

## Les réacteurs à neutrons rapides

### Deuxième partie : développements passés et état des lieux

Dominique GRENECHE

Trois pays, dont bien sûr la France, ont été particulièrement actifs dans le développement des « Réacteurs à Neutrons Rapides » (RNR), dont le combustible est le plutonium fissile (d'où la réaction en chaîne) créé par transmutation de l'uranium fertile. Ou en sont-ils et de nouveaux acteurs apparaissent-ils ?

#### 1 – Etats-Unis

Étonnant : on parle beaucoup aujourd'hui de « nouveaux réacteurs » dans les médias et dans les cercles politiques. Or nous avons vu dans l'article précédent que le concept avait été imaginé dès 1944 par Enrico Fermi et que le premier réacteur électrogène mondial, américain, était un réacteur à neutrons rapide (RNR), régénérateur<sup>1</sup>, et qui a démarré en 1951 . Le successeur d'EBR-1, EBR-2, de puissance 20 MWe, qui **a démarré** en 1965 sur le même site, **associait** même au réacteur une installation pilote de traitement pyrochimique des combustibles usés permettant le recyclage des matières fissiles (uranium très enrichi à l'époque et Plutonium).

Voulant diversifier les options technologiques un prototype industriel de RNR baptisé Fermi-1 (encore appelé EFFBR pour « Enrico Fermi Fast Breeder Reactor », d'une puissance de 61 MWe, a été couplé au réseau en août 1966 (opéré par une compagnie d'électricité privée, Detroit Edison). Il ne fonctionna que deux ans au total de manière chaotique et fut arrêté en 1972<sup>2</sup>. Mais il faut garder en mémoire l'importance des connaissances ainsi acquises sur la physique et la technologie sur les RNR grâce à des physiciens et ingénieurs brillants : sûreté de fonctionnement , démonstration d'évacuation passive de la puissance résiduelle et bien sûr chimie du retraitement des combustibles.

Mais avec l'arrivée au pouvoir en 1977 du Président Jimmy Carter, la filière RNR est remise en cause aux USA dans l'objectif de lutter contre la prolifération des armes nucléaires. Une décision présidentielle<sup>3</sup> décrète notamment *“First, we will defer indefinitely the commercial reprocessing and recycling of the Pu produced in the U.S. nuclear power programs ... »* et *« Second, we will restructure the U.S. breeder reactor program to give greater priority to alternative designs of the breeder and to defer the date when breeder reactors would be put into commercial use”*. C'est un coup fatal au principe même des RNR régénérateurs dont le principe même est basé sur le recyclage des matières fissiles (et donc le traitement des combustibles usés) et dont le seul carburant **durable** est justement le Pu (comme on l'a expliqué dans la première partie). Puis le congrès américain, sous l'administration Clinton, mit un terme à cette belle aventure technologique en 1992 pour des raisons essentiellement politiques<sup>4</sup>. Le réacteur expérimental FFTF (Fast Flux Test Facility) de 400 MW thermiques Suivront plusieurs paliers de montée en puissance du réacteur, qui sera couplé au réseau électrique quand il atteindra 25% de sa capacité et pourra entrer en service commercial après avoir atteint 100% de capacité, **fut** ainsi arrêté en décembre 1993 après 13 ans d'exploitation, après d'âpres batailles entre partisans et opposants. Mais les USA élargiront leur recherche à l'ensemble

<sup>1</sup> Rappel : un réacteur est régénérateur lorsqu'il produit autant de combustible nucléaire qu'il en consomme. Il est surrégénérateur s'il en produit plus, ce qui permet d'alimenter de nouveaux réacteurs.

<sup>2</sup> Il s'agissait à nouveau d'un cœur en uranium enrichi sous forme d'alliage métallique, le fluide caloporteur étant toujours le sodium. De nombreux incidents émaillent son histoire : fusion de deux éléments combustibles, fuites dans les générateurs de vapeur,...

<sup>3</sup> Statement by the President on His Decisions Following a Review of U.S. Policy. April 7, 1977.

<sup>4</sup> Il faut bien sûr se rappeler que les mouvements antinucléaires avaient fait florès après l'accident sur la centrale de Three Miles Island.

des réacteurs dits de 4<sup>ème</sup> génération, dont les RNR, dans un cadre multinational, le « **forum international Génération IV** » (sigle anglais, GIF)

Un regain d'intérêt se fait jour pour des RNR de petite puissance, sur impulsion du DOE (department of energy), mais aussi d'initiatives privées, comme le projet Natrium de Terra Power (société créée par Bill Gates), dont la finalité première est de s'intégrer dans un mix électrique à forte proportion d'énergies renouvelables intermittentes en offrant la possibilité de stocker de la chaleur dans des sels fondus. Mais on est très loin de l'objectif de régénération, d'autant plus que le combustible choisi pour ce réacteur est de l'uranium enrichi (à 20 % ») qui, comme on l'a vu, en écarte toute possibilité. De plus, le congrès américain a décidé très récemment de n'allouer aucun fonds en 2023 pour la poursuite du « Versatile Test reactor » (VTR)<sup>5</sup>, jugé non prioritaire, destiné principalement à fournir une source de neutrons rapides afin de soutenir le développement de technologies de réacteurs dit « avancés ».

Le tabou sur l'exploitation du plutonium reste bien ancré dans les esprits des responsables ou des universitaires influents américains, ce qui laisse planer des incertitudes sur un déploiement futur des RNR **régénérateurs** aux Etats-Unis.

## 2 – Russie

Dès 1949 en URSS un rapport secret avance l'idée de régénération et un programme de recherche sur ce sujet est immédiatement lancé. L'équipe du centre d'Obninsk, berceau du nucléaire civil soviétique, fait l'inventaire des fluides caloporteurs (hélium, plomb-bismuth, mercure, NaK et sodium) et sélectionne le sodium. Elle construit une installation rudimentaire, BR-1, un simple assemblage « critique », qui diverge en 1955<sup>6</sup>. Elle confirme la possibilité de régénération.

S'ensuit une série de réalisations dont la plus marquante est le réacteur BR-5 d'une puissance de 5 MWth qui va diverger le 25 juillet 1958, mais qui sera le siège de nombreux incidents (au demeurant très instructifs). En 1973, sa puissance est doublée (BR10) et il fonctionnera jusqu'à 2002, ce qui en a fait une plateforme expérimentale unique dans tous les domaines de la technologie et de la physique des RNR au sodium, y compris dans le domaine du combustible puisque pendant 15 ans on y a utilisé un nitrure d'uranium à haute densité.

L'institut atomique de Dimitrovgrad va ensuite prendre le relais avec la mise en service en 1969 d'un prototype expérimental de 60 MWth appelé BOR-60, auquel sera adjointe une petite installation expérimentale de retraitement du combustible par un procédé pyrochimique. Il va fonctionner 40 ans, et conforter et améliorer la technologie des RNR refroidis au sodium.

La continuité de la politique soviétique est assez remarquable et le stade réellement industriel du développement des RNR en ex-URSS va être franchi avec la mise en service en 1973 du premier RNR de grande taille, baptisé BN-350 (puissance nominale prévue de 350 MWe), construit au Kazakhstan. Il fonctionnera jusqu'en 1999 en produisant simultanément de l'électricité (52 MWe net) et de la chaleur pour le **dessalement de l'eau de mer** (120 000 m3 par jour)<sup>7</sup>. Avant même son démarrage il est décidé de construire un réacteur de 600 MWe, appelé BN-600, qui démarrera en 1980 et est toujours opérationnel malgré quelques incidents, des fuites de sodium en particulier, que les soviétiques apprendront à maîtriser.

<sup>5</sup> réacteur à vocation purement expérimentale, avec un combustible métallique (alliage U-Pu-Zr),

<sup>6</sup> La réaction en chaîne est obtenue sans dégagement de puissance, avec un cœur en oxyde entouré d'une enveloppe d'uranium métallique. Ils introduiront également du carbure d'uranium.

<sup>7</sup> Les chiffres indiqués dans la littérature pour cette répartition entre électricité et dessalement sont assez variables, sans doute par le fait que cette répartition a évolué au cours du temps.

Puis, en 1983, sont lancées des études de conception d'un nouveau réacteur dont la puissance unitaire peut rivaliser avec celle des réacteurs industriels des autres filières alors en construction ou mis en service dans les grands pays du monde occidental. Le BN-800, de 800 MWe, largement modifié en 1987 à la suite de l'accident de Tchernobyl voit sa puissance portée à 880 MWe et son combustible à base d'uranium enrichi est remplacé par du combustible à base de Pu. Ce n'est qu'en décembre 2015 que le BN-800 est couplé au réseau mais il fonctionne depuis de façon satisfaisante pour un prototype, avec un coefficient de disponibilité cumulé de 66 % fin 2021. En parallèle, une installation de fabrication de combustible Mox (mélange Uranium-Pu) a été mise en service dans la région de l'ancien site militaire de Krasnoïarsk. Les Russes ont ainsi réussi à démontrer la viabilité complète d'un RNR régénérateur<sup>8</sup>.

Le Russie est donc un pays fermement engagé dans le développement des RNR régénérateurs à une échelle industrielle, avec une continuité remarquable.

### **3 – France**

Un équipe dédiée aux premières études sur les RNR est mise en place à Saclay dès 1956 et l'étude d'un premier réacteur expérimental est engagée en 1959. Le RNR Rapsodie, est inauguré en novembre 1967 par le général de Gaulle, ce qui montre l'importance que le gouvernement français attache aux RNR, indépendance nationale oblige. Sa puissance, 24 MW thermiques, sera ensuite portée à 40 MWth. Bien que réduite ensuite pour limiter une fuite d'aérosols de sodium, il va fonctionner très régulièrement pendant une quinzaine d'années en apportant un très grand nombre de connaissances sur la technologie sodium et sur le combustible Mox choisi au départ comme combustible de référence<sup>9</sup>.

Un laboratoire baptisé Cyrano, destiné à mettre au point un procédé d'hydrométallurgies de retraitement des combustibles usés Mox, entre en service en 1968 sur le site de Fontenay aux Roses (FAR), où une centaine de kg de Mox seront traités. L'année suivante, un petit prototype industriel de retraitement des Mox entre en service sur le site de La Hague. Cet atelier baptisé AT1 va permettre de retraiter entre 1969 et 1977 près d'une tonne de Mox contenant 754 kg de mélange U + Pu provenant essentiellement de Rapsodie. Cette opération a permis de démontrer la possibilité technique de « fermer » le cycle du combustible des RNR. Le réacteur sera arrêté en 1982.

La deuxième grande étape du programme français va être la construction d'un démonstrateur industriel de taille significative, 250 MWe, le réacteur Phénix, connecté au réseau en décembre 1973, cinq ans seulement après le début des travaux! Il va fonctionner pendant 35 ans (mais aux 2/3 de sa puissance à partir de 2003) avec cependant quelques arrêts prolongés pour des réparations diverses ou pour y faire des modifications imposées par les réévaluations de sûreté. Son arrêt définitif sera prononcé en 2009 par les autorités de sûreté du fait d'incertitudes liées à son vieillissement. Il a laissé en héritage un inventaire considérable de connaissances qui vont être soigneusement documentées et archivées pour les besoins futurs. Parmi ces résultats il faut surtout mentionner le fait que le Pu produit par le réacteur a pu être recyclé dans le réacteur lui-même, grâce à des installations de traitement dédiées, ce qui a permis de **DEMONTRER EXPERIMENTALEMENT** la possibilité de **SURGENERATION** et même d'en fournir une mesure grâce à des bilans de matière qui ont permis d'établir un taux de surgénération de 1,16. C'est jusqu'à présent un **résultat unique au monde** à cette échelle.

Au début des années 1970, alors que s'achève la construction de Phénix, la conception d'un RNR de très grande puissance, un prototype industriel de 1.200 MWe, est engagée et sa construction commence en décembre 1976 sur le site de Creys-Malville près de Lyon. Superphénix (SPX), est le fait d'une collaboration européenne, notamment entre EDF, la société italienne Enel et la société allemande SBK regroupant des électriciens allemands, néerlandais et belge. Il démarre en 1985, mais

<sup>8</sup> Un emplacement est déjà réservé sur le site du BN-880 pour un futur RNR de 1200 MWe.

<sup>9</sup> Le plutonium est initialement acheté aux anglais, puis produit nationalement

l'histoire de SPX va être extrêmement mouvementée à toutes les étapes de son développement car cette réalisation va susciter beaucoup de débats et une opposition farouche des milieux antinucléaires. Les difficultés persistent ensuite au stade de son exploitation qui sera interrompue de très nombreuses fois pour des raisons techniques, mais aussi politiques et sociales se traduisant par de multiples recours juridiques et des batailles administratives qui vont immobiliser le fonctionnement du réacteur pendant une durée cumulée de 54 mois. La décision en 1997 d'arrêter définitivement ce réacteur, au moment même où il commençait à fonctionner de façon régulière, est prise dans le cadre d'accords électoraux. Ce n'est pas le lieu ici de retracer, même de façon succincte ce feuilleton technico-politique et encore moins d'y apporter des commentaires. Notons simplement que cet évènement va évidemment interrompre brutalement le développement industriel des RNR en France alors que le réacteur BN-800 russe, qui est le seul à avoir approché ses performances, n'a démarré que 20 ans après.

Les programmes de R&D sur cette filière ne vont pas néanmoins se réduire de façon significative. Ils seront d'abord focalisés autour des expériences et essais menés sur le réacteur Phénix qui, comme on l'a vu, a fonctionné jusqu'en 2009. De nouveaux programmes vont également être initiés dans le cadre d'une participation très active de la France aux travaux sur les réacteurs de quatrième génération (forum international Gen IV) avec, en particulier, des études de conception de RNR à gaz. Enfin, dans les années 2010, les chercheurs et ingénieurs travaillent à la conception d'un prototype de RNR au sodium, baptisé ASTRID (Advanced sodium Technology Reactor for Industrial Demonstration) intégrant de nouvelles avancées en matière de sûreté et optimisation de la conception et de réduction des coûts. La construction d'ASTRID est décidée le 17 mars 2015 par le gouvernement mais le CEA annonce en 2019 l'abandon du projet en raison de contraintes soi-disant budgétaires, malgré une baisse de la puissance visée, de 600 à 200 MWe. Le CEA précise alors que « le projet de construction d'un réacteur prototype n'est plus prévu à court ou moyen terme » et le repousse « dans la deuxième moitié du siècle », le coût de l'Uranium étant supposé rester raisonnable durant les 3 prochaines décennies.

#### **4 - Japon**

Le Japon a construit de 1986 à 1994 un réacteur rapide de puissance intermédiaire à caloporteur également sodium de 280 MWe, visant à démontrer un coefficient de surgénération de 1,2. Il sera arrêté dès 1995 suite à une fuite sodium et un incendie. Un scandale lié à une accusation de non-transparence de l'information sur l'accident retarde à mai 2010 son redémarrage. Mais un accident mécanique (une chute d'engin de manutention de 3,3 tonnes) l'arrête à nouveau dès le mois d'août 2010.

Une succession d'incidents conduit enfin à la décision d'arrêt définitif fin 2016. Le déchargement de la totalité du combustible du cœur a été terminé en octobre 2022, ce qui va permettre l'engagement de la phase de démantèlement.

Le Japon, suite à l'arrêt de Monju coopérait avec la France dans le cadre du projet ASTRID.

#### **5 – Autres pays et bilan global**

La plupart des autres grands pays industriels se sont impliqués dans le développement des RNR, mais plus tardivement ou de façon moins massive que ceux que nous venons d'évoquer. Nous nous limiterons donc à les citer : il s'agit de la Grande Bretagne, de l'Allemagne et de l'Italie, qui ont tous trois arrêté leurs programmes, mais aussi de l'Inde et, plus récemment, de la Chine avec le démarrage en 2011 de son réacteur expérimental de 20 MWe, le CEFR (construit avec l'aide de la Russie) et le début de construction d'un prototype industriel de 600 MWe en 2017.

**Au total 15 réacteurs expérimentaux et 17 RNR préindustriels électrogènes ont fonctionné jusqu'à présent dans le monde. Parmi eux, cinq RNR sont en service aujourd'hui**, en incluant le PFBR indien de 500 MWe qui doit démarrer cette année. Notons ici que c'est le **sodium liquide** qui a été retenu comme fluide caloporteur pour la quasi-totalité de ces réacteurs. Ce survol montre que le développement de réacteurs très innovants, même quand la physique est bien comprise, est un vrai

défi : il demande une approche pas à pas, des programmes lourds de qualifications des technologies et une conception facilitant les accès pour réparations. Seule la France avait engagé un programme complet, cohérent car associé au développement du cycle du combustible dès le départ. On ne peut que regretter que le sort du programme ait été l'objet de marchandages politiques, inacceptables quand on réalise son intérêt pour les générations futures.