



Guy MAURIN

Les Réacteurs à Neutrons Rapides en 2018

Les Réacteurs à Neutrons Rapides seront les acteurs incontournables d'un cycle du combustible durable valorisant pleinement les ressources énergétiques d'uranium de la planète. Les Rapides sont indissociables du recyclage et permettent un traitement amélioré des déchets. Il paraît donc naturel de faire le point pour les collègues de l'ARA sur leur développement à l'échelle mondiale.

1. Les Rapides sont les réacteurs du futur

Les Réacteurs à Neutrons Rapides permettent une meilleure gestion du combustible et des déchets.

Les neutrons émis lors d'une fission sont « rapides ». Comme il est plus aisé d'obtenir des fissions avec des neutrons thermiques ralentis par des chocs sur des atomes légers, modérateurs, la plupart des réacteurs actuels sont modérés ; ils fonctionnent avec des enrichissements faibles, de quelques % en uranium 235 fissile, alors que les Rapides nécessitent un enrichissement plus élevé, de l'ordre de 20% en matière fissile, plutonium ou uranium 235.

Historiquement, dans les tous premiers réacteurs, on a utilisé de l'uranium naturel qui ne contient que 0,7% d'uranium 235 fissile, le reste étant de l'uranium 238. Il fallait de l'eau lourde pour ne pas trop absorber les neutrons. Lorsque l'enrichissement de l'uranium en ^{235}U a été maîtrisé industriellement, on a pu utiliser de l'eau légère comme caloporteur et comme modérateur.

Les Réacteurs à Eau Pressurisée REP sont actuellement les plus répandus ; ils utilisent des combustibles enrichis à 4% ou 5%. Sous bombardement neutronique dans le cœur de ces réacteurs, une partie, environ 1%, de l'uranium 238 se transforme en plutonium. Dans une usine de recyclage comme La Hague, on extrait ce plutonium que l'on recycle sous forme de combustible MOX fabriqué à MELOX.

Par contre les réacteurs à neutrons rapides utilisent le sodium comme caloporteur car le sodium ralentit peu les neutrons qui restent ainsi des neutrons rapides.

Comme toutes ces opérations de recyclage sont maîtrisées, pourquoi les Rapides ?

Sous flux thermique, on forme plusieurs isotopes de plutonium, des isotopes impairs fissiles, ^{239}Pu et ^{241}Pu , mais aussi des isotopes pairs absorbants les neutrons ^{238}Pu , ^{240}Pu ,

^{242}Pu . Le plutonium perd sa capacité à entretenir la réaction en chaîne ; on dit que son vecteur isotopique se dégrade.

Il se forme aussi d'autres éléments de la famille des actinides, neptunium, américium et curium dont certains représentants émettent beaucoup de rayonnements alpha, gamma et neutrons. A cause de la dégradation du plutonium et de ces actinides, on ne peut pas recycler industriellement un MOX utilisé dans un réacteur à eau. Le recyclage s'arrête donc prématurément et l'on utilise très peu l'uranium 238 qui constitue la grande majorité (99,3%) de l'uranium naturel.

Pour le moment, les ressources mondiales d'uranium sont suffisantes et on peut développer l'énergie nucléaire en laissant de côté la ressource énergétique potentielle que constitue l'uranium 238. Mais, il faut veiller à effectuer un développement durable.

Heureusement, il y a les Rapides. Sous flux de neutrons rapides, l'uranium 238 se transforme principalement en plutonium ^{239}Pu fissile ; il est possible de concevoir des cœurs surgénérateurs qui produisent plus de plutonium qu'ils n'en consomment. De plus, comme les neutrons rapides sont plus énergétiques, ils sont capables de provoquer des fissions dans les actinides et de résoudre les problèmes de recyclage qu'ils posent. Les Réacteurs Rapides permettront donc d'utiliser pleinement et durablement les ressources d'uranium de la planète. L'utilisation de l'uranium 238 permet de multiplier par près de 100 la disponibilité en ressources fissiles primaires.

Ainsi, la France dispose, avec ses stocks existants d'uranium appauvri et de retraitement, d'environ 5 000 ans de production électrique au niveau actuel.

Mais alors, pourquoi retarder les solutions écologiques et attendre avant de mettre en place le développement durable ?

Le développement durable a un coût supérieur aux solutions à court terme. L'eau est un caloporteur plus facile à gérer, donc moins coûteux, que le sodium. Le recyclage multiple de combustibles très enrichis à haut taux de combustion sera délicat. Le plutonium étant moins difficile à extraire que l'uranium 235, le transport de combustibles frais au plutonium sera plus sensible que celui des combustibles actuels. Il y a des défis économiques et industriels à relever.

On peut évaluer le défi économique en se référant à l'expérience Française.

D'après la Cour des Comptes, la construction des 58 réacteurs REP actuels de 2^{ème} génération d'EDF a coûté 96 G€₂₀₁₀, ce qui donne 1,7 G€₂₀₁₀/GWe, en incluant les essais, la Maîtrise d'Ouvrage et les frais financiers [1].

Lors de la construction progressive de ce parc de 58 réacteurs, les coûts des nouveaux réacteurs n'ont cessé d'augmenter du fait de réglementations plus contraignantes. Par ailleurs, les têtes de série ont eu des coûts de construction plus importants, tout comme les premières tranches de chaque site, du fait des économies d'échelle réalisées par la mise en commun de certaines installations.

Pour les 34 tranches du palier 900MWe, le coût a augmenté de 1,1 G€₂₀₁₀/GWe à 1,7 G€₂₀₁₀/GWe de 1978 à 1984. Pour les 20 tranches du palier 1300MWe, de 1985 à 1992, le coût est resté stable à 1,7 G€₂₀₁₀/GWe, à l'exception de la tête de série, Paluel 1,2, qui a coûté 30% plus cher.

Le palier N4 (1450MWe) ne comporte que 4 tranches terminées en 2000 pour Chooz 1,2 et en 2002 pour Civaux 1,2. Chooz a coûté 30% plus cher, 2,1 G€₂₀₁₀/GWe, que Civaux 1.6 G€₂₀₁₀/GWe.

Super Phénix (1240 MWe) a été construit en 8 ans et a été mis en exploitation après 2 ans d'essais, en 1986. Sa construction a coûté 26GF1986 [2] soit 6,3 G€₂₀₁₀, ce qui représente donc 5.1 G€₂₀₁₀/GWe.

EDF estime pouvoir mettre en service l'EPR (1600MWe) de Flamanville pour 10,5 G€ [3], soit 6.6 G€₂₀₁₀/GWe. Le budget des 2 EPR d'Hinkley Point, au Royaume Uni, est de 18G€, ce qui donne un coût similaire de 6.6 G€₂₀₁₀/GWe.

Le coût de Super Phénix est donc 3 fois celui des REP de 1980 mais il est inférieur à celui des EPR de Flamanville, Olkiluoto et Hinkley Point.

Par rapport à Phénix (250MWe), Super Phénix constituait une extrapolation d'un facteur 5 sur la puissance. C'était un prototype et, de loin, le Réacteur à Neutrons Rapides le plus puissant au monde. Il a été construit dans le cadre d'une coopération européenne faisant appel à des industriels de plusieurs pays. La construction en série ferait baisser significativement les coûts.

Les EPR en construction constituent une petite extrapolation (+10%) de la puissance du palier N4 dont la technologie REP-PWR bénéficie d'une grande expérience en France qui s'est ajoutée à la licence Américaine. La référence des précédents paliers explique un surcoût de 30% pour la tête de série mais pas un facteur 4. L'avenir nous dira s'il s'agit d'un accident industriel ou d'un durcissement drastique des exigences de sûreté.

En conclusion, il est probable que les Réacteurs Rapides industriels construits en série restent plus coûteux que les réacteurs à eau de la même catégorie mais la différence de coût n'est pas si grande.

Le développement des Rapides a commencé très tôt (1951 EBR I aux USA) et une grande expérience a déjà été accumulée. Le nombre de Réacteurs Rapides en exploitation et en projet dans le monde montre l'intérêt pour une technologie qui finira par s'imposer.

2. Les Rapides dans le monde, en exploitation et en projet

Près de 20 Réacteurs à Neutrons Rapides ont été exploités, certains depuis les années 1950 et certains produisant de l'électricité commercialement. Près de 400 ans-réacteurs d'expérience d'exploitation ont été accumulées à la fin de 2010.

Plusieurs pays ont des programmes de Recherche et Développement pour des Réacteurs à Neutrons Rapides améliorés, et le programme INPRO de l'AIEA associe 22 pays (voir paragraphe suivant) qui considèrent les Rapides comme un objectif majeur, en connexion avec le recyclage.

Un accord entre l'Agence de l'Energie Atomique Japonaise, JAEA, le CEA Français et l'USDOE Américain a été signé en Octobre 2010. Cet accord est une extension de collaborations précédentes visant à développer un concept commun de Réacteurs à Neutrons Rapides de classe mondiale en associant des constructeurs privés.

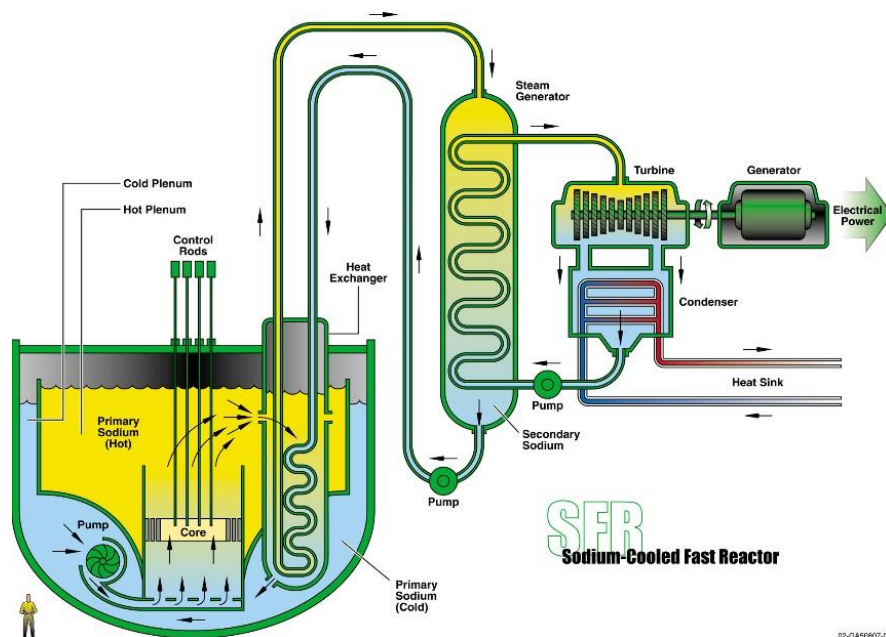
JAEA travaille sur la conception d'un réacteur de démonstration successeur du prototype Monju, la France développe le projet ASTRID (Advanced Sodium Technical Reactor for Industrial Demonstration) avec le Japon.

Les USA n'ont pas de projet de réacteur RNR nouveau et se concentrent sur les systèmes, les matériaux et l'Analyse de Sûreté mais disposent d'une base d'informations et d'expériences extensive résultant des efforts de développement des RNR, en particulier FFTF et EBR-II. GE Hitachi utilise ces connaissances pour son projet PRISM, qui est considéré au Royaume Uni comme une option sérieuse pour consommer le stock de plutonium de qualité militaire de Sellafield en produisant de l'électricité.

On considère qu'à la fois les réacteurs intégrés de type « pool » et les réacteurs à boucle de type « loop » ont du potentiel, bien que la plupart des grands projets soient de type « pool ».

Réacteur « Pool », intégré :

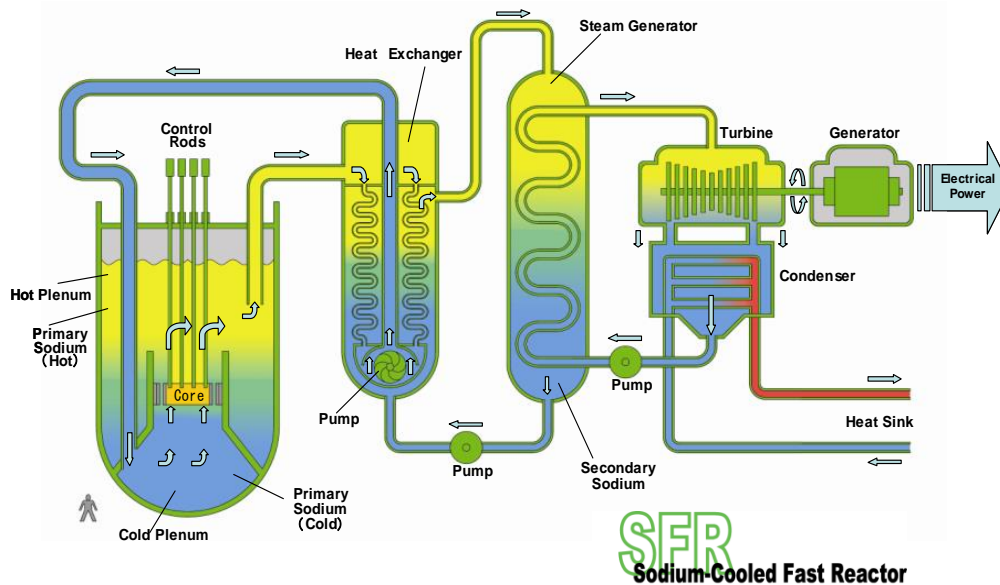
Les 2 dernières générations de RNR Français, Phénix, Super Phénix ainsi qu'ASTRID sont des réacteurs intégrés ou « pool ». Ce concept est représenté sur le schéma ci-dessous [4] :



Le sodium chaud n'est pas envoyé directement dans un Générateur de Vapeur (GV) pour éviter, en cas de fuite de tube GV provoquant une réaction sodium-eau, qu'une bulle d'hydrogène ne parvienne dans le cœur ; on utilise un circuit intermédiaire ou secondaire pour découpler le cœur des GV ; dans un réacteur intégré, les EI, Echangeurs Intermédiaires et les Pompes Primaires sont implantés dans la cuve primaire.

Réacteur « Loop », à boucle :

Dans un réacteur à boucles, « Loop », les Echangeurs Intermédiaires et les Pompes Primaires sont implantés séparément de la cuve primaire, comme sur le schéma ci-dessous [4] :



Les développements portent aussi sur les cycles des combustibles RNR

Les Réacteurs à Neutrons Rapides dans le monde

Dans le cadre de WANO, l'Association Mondiale des Exploitants Nucléaires, le tableau suivant [5] des Réacteurs à Neutrons Rapides en exploitation et en Projet a été établi :

RNR actuels

Réacteur	Type, caloporteur	Puissance MW therm/elec	Combustible (futur)	Pays	Notes
BOR-60	Expérimental, Loop, sodium	55/10	Oxyde	Russie	1969-
BN-600	Démonstration, pool, sodium	1470/600	Oxyde	Russie	1980-
BN-800	Expérimental, pool, sodium	2100/864	Oxyde	Russie	2014-
FBTR	Expérimental, pool, sodium	40/-	Oxyde & Carbure (Métal)	Inde	1985-2030
PFBR	Démonstration, pool, sodium	1250/500	Oxyde (Métal)	Inde	(2015)
CEFR	Expérimental, pool, sodium	65/20	Oxyde	Chine	2010-
Joyo	Expérimental, loop, sodium	140/-	Oxyde	Japon	1978-2007, potentiel redémarrage 2021
Monju	Prototype, loop, sodium	714/280	Oxyde	Japon	1994-96, 2010, arrêt

Projets RNR à court et moyen terme – développements actifs

Reacteur	type, caloporteur	Puissance MW therm/elec	Combustible (futur)	Pays	notes
PRISM	Démonstration, pool, sodium	840/311	Métal	USA	Depuis 2020
ARC-100	Prototype, pool, sodium	260/100	Métal	USA	Collaboration avec GEH
Astrid	Démonstration, pool, sodium	1500/600	Oxyde	France, avec Japon	Vers 2030
Allegro	Expérimental, loop, gaz	50-100 MWth	Oxyde	France	Vers 2025
MYRRHA	Expérimental, Pb-Bi	57/-	Oxyde ?	Belgique, avec Chine	Début 2020s
ALFRED	Prototype, lead	300/120	Oxyde	Roumanie, avec Italie & UE	A partir de 2025
BN-1200	Commercial, pool, sodium	2800/1220	Oxyde, Nitrure	Russie	A partir de mi-2020s
BREST- 300	Démonstration, loop, Pb	700/300	Nitrure	Russie	A partir de 2020
SVBR- 100	Démonstration, pool, Pb-Bi	280/100	Oxyde (Divers)	Russie	A partir de 2019
MBIR	Expérimental, loop, sodium (Pb-Bi, gaz)	100-150 MWt	Oxyde	Russie	A partir de 2020
CDFR- 1000	Démonstration, pool, sodium	/1000	Oxyde	Chine	A partir de 2023
CDFBR- 1200	Commercial, pool, sodium	/1200	Métal	Chine	A partir de 2028
PGSFR	Prototype, pool, sodium	/150	Métal	Corée du Sud	A partir de 2028
JSFR	Démonstration, loop, sodium	/500	Oxyde	Japon	A partir de 2025?
TWR	Prototype, sodium	/600	Métal	Chine, avec USA	A partir de 2023?

3 Développements actuels de réacteurs Rapides en France

La France a développé et construit, depuis 1967, les réacteurs rapides Rapsodie (40MWthermique) à Cadarache, Phénix (250MWélectrique) à Marcoule puis Super Phénix (1200MWe) à Creys Malville. Ces réacteurs ont accumulé 64 ans*réacteurs de bons et loyaux services et ont maintenant achevé leur carrière.

Le CEA poursuit le développement de la technologie Rapide au sodium dans le cadre d'une coopération internationale, le Forum international pour les réacteurs de 4^{ème} Génération [6]. Le CEA participe également au développement d'Allegro, un concept de Rapide à Gaz, dans le cadre d'une coopération européenne.

L'effort principal est le projet ASTRID, Rapide de 600MWe, un réacteur refroidi au sodium qui bénéficie de l'expérience acquise avec les réacteurs précédents. ASTRID est un démonstrateur technologique, pas une tête de série commerciale.

ASTRID et les installations de R&D en soutien pourront :

- Tester et qualifier des options de sûreté innovantes en vue de la filière.
- Qualifier différents combustibles (incinérateurs de plutonium, transmutation, ...).
- Acquérir les données nécessaires à un fonctionnement à 60 ans des futurs

RNR-Na.

- Confirmer les performances de composants innovants d'ASTRID en vue d'optimiser la conception des réacteurs commerciaux au plan technico-économique.
- Constituer une référence pour l'évaluation des coûts de la filière (construction et exploitation).

Parmi les multiples améliorations, on peut citer une amélioration de la sûreté du cœur, de la surveillance en exploitation et de la résistance aux accidents graves ainsi que la réduction des coûts. Les modélisations numériques nouvelles permettent d'optimiser et de fiabiliser la conception. La CAO 3D permet maintenant de créer une maquette complète du réacteur pour mieux gérer l'espace.

Depuis 2010, le CEA est le Maître d'Ouvrage du projet ASTRID, mené en coopération avec le Japon représenté par JSFR. Fin 2015, le CEA a terminé, comme prévu, un dossier d'APS pour un réacteur équipé de Générateurs de Vapeur et un dossier pour un circuit tertiaire à l'azote (180bar).

Actuellement, le CEA travaille sur l'APD (2016-2019) d'ASTRID avec l'objectif de renforcer la collaboration avec le Japon, tout en restant ouvert à d'autres partenaires et de permettre une décision en 2019.

4 Les combustibles rapides

Le combustible utilisé en France est le MOX UO_2 - PuO_2 que nous connaissons bien.

Le combustible métallique U-Zr apporte un meilleur transfert thermique mais est sujet au gonflement, ce qui limite sa durée de vie.

Les nitrures et les carbures présentent aussi des avantages en matière de transfert thermique et un gonflement sous irradiation qui n'a pas encore permis d'atteindre des durées de vie suffisantes.

Des recherches se poursuivent dans plusieurs pays pour améliorer ces différents combustibles.

Le retraitement de petites quantités de MOX Rapide a été effectué industriellement en France à La Hague, notamment au HAO.

Le programme ASTRID inclut des développements des technologies du cycle du combustible pour tenir compte des spécificités des combustibles Rapides : haute teneur fissile, haut taux de combustion, tube hexagonal, fils espaceurs, protection neutronique, actinides.

5 Perspectives futures des Rapides et du recyclage

Les Rapides permettent des économies d'Uranium mais sont plus coûteux que les réacteurs à eau. L'avantage économique des réacteurs à eau va probablement durer quelques décennies.

Une expérience significative a été accumulée mais il reste encore beaucoup à faire pour optimiser la sûreté et le coût de cette technologie. C'est pourquoi le projet de démonstrateur technologique ASTRID est nécessaire pour préparer l'avenir et maintenir nos compétences.

Comme nous avons pu le voir, de nombreux pays considèrent que la technologie des Rapides mérite d'être développée et conduisent des projets dans ce domaine. La coopération avec le Japon sur les Rapides est cohérente avec les autres collaborations que nous avons dans le nucléaire, réacteurs à eau et cycle du combustible. Elle est essentielle.

Références

- [1] Les coûts de la filière électronucléaire Cour des comptes 31 Janv. 2012
- [2] Assemblée Nationale. Rapport d'Enquête sur Super Phénix et les Réacteurs à Neutrons Rapides 1998
- [3] EPR de Flamanville : coût maintenu selon EDF. Le Figaro 15 sept 2017
X.Ursat EDF
- [4] Les réacteurs de 4^{ème} génération et le Forum Génération IV par F.Carré CEA 2006
- [5] WANO Fast Neutron Reactors updated June 2017
- [6] Conférence SFEN 12 octobre 2017 "Le nucléaire et son avenir: les réacteurs de demain" par Nicolas Devictor Chef du programme 4^{ème} Generation CEA