucléaire à grande échelle, surtout quand on pense à la demande en électricité pour un tiers monde avec peu de moyens financiers [...] ». Ils ont conçu ce réacteur pour répondre à ce défi.

FUSION N°76 - MAI - JUIN 1999