

Plutonium, mon amour ! (2/3)

Par Dominique Grenèche et Michel Gay

Le 12 avril 2024

N° 854 Deuxième partie (2/3)

en 3 parties :

- 1) De quoi s'agit-il ?
- 2) Le secret de la surgénération
- 3) Perspective de développement

Deuxième partie

Le secret de la surgénération

Il s'agit de créer dans un réacteur nucléaire de la matière fissile, le Pu, en quantité supérieure à celle que l'on consomme en fonctionnement.

Autrement dit, il s'agit d'un véhicule dont le moteur fabrique plus de carburant qu'il en consomme en roulant !

Cette prouesse a même été mise en œuvre à une échelle industrielle.

En effet, le nombre moyen de neutrons émis par fission est significativement supérieur pour le Pu239 absorbant des neutrons rapides (2,33) que pour l'U235 absorbant des neutrons lents (2,07).

Or, pour espérer produire plus de Pu que celui consommé, il faut dépasser nettement la valeur 2. En effet, un neutron est absorbé dans un autre noyau fissile (afin d'entretenir une réaction en chaîne), et un autre est absorbé dans le noyau fertile (U238) pour donner naissance à un nouveau noyau fissile (Pu239). Comme une fraction des neutrons issus des fissions est perdue par captures stériles, ou par des fuites à l'extérieur du cœur du réacteur, ce facteur de reproduction doit dépasser nettement la valeur 2, ce qu'offrent les fissions sur le Pu avec des neutrons rapides.

Tel est le secret des RNR surgénérateur.

Nota : D'autres plutonium (appelés isotopes du Pu), le Pu240 et le Pu242, formés dans le réacteur, deviennent également fissiles avec des neutrons rapides.

Le délai au terme duquel un RNR a produit une quantité suffisante de plutonium (239 et autres isotopes) pour pouvoir démarrer un nouveau RNR est appelé le Temps de Doublement Linéaire (TDL).

A titre d'exemple le TDL de Superphénix était de 37 ans.

Un autre « temps de doublement » apparaît pour tenir compte des « immobilisations » sur un parc de RNR : le Temps de Doublement Composé (TDC). Il vaut 0,7 TDL et inclut le rythme auquel le Pu produit peut être recyclé ainsi que les masses de combustibles immobilisées dans l'ensemble des étapes (refroidissement du combustible, traitement, fabrication de nouveaux combustibles, ...).

En résumé, un réacteur surgénérateur permet de fabriquer de noyaux fissiles (Pu239) qu'il n'en consomme pour fonctionner, et cela à partir d'une matière « inerte » (U238).

Ce processus est réalisable avec des réacteurs à neutrons rapides utilisant du Pu comme combustible.

Pour être complet, il l'est également avec un combustible formé d'un mélange de thorium (fertile) et d'U233 (fissile) avec un facteur de reproduction de 2,33 comparable à celui du Pu238, mais implique une opération complémentaire de transformation du thorium en U233.

Toutefois, les performances de régénération d'un cycle au thorium en RNL sont nettement moins bonnes que celles avec du Pu en RNR.

La genèse des idées

Le concept de surgénération (« *Breeding* » en anglais) a [été imaginé](#) pour la première fois en avril 1944 par le génial physicien Enrico Fermi.

Enrico Fermi déclara juste après la fin de la guerre, en 1945 « *The country which first develops a breeder will have a great competitive advantage in atomic energy* ».

La Commission de l'Energie Atomique américaine (AEC) autorise officiellement le 9 novembre 1947 le Laboratoire National d'Argonne (ANL) à concevoir et à construire un premier RNR. La construction de ce premier prototype de RNR (qui fut également le premier réacteur nucléaire « civil ») est décidée en 1949 et il sera implanté sur le nouveau site nucléaire d'Idaho, ouvert cette même année.

Il s'agissait d'un réacteur expérimental de puissance 1,4 mégawatts thermiques (MWth) conçu pour produire de l'électricité. Il fut nommé EBR-1, pour « *Experimental Breeder Reactor n°1* ». Le premier réacteur nucléaire au monde à produire de l'électricité (en faible quantité) était un RNR !

La divergence du réacteur a eu lieu le 24 août 1951. Il ne sera définitivement arrêté qu'en 1964, après avoir engrangé une moisson de résultats utiles sur les plans technologique et de la physique des cœurs de RNR.

EBR-1 symbolise donc à l'époque la naissance d'une nouvelle filière de réacteurs qui ne peut que se développer dans le futur, tant ses possibilités sont riches.

C'est aujourd'hui un musée.

Pas moins de 52 réacteurs nucléaires expérimentaux et prototypes seront construits sur ce site (INL). Il en reste aujourd'hui un seul en exploitation : l'ATR (Advanced Test Reactor).

Etats-Unis

Les Etats-Unis pourtant pionniers du développement des RNR, ont peu contribué à leur développement industriel à cause de difficultés techniques et d'opposants à cette technologie.

Mais la disgrâce des RNR s'est accentuée à l'élection en 1977 du Président Jimmy Carter qui, dès son arrivée au pouvoir bannit le traitement des combustibles usés et la séparation du Pu pour des raisons de lutte contre la prolifération des armes nucléaires.

Dans un relevé de décision présidentiel, [il 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".

Ce bannissement porte un coup fatal au principe même des RNR surgénérateurs 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.

Aujourd'hui, une timide reprise apparaît avec quelques projets de RNR de petite taille, comme le projet Natrium de Terra Power (société créée par Bill Gates), offrant la possibilité de stocker de la chaleur dans des sels fondus.

Toutefois, l'objectif de surgénération est d'autant plus éloigné que le combustible choisi pour ce réacteur est de l'uranium enrichi (à 20 %) qui écarte toute possibilité d'atteindre un tel objectif.

Le RNR expérimental au sodium de 300 MWth « *Versatile Test reactor* » (VTR) qui doit être construit en 2026 sur le site de recherche d'Idaho utilisera en principe un combustible métallique avec du Pu (alliage U-Pu-Zirconium), mais il s'agit d'un réacteur à vocation purement expérimentale destiné principalement à fournir une source de neutrons rapides pour tester et évaluer des combustibles nucléaires, des matériaux, et des capteurs ou de l'instrumentation afin de soutenir le développement de technologies de réacteurs dit « avancés ».

Le tabou du Pu reste ancré dans l'esprit de certains responsables et universitaires influents américains, ce qui laisse planer des incertitudes sur le déploiement futur de RNR surgénérateurs aux Etats-Unis.

Russie

En Russie, une installation rudimentaire, appelée BR-1, diverge en mai 1955. Elle permet de démontrer la possibilité de surgénération et d'introduire quelques combustibles expérimentaux au carbure, technologie dans laquelle les Russes vont exceller.

Puis le réacteur BR-5 d'une puissance de 5 MWth diverge le 25 juillet 1958. Au début des années 1970, la puissance du réacteur est portée à 10 MWth, d'où le nom de cette nouvelle installation BR-10 qui

fonctionnera à partir de 1973. Ce réacteur aura une longue carrière puisqu'il ne fut arrêté définitivement qu'en 2002.

L'institut atomique de Dimitrovgrad va ensuite prendre le relais du développement des RNR de puissance, avec la conception puis la mise en service en décembre 1969 d'un prototype expérimental de 60 MWth appelé BOR-60 auquel sera adjoint une petite installation expérimentale de retraitement du combustible (par un procédé pyrochimique). Le réacteur BOR-60 a ainsi été un outil expérimental de tout premier ordre pour conforter et améliorer la technologie des RNR refroidis au sodium, d'autant qu'il a fonctionné pendant près de 40 ans.

Le stade réellement industriel du développement des RNR en ex-URSS va être franchi au milieu des années 1960 avec la conception du premier RNR de grande taille, baptisé BN-350 (350 mégawatts électriques (MWe)), construit au Kazakhstan. Il sera mis en service en 1973, pour une production mixte d'électricité (52 MWe net) et de chaleur pour le dessalement de l'eau de mer à hauteur d'environ 120.000 m³ par jour. Il fonctionnera jusqu'en 1999.

Il est décidé en 1969 de construire un réacteur d'une puissance de 600 MWe appelé BN-600 qui divergera seulement le 26 février 1980. Ce réacteur est toujours en exploitation aujourd'hui, et il fonctionne de façon satisfaisante après quelques débuts difficiles, notamment du fait des multiples fuites dans les circuits de sodium. Les analyses de ces défaillances montrent que les RNR s'accommodent finalement bien de ces fuites de sodium, pourvu que des dispositions soient prévues pour les détecter, les maîtriser, puis les réparer aussi facilement que possible.

En 1983 sont lancées des études de conception d'un nouveau réacteur de 800 MWe, baptisé BN-800, largement modifié en 1987 à la suite de l'accident de Tchernobyl, et sa puissance est augmentée de 10 %, donc portée à 880 MWe.

Il est décidé par ailleurs de remplacer les combustibles à base d'uranium enrichi utilisés jusqu'à présent par du combustible à base de Pu. Ce n'est qu'en décembre 2015 que le BN-800 est couplé au réseau, et il fonctionne depuis de façon satisfaisante avec un coefficient de disponibilité cumulé de 66 % fin 2021.

En parallèle, une installation de fabrication de combustible Mox (mélange Uranium-Pu) été mise en service dans la région de l'ancien site militaire de Krasnoïarsk. Un emplacement est déjà réservé sur le site pour construire le futur RNR de 1200 MWe en cours de conception.

Le Russie est donc un pays fermement engagé dans le développement des RNR surgénérateurs à une échelle industrielle.

France

Dès le début des années 1950, la France initie quelques études exploratoires sur le sodium puis elle met en place à Saclay en 1956 une petite équipe de physiciens et d'ingénieurs dédiée aux premières études sur les RNR et celles d'un premier réacteur expérimental dont la construction sera lancée en 1962 sur le site de Cadarache : c'est le réacteur Rapsodie qui diverge le 27 janvier 1967 et qui a été inauguré en novembre 1967 par le général de Gaulle, ce qui montre l'importance que le gouvernement français attachait alors aux RNR. Il va fonctionner régulièrement pendant une quinzaine d'années en apportant un grand nombre de connaissances sur la technologie sodium et sur le combustible Mox choisi au départ comme référence (en achetant du Pu aux Anglais).

Par ailleurs, un laboratoire baptisé Cyrano, destiné à mettre au point un procédé de retraitement des combustibles usés Mox, entre en service en 1968 sur le site de Fontenay aux Roses. 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.

La deuxième étape du programme français va être la construction d'un démonstrateur industriel de taille significative d'une puissance électrique de 250 MWe, le réacteur Phénix qui est 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 et perfectionnements nécessités par les réévaluations de sûreté. Son arrêt définitif sera prononcé en 2009 (plus de 10 ans après l'arrêt de SPX) par les autorités de sûreté du fait des incertitudes liées à son vieillissement.

A l'issue de sa longue carrière d'exploitation, le réacteur Phénix a laissé en héritage une quantité considérable de connaissances archivées pour les besoins futurs.

Il faut noter que le Pu produit par ce réacteur a pu être recyclé dans le réacteur lui-même, grâce à des installations de traitement dédiées, ce qui a permis de démontrer expérimentalement la possibilité de surgénération avec un taux de surgénération de 1,16.

C'est jusqu'à présent un résultat unique au monde à cette échelle.

La construction d'un RNR de grande puissance (1 200 MWe) commence en décembre 1976 sur le site de Creys-Malville. Superphénix (SPX), est une collaboration européenne, notamment entre EDF, la société italienne Enel et la société allemande SBK regroupant des électriciens allemands, néerlandais et belge. Son exploitation sera interrompue plusieurs fois pour des raisons techniques, mais aussi pour des raisons politiques et sociales, à cause de multiples recours juridiques des opposants. Ces batailles administratives vont immobiliser le fonctionnement du réacteur pendant une durée cumulée de 54 mois. Finalement des motivations politiques vont conduire à prendre la décision en 1997 d'arrêter définitivement ce réacteur, au moment même où il commençait à fonctionner de façon satisfaisante. Cet évènement va interrompre brutalement le développement industriel des RNR en France.

De nouveaux programmes vont également être initiés dans le cadre de la participation de la France aux travaux sur les réacteurs de quatrième génération (forum international Gen IV ou GIF IV).

Enfin, à partir du milieu des années 2000, la conception d'un prototype de RNR au sodium, baptisé ASTRID (*Advanced sodium Technology Reactor for Industrial Demonstration*) intègre de nouvelles avancées en matière de sûreté et d'optimisation de la conception et des coûts. Malheureusement, l'annonce en 2019 de l'abandon de ce projet par le CEA pour des raisons présentées comme budgétaires et de « [phasage](#) » diffère pour longtemps encore le démarrage d'un programme d'envergure sur les RNR qui avait été avalisée lors de la réunion du Comité de l'énergie atomique du 17 mars 2005.

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.

Il s'agit de la Grande Bretagne, de l'Allemagne, de l'Italie, 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 la construction d'un prototype industriel de 600 MWe qui débuté en 2017.

Au total, 15 réacteurs expérimentaux et 17 RNR industriels électrogènes ont fonctionné jusqu'à présent dans le monde. Parmi eux, cinq RNR sont en service aujourd'hui, en incluant de PFBR indien de 500 MWe qui [devrait démarrer en 2024](#) (après avoir accumulé beaucoup de retards).

C'est le sodium liquide qui a été retenu comme fluide caloporteur pour la quasi-totalité de ces réacteurs.

(Suite dans la troisième partie : **Perspectives de développement**)