

# 0 Les réacteurs à neutrons rapides : pourquoi, comment, quand. Synthèse historique et technique. Perspectives de développement

Fiche pour PNC

Dominique GRENECHE

---

## DEUXIEME PARTIE : LES DEVELOPPEMENTS PASSES, PRESENTS, ET FUTURS

-----

On s'est intéressé dans la première partie aux fondements physiques du phénomène de régénération qui consiste à « fabriquer » autant ou même plus de matière fissile que l'on en consomme pour produire de l'énergie dans un réacteur nucléaire en fonctionnement. On a notamment expliqué pourquoi un tel processus ne peut se réaliser qu'avec des réacteurs à neutrons rapides (RNR) pour des combustibles à base d'uranium.

Dans cette deuxième partie on s'intéresse aux développements industriels des RNR régénérateurs en retraçant d'abord très brièvement leur histoire, puis en évoquant les réalisations passées et présentes et enfin en dégageant quelques perspectives concernant leur déploiement à long terme.

### 1 – Historique du développement des RNR et état des lieux.

On se limitera ici à fournir quelques informations très synthétiques permettant de mesurer l'intensité des travaux de R&D et des réalisations passés sur les RNR. Le lecteur intéressé par plus de détails sur cet épisode très riche de l'histoire du développement de l'énergie nucléaire pourra se reporter au chapitre 14.4 de notre livre déjà cité. Avant de résumer succinctement ces développements au niveau mondial, il importe de fournir quelques détails sur l'histoire du développement des RNR dans les trois pays qui ont contribué le plus à ces développements.

#### 1.1 – Etats-Unis

**Les Etats-Unis pourtant pionniers du développement des RNR, ont en fait contribué assez peu à leur développement industriel.** Pourtant le successeur d'EBR-1, EBR-2, de puissance 20 MWe, qui démarre en 1965 sur le même site, augure d'un bel avenir pour les RNR notamment avec son concept tout à fait original d'intégration au réacteur d'une installation pilote de traitement pyrochimique des combustibles usés permettant le recyclage des matières fissiles (uranium très enrichi à l'époque et plutonium). Ce réacteur a permis d'accumuler un grand nombre de connaissances sur les RNR au sodium, notamment sur le plan de leur **sûreté de fonctionnement** avec la **démonstration expérimentale d'évacuation passive de la puissance résiduelle** (test réalisé en 1986 simulant une panne totale des pompes primaires de refroidissement par le sodium). En dépit de ces résultats très prometteurs, le congrès américain sous l'administration Clinton mit un terme à cette belle aventure technologique en 1992 pour des raisons essentiellement politiques. Ce fut la même chose pour le réacteur expérimental FFTF (Fast Flux Test Facility) de 400 MWth, qui démarra en 1980 mais qui fut finalement arrêté en décembre 1993 non sans voir fait l'objet d'âpres batailles entre partisans et opposant à cette installation dont l'intérêt, il est vrai, avait beaucoup diminué dans le contexte américain sur lequel nous revenons ci-après.

Entre temps, un prototype industriel de RNR baptisé Fermi-1 (encore appelé EFFBR pour « Enrico Fermi Fast Breeder Reactor »), d'une puissance de 61 MWe, avait tout de même été couplé au réseau en août 1966 (opéré par une compagnie d'électricité privée, Detroit Edison). Il s'agissait à nouveau d'un cœur en uranium enrichi mais utilisé cette fois sous forme d'alliage métallique, le fluide caloporteur étant toujours le sodium. Il a malheureusement subi une fusion de deux éléments combustibles deux mois après sa mise en service, causée par une obturation partielle de canaux d'entrée du sodium. Il fallut quatre ans de travaux de réparation avant que le réacteur ne redémarre. Le fonctionnement du réacteur a ensuite été altéré par d'autres incidents qui se sont répétés, en particulier des fuites dans les générateurs de vapeur. Le réacteur fut finalement arrêté définitivement en octobre 1972 pour des raisons financières, en ayant fonctionné seulement deux ans de façon assez chaotique. Cette expérience fâcheuse jeta évidemment un certain discrédit sur la filière des RNR aux Etats-Unis.

Mais cette disgrâce envers les RNR s'est beaucoup accentuée au tournant des années 70-80 avec l'arrivée au pouvoir en 1977 du Président Jimmy Carter qui, dès son arrivée jette son opprobre sur le traitement des combustibles usés et la séparation du plutonium pour des raisons de lutte contre la prolifération des armes nucléaires. Dans un relevé de décision présidentielle<sup>1</sup> il décrète notamment **“First, we will defer indefinitely the commercial reprocessing and recycling of the plutonium 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 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 plutonium (comme on l'a expliqué dans la première partie).

Aujourd'hui on assiste à timide reprise avec quelques projets de RNR de petite taille, 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. Pourquoi pas, 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, écarte toute possibilité d'atteindre un tel objectif. Signalons également le RNR au sodium « Versatile Test reactor » (VTR) qui doit être construit prochainement sur le site de recherche d'Idaho qui utilisera en principe un combustible métallique avec du plutonium (alliage U-Pu-Zr), 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 ». De plus, le congrès américain a décidé très récemment de n'allouer aucun fonds en 2023 pour la poursuite de ce projet jugé non prioritaire.

Pour conclure, on ne peut que constater que le tabou du plutonium reste bien ancré dans l'esprits de certains responsables et décideurs ou universitaires influents américains, ce qui laisse planer des incertitudes sur le déploiement futur de RNR **régénérateurs** aux Etats-Unis.

## **1.2 – Russie**

En Russie (ex-URSS), on peut considérer que l'acte de naissance des RNR est constitué par la publication d'un rapport au gouvernement (évidemment secret) en 1949, avançant l'idée de la régénération, ce qui conduisit les responsables à engager immédiatement un programme de recherche sur ce sujet. L'équipe du centre d'Obninsk, berceau du nucléaire civil soviétique (que l'auteur de cette a pu visiter) procède d'abord au choix du fluide caloporteur en comparant notamment l'hélium, l'alliage plomb-bismuth, le mercure, le NaK et enfin le sodium, pour arriver finalement au choix de ce

---

<sup>1</sup> Statement by the President on His Decisions Following a Review of U.S. Policy. April 7, 1977.

dernier. Ils fabriquent alors un dispositif que l'on peut difficilement qualifier de réacteur mais qui est simplement un assemblage critique de plutonium sous forme d'oxyde (12 kg) ne dégageant aucune puissance, entouré d'une couverture en uranium. Cette installation rudimentaire, appelée BR-1, diverge en mai 1955 et elle permet de démontrer la possibilité de régénération. C'est aussi l'occasion pour les scientifiques soviétiques d'introduire quelques combustibles expérimentaux au carbure, ce qui inaugure cette technologie dans laquelle les Russes vont se faire une spécialité.

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). Au début des années 1970, il est décidé de transformer ce réacteur pour pouvoir augmenter sa puissance à 10 MWth, d'où le nom de cette nouvelle installation BR-10 qui va commencer à fonctionner à partir de 1973. Ce réacteur aura une très longue carrière puisqu'il ne fut arrêté définitivement qu'en 2002, ce qui en 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 celui du réacteur a été pendant quinze ans basé sur l'utilisation de nitrure d'uranium à haute densité.

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 (puissance nominale prévue de 350 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 de 120 000 m<sup>3</sup> par jour<sup>2</sup> et il fonctionnera jusqu'en 1999.

Avant même le démarrage de ce BN-350, il est décidé (en 1969) de construire un réacteur d'une puissance de 600 MWe appelé BN-600, mais il faut attendre le 26 février 1980 pour qu'il diverge. Ce réacteur est toujours en exploitation aujourd'hui et il fonctionne maintenant de façon satisfaisante, après quelques débuts difficiles notamment du fait des multiples fuites dans les circuits de sodium. En fait les analyses détaillées de ces défaillances sont pleines d'enseignements et démontrent d'une certaine façon que les RNR s'accommodent finalement assez bien de ces fuites de sodium, pourvu que des dispositions soient prévues pour les détecter, les maîtriser puis les réparer aussi facilement que possible.

C'est en 1983 que sont lancées des études de conception d'un nouveau réacteur dont la puissance unitaire puisse rivaliser avec celle des réacteurs industriels des autres filières alors en construction ou mis en service dans les grands pays du monde occidental. La conception de ce réacteur de 800 MWe, baptisé BN-800, est assez largement modifiée 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 dans les réacteurs de puissance par du combustible à base de plutonium. Suite à d'importants retards liés à des difficultés financières, ce n'est qu'en décembre 2015 que le BN-800 est couplé au réseau mais depuis il fonctionne de façon satisfaisante avec un coefficient de disponibilité cumulé de 66 % fin 2021. En parallèle, une installation de fabrication de combustible Mox (mélange Uranium-Plutonium) été mise en service dans la région

---

<sup>2</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.

de l'ancien site militaire de Krasnoïarsk. Notons pour terminer qu'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 régénérateurs à une échelle industrielle.

### 1.3 – 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 implanté sur le site de Cadarache, qui diverge le 27 janvier 1967. 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 référence (en achetant du plutonium aux Anglais. Par ailleurs, un laboratoire baptisé Cyrano, destiné à mettre au point un procédé hydrométallurgique de retraitement des combustibles usés Mox, entre en service en 1968 sur le site de Fontenay aux Roses. FAR, ce qui va permettre de retraiter une centaine de kg de Mox usé. 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. Rapsodie a été inauguré en novembre 1967 par le général de Gaulle, ce qui montre l'importance que le gouvernement français attache aux RNR.

La deuxième grande 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 par les autorités de sûreté du fait des incertitudes liées à son vieillissement. Mais à l'issue de sa longue carrière d'exploitation, le réacteur Phénix a laissé en héritage une quantité 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 plutonium 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 **SURGENENERATION** 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 définition d'un RNR de très grande puissance, 1 200 MWe, est en cours. Sa construction commence en décembre 1976 sur le site de Creys-Malville près de Lyon. Le projet, baptisé tout naturellement 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. L'histoire de SPX va être extrêmement mouvementée à toutes les étapes de son développement et cette réalisation va susciter beaucoup de contestations et même une opposition virulente de la part de farouches extrémistes. 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 (qui confinent au harcèlement délibéré des opposants) et des batailles administratives qui vont immobiliser le fonctionnement du réacteur pendant une durée cumulée de 54 mois. Ce sont finalement des motivations à caractère purement politiques qui vont conduire à prendre la décision en 1997 d'arrêter définitivement ce réacteur, au moment même où il commençait à fonctionner de

façon tout à fait satisfaisante. 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.

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 des tests menés sur le réacteur Phénix qui, comme on l'a vu, a fonctionné jusqu'en 2009, donc pendant plus de 10 ans après l'arrêt de SPX. De nouveaux programmes vont également être initiés dans le cadre de la participation très active de la France aux travaux sur les réacteurs de quatrième génération (forum international GenIV) avec en particulier des études de conception des RNR à gaz. Enfin, à partir du milieu des années 2000, 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 d'optimisation de la conception et des coûts. Malheureusement, le CEA annonce en 2019 l'abandon de ce projet pour des raisons présentées comme budgétaires. Là encore, on ne commentera pas cette décision, sauf pour souligner qu'elle diffère pour longtemps encore le démarrage d'un programme d'envergure sur les RNR. On ne peut que recommander à ce sujet l'excellente analyse présentée par Yves Bréchet dans son article évoqué en préambule de ce document. Notons simplement ici que la décision de construction ce réacteur avait été avalisée par les ministres concernés lors de la réunion du Comité de l'énergie atomique du 17 mars 2005.

#### **1.4 – 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 en renvoyant à nouveau le lecteur au chapitre 14.4 de notre livre pour avoir plus de détails. 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, on dénombre pas moins de **15 réacteurs expérimentaux et 17 RNR industriels électrogènes qui 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 doit démarrer cette année (après avoir accumulé beaucoup de retards). Notons ici que c'est le **sodium liquide** qui a été retenu comme fluide caloporteur pour la quasi-totalité de ces réacteurs.

### **2 – Perspectives de développement des RNR régénérateurs.**

#### **2.1 - Les motivations**

La finalité principale des RNR régénérateurs est de permettre à terme de remplacer les réacteurs nucléaires actuels à neutrons lents (RNL) qui n'utilisent qu'environ 0,5 % l'Unat pour produire de l'énergie, sachant qu'il n'existe aucun moyen pour espérer améliorer significativement cette piètre performance. Or, les ressources économiquement **exploitables** d'Unat s'épuiseront nécessairement un jour ou l'autre et dans ces conditions on peut craindre une extinction progressive de l'énergie nucléaire faute de pouvoir extraire de l'Unat à des coûts raisonnables (nous reviendrons un peu plus loin sur la question de l'uranium contenu dans l'eau de mer). Dans cette perspective il importe donc d'agir dès maintenant pour pouvoir déployer les RNR régénérateurs qui, on l'a vu, permettent d'utiliser la totalité de l'Unat (via sa transformation progressive en plutonium) et qui, de ce fait ouvre la voie à une énergie nucléaire durable en **multipliant son potentiel énergétique** par au moins un **facteur cent**.

Un autre intérêt des RNR provient de leur capacité à réduire fortement les quantités de déchets radioactifs à vie longue, constitués par les « actinides mineurs » (Américium, Neptunium, Curium). Ils sont aujourd'hui mélangés aux produits de fission (PF) dans les déchets ultimes vitrifiés destinés au stockage géologique et ils constituent la quasi-totalité de la radiotoxicité à long terme (au-delà de 500 ans) de ces déchets car celle des PF est alors devenue négligeable. En effet, les RNR du fait de leur spectre de neutrons rapides produisent nettement moins de radionucléides à vie longue que les RNL et ils offrent même la possibilité de détruire efficacement une bonne partie d'entre eux (par transmutation nucléaire, appelée parfois « incinération »), ce qui très difficilement faisable dans des RNL. La faisabilité de ce processus a été démontrée à une échelle significative grâce à d'importants programmes de R&D réalisés notamment en France. C'est donc une excellente machine pour réduire la radiotoxicité potentielle des déchets radioactifs.

Signalons enfin que le recyclage éventuel de l'américium en RNR est beaucoup plus efficace qu'en RNL, dans lesquels ce recyclage soulève de sérieuses difficultés. Une telle option permet de réduire de façon importante le dégagement thermique des déchets vitrifiés issus de traitement des combustibles usés des RNL au-delà d'une période de refroidissement préalable d'une centaine d'années<sup>3</sup>. Si ces déchets sont stockés définitivement dans un stockage géologique après un entreposage en surface d'une telle durée, il devient possible de diminuer fortement la charge thermique de ce stockage géologique et par là-même d'en réduire les dimensions et donc le coût. En effet, au-delà d'une centaine d'années, la part du dégagement thermique de l'américium-241 dans le dégagement thermique total des verres devient de plus en plus prépondérante.

## **2.2 - Les programmes mondiaux**

En dehors des programmes nationaux évoqués au paragraphe précédent, il existe un cadre international de coopération en matière de développement de la R&D sur les RNR : le Forum international Génération IV (GIF) qui a été créé en 2001. Cet organisme rassemble aujourd'hui 13 pays, dont les principaux grands pays industriels ainsi que Euratom en tant qu'organisme chargé de superviser et de soutenir les travaux des pays membre de l'Union Européenne, notamment au travers de sa « plateforme technologique » SNETP mise en place en 2007 pour structurer et promouvoir le développement d'une énergie nucléaire durable (et dans laquelle la France est très présente). On trouvera dans le dernier rapport annuel (2020) du GIF<sup>4</sup> une très bonne synthèse technique et programmatique sur les RNR, notamment sur les 3 options étudiées aujourd'hui : sodium, plomb et gaz. Ajoutons à cela les réflexions menées au sein de l'AIEA via son programme INPRO qui a donné lieu à l'édition récente d'un rapport de synthèse<sup>5</sup> dont les annexes fournissent notamment des précisions techniques tout à fait intéressantes sur la stratégie et les programmes chinois (annexe II) et japonais (annexe III). Nous renvoyons donc le lecteur à ces documents pour obtenir plus de détails sur l'état des lieux des projets et programmes de développement sur les RNR dans le monde.

On peut simplement en conclure que dans ce domaine des RNR, les différents pays peuvent être classés en quatre catégories :

1. Les pays engagés de façon très volontariste dans le développement aussi proche que possible d'un parc de RNR **régénérateurs** : Russie, Chine et Inde (mais ce pays manque de capacités financières pour mettre en œuvre ses projets) ;

---

<sup>3</sup> "Nuclear Waste Can Be Reduced by Recycling and Transmutation" - Dominique Greneche – ELSEVIER - Janvier 2020  
[https://www.researchgate.net/publication/343904167\\_Nuclear\\_Waste\\_Can\\_Be\\_Reduced\\_by\\_Recycling\\_and\\_Transmutation](https://www.researchgate.net/publication/343904167_Nuclear_Waste_Can_Be_Reduced_by_Recycling_and_Transmutation).

<sup>4</sup> GIF – Annual report 2020 - <https://www.gen-4.org/gif/>.

<sup>5</sup> "Developing Roadmaps to Enhance Nuclear Energy Sustainability: Final Report of the INPRO Collaborative Project ROADMAPS" – IAEA Nuclear Energy Series - No. NG-T-3.22 - Sept. 2021.

2. Les pays qui ont nettement différé la date de ce développement : la France avec la décision récente d'interrompre le projet de réacteur de démonstration ASTRID évoqué plus haut (et d'ailleurs simplement isogénérateur) et le Japon qui a été contraint de geler son ambitieux programme à la suite de l'accident de Fukushima de 2011 ;
3. Les pays qui ont un programme nucléaire important mais qui n'ont aucune stratégie nationale pour le déploiement de RNR : USA et Grande Bretagne;
4. Les autres pays membres du GIF dont certains réalisent quelques programmes de R&D sur les RNR (comme la Corée ou la Suisse) mais qui n'ont pas de vision précise de leur déploiement.

Ce découpage très schématique montre bien que la France qui fut incontestablement le leader mondial du développement des RNR jusqu'au tournant du siècle dernier a perdu ce rang aujourd'hui. Cela étant elle dispose encore aujourd'hui d'une place de tout premier plan dans le secteur du traitement recyclage des combustibles sans lequel le déploiement de RNR n'est pas envisageable. Il convient donc de maintenir des efforts soutenus de R&D dans ce domaine stratégique qui pour assure un développement durable de l'énergie nucléaire.

### **2.3 - Les scénarios concernant la disponibilité de l'uranium naturel (Unat)**

Pour fixer les idées sur ce point, il faut d'abord se référer aux données actuelles concernant les prix et les ressources en uranium, car ces deux paramètres sont évidemment liés (les ressources potentiellement exploitables augmentent dès lors que le prix que l'on accepte de payer pour en extraire l'uranium devient plus élevé). Pour ce qui concerne le prix, il se négocie ces dernières années entre 50 \$/KgU et 100 \$/KgU pour les contrats à long terme, mais la tendance récente est à la hausse. Pour ce qui concerne les ressources en Unat, on peut se référer au document qui fait autorité en la matière, à savoir le « livre rouge » publié régulièrement par l'AIEA-OCDE.

On s'intéresse d'abord aux ressources dont l'exploitation économique est assurée dans les conditions actuelles, encore appelée « ressources conventionnelles ». Dans sa dernière édition de 2020, il est indiqué que les ressources conventionnelles identifiées à un prix maximum de 130 \$/kg sont de l'ordre de **6 millions de tonnes d'uranium**. En y ajoutant les ressources « raisonnablement assurée » on arrive à **10 millions de tonnes**. Si on ajoute également les ressources présumées (ou « inférées ») on trouve un total de **12 millions de tonnes d'uranium** pouvant probablement être extraites du sol à un prix inférieur à 130 \$/KgU qui correspond d'ailleurs à peu près au prix maximum enregistré ces dix dernières années sur le marché<sup>6</sup>. En doublant ce prix (< 260 \$/KgU), on arrive à environ **15 millions de tonnes, dont 8 millions de tonnes de ressources identifiées**. Notons cependant que selon certains géologues d'ORANO, il existe peut-être d'autres gisements d'uranium inconnus à ce jour mais si c'est le cas, ils sont situés dans des régions isolées ou bien à grande profondeur (> 3000 m) ou les deux à la fois, et les procédés pour en extraire l'uranium seront certainement plus complexes. On est donc là dans le domaine de la spéculation.

Au-delà de ces ressources, il faut évoquer les ressources dites « non conventionnelles » terrestres qui sont définies dans le « livre rouge » comme ressources à très faible teneur ou celles dont l'uranium n'est récupérable qu'en tant que sous-produit ou coproduit mineur. Il s'agit de roches phosphatées, de minerais non ferreux, de carbonatite, de monazite, de schistes noirs, de lignite, ou même de cendres de charbon. Les éléments fournis dans ce document montrent que s'il fallait procéder à l'extraction d'uranium à partir de ressources ayant une teneur en uranium aussi faible, leur apport à l'approvisionnement mondial en uranium serait marginal, d'autant plus que la plupart ne peuvent être que des flux qui sont par nature limités par le flux de production de la ressource principale. C'est par exemple le cas des phosphates dont la quantité totale est estimée à 4 millions de tonnes et dont le flux annuel de production d'uranium serait limité 10 000 tonnes par an (le coût d'une extraction seule

---

<sup>6</sup> Un pic tout à fait exceptionnel a 54 \$/kg a cependant été enregistré en 2007 : voir livre rouge 2020 page 105.

sans valorisation de l'acide phosphorique serait prohibitif)<sup>7</sup>. En tout état de cause, il est probable, qu'au moment où s'amorcera la pénurie d'uranium, il n'y aura plus beaucoup de phosphates pour fabriquer des engrais.

On peut ajouter à cela les ressources en uranium naturel dites « secondaires » constituées essentiellement de l'uranium appauvri issu des usines d'enrichissement. L'évaluation de ce potentiel de ressource en uranium est assez facile à faire puisqu'on connaît les stocks existants dans le monde (autour de 2 millions de tonnes d'uranium aujourd'hui, dont 330 000 tonnes en France), et sa teneur résiduelle en U235 qui est en moyenne de 0.25 %. Avec ces données, on calcule que le réenrichissement de ces 2 Mt permettrait d'obtenir environ 500 000 tonnes d'uranium à une teneur en U235 égale à celle de l'Unat (0.71%) avec un taux de rejet des usines d'enrichissement de 0.1 % et une capacité d'enrichissement de 800 000 UTS soit 16 fois la capacité mondiale annuelle disponible aujourd'hui. Compte tenu de ces chiffres, il est à peine besoin de préciser que cette source secondaire ne peut que servir d'appoint pour l'approvisionnement mondial en Unat et ne pourra être acquise qu'en acceptant de payer nettement plus cher l'uranium enrichi issu de cette opération.

Enfin, il faut mentionner l'extraction théoriquement possible de l'uranium contenu dans l'eau de mer dont la concentration moyenne d'uranium en masse de 3,3 ppb, soit un microgramme par kilogramme. Cela conduit à une masse totale de 4,5 milliards de tonnes dans l'ensemble des mers et océans de la planète, ce qui fait miroiter une ressource pratiquement inépuisable d'uranium. Malheureusement, il paraît totalement illusoire de pouvoir exploiter un jour une telle ressource dans des conditions économiques raisonnables, compte tenu des quantités faramineuses d'eau de mer qu'il faudrait traiter mais aussi des quantités tout aussi phénoménales de matériaux à mettre en œuvre dans les procédés pour pouvoir approvisionner le parc mondial de réacteurs. A titre d'exemple pour fournir la quantité annuelle d'Unat nécessaire à l'alimentation du parc mondial actuel de réacteurs nucléaires, soit environ 60 000 tonnes, il faudrait traiter chaque année 4 à 5 fois le volume d'eau de la Manche en supposant un rendement d'extraction de 100 % et mettre en œuvre des centaines de millions de tonnes d'adsorbants plongés dans l'eau de mer en y associant toutes les infrastructures ainsi que la logistique maritime et terrestre nécessaire à la réalisation de telles opérations<sup>8</sup>. Cela ne paraît pas réaliste.

Voyons maintenant quelles peuvent être les **projections en matière de demande mondiale d'uranium**. Celle-ci dépend évidemment des scénarios de développement des réacteurs nucléaires de la génération actuelle, qui sont essentiellement des réacteurs à eau légère (90 % de la puissance mondiale installée). Leur consommation moyenne est d'environ 23 tonnes d'Unat/TWhe ce qui fait une consommation mondiale annuelle de 61 000 tonnes d'Unat pour les 2650 TWhe produits en 2021. Si on suppose au cours de ce siècle (jusqu'en 2100) un **taux de croissance de nouvelles capacités de production nucléaire** (noté ici CPN) égal à la moyenne des taux observés ces dix dernières années, soit 1,6 %, on arrive à **une consommation cumulée en 2100 de 10 millions de tonnes, ce qui correspond à la totalité des ressources en Unat identifiées ou raisonnablement assurées aujourd'hui à un coût moins de 130 \$/Kg**. Pourtant, cette hypothèse de croissance est relativement modeste puisqu'elle correspond à 620 GWe de CPN installée en 2050, ce qui ne représente qu'une augmentation d'environ 55 % par rapport la CPN installée aujourd'hui qui est proche de 400 GWe. C'est assez nettement inférieur aux 800 GWe prévus par l'AIEA dans son hypothèse haute<sup>9</sup>. Notons à ce propos que le taux de croissance de l'énergie nucléaire destinée uniquement à la production électrique pourrait-être accru par la mise en œuvre d'applications non électrogènes de cette énergie notamment via le déploiement de réacteurs de petite taille destinés justement à de telles applications. Néanmoins, ce scénario conduit à une CPN installée de 1350 GWe à l'horizon 2100, soit 3,5 fois celle d'aujourd'hui, ce

<sup>7</sup> Lettre i-tese N° 14 – Rubrique ECLAIRAGE -Article sur l'uranium des phosphates - Sophie GABRIEL et Florian FIZAINÉ.

<sup>8</sup> Voir par exemple l'article de Masao Tamada publié en 2009 "Current status of technology for collection of uranium from seawater" dans lequel il est annoncé un taux de récupération de 4 grammes par kg d'adsorbant en 2 mois ce qui correspond à la fabrication (ou au recyclage), la manipulation et au traitement de 90 millions de tonnes d'adsorbants par an.

<sup>9</sup> <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/iaea-increases-projections-for-nuclear-power-use-in-2050>.



qui peut paraître comme une prévision excessive. Mais même en supposant un taux de croissance de seulement 1 % par an à partir de 2050, qui conduit à une CPN installée de 1000 GWe en 2100 (2,6 fois celle d'aujourd'hui), on arrive à une consommation cumulée de l'ordre de 9 millions de tonnes d'uranium en 2100 ce qui dépasse les ressources identifiées aujourd'hui à un coût d'extraction inférieur à 260 \$/KgU.

Ces tensions pourraient donc apparaître au tournant de ce siècle sur cet approvisionnement en uranium naturel, mais de façon assez progressive. Cela devrait laisser du temps pour rechercher des ressources insoupçonnées dans l'état actuel des connaissances géologiques, en redynamisant les efforts de prospection, ou des gisements à plus faible teneur en uranium à l'aide de technologies d'extraction plus efficaces. Mais cette extension possible des ressources accessibles en uranium ne pourra se réaliser que moyennant une augmentation significative des coûts de l'uranium qui peut affecter sensiblement la compétitivité de l'énergie nucléaire. Autrement dit, il serait bien imprudent de miser sur des découvertes majeures de nouvelles ressources en uranium susceptibles de modifier radicalement cette échéance.

En définitive, il apparaît donc qu'une **raréfaction de ces ressources en uranium économiquement exploitables se profile à la fin de ce siècle ou au début du siècle prochain**, compte tenu des données disponibles actuellement sur les ressources en Unat, et des prévisions même les plus raisonnables du développement mondial de l'énergie nucléaire. Cette situation pourrait conduire à cet horizon à des tensions sur les approvisionnements en Unat, et ceci d'autant plus que cette échéance inéluctable d'épuisement des ressources exploitables en uranium sera forcément précédée par un phénomène d'anticipation de la part des producteurs d'énergie. En effet, ceux-ci ne voudront pas se lancer dans la construction de nouveaux réacteurs nucléaires s'ils n'ont pas suffisamment d'assurance de pouvoir les alimenter en combustible à des prix raisonnables pendant leur durée de fonctionnement. Il est utile de rappeler à cet égard qu'un EPR est conçu pour produire de l'électricité pendant au moins 60 ans et que pendant cette longue période il doit avoir la garantie de pouvoir s'alimenter en uranium.

**D'où la nécessité de mettre en place dès maintenant un programme de déploiement de RNR à une échelle industrielle.**

#### **2.4 - Les RNR : à quelle échéance ?**

Les études des scénarios de déploiement des RNR n'est pas simple du tout car elles doivent prendre en compte de nombreux paramètres sur lesquels il faut faire des hypothèses qui ne sont pas forcément faciles à élaborer et qui sont par nature discutables. Nous citons ci-après ces principaux paramètres, mais auparavant, il importe de rappeler que dans la phase de démarrage d'un parc de RNR) on utilise le plutonium issu du traitement du combustible des réacteurs à eau (ou éventuellement du plutonium séparé déjà disponible en stock). Un **cœur de RNR nécessite environ 6 à 8 tonnes de plutonium<sup>10</sup> pour un GWe installé** et au total une **quinzaine de tonnes** au minimum dans l'ensemble du cycle en prenant en compte les matières immobilisées à la fabrication, en réacteur, au refroidissement et dans l'usine de recyclage et de fabrication des combustibles contenant la matière fissile récupérée par ces opérations (combustible MOX). Si le RNR est isogénérateur, il fabrique le plutonium nécessaire à sa propre consommation et, une fois démarré, il ne consomme plus que de l'uranium appauvri. Dans ce cas, le démarrage de nouveaux RNR repose sur un nouvel apport de plutonium issu des réacteurs à eau. Si le réacteur est surgénérateur, il fabrique plus de plutonium qu'il n'en consomme et le

---

<sup>10</sup> Chiffre valable pour du plutonium de composition isotopique égale celle du plutonium contenu dans des combustibles usés de type REP, qui est typiquement de l'ordre de 50 à 55 % de Pu239, 23 à 24 % de Pu240, 13 à 15 % de Pu241, 5 à 7 % de Pu242.

plutonium excédentaire peut être utilisé pour démarrer d'autres RNR. Citons maintenant les principaux paramètres de ces études de scénarios :

- prévisions concernant la **capacité installée du parc nucléaire**, pour lesquelles on trouve de multiples hypothèses et scénarios, tant au niveau de chaque grand pays nucléaire (avec en premier lieu la France) qu'au niveau international avec notamment quelques organismes internationaux tels que l'AIEA, l'OCDE-AEN, l'AIE, le GIEC ou encore le WEC et même des sociétés privées telles que BP ou Global data<sup>11</sup>. Notons sur ce point la forte disparité des chiffres indiqués dans les différentes publications, qui montre la grande fragilité des prévisions, tout au moins au niveau mondial,
- **gain de régénération** des RNR, **GR**, qui mesure l'excès de plutonium créé dans le cœur de réacteur (cœur actif et couvertures) par rapport à la quantité consommée, qui peut varier avec le temps et qui dépend des modèles de RNR retenus<sup>12</sup>,
- temps de refroidissement des combustibles usés avant traitement et temps de traitement puis de recyclage des matières fissiles récupérées, qui conditionnent **l'inventaire en matière fissile mobilisé dans le cycle**, **Mcy**, et qui peut également varier avec le temps,
- **temps de doublement**, **TD**, qui, comme on l'a vu, est le temps au terme duquel un RNR a produit une quantité suffisante de Pu239<sub>éq</sub> pour pouvoir démarrer un nouveau RNR de même puissance, et qui dépend de GR et de Mcy,
- **capacités de traitement de combustibles** qui sont différentes selon le type de combustible traiter, uranium, MOX-RNL, MOX-R NR, et qui sont nécessairement contraintes
- **qualité isotopique du plutonium**, synthétisée par la notion de « plutonium-239 équivalent » déjà évoquée, qui varie beaucoup selon les types de réacteurs, et leurs proportions respectives qui évolue dans le temps,
- **stratégie de gestion des combustibles usés et de recyclage des matières fissiles**, notamment moxage des REP et traitement des combustibles MOX usés, en lien avec le traitement des combustibles usés issus des RNR,
- et enfin, **date de démarrage postulée des premiers RNR industriels**. Sur ce point il importe de rappeler qu'en France, il s'est écoulé 20 ans entre le démarrage du premier réacteur expérimental Rapsodie en janvier 1967 et la mise en service du premier grand RNR industriel Superphénix en janvier 1987. Encore faut-il souligner que ce programme ambitieux a pu être réalisé grâce à l'impulsion très volontariste des grands décideurs de l'époque, et qu'il s'est déroulé dans un contexte réglementaire et économique bien différent de ce qu'il est de nos jours. Malgré les progrès dans les méthodes et outils de conception, il n'est pas déraisonnable de penser qu'il faudrait aujourd'hui davantage de temps pour effectuer le même parcours.

Pour les besoins de ce document de synthèse, on a analysé une bonne vingtaine de ces études de scénarios, publiées en France (et quelques-unes au Etats-Unis) depuis de début des années 2000. On peut en tirer les enseignements suivants et en ne retenant que les scénarios les moins extrêmes concernant les hypothèses faites sur chacun des paramètres indiqués ci-dessus. Les principaux enseignements que l'on peut tirer de cette analyse peuvent se résumer de la façon suivante :

- La période de **transition entre les RNL et les RNR est au grand minimum de 60 à 70 ans**, même dans les scénarios qui envisagent un taux de pénétration des RNR aussi élevé que possible et de très bonnes performances de ces RNR en termes de temps de doublement. La principale raison est que le rythme de déploiement des RNR est limité par les capacités de traitement des combustibles raisonnablement envisageables mais elle peut être surtout

---

<sup>11</sup> Nous excluons bien entendu ici les ONG de type Greenpeace pour lesquelles il est inutile de mener cette analyse !

<sup>12</sup> Essentiellement le type de fluide caloporteur (sodium, plomb, gaz) et de combustible (oxyde, métal, carbure) mais aussi de l'agencement du cœur, avec notamment la présence ou non de couvertures.

freinée par la **disponibilité du plutonium**. Dans les cas d'une forte croissance de la demande d'énergie nucléaire, cette contrainte limite le taux d'introduction des RNR et peut donc conduire à poursuivre la mise en service de RNL à la place de RNR qui ne peuvent démarrer faute de quantités suffisantes de plutonium pour les alimenter.

- Plus le **gain de régénération** est élevé plus le déploiement des RNR peut être rapide, ce qui est logique, mais **l'effet ne devient sensible qu'à très long terme** compte tenu des constantes de temps très étendues qui caractérisent l'effet multiplicatif de la surgénération (temps de doublement).
- Au plan mondial et sur le long terme (> 2100) on ne peut **stabiliser la demande cumulée en uranium naturel à un niveau inférieur à 15 millions de tonnes que si les RNR commencent à être déployés AVANT LE MILIEU DE CE SIECLE et pour une croissance relativement modérée du nucléaire**. Pour fixer les idées, on peut se référer à l'un des scénarios considérés dans l'étude prospective sur les besoins mondiaux en énergie<sup>13</sup> dans lequel le nucléaire prend une part significative mais non excessive, avec une production en 2050 égale à 2,5 fois celle d'aujourd'hui, soit 6500 TWhe (elle est d'environ 2600 TWhe en 2021) et 15 000 TWhe en 2100 scénario « C2 ». Ce scénario a été étudié par le CEA<sup>14</sup> et les résultats montrent bien que cette stabilisation apparaît dans la première moitié du siècle prochain.
- En dehors des stocks existants de plutonium séparé (qui n'existent qu'en France et au Royaume Uni), **seul le traitement des combustibles usés des RNL permet le démarrage des RNR**. Quelques-uns pourraient néanmoins être démarrés avec de l'uranium enrichi (RNR-U235), pour pallier le manque provisoire de plutonium. Mais cela devrait rester une exception coûteuse et l'intérêt d'une telle option en termes de limitation de la consommation cumulée d'uranium est limité dans le cas de scénarios de croissance modérée de parc nucléaire. A titre indicatif on peut citer ici une étude<sup>15</sup> récente qui montre que le recours aux RNR-U235 pour compenser le déficit momentané de plutonium permet de réduire d'environ 10 % seulement la quantité cumulée d'Unat consommée à l'horizon 2100 pour des scénarios de croissance modérée du parc nucléaire mondial (multiplication par un facteur 2,5 de la puissance installée aujourd'hui). Ce gain atteint tout de même un tiers à l'horizon 2150, mais cette échéance est trop lointaine pour qu'un tel résultat puisse s'intégrer dans un choix stratégique.
- La **longue période de coexistence entre RNL et RNR** dans les parcs nucléaires du futur demandera de la flexibilité qui pourra en partie être assurée par un traitement bien adapté éventuellement modulaire des combustibles usés permettant de **traiter simultanément ou successivement des combustibles provenant des RNL et des RNR** dans des installations mixtes ou dédiées. La mise en œuvre de ces installations devra être anticipée longtemps à l'avance (une dizaine d'années).

Ces résultats se transposent au cas de la France en tenant compte de ses spécificités, notamment celle de posséder aujourd'hui un stock important de plutonium séparé (environ 60 tonnes) et de disposer de technologies et de capacités industrielles de traitement-recyclage très largement éprouvées. Toutes ces études montrent le grand bénéfice qu'il y aurait à engager dès maintenant un programme

---

<sup>13</sup> "Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond" – Joint study of International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) and World Energy Council (WEC) – 1996

<sup>14</sup> Etude CEA présentée à la conférence GLOBAL 2009 : "A Long term prospective on the electronuclear fleet: from GEN II to GEN IV"

<sup>15</sup> « Deployable nuclear fleet based on available quantities of uranium of uranium and reactor types - the case of fast reactors started up with up with enriched uranium" – Anne Baschwitz et col. – EPJ Nuclear Sciences & Technology - 2016

ambitieux de développement des RNR à une échelle industrielle, avec pour objectif un début de mise en service des premiers grands réacteurs avant 2050. Cela passe évidemment par la réalisation à brève échéance d'un démonstrateur mais aussi par l'élaboration d'une stratégie permettant de préparer les adaptations nécessaires des outils industriels du cycle du combustible, notamment pour le traitement des combustibles usés des RNR.

## **CONCLUSION GENERALE**

Aux termes de cette analyse, il apparaît clairement que **les RNR** (qui doivent être au moins isogénérateur de plutonium) constituent **l'unique possibilité de maintenir durablement la production d'énergie nucléaire**, s'ils sont déployés industriellement avant le milieu de ce siècle. Dès lors que l'on suppose que l'énergie nucléaire est amenée à se développer, même à un rythme modeste, on se dirige inéluctablement vers son extinction progressive au-delà de ce siècle faute de quantités suffisantes de ressources d'uranium naturel économiquement exploitables. Or, étant donné la grande inertie qui caractérise la mise à l'équilibre de ces systèmes et compte tenu des constantes de temps liées la mise en œuvre industrielle des installations nucléaires, **il est urgent de mener une nouvelle réflexion stratégique pour faire en sorte que les RNR soient déployés le plus tôt possible** faute de quoi ils ne seront pas au rendez-vous.

**La France possède aujourd'hui les meilleurs atouts au monde** pour lancer dans les meilleurs délais un programme volontariste sur cette filière. D'abord avec sa grande **maitrise de la technologie des RNR** au sodium qui est certainement parmi les plus étendues au monde. Ensuite son **expérience unique sur le traitement de combustibles usés et le recyclage du plutonium** qu'elle a acquise depuis plus de 30 ans. Enfin par la **possession sur son territoire de plutonium séparé** en quantités suffisantes pour pouvoir démarrer sans attendre plusieurs RNR (4 ou 5). Il faut ajouter à cela le fait qu'elle détient sur son sol de **grands stocks d'uranium appauvri** (plus de 330 000 tonnes à ce jour) qui constituent le « carburant » des RNR une fois leur équilibre atteint, et qui assure donc la production totalement autonome d'énergie nucléaire pour des milliers d'années. **AUCUN PAYS AU MONDE ne rassemble de tels atouts.**

La technologie existe, les compétences aussi. Reste la volonté politique qui elle, n'est pas assurée.