

Réacteurs à neutrons rapides

Les réacteurs à neutrons rapides pourraient assurer un meilleur rendement énergétique, minimiser les risques de prolifération des armes nucléaires et réduire notablement la durée d'isolement des déchets radioactifs

W. Hannum • G. Marsh • G. Stanford

Malgré les craintes de l'opinion publique concernant la sécurité et la gestion des déchets issus des centrales nucléaires, la production d'électricité par des réacteurs nucléaires apparaît, en regard du problème du réchauffement climatique, comme une

source d'énergie à grande échelle parmi les plus écologiques. De nombreux pays tels que le Brésil, la Chine ou l'Inde mettent en chantier des centrales nucléaires ou, tout au moins, l'envisagent (8 unités sont en construction et 19 en commande ferme). En France, le site de Flamanville vient d'être désigné pour accueillir le démonstrateur des futurs réacteurs à eau pressurisée (EPR). Seuls les États-Unis restent en marge de cette tendance globale: la dernière centrale nucléaire y a été construite il y a une trentaine d'années.

Développée avec prudence, l'énergie nucléaire pourrait être une source d'énergie quasi inépuisable et sans impact sur le changement climatique. En particulier, une nouvelle technologie pourrait éviter les principaux inconvénients des méthodes actuelles, à savoir les accidents potentiels, le risque de détournement du combustible à des fins militaires ou terroristes, la gestion des déchets très radioactifs à longue durée de vie, mais aussi l'épuisement des réserves d'uranium extractible à un coût raisonnable. Ce système repose sur deux innovations: un procédé dit pyrométallurgique de recyclage des déchets des réacteurs en combustible, et des réacteurs à neutrons rapides capables de consommer ce combustible. Avec cette approche, seuls des déchets d'une durée de vie moyenne, c'est-à-dire dont la radioactivité chuterait à un niveau inoffensif en quelques centaines d'années, seraient produits. Cela résoudrait *de facto* le problème du stockage à long terme – des dizaines de milliers d'années – des déchets nucléaires.

Rappelons le principe de la fission nucléaire. Tous les réacteurs produisent de l'énergie en cassant des noyaux d'atomes lourds, principalement de l'uranium et des éléments dérivés de l'uranium. Dans la nature, l'uranium est un mélange de deux isotopes, l'uranium 235, dit fissile, car il se fissionne facilement, et l'uranium 238, bien plus abondant et beaucoup plus stable.

La combustion de l'uranium dans un réacteur nucléaire est à la fois déclenchée et entretenue par les neutrons. Quand le noyau d'un atome fissile est heurté par un neutron, il a de fortes chances de se scinder (c'est la fission), ce qui libère de l'énergie et plusieurs autres neutrons. Certains d'entre eux frappent d'autres atomes fissiles voisins, entraînant leur fission, et propageant ainsi une réaction nucléaire en chaîne. La chaleur résultante est acheminée

contre déchets nucléaires

sent l'eau ordinaire à la fois pour ralentir les neutrons et pour acheminer la chaleur libérée par la fission vers le générateur électrique associé. Les réacteurs à neutrons thermiques ont un bon rendement, mais ils gaspillent beaucoup de combustible et produisent des déchets inutiles.

Voyons pourquoi. L'uranium 238 n'est pas fissile, mais il peut se scinder lorsqu'il est percuté par un neutron rapide (énergétique); on dit qu'il est fissionnable. Il est également dit fertile car, quand un noyau d'uranium 238 absorbe un neutron sans se désintégrer, il se transforme en plutonium 239 qui, comme l'uranium 235, est fissile et peut entretenir une réaction en chaîne. De fait, après trois ans de service, lorsque l'uranium 235 a été presque totalement consommé et que le combustible usé est retiré des réacteurs, le plutonium contribue pour plus de moitié à la puissance dégagée par le réacteur.

Lors du retrait du combustible, seuls cinq pour cent environ des atomes fissionnables (uranium 235, plutonium et uranium 238) ont ainsi été utilisés, et le combustible dit usé renferme encore près de 95 pour cent de son énergie originelle. Par ailleurs, seulement un dixième du minerai d'uranium extrait est converti en combustible lors du processus d'enrichissement – on augmente la concentration en uranium 235 –, de sorte que moins du centième du contenu énergétique du minerai sert à produire de l'électricité dans les réacteurs actuels.

Le combustible usagé des réacteurs à neutrons thermiques contient encore potentiellement de quoi alimenter des réactions nucléaires. Dans un scénario énergétique qui verrait ces réacteurs se multiplier, les réserves d'uranium à faible coût d'extraction s'épuiseraient en quelques décennies. Il semble donc aberrant de mettre purement et simplement au rebut le combustible usé ou les résidus du processus d'enrichissement.

Le combustible usagé comprend trois types de matériaux. Les produits de fission, un mélange d'éléments plus légers créés lorsque les atomes lourds se cassent, sont les véritables déchets de la réaction de fission. Ils représentent environ cinq pour cent du combustible usagé. Ces déchets sont fortement radioactifs pendant les premières années. Après une décennie environ, leur radioactivité est principalement le fait du césium 137 et du strontium 90. Tous deux étant solubles dans l'eau, les déchets doivent être confinés avec sûreté. En environ trois siècles, la radioactivité de ces isotopes décline d'un facteur 1 000; ils ne présentent alors pratiquement plus aucun danger.

L'essentiel du combustible nucléaire usagé (environ 94 pour cent) est constitué d'uranium non fissionné, dont la majeure partie de l'uranium 235 a disparu. Ce composant

Jana Brenning

hors du réacteur par un circuit de fluides caloporteurs pour, *in fine*, transformer de l'eau en vapeur et faire tourner des turbines, produisant ainsi de l'électricité.

Pour que les neutrons provoquent des fissions nucléaires avec efficacité, ils doivent être soit lents, soit très rapides. La plupart des centrales nucléaires actuelles sont des réacteurs dits à neutrons thermiques, activés par des neutrons lents (de basse énergie) qui font de nombreux ricochets dans le cœur. Les neutrons, rapides au moment de leur libération, sont ralentis par l'interaction avec les atomes légers environnants, à savoir l'hydrogène de l'eau qui circule dans le cœur du réacteur. À deux exceptions près, les quelque 440 réacteurs nucléaires commerciaux en fonctionnement sont à neutrons thermiques et la plupart d'entre eux utili-

Un nouveau type de réacteur nucléaire

Un cycle du combustible nucléaire plus sûr et plus durable : cette perspective prometteuse repose sur le concept de réacteur à métal liquide avancé (ALMR) développé depuis les années 1980. Comme toutes les centrales nucléaires, un système ALMR tire parti des réactions de fission en chaîne pour produire de la chaleur, qui est convertie en électricité.

Dans les « réacteurs à neutrons thermiques » des centrales nucléaires actuelles, des

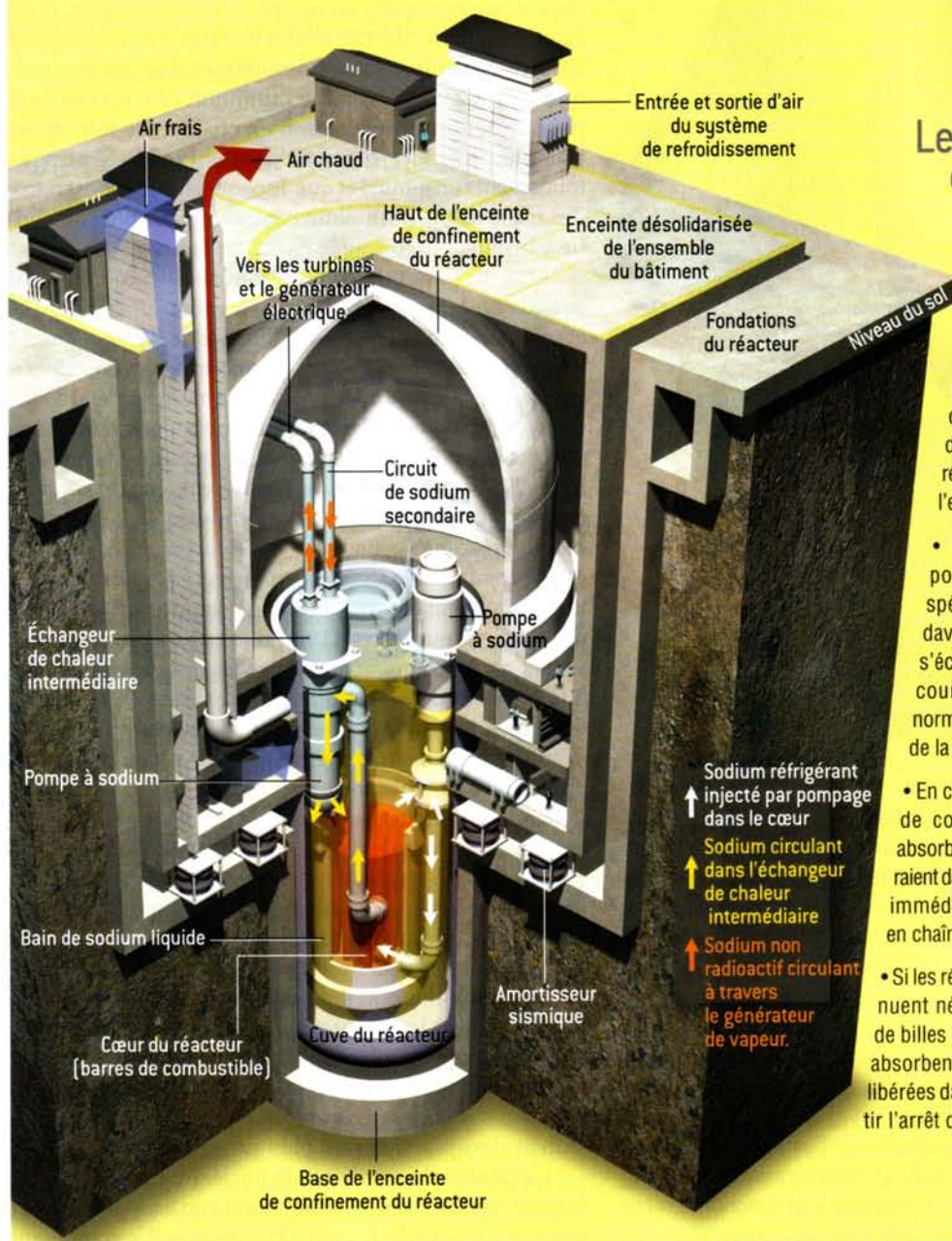
neutrons relativement lents propagent les réactions en chaîne dans le combustible, constitué d'uranium et de plutonium. À l'inverse, dans un système ALMR, on utilise des neutrons rapides – donc énergétiques – qui peuvent scinder l'uranium et les noyaux lourds transuraniens, pourtant très stables. Ce réacteur consommerait du combustible métallique obtenu en recyclant le combustible usagé des réacteurs à neutrons thermiques. Une fraction bien plus impor-

tante de l'énergie du combustible initial serait ainsi exploitée.

Dans la plupart des réacteurs actuels, de l'eau baigne le cœur pour le refroidir et ralentir les neutrons. Dans un système ALMR, c'est du sodium liquide qui circule. Ce fluide ralentit peu les neutrons et conduit très bien la chaleur, ce qui améliore le transfert d'énergie vers l'unité de production d'électricité.

Dans un tel réacteur à neutrons rapides, la combustion

nucléaire dans le cœur chauffe le sodium réfrigérant qui y circule. Le fluide chauffé s'écoule dans un échangeur de chaleur où il transfère son énergie thermique à du sodium liquide circulant dans un circuit intermédiaire. Le sodium intermédiaire échange à son tour la chaleur avec de l'eau appartenant à un circuit distinct (*non représenté*). De la vapeur est ainsi créée ; elle est ensuite transportée jusqu'à des turbines, grâce auxquelles de l'électricité est produite.



Les sécurités du réacteur

- Des pompes injectent le sodium réfrigérant dans le cœur. En cas de défaillance de leur part, le réfrigérant circulerait sous l'effet de la gravité.

- En cas d'arrêt des pompes, des dispositifs spéciaux permettraient à davantage de neutrons de s'échapper du cœur qu'au cours du fonctionnement normal, d'où un abaissement de la température.

- En cas d'urgence, six barres de contrôle d'un matériau absorbant de neutrons tomberaient dans le cœur et arrêteraient immédiatement les réactions en chaîne.

- Si les réactions en chaîne continuent néanmoins, des milliers de billes de carbure de bore, qui absorbent les neutrons, seraient libérées dans le cœur pour garantir l'arrêt du réacteur.

Sodium réfrigérant injecté par pompage dans le cœur
 Sodium circulant dans l'échangeur de chaleur intermédiaire
 Sodium non radioactif circulant à travers le générateur de vapeur.

ressemble à de l'uranium naturel, qui contient 0,71 pour cent d'uranium 235. Il n'est que moyennement radioactif et, séparé des autres composants du combustible usagé, il pourrait facilement être stocké dans des installations protégées en attendant un usage ultérieur (en France, 70 pour cent de l'uranium récupéré dans le combustible usagé est ainsi stocké dans l'attente d'une utilisation future).

Enfin, les autres déchets, les plus problématiques, sont des composants transuraniens, c'est-à-dire des éléments plus lourds que l'uranium. Il s'agit principalement d'un mélange de différents isotopes de plutonium, avec une part importante d'américium. Bien que les éléments transuraniens ne représentent qu'un pour cent du combustible usagé, ils sont la principale source de radioactivité des déchets. La demi-vie de ces atomes (la durée au bout de laquelle la moitié d'entre eux se sont désintégrés) atteint des dizaines de milliers d'années.

Consommer le plutonium

Que faire de ce plutonium et des autres éléments radioactifs à longue durée de vie ? Plusieurs solutions sont à l'étude. On peut les stocker en lieu sûr, mais comment garantir la pérennité d'un site de stockage durant plusieurs millénaires ? Les politiques de gestion hésitent entre l'enfouissement définitif et l'enfouissement réversible de ces déchets. En France, les déchets ultimes sont vitrifiés, et les autorités évaluent la possibilité de les stocker dans des couches géologiques profondes au laboratoire de Bure, tandis que les États-Unis ont prévu d'enterrer leurs déchets sur le site du mont Yucca, dans le Nevada.

Les premiers concepteurs de l'énergie nucléaire avaient une autre solution en tête. Ils pensaient que le plutonium présent dans le combustible usagé des réacteurs à neutrons thermiques pourrait être retraité, puis utilisé dans des réacteurs à neutrons rapides conçus pour produire plus de plutonium qu'ils n'en consomment, nommés surgénérateurs. Ils envisageaient aussi qu'un marché ouvert du plutonium verrait le jour. Cependant, le plutonium est le composant principal des bombes atomiques. À mesure que la technologie nucléaire se disséminait, hors du contrôle des superpuissances, la menace d'une prolifération non contrôlée d'armes nucléaires a émergé.

Le traité de non-prolifération nucléaire, signé en 1968, a en partie répondu à cette inquiétude. En échange d'une aide des puissances nucléaires pour développer des applications nucléaires civiles, les États signataires s'engagent à ne pas acquérir ou fabriquer d'armes atomiques. Bien que des inspecteurs internationaux vérifient le respect de ce traité international, son efficacité est limitée en l'absence de moyens de pression sur les États, comme en témoigne l'actuelle crise iranienne.

Une des façons de fabriquer une arme nucléaire est d'utiliser du plutonium chimiquement pur contenant une concentration très élevée de l'isotope 239 (l'autre voie est d'enrichir à l'extrême l'uranium). Le plutonium issu des centrales nucléaires civiles contient des quantités importantes d'autres isotopes et la purification est très coûteuse, ce qui rend difficile son utilisation dans une arme. L'utilisation de déchets de réacteurs électronucléaires dans des armes reste cepen-

dant envisageable. C'est pourquoi le président américain Jimmy Carter a interdit le retraitement du combustible nucléaire aux États-Unis en 1977 : si le plutonium n'est pas extrait du combustible usé, il ne peut être utilisé pour fabriquer des bombes. Les autres puissances nucléaires, notamment la France, n'ont cependant pas suivi cette politique, et le retraitement des déchets en vue de l'utilisation dans des centrales s'y poursuit.

À l'époque de l'interdiction aux États-Unis, le retraitement était synonyme de méthode PUREX (pour *plutonium uranium extraction*, ou extraction de plutonium et d'uranium), une technique répondant aux besoins en plutonium pur pour les armes atomiques. Cependant, les réacteurs à neutrons rapides offrent une stratégie alternative de recyclage, qui ne fait intervenir de plutonium pur à aucun stade. Ces réacteurs minimisent ainsi le risque de voir le combustible usagé utilisé pour la production d'armes, tout en exploitant au maximum l'énergie du combustible nucléaire (voir l'encadré page 38). Plusieurs réacteurs de ce type ont été construits et utilisés pour la production d'électricité, et deux d'entre eux sont toujours en service. En France, le surgénérateur *Superphénix*, sur le site de Creys-Malville, a été arrêté en 1998 pour des raisons économiques et politiques.

Les réacteurs à neutrons rapides ont un meilleur rendement que les réacteurs classiques, les neutrons très énergétiques étant plus efficaces que les neutrons lents pour déclencher des réactions de fission. La plupart des neutrons lents sont en effet absorbés dans des réactions autres que les réactions de fission et sont perdus. En outre, la haute énergie d'un neutron rapide augmente très fortement la probabilité qu'un noyau lourd fertile (par exemple d'uranium 238) se fissionne suite à la collision. Ainsi, sont susceptibles de se fissionner dans un réacteur à neutrons rapides non seulement l'uranium 235 et le plutonium 239, mais aussi une fraction appréciable des éléments transuraniens plus lourds.

L'eau ralentit les neutrons et ne peut donc pas être utilisée dans un réacteur à neutrons rapides. Les ingénieurs confient le transport de la chaleur et le refroidissement du cœur à un métal liquide, tel du sodium fondu. Le métal liquide présente plusieurs avantages par rapport à l'eau. Les systèmes réfrigérés à l'eau fonctionnent sous haute pression, si bien qu'une fuite peut avoir de graves conséquences en termes de ruptures de canalisations et de perte rapide de fluide de refroidissement. Les systèmes à métal liquide, en revanche, fonctionnent à pression atmosphérique, si bien que les risques de fuite grave sont nettement plus faibles et la manipulation moins dangereuse. Par ailleurs, le métal liquide est un bien meilleur caloporteur que l'eau et, en cas de surchauffe du réacteur, il modérerait l'élévation de température en évacuant efficacement l'excès de chaleur. Le métal liquide présente cependant de grands risques. Le sodium s'enflamme au contact de l'eau et donne lieu à de redoutables incendies. Un feu de sodium s'est par exemple déclaré en 1995 dans le surgénérateur de Monju au Japon, ce qui a causé de gros dégâts sur les bâtiments bien qu'il n'ait pas menacé l'intégrité du réacteur lui-même, ni blessé personne. De fait, l'inflammabilité du sodium n'est pas considérée comme un problème insurmontable, mais

la technologie des réacteurs à neutrons rapides refroidis par métal liquide restera toujours complexe et délicate.

Les chercheurs du Laboratoire national d'Argonne, aux États-Unis, ont commencé à développer les réacteurs rapides dans les années 1950. Dans les années 1980, cette recherche s'est orientée vers la technologie ALMR (*advanced liquid-metal reactor*, ou réacteur à métal liquide de type avancé), où du combustible sous forme métallique (par opposition aux oxydes d'uranium ou de plutonium utilisés dans les réacteurs à neutrons thermiques) est réfrigéré par du métal liquide, le réacteur étant couplé à une unité de recyclage et de réapprovisionnement du combustible, par traitement pyrométallurgique à haute température. Les ingénieurs ont exploré plusieurs autres concepts de réacteurs rapides, fondés sur des combustibles d'uranium ou de plutonium métalliques ou d'oxydes métalliques d'uranium ainsi que sur divers réfrigérants (gaz, plomb ou alliage plomb-bismuth liquides). L'approche ALMR retient aujourd'hui l'attention, car son combustible métallique permet de la coupler facilement avec le recyclage pyrométallurgique.

Le procédé pyrométallurgique consiste à extraire du combustible usagé un mélange d'éléments transuraniens et non pas simplement du plutonium pur comme dans le procédé PUREX. Il est fondé sur la galvanoplastie, c'est-à-dire la récupération sur une électrode métallique des élé-

ments dissous sous forme d'ions dans un bain chimique. Deux approches similaires ont été développées aux États-Unis et en Russie, la différence étant que les Russes traitent du combustible céramique, tandis que le combustible d'un ALMR est métallique.

Un recyclage pyrométallurgique

Dans le procédé pyrométallurgique ALMR (voir l'encadré ci-dessous), le combustible métallique usé est dissous dans un bain chimique non aqueux. Un courant électrique intense permet alors de recueillir de façon sélective le plutonium et les autres éléments transuraniens sur une électrode, tandis que l'essentiel des produits de fission et une partie de l'uranium restent dans le bain. Les matériaux déposés sont ensuite grattés, fondus, coulés en lingots, et enfin transformés en combustible pour réacteurs à neutrons rapides. Lorsque le bain est saturé en produits de fission, le solvant est nettoyé et les produits de fission extraits pour être définitivement éliminés.

Ainsi, le pyrotreatment recueille pratiquement tous les éléments transuraniens, y compris le plutonium. Seule une infime fraction des composants transuraniens finit au rebut, ce qui réduit considérablement la durée d'isolement nécessaire des déchets. Par ailleurs, la présence de produits de fission et d'éléments transuraniens dans le combustible retraité empêche d'utiliser ce dernier pour

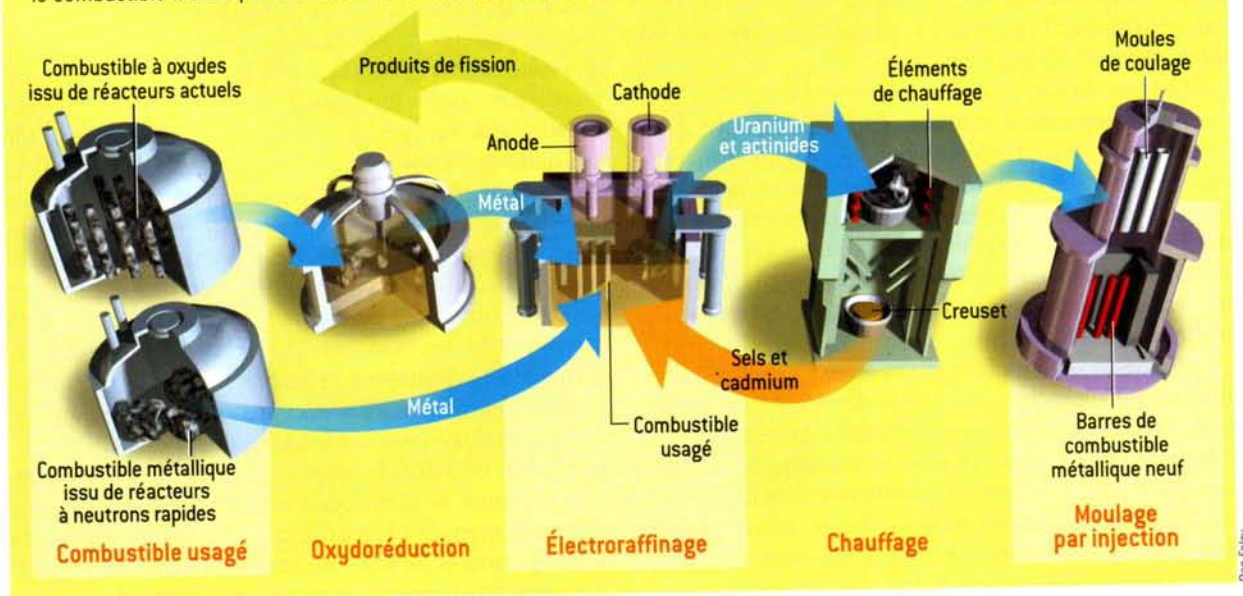
Une autre voie pour recycler le combustible nucléaire

Le recyclage pyrométallurgique permet de récupérer l'essentiel du combustible usagé des réacteurs à neutrons thermiques pour produire du combustible utilisable dans les réacteurs à neutrons rapides.

L'étape clé est le processus d'électroraffinage qui sépare les véritables déchets, à savoir les produits de fission, de l'uranium, du plutonium et des autres actinides (éléments lourds très radioactifs à longue vie) contenus dans le combustible usagé. Après une oxydoréduction pour convertir en métal l'oxyde d'uranium, utilisé par les réacteurs à neutrons thermiques actuels, ou directement pour le combustible métallique des réacteurs à neutrons rapides, le

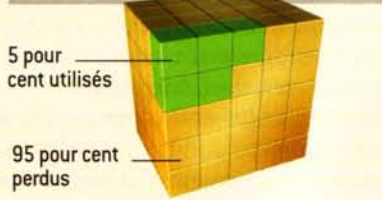
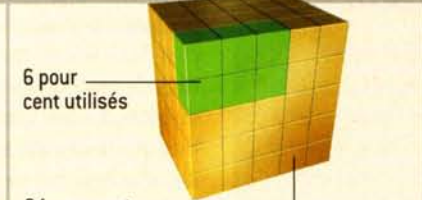
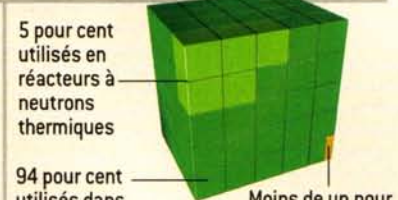
combustible usagé est dissous sous forme d'ions dans un bain chimique et les composants sont séparés par l'application d'un courant électrique intense et recueillis à la cathode. Les actinides sont volontairement englobés dans le mélange récupéré afin d'éviter que le plutonium ne soit détourné à des fins militaires.

Après l'électroraffinage, l'uranium et les autres actinides sont envoyés vers une unité de chauffage pour éliminer les sels résiduels et le cadmium ajouté au cours du raffinage. L'uranium et les actinides restants sont ensuite coulés en barres métalliques de combustible frais, et les sels et le cadmium sont recyclés dans l'électroraffineur.



Trois cycles possibles du combustible nucléaire

Il existe trois filières principales de consommation et de retraitement du combustible nucléaire. Ces cycles du combustible diffèrent par le type de réacteur et les méthodes de traitement utilisés. Leurs principales caractéristiques sont résumées ci-dessous pour chaque filière.

Circuit à un seul passage Après sa combustion dans les réacteurs à neutrons thermiques, le combustible n'est pas retraité. Tel est le choix des États-Unis.	Recyclage du plutonium Le plutonium est extrait, par le procédé PUREX, du combustible usé des réacteurs à neutrons thermiques. C'est le cas en France.	Recyclage complet Du combustible recyclé par pyrométallurgie est consommé dans des réacteurs à neutrons rapides. Au stade de prototype.
Utilisation du combustible		
 <p>5 pour cent utilisés</p> <p>95 pour cent perdus</p> <p>Quantité initiale de combustible</p> <p>Environ cinq pour cent de l'énergie du combustible sont utilisés, et moins de un pour cent de l'énergie du minerai d'uranium originel. Ni l'uranium appauvri (extrait lors de l'enrichissement du minerai) ni l'uranium du combustible usé ne sont utilisés.</p>	 <p>6 pour cent utilisés</p> <p>94 pour cent perdus</p> <p>Environ six pour cent de l'énergie du combustible sont utilisés, et moins de un pour cent de l'énergie du minerai. Le plutonium issu du combustible usé est utilisé, mais pas l'uranium ni l'uranium appauvri.</p>	 <p>5 pour cent utilisés en réacteurs à neutrons thermiques</p> <p>94 pour cent utilisés dans des réacteurs à neutrons rapides</p> <p>Moins de un pour cent sont des déchets ultimes</p> <p>Près de 99 pour cent de l'énergie du combustible usagé des réacteurs à neutrons thermiques sont exploités. Quand le combustible usagé est épuisé, de l'uranium appauvri peut être brûlé, de façon à récupérer plus de 99 pour cent de l'énergie du minerai.</p>
Installation et fonctionnement		
<p>Mines d'uranium Usine d'enrichissement pour concentrer l'uranium fissile Usine de fabrication du combustible Centrales nucléaires Stockage temporaire des déchets (en attendant un stockage permanent) Installation de stockage permanent isolant les déchets de façon sûre pendant 10 000 ans Pas de manipulations du plutonium ni de traitement des déchets</p>	<p>Mines d'uranium Usine d'enrichissement Usine de mélange du plutonium Usine de fabrication du combustible hors site Usine de retraitement du plutonium hors site Centrales nucléaires Stockage temporaire des déchets Usines de traitement des déchets hors site Installation de stockage permanent isolant les déchets et garantissant leur sécurité pendant 10 000 ans</p>	<p>Fabrication du combustible sur place Système de pyrotreatment sur place Centrales nucléaires Recyclage rapide du combustible usagé Unité de traitement des déchets sur place Installation de stockage permanent pour isoler les déchets en sécurité pendant 500 ans Exploitation minière inutile avant plusieurs siècles Pas besoin d'enrichir l'uranium</p>
Sort du plutonium		
<p>Quantités croissantes de plutonium dans le combustible usagé Le plutonium militaire en excès n'est éliminé que très lentement, par incorporation dans le combustible neuf</p>	<p>Augmentation des quantités de plutonium dans le combustible usagé et sur le marché Le plutonium militaire en excès est lentement éliminé par incorporation dans le combustible neuf</p>	<p>Les stocks finissent par se réduire aux matériaux présents dans les réacteurs et en cours de recyclage Le plutonium militaire en excès peut être rapidement éliminé ; le plutonium du combustible est trop impur pour être détourné</p>
Types de déchets		
<p>Combustible usé riche en énergie ; confiné dans des conteneurs et dans des installations de stockage souterraines Trop radioactifs pour que le plutonium 239 soit facilement récupéré et détourné, et ce pendant plusieurs centaines d'années</p>	<p>Combustible usagé riche en énergie ; confiné dans des conteneurs et dans des installations de stockage souterraines Trop radioactifs pour une récupération facile du plutonium, pendant plusieurs centaines d'années Déchets vitrifiés stables et riches en énergie</p>	<p>Déchets devant rester intacts pendant 500 ans seulement, avant de perdre leur dangerosité. Non utilisables à des fins militaires, car dépourvus de plutonium</p>

(En rouge : nécessite une sûreté maximale ; en vert : nécessite une sûreté modérée ; en bleu : risque potentiel pour les générations futures)

Dour Foley

fabriquer des armes, ou même dans les réacteurs à neutrons thermiques. En revanche, dans un réacteur à neutrons rapides, l'utilisation d'un tel matériau est non seulement possible, mais avantageuse.

Le recyclage pyrométallurgique du combustible de réacteurs ALMR a été réalisé avec succès à l'échelle expérimentale dans des centrales nucléaires en service, aux États-Unis comme en Russie ; mais il n'a pas encore été testé à grande échelle.

Gestion simplifiée des déchets

La technologie ALMR présente de nombreux avantages. Alors qu'une centrale nucléaire classique d'une puissance de 1 000 mégawatts produit une vingtaine de tonnes de combustible usagé par an, un réacteur à neutrons rapides de même puissance produit dans le même temps à peine plus d'une tonne de produits de fission, auxquels s'ajoutent des traces d'éléments transuraniens.

La gestion des déchets dans le cycle ALMR serait grandement simplifiée. Comme les déchets d'un réacteur à neutrons rapides contiennent peu d'éléments transuraniens à longue durée de vie, leur radioactivité redescendrait au niveau de celle du minerai originel en quelques centaines d'années seulement, au lieu de dizaines de milliers d'années.

Dans un cycle de combustible fondé sur les réacteurs à neutrons rapides, le trafic du plutonium serait *de facto*

éliminé, car il ne se retrouverait jamais isolé des autres composants des déchets. En outre, les transports de matériaux hautement radioactifs seraient réduits à deux étapes : le convoiement des produits de fission vers un site de stockage et l'acheminement du combustible pour la mise en route d'un nouveau réacteur. Hors de ces étapes, rien ne sortirait du cœur.

Certains pays, notamment la France, défendent la généralisation de la séparation du plutonium par le traitement PUREX du combustible usagé des réacteurs à neutrons thermiques, de façon à fabriquer un mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium, ou MOX, destinés à être recyclés dans les réacteurs à neutrons thermiques. Environ un tiers des réacteurs français sont ainsi chargés avec un tiers de MOX. Le MOX est également présenté comme une solution pour dégrader le plutonium militaire excédentaire afin d'empêcher sa réutilisation à des fins militaires. Néanmoins, nous pensons que ce serait une erreur de déployer une telle infrastructure de retraitement pour l'ensemble du nucléaire civil. Le gain en ressources serait modeste, alors que le problème des déchets ne serait pas résolu à long terme et cela ne repousserait que très momentanément le besoin de réacteurs à neutrons rapides.

Le système combinant réacteurs à neutrons rapides et traitement pyrométallurgique est d'utilisation souple. Un réacteur à neutrons rapides peut aussi bien être producteur net que consommateur net de plutonium, ou fonc-

Des obstacles liés au temps et à la prolifération

Bien que les réacteurs nucléaires de quatrième génération soient souvent présentés comme une utopie technologique lointaine, les auteurs de cet article insistent sur la nécessité de mettre en place rapidement une filière nucléaire durable du point de vue des ressources et acceptable en termes de déchets. Cette initiative mérite d'être saluée, car elle tente d'élever l'industrie nucléaire au niveau de l'enjeu énergétique des décennies à venir : réduire massivement le recours aux combustibles fossiles (gaz, pétrole, etc.).

L'article présente la pyrométallurgie comme la condition *sine qua non* pour que la filière des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium permette d'éviter la prolifération des matériaux nucléaires et de réduire la quantité d'éléments radioactifs relégués dans les déchets ultimes. Ce n'est pas si évident. Les recherches menées en France ont démontré qu'il est possible de retraiter, en plus du plutonium et de l'uranium, des actinides mineurs par voie aqueuse. La perte d'actinides ne dépasse pas 0,1 pour cent, ce qui est bien inférieur au taux de perte de la pyrométallurgie.

Il existe un second point problématique : l'apport initial de plutonium nécessaire dans le cadre d'un déploiement à grande échelle des réacteurs à neutrons rapides. De ce point de vue, la pyrométallurgie semble mal placée. En effet, un réacteur de type EFR (*European fast reactor*) – projet industriel dans la lignée de *Superphénix*, fondé sur un refroidissement au sodium liquide, un combustible de type oxyde, et un retraitement de type PUREX – nécessite au démarrage près de 12 tonnes de plutonium par gigawatt de puissance, soit l'équivalent de 50 années de production d'un réacteur actuel de puissance égale. Le concept de réacteur

à métal liquide avancé ne présente pas d'avantage de ce point de vue : la pyrométallurgie permet certes de traiter des combustibles sans attendre leur refroidissement, mais les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium nécessiteront toujours de grandes quantités de plutonium lors du démarrage. Les scénarios étudiés en France montrent que le remplacement de tous les réacteurs à neutrons thermiques par des réacteurs à neutrons rapides, commencé en 2040, ne s'achèverait pas avant 2090. Comment imaginer dès lors qu'un pays moins nucléarisé que la France – c'est-à-dire tous – puisse fonder son développement nucléaire uniquement sur les réacteurs à neutrons rapides ? Il faudrait pour cela disposer d'uranium très enrichi, à hauteur de 20 pour cent, et disséminer des technologies d'enrichissement performantes, ce qui est contradictoire avec la lutte contre la prolifération sur laquelle insistent les auteurs.

La pyrochimie ne peut ainsi à elle seule révolutionner le concept – par ailleurs digne d'intérêt – des réacteurs rapides au sodium liquide. En revanche, elle apparaît comme le seul retraitement envisageable dans la filière des réacteurs à sels fondus s'appuyant sur le cycle régénérateur du thorium, qui exige aussi d'extraire sur site une partie de produits de fission. Si l'on parvient à passer des expériences de laboratoire au stade industriel, la pyrométallurgie permettrait d'utiliser toutes les potentialités de cette filière prometteuse, qui élimine *de facto* le problème de l'apport en plutonium et ouvrirait une nouvelle façon d'aborder le nucléaire du futur.

Sylvain DAVID

Chargé de recherche CNRS
à l'Institut de physique nucléaire d'Orsay

tionner à la limite de ces deux régimes. Utilisé comme producteur net, le système fournirait le combustible nécessaire à la mise en route d'autres réacteurs rapides. En consommateur net, il dégraderait le plutonium et les matériaux militaires excédentaires. En mode d'équilibre, de simples apports réguliers en uranium appauvri (débarassé de l'uranium 235 fissile) seraient nécessaires pour remplacer les atomes de métaux lourds fissionnés.

Cette méthode serait économiquement compétitive avec les technologies nucléaires existantes. Le recyclage pyrométallurgique est, sur le papier, bien moins onéreux que le retraitement PUREX. Mais la viabilité économique du système reste à démontrer.

L'économie globale de n'importe quelle source d'énergie dépend non seulement des coûts directs, mais également des coûts externes, c'est-à-dire des coûts, difficiles à quantifier, associés à l'emploi de la technologie. Lorsqu'on brûle du pétrole pour fabriquer de l'électricité, par exemple, cela revient à accepter les effets néfastes de cette technique sur la santé et sur l'environnement. Même s'ils sont difficiles à intégrer, les coûts externes doivent être pris en compte pour que les comparaisons économiques soient pertinentes.

Un duo pour l'avenir ?

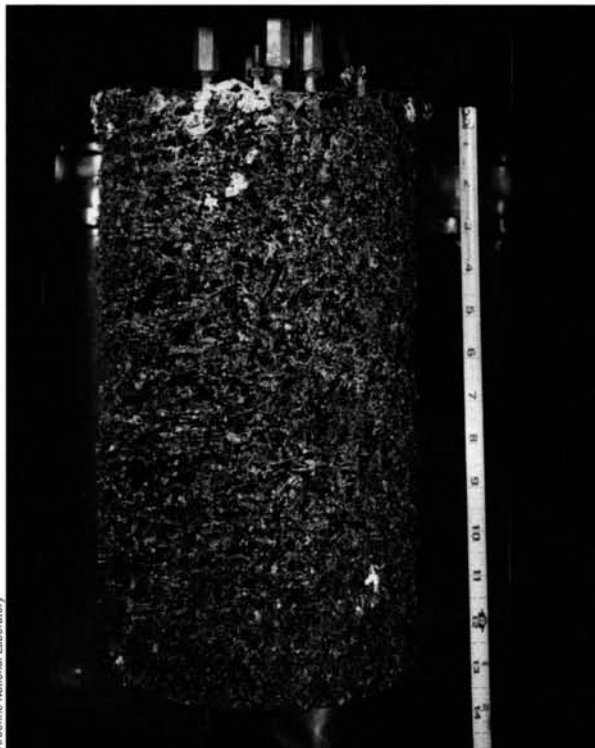
Si des réacteurs à neutrons rapides de type avancé sont mis en service, ils commenceront par consommer le combustible usé des réacteurs thermiques, recyclé par pyrotraitement. Ces déchets, actuellement stockés « de façon temporaire » sur des sites spécifiques, seraient transportés vers des usines de retraitement où ils seraient séparés en trois produits. Les produits de fission, inévitablement mêlés d'un peu d'éléments transuraniens, hautement radioactifs, seraient confinés sous une forme physiquement stable (une substance vitrifiée), puis expédiés vers un site de stockage permanent.

Le second produit, composé de pratiquement tous les éléments transuraniens et d'une partie de l'uranium et des produits de fission, serait converti en combustible métallique destiné aux réacteurs à neutrons rapides dans une chaîne de pyrotraitement distincte, puis transféré vers des réacteurs de type ALMR.

Le troisième produit, représentant environ deux pour cent du combustible usagé des réacteurs à neutrons thermiques, contiendrait l'essentiel de l'uranium, désormais appauvri. Il serait mis de côté pour une utilisation ultérieure dans des réacteurs à neutrons rapides.

Un tel scénario ne peut se réaliser en un jour. Le premier réacteur à neutrons rapides pourrait être opérationnel dans une quinzaine d'années si l'on inaugurerait un tel chantier, au moment prévu par les États-Unis pour commencer l'enfouissement profond des déchets au mont Yucca (en France, l'enfouissement ne commencera pas avant une cinquantaine d'années).

Quand les réacteurs actuels arriveront en fin de vie, ils pourraient être remplacés par des réacteurs à neutrons rapides. Si c'était le cas, il ne serait plus nécessaire d'extraire de minerai d'uranium avant des siècles, ni de l'enrichir. À long terme, le recyclage du combustible des réacteurs rapides serait si efficace que les réserves d'uranium dureraient presque indéfiniment.



Argonne National Laboratory

L'uranium et les actinides extraits du combustible usagé des réacteurs à neutrons thermiques recouvrent la cathode d'une unité d'électroraffinage au cours du processus de pyrorecyclage métallique. Après d'autres traitements, le combustible métallique peut être utilisé dans des réacteurs à neutrons rapides.

L'Inde et la Chine ont récemment annoncé leur intention de déployer des réacteurs à neutrons rapides. Les premiers utiliseraient du combustible oxyde ou carbure, une voie que nous pensons loin d'être optimale et qui a sans doute été retenue parce que la technique de retraitement PUREX est bien opérationnelle, tandis que le pyrotraitement n'a pas encore fait ses preuves.

Il n'est pas trop tard pour que les autres pays développent le couple réacteurs à neutrons rapides et pyrotraitement pour des combustibles métalliques. Car il semble clair que seule l'énergie nucléaire peut subvenir à long terme aux besoins en énergie de l'humanité tout en préservant l'environnement. Il convient donc de ne pas gaspiller les réserves de combustible. Les réacteurs à métal liquide avancés sont une solution crédible dans ce sens.

William HANNUM a été directeur de recherche sur la sécurité des réacteurs au ministère américain de l'Énergie, et directeur adjoint de l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE, à Paris. Gerald MARSH a été consultant auprès du ministère américain de la Défense sur la technologie et la politique nucléaires. George STANFORD a effectué ses recherches en physique nucléaire et en physique des réacteurs.

A DUBBERLY et al., *S-prism fuel cycle study*, in *Proceedings of ICAPP'03*, Cordoue, mai 2003, article 3144.

Énergie nucléaire, des pistes pour le futur, in *Les dossiers des défis du CEA*, avril 2003, <http://www.cea.fr/fr/magazine/somDossier.asp?id=7>

J LAKE, R. BENNET et J. ROTTEK, *Une nouvelle génération de réacteurs nucléaires*, in *Pour la Science*, vol. 293, mars 2002.