

Les réacteurs surgénérateurs : une évidence

3^{ème} partie : le futur

Dominique GRENECHE

1 – Pourquoi développer les RNR ?

La finalité principale des Réacteurs à Neutrons Rapides régénérateurs (RNR) est de permettre à terme de remplacer les réacteurs nucléaires actuels à neutrons lents (RNL), nos réacteurs à eau pressurisée, qui n'utilisent qu'environ 0,5 % l'Uranium naturel (Unat) pour produire de l'énergie. Or, les ressources économiquement exploitables d'Unat s'épuiseront et il importe donc d'agir dès maintenant pour pouvoir déployer les RNR surgénérateurs qui, comme analysé dans les deux articles publiés précédemment¹, permettent d'utiliser la totalité de l'Unat (via sa transformation progressive en Pu), ouvrant la voie à une énergie nucléaire durable en multipliant d'un facteur 100 son potentiel énergétique.

Nous ne traiterons pas dans cet article d'un autre intérêt des RNR, leur capacité à réduire fortement les quantités de déchets radioactifs à vie longue, constitués par les « actinides mineurs » (Américium, Neptunium, Curium)². Ils sont aujourd'hui mélangés aux produits de fission (PF) dans les déchets ultimes vitrifiés destinés au stockage géologique. Ils concentrent, au-delà d'un temps de stockage de 500 ans (les PF ont disparu par décroissance radioactive), la quasi-totalité de la radiotoxicité à long terme. En effet les neutrons rapides (de forte énergie) des RNR produisent nettement moins de ces radionucléides et offrent la possibilité de détruire efficacement une bonne partie d'entre eux (par transmutation nucléaire, appelée parfois « incinération »). La faisabilité de ce processus a été démontrée, notamment en France.

2 - Les programmes mondiaux

Un accord international de coopération en matière de développement des RNR a vu le jour en 2001: le Forum International Génération IV (GIF) qui rassemble 13 pays³. Euratom, également dans le cadre de cet accord, supervise et soutient les travaux des pays membres de l'Union Européenne dans la perspective d'un nucléaire durable, notamment au travers de sa plateforme technologique (SNETP) mise en place en 2007, avec une forte participation de la France. Le programme INPRO de l'AIEA procure par ailleurs les informations sur les stratégies et les programmes de la Chine et du Japon⁴.

Les pays peuvent être classés en catégories :

1. Les pays engagés de façon volontariste dans le développement d'un parc de RNR : Russie, Chine et Inde (avec des moyens inégaux).
2. Les pays qui ont nettement différé la date de ce développement : la France⁵ et le Japon⁶.
3. Les pays nucléaires avec un passé R&D important, mais sans stratégie nationale pour le déploiement de RNR : USA⁷ et Grande Bretagne.

¹ <https://www.pnc-france.org/les-reacteurs-surgenerateurs-une-evidence-1ere-partie/>
<https://www.pnc-france.org/les-reacteurs-surgenerateurs-developpements-passes-et-etat-des-lieux-2eme-partie/>

² « Nuclear Waste Can Be Reduced by Recycling and Transmutation » - Dominique Grenèche - « Encyclopedia of nuclear energy »

³ Les partenaires sont : Canada, Chine, Euratom, France, Japon, Corée, Afrique du sud, Russie, et USA. On trouvera dans le dernier rapport annuel (2020) du GIF une très bonne synthèse technique et programmatique sur les RNR, notamment sur les 3 options étudiées aujourd'hui : sodium, plomb et gaz.

⁴ « 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.

⁵ La décision d'interrompre le projet de réacteur de démonstration ASTRID (isogénérateur), avec report en seconde moitié du siècle

⁶ Gel suite à l'accident de Fukushima

⁷ Les USA s'interdisent en effet le retraitement des combustibles usés et n'ont pas respecté leur engagement à recycler dans les REL leurs stocks de plutonium militaire. Natrium, futur réacteurs RNR sodium utilisera l'uranium enrichi comme combustible !

La France, qui fut incontestablement le leader mondial du développement des RNR jusqu'au tournant du siècle dernier a malheureusement perdu ce rang par manque de continuité des politiques énergétiques nationales. Mais elle occupe encore une place unique dans les technologies du traitement et du recyclage des combustibles, au niveau industriel, et majeure par l'expérience acquise d'exploitation d'installations préindustrielles. Seuls des efforts soutenus de R&D dans ce domaine stratégique lui permettront de retrouver sa place.

3 – Les réserves d'uranium naturel (Unat) : quelles perspectives ?

L'importance des réserves est bien sûr fonction du coût d'extraction d'un minerai, en général peu chargé en uranium. L'AIEA-OCDE suit dans son « livre rouge » l'évolution de ces réserves⁸. Alors que l'uranium se négocie sur le marché entre 50 et 100 \$/KgU pour les contrats à long terme, avec une tendance récente à la hausse, l'estimation des réserves économiquement exploitables prend en compte un prix inférieur à 130 /kg U.

3-1 : Les ressources « conventionnelles »

Les ressources assurées sont estimées à **6 millions de tonnes d'uranium**, auxquelles s'ajoutent : (i) des ressources « raisonnablement assurées » (4 millions de tonnes), et des ressources présumées (2 millions de tonnes), **soit un total de 12 millions de tonnes représentant l'équivalent de 200 années de consommation par le parc actuellement installé**. En doublant le seuil de prix (< 260 \$/KgU), l'ensemble s'élève à **15 millions de tonnes**.

Des ressources conventionnelles supplémentaires potentielles sont probables, mais leur importance ne peut être estimées car les conditions d'accès et d'extraction en sont hypothétiques et la dynamique de recherche a été très ralentie depuis des décennies.

3 – 2 : Les ressources non conventionnelles

Ce sont des ressources à très faible teneur en uranium ou dont l'uranium n'est récupérable qu'en tant que sous-produit ou coproduit mineur⁹. Leur apport serait marginal, avec des flux par nature limités par le flux de production de la ressource principale pour les seconds¹⁰.

Une deuxième ressource, déjà disponible, est l'uranium appauvri issu des usines d'enrichissement. Le stock mondial est d'environ de 2 millions de tonnes, dont 330 000 tonnes en France, et sa teneur résiduelle en U235 est en moyenne de 0.25 %, soit le tiers du contenu initial¹¹. Un second passage dans des usines de séparation isotopique permettrait d'obtenir environ 500 000 tonnes d'uranium au niveau mondial, à une teneur en U235 égale à celle de l'Unat (0.71%), mais à condition de disposer de capacités d'enrichissement considérables, avec en conséquence un prix très élevé.

Pour les pays qui disposent d'usine de retraitement des combustibles usés (la France en particulier), l'uranium récupéré (URT) a une teneur légèrement supérieure à celle de l'uranium naturel. Il peut être réenrichi dans des centrifugeuses dédiées¹².

Enfin, il faut mentionner l'extraction théoriquement possible de l'uranium contenu dans l'eau de mer, avec une concentration moyenne d'uranium limitée à un microgramme par kilogramme. Il y aurait ainsi 4,5 milliards de tonnes d'uranium dans l'ensemble des mers et océans, une ressource pratiquement inépuisable. Son exploitation n'est guère réaliste si on tient compte des prix d'extraction, des volumes d'eau à mobiliser, et plus encore de la quantité de matériaux à extraire et traiter¹³, même si des progrès sont annoncés.

⁸ https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_52718/uranium-2020-resources-production-and-demand .

⁹ Roches phosphatées, minerais non ferreux, carbonatite, monazite, schistes noirs, lignite, ou même cendres de charbon

¹⁰ On estime à 4 Mt U le contenu des phosphates, mais le rythme d'extraction est limité par le marché des phosphates

¹¹ En fonction de son prix on appauvrit plus ou moins l'U naturel. Un second passage dans les usines d'ultracentrifugation permet une récupération supplémentaire.

¹² Afin d'éviter une pollution des lignes de production standards par de l'U336 présent dans l'URT en proportions significatives, et également d'une radioactivité plus élevée.

¹³ <https://spectrum.ieee.org/uranium-from-seawater>, et "Current status of technology for collection of uranium from seawater": https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/9789814327503_0026

4 – La demande mondiale.

Elle 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). Elle est actuellement de 61 000 tonnes d'Unat par an (2021)¹⁴, soit 1/200 des réserves conventionnelles pour 400 GWe installés. Si on suppose au cours de ce siècle (jusqu'en 2100) un **taux de croissance de nouvelles capacités de production nucléaire** 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 aux deux tiers des ressources en Unat identifiées ou raisonnablement assurées aujourd'hui à un coût inférieur à 230 \$/Kg**. Cette projection est pourtant nettement inférieure à celle proposée par l'AIEA dans son hypothèse haute¹⁵ et n'intègre pas une production nucléaire dédiée à la chaleur¹⁶.

La comparaison de cette demande aux réserves conventionnelles, quelques soient les incertitudes sur les futures constructions de réacteurs, montre qu'elles ne sont pas durables avec les réacteurs de 3^{ème} génération actuels. Une raréfaction des ressources en uranium naturel économiquement exploitable se profile potentiellement dès la fin du siècle alors que la croissance du nucléaire semble aujourd'hui inéluctable. Le risque industriel est d'autant plus évident que les réacteurs modernes sont conçus pour être exploités au minimum 60 à 80 ans.

Une première conclusion est qu'il va être nécessaire de relancer les efforts de prospection et de s'adapter à des teneurs plus faibles en uranium. On peut s'attendre à une augmentation significative des coûts de l'uranium, qui peut affecter la compétitivité de l'énergie nucléaire, mais seulement à long terme car le coût de l'Unat reste faible dans le coût du kWh (environ 3,5 %). Mais il serait bien imprudent de miser sur des découvertes majeures de nouvelles ressources en uranium susceptibles de modifier radicalement cette échéance. compte tenu des données disponibles actuellement.

La seconde conclusion est qu'une situation de pénurie potentielle sera anticipée par investisseurs, ce qui induira une grande prudence de leur part avant d'engager de nouveaux projets.

5 - Les RNR : à quelle échéance ?

Nous avons vu que des stocks considérables d'uranium appauvri sont sortis des usines de séparation isotopique, en particulier en France (320 000 tonnes en 2022). Or cet uranium « fertile » peut être transmuté en plutonium « fissile » dans les réacteurs surgénérateurs de 4^{ème} génération.

Pour démarrer un tel réacteur il faut disposer d'un stock de plutonium 239 qui est extrait des combustibles usés des réacteurs actuels. Il faut en charger **6 à 8 tonnes dans un RNR d'un GW**. Mais, en tenant compte des tonnages immobilisés, en amont pour la fabrication des combustibles (MOX : combustible mixte U/Pu) et à l'aval dans la récupération du Pu résiduel, c'est une quinzaine de tonnes qui est requise au total. Si le RNR est isogénérateur, il fabrique alors le Pu nécessaire à sa propre consommation et ne consomme plus que de l'uranium appauvri. Si le réacteur est surgénérateur, il fabrique plus de Pu qu'il n'en consomme et le Pu excédentaire peut être utilisé pour démarrer d'autres RNR.

Une planification de l'introduction de RNR en complément puis remplacement des réacteurs actuels fait ainsi appel à de nombreux paramètres et à une modélisation complexe :

- Évolution de la capacité installée du parc nucléaire, pour lesquelles on trouve de multiples hypothèses et scénarios¹⁷ avec des prévisions fragiles, en particulier au niveau mondial.

¹⁴ Elle est de 23 tonnes d'Unat par TWh produit, la production nucléaire ayant été de 2650 TWh en 2021

¹⁵ <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/iaea-increases-projections-for-nuclear-power-use-in-2050>.

¹⁶ Avec des réacteurs calogène l'hypothèse haute de l'AIEA conduirait à 1350 GWe en 2100.

¹⁷ Par pays nucléaire ou au niveau international (AIEA, OCDE-AEN, AIE, IGIEC, WEC) et même des sociétés privées telles que BP ou Global data.

- Gain de Régénération (GR), et donc excès de Pu créé dans le cœur de réacteur¹⁸ par rapport à la quantité consommée, selon les modèles de RNR retenus¹⁹.
- Inventaire en Matière fissile mobilisé dans le cycle (Mcy) en amont et aval du réacteur.
- **Temps de Doublement (TD)**, temps qui dépend de GR et de Mcy, au terme duquel un RNR a produit une quantité suffisante de plutonium pour pouvoir démarrer un nouveau RNR de même puissance, tout en continuant sa production.
- **Capacités de traitement des combustibles** selon le type de combustible.
- **Qualité isotopique du Pu**, synthétisée par la notion de « Pu-239 équivalent », variable selon les types de réacteurs, et qui évolue dans le temps.
- **Stratégie de gestion des combustibles usés et de recyclage des matières fissiles**, qui impacte les évolutions d'un parc actuel vers un parc RNR.
- **Date de démarrage estimée des premiers RNR industriels.**

Nous sommes sur des technologies du temps long et il faut rappeler qu'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, grâce à une impulsion très volontariste des décideurs de l'époque. Mais les freins réglementaires n'ont fait que croître depuis.

D'une vingtaine d'études de scénarios publiées depuis le début des années 2000, en France et aux Etats-Unis, on peut tirer les enseignements suivants :

→ La période de **transition entre les réacteurs actuels et les RNR sera d'au moins 60 à 70 ans**, même dans les scénarios les plus optimistes : le rythme de déploiement des RNR est limité par les capacités raisonnablement envisageables de traitement des combustibles, et surtout par la **disponibilité du Pu**.

→ Plus le **gain de régénération** est élevé plus le déploiement des RNR sera rapide, mais seulement à **long terme** compte tenu du temps de doublement, qui est long (il se chiffre en décennies), et à l'issue duquel un réacteur supplémentaire peut être mis en service.

→ **La demande cumulée en uranium naturel ne pourra être limitée à un niveau inférieur à 15 millions de tonnes que si les RNR commencent à être déployés AVANT LE MILIEU DE CE SIECLE et seulement pour une croissance relativement modérée du nucléaire²⁰.**

→ **Seul le traitement des combustibles usés des réacteurs actuels permet le démarrage des RNR, sauf à démarrer, ce qui est coûteux, avec un cœur à uranium enrichi pour compenser le manque initial de Pu.**

→ **La longue période de coexistence entre RNL et RNR** dans les parcs nucléaires du futur demandera de la flexibilité : traitement modulaire ? Traitement simultané ou successif des combustibles des deux générations dans la même installation ? La mise en œuvre de ces installations devra être anticipée d'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 Pu déjà 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 ambitieux de développement des RNR à une échelle industrielle, avec pour objectif un début de mise en service des premiers grands réacteurs vers 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

¹⁸ Le PU est extrait des combustibles usés du cœur (MOX) et de la couverture fertile en U appauvri)

¹⁹ Les variables sont le caloporteur (sodium, plomb, gaz), le combustible (oxyde, métal, carbure), l'agencement du cœur.

²⁰ Lire par exemple les deux documents "Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond" (Joint study of International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) and World Energy Council (WEC) – 1996) et Étude CEA présentée à la conférence GLOBAL 2009: "A Long term prospective on the electronuclear fleet: from GEN II to GEN IV" avec une production en 2050 égale à 2,5 fois celle d'aujourd'hui en 2050 et (elle est d'environ 2600 TWh en 2021) et 15 000 TWh en 2100 scénario « C2 ». Ce scénario a été étudié par le CEA

adaptations nécessaires des outils industriels du cycle du combustible, notamment pour le traitement des combustibles usés des RNR et des déchets ultimes.

6 – CONCLUSION : Vision et volonté politique

Aux termes de cette analyse, il apparaît clairement que **les RNR** (qui doivent être nécessairement surgénérateurs) constituent **l'unique possibilité de maintenir durablement la production d'énergie nucléaire**. Un développement de l'énergie nucléaire au niveau mondial, très clairement en faveur du climat, conduit inéluctablement à un épuisement des ressources en Unat. Cette problématique se retrouve dans toutes les technologies de production d'électricité (terres rares, lithium, cuivre, ...). 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 étudiés et qualifiés 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 :

- Elle a acquis une grande **maitrise de la technologie des RNR** au sodium et une **expérience unique sur le traitement de combustibles usés et le recyclage du Pu**.
- Elle dispose déjà sur son territoire d'un stock de Pu suffisant pour pouvoir démarrer plusieurs RNR (4 ou 5)²¹, sans attendre
- Elle détient sur son sol de **grands stocks d'uranium appauvri** (plus de 330 000 tonnes à ce jour)²² qui constituent le « carburant » des RNR une fois leur équilibre atteint.

Elle pourrait être donc autonome pour des milliers d'années, ce qui est unique. Technologie, expérience acquise, compétences R&D et industrielle sont là ! Reste la volonté politique.

NB. : Nous ne traitons pas dans ce texte de la filière thorium, aujourd'hui faiblement développée (en Inde essentiellement). Par ailleurs les projets de réacteurs innovants, actuellement très à la mode avec par exemple les réacteurs à sels fondus, ne sont pas traités car trop prospectifs encore. Ils sont loin d'avoir la maturité des RNR à caloporteurs sodium et nécessitent des développements importants du cycle du combustible, amont comme aval.

²¹ Voir : <https://www.recna.nagasaki-u.ac.jp/recna/en-fmdata/pu-2018>

²² Le stock mondial de Pu civil séparé est de 366 tonnes essentiellement dans 5 pays : Grande Bretagne (110 t), Russie (91 t), France (65 t), USA (50 t), Japon (47 t). Peuvent s'ajouter les stocks de Pu « militaires » en Russie (94 t) et aux USA (38 t).