

### Sommaire

#### Les Réacteurs à Neutrons Rapides (RNR) et l'avenir du nucléaire durable

Physique des réacteurs RNR	P1
Technologie des réacteurs RNR	P2
Conditions du déploiement des RNR	P3
Stratégie au niveau mondial	P4
RNR dans le monde en 2020	P6

#### Nos prochaines conférences

[Energies et économie : quand des physiciens se mettent à l'économie -](#)  
mercredi 24 juin 2020

[Organiser la mobilité quotidienne bas Carbone](#) The shift Project  
Jeudi 9 juillet

[En raison de l'épidémie du coronavirus, nos prochaines conférences se font sous forme de « webinaire »](#)

Informations et Inscriptions sur notre site internet  
[www.centrale-energies.fr](http://www.centrale-energies.fr)

Comité de relecture

Christiane DREVET  
Guy MOREAU

## Les Réacteurs à Neutrons Rapides (RNR) et l'avenir du nucléaire durable

*Jacky Rousselle (ECL81)*

Cet article est une synthèse de la journée du 29 janvier 2020 organisée par la Société Française d'Énergie Nucléaire – 'Le rôle des technologies RNR pour un nucléaire durable'.

Après la suspension du projet ASTRID ([cf article Flash n°68 janvier 2020 Centrale Energies](#)), cette journée a apporté des informations sur la physique, les technologies des RNR, sur les conditions de leur déploiement et sur les efforts actuels dans le monde.

Gérard Longuet, Président de l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Techniques (OPECST), est intervenu pour rappeler que la demande mondiale future d'énergie est considérable, que l'utilité économique de la production d'électricité nucléaire est confirmée et qu'il y a le devoir absolu de poursuivre la R&D théorique sur les RNR sans interruption. Il a précisé que l'objectif de repousser l'échéance d'épuisement des matières fissiles par les technologies RNR est très pertinent.

### I) PHYSIQUE DES REACTEURS RNR

Bertrand Boullis est intervenu pour présenter les éléments de physique des réacteurs qui distinguent les RNR par rapport aux filières à neutrons ralentis par modérateur en énergie épithermique ou thermique (Réacteurs à eau sous pression, ...). D'autres intervenants ont aussi apporté des éléments comme Joel Guidez (CEA), Bernard Carlucc (Framatome).

En premier lieu un spectre rapide de neutrons favorise les fissions des noyaux lourds. Ainsi pour un réacteur à neutrons rapides au sodium, la probabilité du rapport fission sur capture est de même ordre de grandeur pour l'uranium 235 par rapport à un PWR mais les valeurs de cette probabilité sont plus élevées par rapport à celles du PWR pour les isotopes de masse atomique plus grande (R. Hill, ANL, 2007). Ce qui favorise les fissions de ces isotopes donc la transmutation d'éléments comme Uranium 238, Neptunium 237, Plutonium 238 à 242, Américium 241 et 243, Curium 244.

Les éléments lourds autres que l'uranium et le plutonium sont désignés actinides mineurs et sont présents dans le combustible nucléaire utilisé du parc français REP jusqu'à leur conditionnement après retraitement à La Hague dans les colis de verre de Haute Activité à Vie Longue (HAVL).

Ainsi les RNR peuvent transmuter les isotopes du plutonium donc utiliser leur énergie de fission et valoriser les stocks de plutonium, en complément du plutonium recyclé dans le combustible MOX dans les REP.

Les RNR peuvent transmuter les actinides mineurs donc diminuer les déchets nucléaires HAVL susceptibles d'être stockés à terme dans le centre de stockage profond de Bure.

Mais la probabilité du rapport fission sur capture est faible (R. Hill, ANL, 2007) de l'ordre de 0,5 pour le Plutonium 242, 0,2 pour Américium 241 et 243, 0,45 pour le Curium 244) donc il faut beaucoup de temps pour assurer la transmutation.

Par exemple une simulation pour Astrid a montré qu'au bout de 5 ans d'irradiation dans le cœur RNR, 100% de l'Américium 243 se transforme en 15% environ de Produits de fission, par capture de neutrons 5% en Pu et 45% de Curium et en 35% restant d'Américium 243.

Le stockage sans retraitement du combustible utilisé entraîne une radiotoxicité supérieure à celle de l'uranium naturel pendant 250000 ans. Alors que le retraitement du combustible utilisé tel que pratiqué actuellement par la France avec recyclage du plutonium et stockage des produits de fission et des actinides mineurs induit que cette radiotoxicité est de 10000 ans.

Une séparation des actinides mineurs par des nouveaux procédés de retraitement et leur transmutation dans des RNR induirait une radiotoxicité des 'déchets' supérieure à celle de l'uranium naturel que pendant 250 ans (facteur 1000 par rapport au stockage sans retraitement du combustible utilisé).

En second lieu un spectre de neutrons d'énergies rapides réside dans la capacité d'un tel spectre de convertir davantage d'isotopes dits fertiles comme l'uranium 238 en des isotopes fissiles comme le Plutonium 239 par capture de neutron. Ceci est possible parce que le nombre  $\eta$  de neutrons émis par fission est plus élevé dans le domaine des énergies rapides des neutrons incidents avant fission, au-delà d'un seuil dépendant de l'isotope, par exemple pour le Plutonium 239 : au moins 50 keV environ (rapport DOE 2016 – options de cycle).

Ainsi le cycle actuel du combustible nucléaire en France produit 7000 tonnes par an d'uranium appauvri et le stock total est de 300 000 tonnes. Ce cycle produit 10 tonnes par an de plutonium transformé en 120 tonnes d'assemblages MOX.

Ce sont des ressources futures valorisables dans des RNR sans dépendre de mines d'uranium.

Il faut noter qu'une R&D en France est en cours pour le multi-recyclage du combustible MOX dans les REP.

## II) TECHNOLOGIE DES REACTEURS RNR

### Filières de réacteurs RNR :

Ils existent plusieurs filières de réacteurs RNR qui diffèrent selon la nature physique du combustible selon qu'il soit solide (gaine de combustible) ou liquide ; selon la nature du caloporteur : sodium pour la filière RNR-Na, au plomb, gaz ; selon sa vocation : réacteur de recherche (irradiation, neutronique, ...) ou réacteur industriel (SMR, fortes puissances).

Un type de réacteur n'a de signification qu'au sein de son cycle de combustible avec les usines de retraitement /recyclage en cycle fermé et de fabrication du combustible (mines éventuelles) donc avec tous les coûts complets d'investissement associés jusqu'aux centres d'entreposage et de stockage de déchets nucléaires. La compétitivité économique résulte de l'addition de ces coûts d'investissement et d'exploitation.

#### A) Le projet de réacteur ASTRID (Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration) :

**Jean-Claude Garnier (CEA)** a exposé le projet de réacteur RNR-NA ASTRID qui est à présent suspendu. Ce projet a été lancé par le Président Jacques Chirac par la loi du 28 juin 2006 sur la gestion des matières radioactives et c'est un démonstrateur du multi-recyclage du plutonium, en particulier avec l'usage de l'uranium appauvri accumulé en France. C'est aussi un démonstrateur d'irradiations expérimentales pour la transmutation d'actinides mineurs – loi de 2006, en continuité avec les expérimentations de transmutation qui avaient été menées dans le réacteur RNR-NA Phénix à Marcoule.

Le cœur d'ASTRID est un cœur hétérogène axial, dit CFV (Cœur à Faible effet en réactivité de Vidange du sodium) présentant un coefficient de vidange sodium négatif ou nul et une faible chute de réactivité au cours du cycle.

Le concept favorise la fuite des neutrons hors du cœur en cas d'accident pour ainsi réduire la réactivité du cœur.

L'objectif d'ASTRID est d'être iso-générateur pour le combustible, c'est-à-dire de consommer autant de matières fissiles que d'en produire (et non surgénérateur si on produisait justement plus de matières fissiles que consommées).

En 2017, les échangeurs NA/vapeur des boucles intermédiaires ont été remplacés par des échangeurs Na/gaz avec des turbines à cycle de Brayton.

La puissance de 600 MWe du projet initial a été ramenée à 150 MWe en 2018 (New ASTRID) puis le projet a été suspendu à l'été 2019.

Pour capitaliser les connaissances, le CEA met en œuvre le Dossier de Fin de Convention (DFC) qui est constitué dans l'objectif de conserver et de transmettre les informations. Bertrand Morel (Orano) est intervenu pour présenter les différences des combustibles REP et RNR-Na. La quantité de Plutonium et sa composition isotopique, ainsi que le taux de Combustion (donc la quantité de produits de fission) sont différentes. Ce qui entraîne des adaptations des procédés de retraitement du combustible usé RNR-Na.

Pour la fabrication du combustible RNR-Na, la France a l'expérience passée en particulier pour Rapsodie, Phénix et Superphénix. Dans le cadre du programme Astrid, des pastilles MOX ont été fabriquées avec succès et pour la fabrication du tube hexagonal de l'assemblage, le redéveloppement de la technologie est à poursuivre

**B) Les réacteurs RNR à sels fondus ou MSR (Molten Salt Reactors) (Cf. conférence Centrale Energies de 2018)**

**Paul Gauthé (CEA)** a présenté la filière qui se caractérise par la nature du combustible sous forme de matière fissile dissoute dans de sels liquides (chlorures ou fluorures) à haute température.

Un grand avantage de la filière réside dans la sûreté intrinsèque en cas de transitoires de température avec des contre-réactions fortement négatives.

Mais il y a des verrous technologiques à lever : la chimie du sel (solubilité, précipitations, risques chimiques), les matériaux (corrosion, dommages, haute température, irradiation, durée de vie), très faible maturité technologique donc nombreux programmes de R&D et de qualification, technologies des équipements, procédés de retraitement à définir, maintenance, ...

Les acteurs français (CNRS, CEA : programme Esquisses, ORANO, FRAMATOME) poursuivent les recherches dans le domaine des MSR, en particulier pour un RNR à sels chlorure.

Il y a de nombreuses sociétés à l'international qui étudient des concepts de MSR en cycle uranium ou en cycle thorium.

Parmi les projets les plus avancés, citons l'annonce en décembre 2019 par Rosatom (Russie) de la construction près de Krasnoyarsk d'un réacteur expérimental à sels fondus pour l'incinération d'actinides mineurs.

Mentionnons aussi le projet MCFR (Molten Chloride Fast Reactor) de 30 MWth de Terrapower (USA).

**III) CONDITIONS DU DEPLOIEMENT DES RNR**

**III.1) Développement du nucléaire et ressources en uranium**

Les facteurs qui semblent avant tout conditionner le déploiement des RNR sont la disponibilité des ressources en uranium (à terme aussi celles en thorium) traduit par son cours de marché et les scénarios de développement de l'énergie nucléaire.

L'offre et la demande future en uranium selon différents scénarios de développement de l'énergie nucléaire ont fait l'objet d'une présentation par **Sophie Gabriel** (CEA-DEN/I-Tésé).

Pour la technologie REP dominante actuellement, un GWe consomme environ 150 tonnes d'uranium par an en cycle ouvert. La production –demande mondiale est de l'ordre de 65000 t/an. Le parc actuel correspond à une puissance installée de 450 tranches nucléaires pour 396900 MWe. La puissance moyenne installée est ainsi de 880 MWe.

La consommation actuelle d'uranium est cohérente par rapport à la disponibilité d'environ 130 ans de ressources conventionnelles identifiées d'uranium de 8 MtU citée dans le livre rouge de l'Agence pour l'Energie Nucléaire de l'OCDE édition 2018. Mais elle est liée à une évolution à la hausse des prix du marché de l'uranium pour exploiter des gisements de plus en plus coûteux.

Il faut y ajouter 7,5 MtU de ressources conventionnelles non découvertes à la fois déduites et spéculatives. Ce qui rend possible une durée d'offre supplémentaire de 115 ans donc au total 245 par rapport à la demande de 65000 tU/an du parc nucléaire mondial actuel.

Les ressources non conventionnelles d'uranium (source i-tésé) sont les suivantes :

	Uranium dans gisements exploités de phosphates	U dans cendres charbon	Uranium dans eau de mer
Réserves en MtU	3,9	< 0,2	4500
Exploitation annuelle possible	< 10 000tU/an	< 700 tU/an	Pas industriel
Observations	Réserves phosphates : 65 Gt 100 ppm U	Marginal et lié à l'exploitation et la récupération	Très hypothétique : bilan énergétique du procédé ? ... R&D par Japon JAEA et Chine

Ainsi il est constaté que les ressources non conventionnelles d'uranium sont marginales à ce jour.

Mais la question de la disponibilité des ressources conventionnelles d'uranium à court terme ne se pose pas avec le parc actuel comme vu précédemment.

L'équipe d'I-tésé a étudié les besoins en uranium pour deux scénarios d'augmentation du parc mondial à l'horizon 2100 :

Scénario	Taille du parc mondial en 2100 par rapport au parc actuel	Equivalent en puissance GWe	Augmentation consommation U/an	Consommation tU à horizon 2100
C2	X 6	>2000	3000 tU/an	305 000 tU/an
A3	X 17	>5500	7900 tU/an	700 000 tU/an

Avec un modèle, l'équipe i-tésé a réévalué les ressources conventionnelles ultimes d'uranium en considérant que les gisements sont accessibles jusqu'à 1km ou 2 km de profondeur :

Profondeur exploitation des gisements	Ressources conventionnelles ultimes en MtU (modèle i-tésé)	Offre en MtU : ressources conventionnelles - production passée (~3 MtU)	Durée de l'offre en années au rythme de 2100 du scénario C2	Durée de l'offre en années au rythme de 2100 du scénario A3
1km	36	33	108	47
2km	72	69	226	98

Cependant, comme pour d'autres matières premières de nombreuses incertitudes demeurent sur l'accès aux ressources. : le niveau des dépenses d'exploration nécessaires aux découvertes est corrélé au prix du marché de l'uranium. Il y a des facteurs géopolitiques et aléas : par exemple la crise covid 19 actuelle a entraîné une non exploitation de mines et une augmentation brutale du prix de l'uranium de 40%. L'hypothèse d'exploitation des gisements jusqu'à 2 km peut être irréaliste : manque de disponibilité de ressources en eau pour la mine, etc. Le marché de l'uranium peut entraîner un risque de pénurie.

Cette incertitude sur la disponibilité des ressources à long terme et la gestion durable des ressources naturelles amènent au déploiement de RNR.

### III.2) Valeur économique des RNR pour leur déploiement

Luc Van Den Durpel de la société Nuclear 21st est intervenu pour présenter la valeur économique des RNR ainsi que leur valeur s'ils ne sont pas déployés en s'appuyant sur 4 scénarios croissants sur le déploiement à partir de 2060 de RNR et de cycle fermé sur les matières fissiles. Il a montré que les RNR permettent de pallier aux risques prix de l'uranium ainsi qu'avec le multi-recyclage ou de transmutation de matières fissiles d'induire de moindres coûts de stockage profond.

### III.3) Enjeux industriels et économiques

Rémy Dupraz (Framatome) est intervenu pour présenter les enjeux industriels associés au déploiement de RNR, étant donné que le tissu industriel et le parc français actuel repose sur les tranches REP à l'avenir. IL y a une exigence de continuité en s'affranchissant de tout arrêt de construction sur de longues périodes.

Un point important est de vérifier au stade conception la fabricabilité de composants par rapprochement de l'ingénierie avec les fabricants (cf problèmes de Flamanville 3).

Framatome met en place un Centre de Compétences « Réacteur Avancés » qui comprend une « Ecole de Design » dans le prolongement des acquis d'ASTRID. David Settimo (EDF) a présenté les études d'estimation de coûts d'investissement de futur RNR-Na. Il est visé avec des études d'optimisation d'atteindre un ratio de coûts d'investissement de 1,45 entre un RNR et un REP de puissance équivalente.

Stéphanie Tillement (Institut-Mines Télécom-Atlantique) et Frédéric Garcias (Université de Lille) dans le cadre du projet AGORAS (Amélioration de la Gouvernance des Organisations et des Réseaux d'Acteurs de la Sécurité Nucléaire) a replacé la trajectoire du projet Astrid dans l'histoire des précédents RNR développés en France ainsi que l'évolution de son infrastructure projet.

## IV) STRATEGIE AU NIVEAU MONDIAL

Gilles Rodriguez (CEA), Directeur technique du Forum International Génération IV (GIF) , a présenté la vision du GIF pour le déploiement des RNR.

Il est nécessaire de faire évoluer les 4 valeurs qui ont constitué en 2000 la sélection des 6 concepts de GIV : durabilité, compétitivité économique, sûreté et fiabilité, résistance à la prolifération et protection physique.

Il a été précisé qu'il faut réévaluer le degré de maturité technologique (TRL ou Technology Readiness Level) des 6 concepts retenus dans GIV : actuellement dans l'ordre croissant de TRL : MSR (Molten Salt Reactor), GFR (Gas-cooled Fast Reactor), SCWR (Supercritical Water-cooled Reactor), VHTR (Very High Temperature Reactor), LFR (Lead-cooled Fast

Reactor) et SFR (Sodium-cooled Fast Reactor). Les 4 concepts RNR sont : MSR, GFR, LFR et SFR.

Il émerge à présent une nouvelle valeur pour les systèmes GIV : celle de flexibilité à la fois opérationnelle (suivi charge, combustible, ...), de déploiement (petite à grande puissance, site, modularité...), de production (H<sub>2</sub>, chaleur...).

Le GIF développe des standards de sûreté pour chaque concept : Safety goals/ Safety Design Criteria (SDC)/ Safety Design Guidelines/ Country specific codes and standards.

Le GIF prend des initiatives vers les entreprises privées et les vendeurs de SMR (Small Modular Reactor), sur les innovations techniques (construction modulaire, structures génie civil avancées, combustible, matériaux, impression 3D), sur les infrastructures internationales de R&D d'essais et de formation avec préservation et capitalisation des connaissances.

**Nicolas Devictor (CEA) a présenté les axes futurs de R&D au CEA pour les RNR jusqu'à échéance de 10 ans :**

- Socle de recherches sur la physique des réacteurs RNR et leur sûreté, le combustible et les matériaux

- Développements technologiques (mesures, Contrôles Non Destructifs et visualisation Sodium, robotique).

- Esquisses et veille technologique (optimisations RNR-Na, faisabilité réacteurs à sels fondus en spectre rapide, veille sur autres concepts (GFR, LFR, ...).

- Collaborations internationales (AIEA, OCDE/NEA, Forum GIV, Europe (H2020, Myrrha, ...), Russie, Chine, Etats-Unis, Inde, Japon), possibilité de s'associer à des projets de réacteur à l'étranger.

- Dans le domaine du cycle du combustible, synergies avec les développements procédés pour le multi-recyclage en REP.

- Objectif de préservation des compétences.

**Alexey Lokhov, Deputy Director de Rosatom Europe de l'Ouest a présenté les réacteurs RNR et la fermeture du cycle du combustible en Russie.**

L'objectif de la Russie est de développer de nouvelles technologies nucléaires impliquant l'opération parallèle du parc de réacteurs thermiques et de RNR pour assurer un cycle fermé du combustible nucléaire. La fermeture du cycle actuel est réalisée par l'usine de retraitement RT-1 et par le Pilot Demonstration Center RDC (RT-2). Le plutonium recyclé est utilisé dans des assemblages MOX sous forme de PuO<sub>2</sub>. Il est aussi utilisé dans des assemblages REMIX (U, Pu) O<sub>2</sub>.

L'usine RT-2 a l'objectif de retraiter plus de 950 tonnes de combustible par an.

Le projet de RNR-Na BN-1200 M est le futur réacteur commercial RNR.

**Joel Guidez (CEA) a présenté les RNR aux Etats-Unis.**

Le DOE cherche des investisseurs pour le projet RNR de recherche VTR (Versatile Test Reactor) : General Electric Hitachi se rapproche de Terrapower pour le design et la construction.

Terrapower développe aussi avec Bill Gates le concept de RNR 'réacteur cigare' avec utilisation d'uranium de retraitement dans une couverture fertile de conversion en plutonium puis utilisation de ce dernier comme combustible. Mais il n'est pas envisagé de retraitement et le combustible utilisé est destiné au stockage géologique.

A présent Terrapower porte essentiellement ses efforts sur les réacteurs à sels fondus MSR.

Aux Etats-Unis, beaucoup de projets de petits réacteurs se développent.

La première demande de certification pour un Advanced Reactor a été déposée en 2020 pour le micro-réacteur sodium AURORA développé par Oklo qui a reçu un site permit à INL.

Quelques projets utilisent le plomb (SEALER, ...) ou le sodium (ARC 100, eVINCI de Westinghouse, AURORA, ...).

Deux projets sont des réacteurs RNR à sels fondus MSR à chlorures : projet de la société Elysium et le projet MCRE ( Molten Chloride Reactor Experiment) de Terrapower avec sans doute la réalisation d'une maquette de 10 MWth à l'INL (Idaho National Laboratories) d'ici 2022.

Dans ces projets le retraitement est implicitement intégré mais jamais justifié.

**Joel Guidez a aussi présenté la situation en Chine, en l'absence de l'intervenant prévu : Christophe Poinssot, conseiller nucléaire à Pékin.**

La Chine veut tester l'ensemble des filières GIV y compris avec des SMR et a la volonté de poursuivre un cycle fermé.

- Filière Sodium Fast Reactor (SFR) portée par CNNC et son institut de R&D, CIAE (Pékin) :

- Démonstrateur expérimental **CEFR de 20MWe** construit avec l'aide des russes, pleinepuissance atteinte en 2014,
- Démonstrateur **CFR600 de 600 MWe** en construction sur le site de Xiapu (Fujian) suite à la décision du Conseil des Affaires d'Etat en décembre 2017.

- Filière Molten Salt Reactor (MSR) porté par le Shanghai Institute of Nuclear Applied Physics (SINAP) de la Chinese Academy of Science (CAS) :

- Projet de démonstrateur expérimental **TSMR de 12 MWe** sur le site de Minqin (Gansu) dont le choix a été confirmé le 30 novembre 2018 par la NNSA.

**Réacteurs RNR dans le monde en 2020 :**

	Russie	Chine	Etats-Unis	Japon	Inde
Réacteurs RNR de recherche	-BOR 60 (60 MWth) -MRIR (Multipurpose Fast Neutron Research Reactor- 150 MWth)	CEFR (2011)		JOYO (en attente de possible redémarrage)	FBTR
Réacteurs de puissance en fonctionnement	BN600 (1980) BN800 (2015)				
Réacteurs en construction	MBIR (remplacement BOR 60)	Démonstrateur CFR 600 (2023) en construction à Xiapu (Fujian) - Démonstrateur TSMR (12 MWe)			PFBR (en cours remplissage sodium depuis des années)
Réacteurs en projet	-BN1200 (1220 MWe) - BREST –OD-300 (300 MWe) refroidi au plomb	-Commercial CFR-1000 (2030)	-micro réacteur Na AURORA d'Oklo -projet d'Elysium -Projet MCRE de Terrapower		

En conclusion, un parc nucléaire durable et son cycle lié est une stratégie de long terme qui nécessite une large anticipation avant leur éventuelle compétitivité déterminée par des analyses économiques.