

Le réacteur rapide à métal liquide: considérations techniques et économiques

La technologie a fait un grand pas ces dernières années

par Simcha Golan, Jean Leduc et Hiroshi Nakagawa

Après 40 années d'études et d'expérimentation du réacteur rapide à métal liquide (LMFR), le Japon, l'Europe occidentale, l'Union soviétique et les Etats-Unis abordent l'étape suivante. Nous nous proposons de faire le point de la technique actuelle de ce réacteur et de ses possibilités sur le plan économique, et nous exposerons divers points de vue sur la façon dont on peut envisager de l'exploiter.

Etat d'avancement de la technique

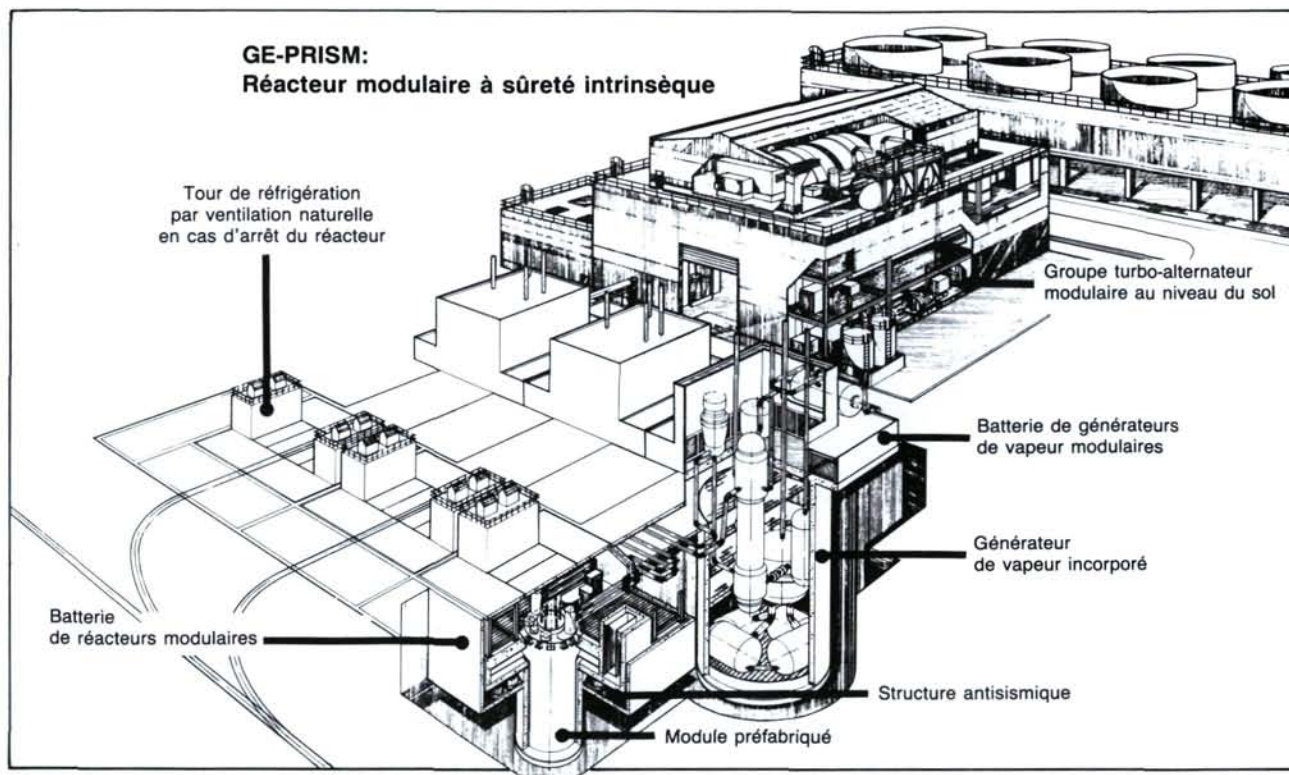
L'expérience acquise avec 200 années de réacteur expérimental et de moyenne puissance montre que le réacteur rapide refroidi au sodium est fiable et tout aussi facile à exploiter que les réacteurs à eau légère (LWR) actuels; la maintenance ne présente pas de problèmes particuliers, implique une radioexposition relativement faible du personnel, et la gestion des déchets est réduite au minimum car les quantités produites sont normalement faibles. Les prototypes tels que Phénix en France, de 250 MWe (15 ans), PFR au Royaume-Uni, de 250 MWe (16 ans), BN-350 en URSS (16 ans) et FFTF aux Etats-Unis, de 400 MWth (10 ans) ont donné des résultats particulièrement intéressants. Ces quatre installations ont récemment fait la preuve de leur grande fiabilité. En particulier, le BN-600 soviétique fonctionne depuis près de 9 ans exclusivement comme réacteur électrogène industriel et le Superphénix français, qui est avec ses 1250 MWe le réacteur à métal liquide le plus puissant du monde, a atteint son plein régime en décembre 1986. Il a dû être mis à l'arrêt en mai 1987, à la suite d'une fuite au niveau d'un barillet extérieur de stockage du combustible; après réparation et modification de certaines procédures d'exploitation, il a été remis en service en janvier 1989.

Des taux de combustion dépassant 100 000 MWd/t ont été obtenus dans plusieurs pays et l'expérimentation semble indiquer que l'on atteindra des valeurs supérieures à 200 000 MWd/t avec des combustibles tant à l'oxyde que métalliques. Les taux de combustion obtenus sur Phénix et PFR sont d'environ 130 000 MWd/t

dans des conditions d'exploitation analogues à celles des LMFR industriels. Le bouclage du cycle du combustible de ces réacteurs a été réalisé en grande partie en France, au Royaume-Uni et aux Etats-Unis. La fabrication des combustibles pour Phénix et Superphénix en France a été une excellente école pour la production des combustibles à mélange d'oxyde. En Europe encore, environ 25 tonnes de combustible oxyde épuisé ont pu être traitées au cours des 15 dernières années et les produits de fission vitrifiés en vue de leur stockage à long terme. Aux Etats-Unis, le Laboratoire national d'Argonne est bien avancé dans l'étude des combustibles trimétalliques (U-Pu-Zr) et de la technologie de retraitement associée. Des taux de combustion de 185 000 MWd/t ont été obtenus lors d'essais avec des assemblages EBR-2. De grands progrès ont été faits dans le pyrotraitement des combustibles métalliques, procédé qui permet de récupérer de précieux constituants du combustible, tels l'uranium et le plutonium, et d'extraire les produits de fission. Le procédé a ceci de particulier que la plupart des actinides restent solidaires du plutonium pendant toute l'opération et se trouvent ainsi extraits du courant de déchets. Des modifications sont actuellement apportées à l'installation EBR-2 pour y faire vers le milieu des années 90 la démonstration à grande échelle de ce cycle du combustible comprenant retraitement et fabrication, et gestion des déchets.

Rappelons que les connaissances actuelles sont essentiellement dues à des travaux sur des réacteurs construits avant le milieu des années 70 à l'aide d'une technologie mise au point dans les années 60 ou même avant. Les grands progrès que l'on a fait ces dernières années en technologie des réacteurs rapides ne trouveront leur application que dans la prochaine génération de centrales. Les nouvelles orientations techniques de la conception de ces futures installations tiennent compte de l'acquis de la recherche et du développement et des leçons tirées plus récemment de l'exploitation des centrales. Le secret a consisté à profiter des propriétés intrinsèques favorables de ce type de réacteur pour améliorer la sûreté et minimiser les prix de revient. Les trois caractéristiques les plus remarquables sont le fonctionnement pratiquement à la pression atmosphérique du système de refroidissement du réacteur, les températures de travail bien inférieures au point d'ébullition du fluide de refroidissement et la forte réduction du coefficient de

M. Golan est directeur de la Division nucléo-électrique du service de recherche et développement de Bechtel. M. Leduc est directeur à la stratégie et aux relations internationales de Novatome et M. Nakagawa est directeur de l'engineering de la Compagnie nucléo-électrique du Japon.



radioactivité en fonction de l'augmentation de la température. Ces qualités, auxquelles s'ajoutent la résistance du sodium aux hautes températures, sa compatibilité avec de nombreux matériaux et sa haute conductibilité thermique et électrique, incitent les concepteurs à se surpasser.

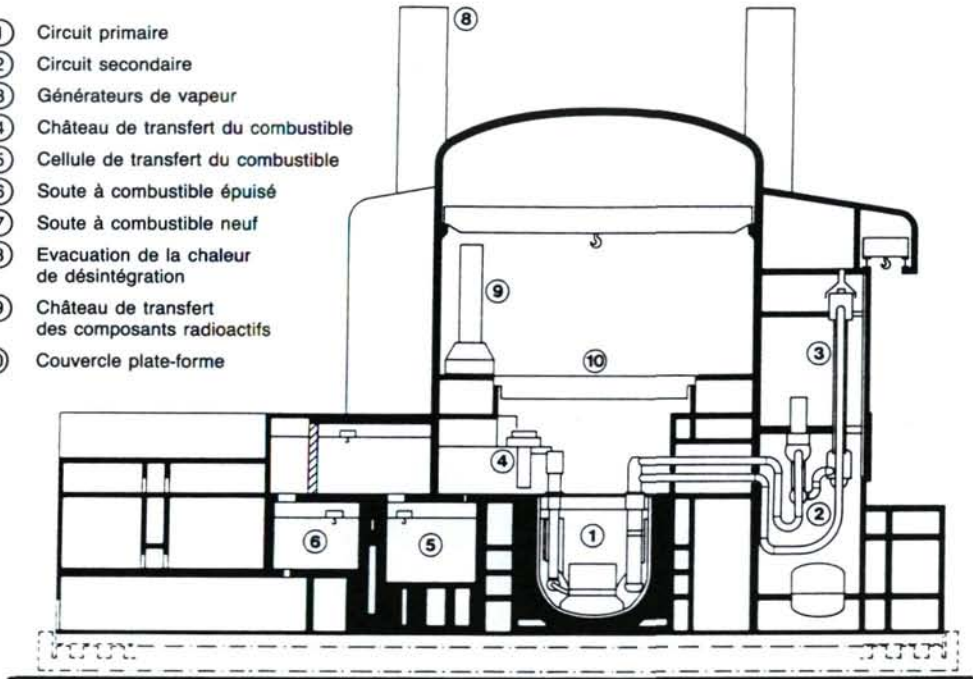
Les Etats-Unis viennent de décider, après avoir tout bien pesé, de concentrer leur effort sur le réacteur modulaire (471 MWth/155 MWe) utilisant un combustible en alliage trimétallique. Cette formule se prête mieux à la préfabrication en atelier, revient meilleur marché grâce à la production en série, permet de simplifier en appliquant les principes de la sûreté passive et facilite les augmentations progressives de puissance. En utilisant un combustible en alliage métallique, il est possible de donner au cœur des configurations peu sensibles aux accidents et d'utiliser les procédés pyrométallurgiques à haut rendement pour le recyclage du combustible, ce qui permettrait dans un premier temps de clore économiquement le cycle du combustible lorsque les premiers LMFR seront mis en service. Par contre, le Japon, l'URSS, l'Inde et les pays européens, plus conservateurs, s'en tiennent à des unités massives de 800 à 1500 MWe alimentées par des combustibles à mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium, considérant que les réacteurs de grande puissance permettent de réaliser d'importantes économies d'échelle tant sur la construction que sur l'exploitation. L'expérience de Superphénix montre effectivement que l'on pourra obtenir de fortes réductions des coûts en construisant dans l'avenir de grandes centrales monolithiques. La technologie des combustibles à mélange d'oxyde est mieux établie et bénéficie de l'expérience acquise avec le retraitement et la fabrication des combustibles pour réacteurs à eau

légère. Plusieurs options se présentent donc actuellement aux futurs constructeurs des réacteurs à métal liquide industriels. Aux variantes près, les différents projets sont fondamentalement identiques, ce qui favorise la collaboration internationale.

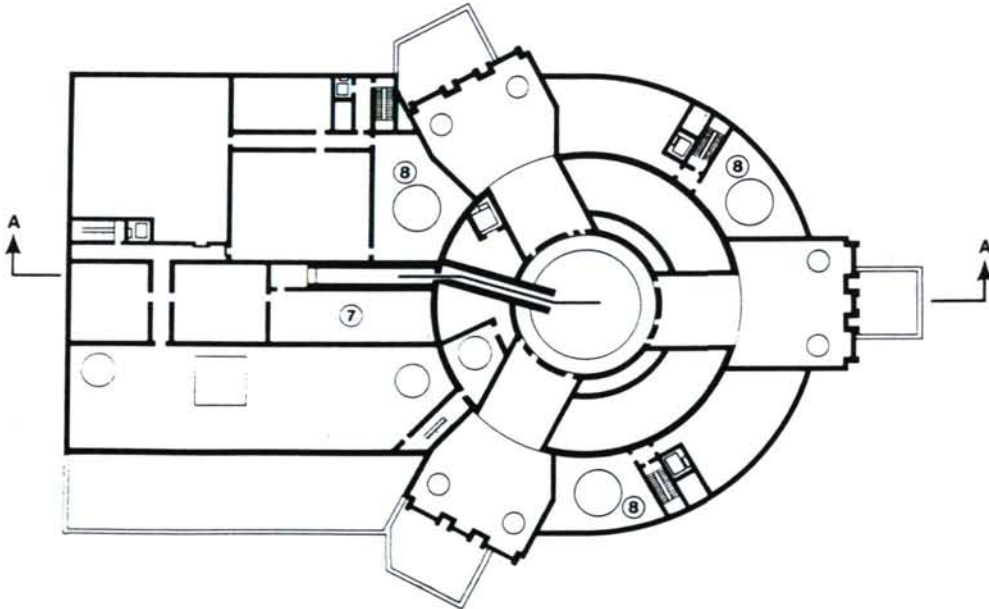
Etats-Unis d'Amérique. Dans ce pays, le gros de l'effort, sous la conduite de General Electric, porte sur l'étude de groupes de moyenne puissance (PRISM) qui peuvent être combinés, selon le principe modulaire, pour former des centrales de grande puissance. Chaque groupe se compose de trois réacteurs modulaires de 471 MWth alimentant un seul turbo-alternateur de 465 MWe (voir la figure). Les caractéristiques les plus originales de cette conception sont les suivantes: réacteurs modulaires compacts fabriqués en usine et transportables; combustibles trimétalliques retraitables par des procédés pyrométallurgiques; arrêt et stabilisation du réacteur assurés par ses réactions spontanées aux variations de température et de réactivité, même dans le cas d'un accident extrêmement improbable; système passif d'évacuation de la chaleur de désintégration; protection anti-sismique très largement calculée; et grande adaptabilité au site; confinement assuré par un caisson protecteur entourant la cuve du réacteur dont les pénétrations sont à joints soudés; pompes électromagnétiques au lieu de pompes mécaniques sur le circuit primaire; élimination des systèmes auxiliaires de refroidissement dépendant d'une alimentation électrique et des groupes électrogènes diesel de sûreté; construction par modules préfabriqués en usine; construction des éléments ayant une fonction de sûreté indépendamment du reste de la centrale; homologation d'un modèle type après l'essai d'un prototype de module en grandeur réelle dans diverses conditions normales et anormales.

Premier projet définitif d'EFR

- ① Circuit primaire
- ② Circuit secondaire
- ③ Générateurs de vapeur
- ④ Château de transfert du combustible
- ⑤ Cellule de transfert du combustible
- ⑥ Soute à combustible épuisé
- ⑦ Soute à combustible neuf
- ⑧ Evacuation de la chaleur de désintégration
- ⑨ Château de transfert des composants radioactifs
- ⑩ Couvercle plate-forme



Section A-A



Europe. L'essentiel des travaux menés en Europe sous la conduite de European Fast Reactor Utilities Group portent sur un projet de 1500 MWe (EFR) dont les caractéristiques de sûreté et l'économie répondent aux exigences du Royaume-Uni, de la France et de la République fédérale d'Allemagne. Ce projet, inspiré de diverses réalisations nationales européennes antérieures, telles que CDFR, SNR-2 et Superphénix-2, auxquelles sont associés Ansaldo, Belgonucléaire, Interatom, NCC et Novatome, permet de réduire sensiblement les coûts

et de concurrencer ainsi, sur le plan économique, les réacteurs à eau légère actuellement en service en Europe (voir les figures), grâce notamment aux caractéristiques suivantes: combustible à mélange d'oxydes à taux de combustion élevé (plus de 150 000 MWd/t); une seule unité intégrée de type piscine de 3600 MWth avec composants de grande capacité pour le transport de la chaleur (trois pompes primaires, six échangeurs de chaleur intermédiaire, et entre trois et six circuits secondaires); confinement primaire compact constitué par la

cuve du réacteur enfermée dans un bâtiment cylindrique en béton armé constituant le confinement secondaire; système simplifié d'évacuation directe de la chaleur de désintégration; six générateurs de vapeur en acier ferritique à tubulure droite et à passage unique; vapeur à haut rendement thermique (490°C/185 bars à l'entrée de la turbine). Un gros effort est fait pour améliorer la sûreté par des moyens passifs.

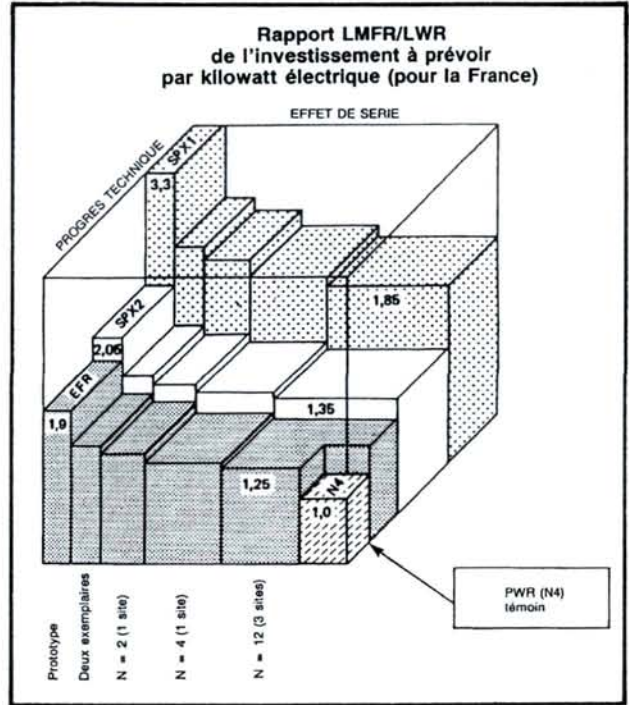
Union soviétique. A partir de l'expérience acquise avec ses quatre réacteurs rapides à métal liquide en service (BR-10, BOR-60, BN-350 et BN-600), l'URSS vient de mettre au point un modèle plus puissant, le BN-800, dont la construction a commencé sur deux sites, Beloyarsk et Oural-Sud. Ils s'agit d'un réacteur globalement amélioré qui utilise néanmoins au maximum les matériels conçus pour le BN-600. Par exemple, la cuve est de même taille que celle de ce dernier, bien que le cœur soit de plus grande dimension, modification rendue possible par une réduction des protections internes de la cuve justifiée par l'expérience d'exploitation du BN-600. Pour améliorer la performance des générateurs de vapeur, la température du sodium secondaire a été légèrement abaissée (505°C au lieu des 520°C du BN-600), de même que la température de la vapeur (490°C au lieu de 505°C). Le BN-800 n'alimente lui aussi qu'un seul turbo-alternateur. L'étape suivante est le BN-1600, considéré en Union soviétique comme le prototype des réacteurs industriels de l'avenir. Ce dernier projet a été examiné en 1988 et il a été décidé d'en poursuivre l'étude en vue d'en améliorer les caractéristiques de sûreté et la rentabilité.

Japon. Se fondant sur la performance satisfaisante du réacteur Joyo (depuis 11 ans) et l'expérience acquise lors de la réalisation du prototype de 280 MWe de Monju dont on prévoit la divergence pour 1992, les compagnies d'électricité japonaises sont sur le point de décider des spécifications à retenir pour le prochain LMFR de démonstration dont la mise en chantier est prévue pour la fin des années 90. Après six ans d'études en vue d'en réduire le coût, ce réacteur se situera vraisemblablement dans la gamme des 800 à 1000 MWe; il utilisera un combustible à l'oxyde et sera équipé d'un générateur de vapeur en acier ferritique à tubulure hélicoïdale et à passage unique. Des décisions restent à prendre sur certains points essentiels; il faut choisir entre le type intégré et la formule à circuit de refroidissement monté en tête, et déterminer le type de structure antisismique à adopter compte tenu de la forte intensité des tremblements de terre que connaît le Japon.

Inde. Le surgénérateur rapide expérimental réalisé en Inde a divergé en octobre 1985. L'expérience acquise avec cette installation servira à la réalisation d'un prototype de surgénérateur rapide intégré de 500 MWe dont la conception théorique est chose faite.

Possibilités économiques de réalisation

Les réacteurs rapides à métal liquide qui fonctionnent actuellement, dont le Superphénix de 1250 MWe, sont fondés pour l'essentiel sur les critères de sûreté des réacteurs à eau légère, avec des marges extrêmement prudentes. De nouvelles données, de nouveaux moyens de calcul et de nouvelles configurations du cœur ont néanmoins permis de mettre au point certains critères de



sûreté propres à cette filière, de condenser sa partie active et de simplifier les systèmes et structures auxiliaires. L'évacuation de la chaleur de désintégration par convection, le montage des systèmes à fonction de sûreté à proximité immédiate du réacteur, la réduction au minimum des fonctions de sûreté nécessitant une alimentation électrique et l'exploitation des propriétés physiques favorables du sodium sont autant de facteurs qui ont permis de simplifier le réacteur et d'en abaisser le prix de revient. Ainsi par exemple, la meilleure connaissance de la thermohydraulique du sodium résultant des mesures de température faites sur Superphénix a permis de condenser la configuration du réacteur européen, ce qui devrait permettre de réduire de 62% le poids d'acier du circuit primaire.

Une considération essentielle est celle du prix que coûtera le *nième* exemplaire d'une série par rapport à celui d'un réacteur à eau légère équivalent (voir la figure qui représente les prévisions actuelles à partir des données de Superphénix et de projets européens plus récents). Le bloc de gauche du graphique indique les perfectionnements attendus du progrès technique. On prévoit des réductions très sensibles du poids d'acier des composants et des volumes de béton par MWe pour le EFR, par rapport au Superphénix, avec les importantes réductions de coût qui en résultent. La fabrication du EFR en série devrait permettre d'opérer de nouvelles réductions de coût comme le montre le programme LWR français. Dans les conditions particulières de la France, le *nième* exemplaire d'une série verrait son prix réduit à un niveau d'environ 25% supérieur à celui d'un LWR avancé comparable. En revanche, vu le taux de combustion élevé dans un EFR, on s'attend que son cycle du combustible soit sensiblement moins cher que celui d'un LWR même alimenté en uranium d'un prix modéré, de sorte que le coût total d'exploitation d'un LMFR de série devrait approcher celui d'un LWR.

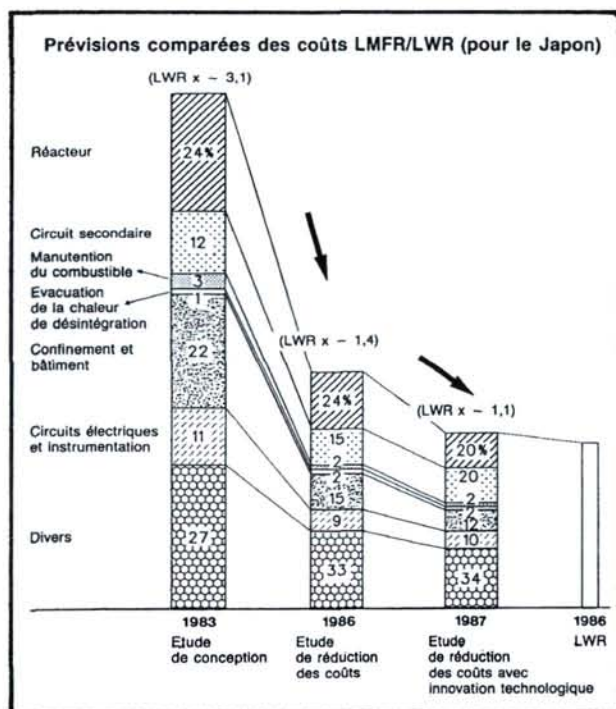


Salle de commande de Superphénix, surgénérateur rapide français. (Photo: CEA)

Des études faites indépendamment aux Etats-Unis et au Japon ont donné des résultats analogues, voire même un peu plus optimistes. Les exploitants japonais ont utilisé une méthode informatique développée de prévision des coûts, mise au point en collaboration avec des fabricants américains bien établis, afin de systématiser la comparaison des coûts des projets de LMFR avancés actuels en les rapportant à ceux des LWR (voir la figure page 34 représentant l'évolution des coûts prévus par les études japonaises récentes). Les comparaisons LMFR/LWR prévoient les rapports de coûts suivants: environ 1,1 pour le réacteur, sensiblement moins de 1,0 pour le cycle du combustible métallique, et environ 1 pour le combustible à l'oxyde même aux prix actuels de l'uranium. Le calcul fait aux Etats-Unis pour les LMFR de 1400 MWe normalisés (trois modules PRISM) indique des rapports d'investissement et de coût global

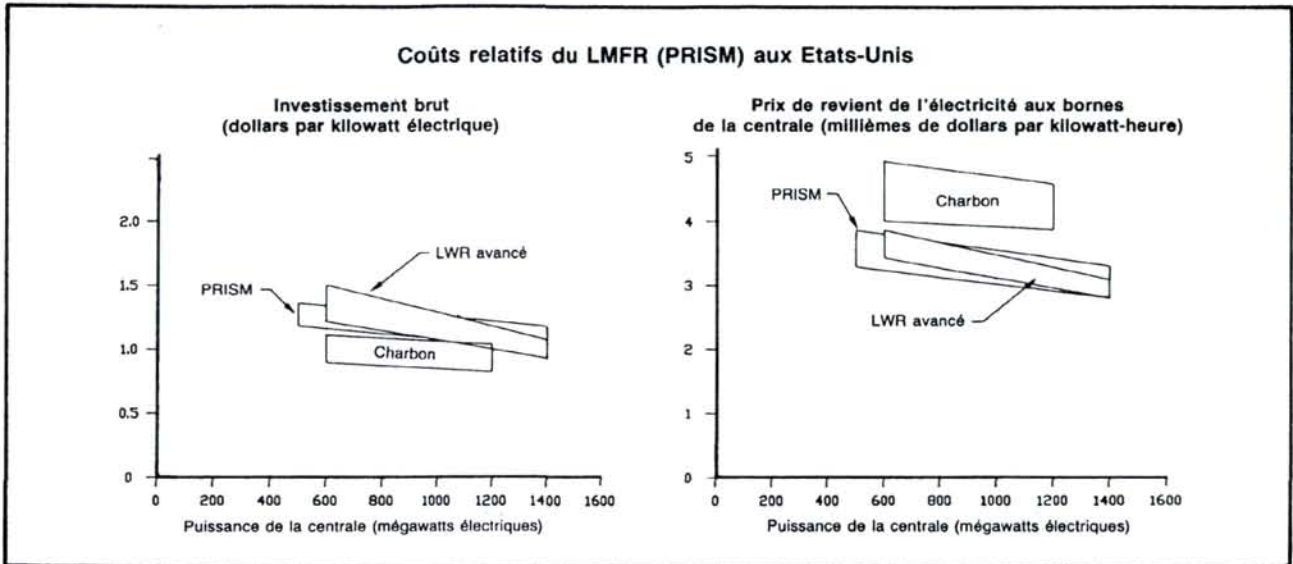
d'exploitation proches de l'unité. Au niveau de prix actuel, on ne note aucune différence significative entre un LMFR et un LWR aux Etats-Unis (voir la figure). Toutefois, toute augmentation du prix de l'uranium dans l'avenir avantagera le LMFR. En résumé, tant les études japonaises que les études américaines prévoient que les centrales LMFR seront économiquement compétitives par rapport aux centrales LWR lorsqu'elles seront fabriquées en plusieurs exemplaires normalisés.

A noter que ces comparaisons entre LMFR et LWR reposent sur l'expérience acquise et sur les conditions prévues dans les pays considérés, sans tenir compte des différences importantes qui existent entre ces pays quant au prix de revient absolu d'un LWR. En France, la compétitivité du LMFR est sans doute plus problématique que dans d'autres pays car le prix du LWR français est avantageux. Ainsi, les 25% de plus que coûte un LMFR en France par rapport à un LWR ne signifient pas nécessairement que l'investissement nécessaire soit supérieur, en termes absolus, aux projections faites aux Etats-Unis et au Japon.



Mise en œuvre industrielle

Au Japon, les spécialistes pensent généralement qu'il faudra une ou deux campagnes de démonstration supplémentaires avant de commercialiser le LMFR en série, ce qui n'aura peut-être pas lieu avant 2030. En Europe, on pense actuellement que cette filière commencera à remplacer les LWR déclassés à partir de 2010, en concurrence avec les LWR avancés qui seront alors disponibles. Cela implique qu'une installation de démonstration économique, tel le EFR, aura été construite au cours de la prochaine décennie, ou à peu près. Aux Etats-Unis, tout comme en Europe ou au Japon, le calendrier de mise en œuvre industrielle des LMFR sera fonction de plusieurs variables: demande d'électricité, ressources disponibles en combustibles nucléaires et fossiles à prix modéré, existence d'autres options nucléaires, et contraintes environnementales résultant de l'utilisation des combustibles fossiles. Il est donc très difficile, sinon impossible, de prédire à quel moment précis les LMFR deviendront absolument nécessaires. Cette importante question peut être considérée sous divers angles.



Un des points de vue retient que des sommes considérables (plus de 30 milliards de dollars de 1988) ont déjà été investis dans l'étude et la démonstration de cette technologie particulière et que son potentiel en tant qu'option énergétique économiquement accessible et applicable vers la fin du siècle offre une garantie contre toute flambée éventuelle de la demande d'énergie dans l'avenir. Comme le passage de cette technologie au stade industriel ne représente qu'un modeste supplément de dépense, il semblerait économiquement rationnel d'achever sa mise au point.

Un deuxième point de vue fait dépendre tout le problème de l'énergie de l'explosion démographique prévisible du monde en développement (la population mondiale augmentera de plus de 1,5 milliard d'individus d'ici à 2025), de la montée irrésistible des aspirations économiques des populations partout dans le monde et de l'inquiétude croissante pour l'environnement que suscitent les pluies acides et l'effet de serre. Pour faciliter la croissance économique des pays en développement sans nuire indûment à l'environnement sur l'ensemble de la planète, les pays industriels devraient réduire leur consommation de combustibles fossiles et d'uranium à bon marché et réserver les ressources ainsi économisées aux centrales classiques et nucléaires d'exploitation facile que les pays en développement peuvent s'offrir. Cela laisse entendre que les pays industriels devraient envisager de recourir plus tôt aux réacteurs rapides à métal liquide, même si ceux-ci devaient coûter un peu plus cher dans un premier temps, afin, encore une fois, d'épargner les ressources d'uranium à bon marché dans l'intérêt des pays en développement.

Un troisième point de vue évoque la symbiose des réacteurs à eau légère et des réacteurs à métal liquide. Dans la plupart des cas, le démarrage des LMFR se fera avec des combustibles au plutonium extrait du combusti-

ble épuisé des LWR. Un réacteur à eau légère produit, pendant sa durée utile, suffisamment de plutonium pour la première charge de combustible d'un LMFR de moyenne puissance. Or, le parc de réacteurs à eau légère que l'on prévoit d'ici à 2010 devrait produire suffisamment de plutonium pour alimenter un parc de LMFR d'une puissance installée totale de 200 gigawatts-électriques. Il n'y a pas de meilleur conservateur et utilisateur du plutonium que la filière à métal liquide. Le recyclage du plutonium pour ces réacteurs rapides présenterait aussi l'avantage de consommer les déchets transuraniens de très longue période qui lui sont associés, en particulier le neptunium 237 et autres actinides mineurs, de sorte que la période d'isolement indispensable des déchets de haute activité serait ramenée de quelques dizaines de millénaires à quelques centaines d'années, pour ne parler que des produits de fission. L'importance de ce rôle complémentaire que pourraient jouer les LMFR suscite un intérêt croissant dans le monde entier en un temps où le public se montre de plus en plus préoccupé par les risques qu'implique l'évacuation des déchets radioactifs de longue période des centrales nucléaires.

Ces diverses perspectives semblent nous enjoindre de maintenir le rythme des travaux sur les LMFR au moins jusqu'à ce que des modèles normalisés industriellement viables aient fait leurs preuves et soient intégralement homologués. Au seuil du prochain millénaire, le déploiement effectif de ces réacteurs devrait obéir aux lois du marché. Le réacteur rapide à métal liquide est le seul moyen techniquement éprouvé qui puisse nous fournir de nouvelles matières fissiles en quantités pratiquement illimitées à partir des abondantes réserves mondiales d'uranium appauvri, d'uranium naturel à faible teneur et de thorium pour alimenter les centrales nucléaires toujours plus nombreuses qu'il faudra mettre en service dans les cent prochaines années et au-delà.

