

Représentation 3D du jumeau numérique du micro-générateur XAMR de NAAREA (Source Naarea).

# Pour préparer la relève des EPR à l'horizon 2050, nous devons investir dans les réacteurs à neutrons rapides

**Suzanne Debaille**

Ingénieur Emérite SEE

**Timothée Kooyman**

Directeur Technique Engineering

**Avec un objectif de mise en exploitation d'un parc nucléaire durable à l'horizon 2050, il est nécessaire de lancer dès à présent les développements de prototypes de réacteurs à neutrons rapides.**

**Les réacteurs à neutrons rapides, une clé pour notre indépendance énergétique**

Face aux enjeux climatiques, des parlementaires de tous bords, du PCF à LR, se sont unis en 2024 pour appeler à la relance du programme français de réac-

teurs nucléaires à neutrons rapides, clé de notre indépendance énergétique.

En effet, les RNR <sup>1</sup> offrent une voie durable pour utiliser au mieux les ressources en uranium et en plutonium, permettant

<sup>1</sup> Réacteur à neutrons rapides

une utilisation quasi totale du combustible et réduisant ainsi notre dépendance aux importations.

Ces réacteurs de quatrième génération sont alimentés par du plutonium et de l'uranium appauvri. Avec les réserves actuelles en uranium appauvri, estimées à 350 000 tonnes en France selon l'ANDRA ●●●

- (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs), ils permettent de nous assurer plusieurs siècles d'indépendance énergétique, sans recours aux extractions minières <sup>2</sup>. De plus, ces réacteurs ont la capacité unique de brûler les déchets à vie longue produits par les réacteurs conventionnels, transformant des éléments hautement radioactifs en déchets à vie plus courte et plus faciles à gérer. Cela représente une réelle avancée pour la gestion des déchets nucléaires, réduisant les coûts associés au stockage à long terme.

En France, le rapport de la commission d'enquête sur la perte de souveraineté énergétique de la France, insistait sur le rôle crucial du secteur nucléaire dans le mix énergétique français et appelait à des efforts pour accélérer les projets nucléaires et moderniser les installations existantes.

En mars 2024, la commission européenne a lancé l'Alliance industrielle européenne sur les petits réacteurs modulaires SMR <sup>3</sup> afin d'améliorer les collaborations en matière de compétences, d'innovation et de sécurité, renforcer la compétitivité industrielle et garantir une chaîne d'approvisionnement solide dans l'Union européenne.

En parallèle, le plan d'investissement France 2030 a fait émerger, via l'appel à projets « Réacteurs nucléaires innovants », un grand nombre de nouveaux acteurs. Un soutien gouvernemental a été accordé à plusieurs entreprises dont les projets sont de petits réacteurs destinés à être produits industriellement en grande série et installés au plus près des consommateurs que sont les industries de la mobilité, et les industries électro-intensives utilisant de la chaleur industrielle.

2 Le poids énergétique de l'uranium par rapport au gaz, charbon et pétrole, représente seulement 7 % des quantités d'énergie disponibles dans le monde. S'il était utilisé dans les réacteurs rapides capables de brûler complètement l'uranium, cette part représenterait 90 % de l'énergie disponible dans le monde, loin devant le charbon (5,5 %), le pétrole (2,5 %) et le gaz (2 %).

3 SMR : *Small Modular Reactor*

**“ Les neutrons émis lors de la fission d'un actinide (comme l'uranium, le thorium ou le plutonium) ont initialement une vitesse élevée qui limite la probabilité qu'ils interagissent avec la matière fissile et conduisent à une réaction en chaîne. ”**

## Les réacteurs à neutrons rapides : mode de fonctionnement et intérêt

Le principe de fonctionnement des réacteurs nucléaires est d'entretenir et de contrôler une réaction de fission en chaîne. La fission est la faculté que présentent les noyaux d'éléments lourds de la famille des actinides (uranium, plutonium...) de se scinder, sous l'impact d'un neutron, en deux noyaux plus petits appelés « produits de fission ». Chaque fission s'accompagne d'une importante libération d'énergie et de l'émission de deux à trois neutrons qui pourront, à leur tour, provoquer une nouvelle fission et entretenir la réaction. Les neutrons émis lors de la fission d'un actinide (comme l'uranium, le thorium ou le plutonium) ont initialement une vitesse élevée qui limite la probabilité qu'ils interagissent avec la matière fissile et conduisent à une réaction en chaîne.

Une première solution est de les ralentir par un modérateur (eau, graphite ou eau lourde) qui leur fait perdre leur énergie cinétique par chocs successifs. Ils sont alors appelés neutrons thermiques. Ces neutrons ralentis ont plus de chance de provoquer une fission chez certains noyaux, comme l'uranium 235. Cependant, la probabilité de capture stérile (c'est-à-dire les captures ne donnant pas lieu à une nouvelle fission) des neutrons par des noyaux présents dans le réacteur est importante. Cette capture limite les possibilités de régénération du combustible et entraîne la production de plutonium 239 qui est réutilisable pour fabriquer du combustible appelé MOX (*Mixed Oxide fuel*).

L'autre solution est de choisir délibérément de ne pas incorporer de modérateur. On a alors des neutrons rapides, dont l'énergie est élevée. Ceux-ci ont l'avantage de faire fissionner tous les noyaux lourds et non les seuls matériaux fissiles. L'utilisation de neutrons rapides limite également les captures stériles ce qui tend à améliorer l'efficacité du réacteur.

Ces systèmes à neutrons rapides permettent la fermeture complète du cycle du combustible par un multi-recyclage du plutonium, permettant ainsi de préserver les ressources en uranium alors que dans les réacteurs actuels, le recyclage du plutonium est limité à un cycle sous la forme de combustible MOX.

La probabilité d'interaction entre un neutron et un noyau étant plus faible en spectre rapide, il est donc nécessaire d'avoir un cœur plus enrichi en matériau fissile constitué soit d'uranium très enrichi, soit de plutonium, pour maintenir la réaction en chaîne. Le plutonium qui est produit dans les réacteurs à neutrons thermiques constitue le combustible de choix pour les réacteurs à neutrons rapides, dits de 4<sup>ème</sup> génération.

Par ailleurs, des matériaux fertiles peuvent être disposés en périphérie du cœur (on parle de « couverture fertile ») de manière à utiliser les neutrons de fuite. C'est le principe de la surgénération : récupérer les neutrons sortants pour transmuter un matériau a priori inutilisable (fertile mais non fissile) en matériau fissile.

## Les réacteurs à neutrons rapides : le complément des réacteurs à eau pour un nucléaire durable et pour économiser l'uranium

La justification économique du réacteur à neutrons rapides vient surtout de sa capacité à générer ou régénérer du plutonium en plus de l'énergie produite, ce plutonium pouvant ensuite être en partie réutilisé dans le réacteur, recyclé en plutonium militaire, ou transformé en combustible MOX (mélange d'uranium et de plutonium).

La grande majorité des 435 réacteurs nucléaires actuellement en service dans le monde sont des réacteurs à eau de 3<sup>ème</sup> génération. Ils n'utilisent qu'une partie infime de l'uranium naturel, c'est-à-dire l'isotope fissile <sup>235</sup>U qui n'est présent qu'à hauteur de 0,7 % dans l'uranium naturel. La question de la durabilité des ressources en uranium devient alors une question centrale (figures 1 et 2).

En permettant de valoriser la quasi-totalité de l'uranium, les RNR multiplient par un facteur de l'ordre de 100 l'énergie que l'on peut extraire d'une masse donnée d'uranium naturel et multiplient d'autant la durée de capacité de production. La gestion du plutonium produit dans les réacteurs actuels est un autre facteur conditionnant le développement de l'énergie nucléaire.

Contrairement aux réacteurs actuels, les RNR peuvent utiliser sans limitation le plutonium produit par le parc nucléaire et assurer ainsi sa totale valorisation. Les RNR peuvent donc compléter les réacteurs à eau actuellement en opération, pour fournir de l'énergie aux industries lourdes et favoriser leur décarbonation, en optimisant le cycle du combustible et la gestion des déchets.

Dans ce domaine, la France a un potentiel presque unique au monde, puisqu'elle a décidé initialement de retraiter ses combustibles de réacteurs à neutrons thermiques et qu'elle dispose aujourd'hui de stocks de matières nécessaires pour enclencher le fonctionnement de réacteurs à neutrons rapides. Indépendamment de ces stocks importants, la seule production annuelle de combustibles usés issus du parc actuellement en fonctionnement permettrait d'alimenter chaque année, environ un à deux réacteurs RNR de 1000 MWe.

## Les réacteurs à sels fondus une filière prometteuse mais un faible retour d'expérience

Dans la pratique, les caloporteurs pour les réacteurs à neutrons rapides sont le sodium et ses eutectiques (Na-K), le

plomb et son eutectique (Pb-Bi), le gaz (hélium ou CO<sub>2</sub>), les sels fondus (fluorures ou chlorures).

En France, trois options de caloporteur sont explorées en parallèle, avec les projets RNR suivants :

- le sodium (solutions Hexana<sup>4</sup> et Otrera)
- les sels fondus (solution Naarea<sup>5</sup>, Thorizon et Stellaria)
- le plomb, (solution Newcleo)

La technologie des réacteurs au sodium bénéficie déjà de nombreuses années d'expérience avec les projets Astrid<sup>6</sup> et Phenix<sup>7</sup>. Cependant, la concrétisation des autres filières passe encore par beaucoup de recherches et de démonstrations de sûreté.



4 Cf. article REE 2023-4 : Un concept de réacteurs modulaire à neutrons rapide au service du nucléaire durable.

5 Présentation de la Start-up Naarea in REE 2023-4.

6 Le programme ASTRID (*Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration*) d'étude et de construction d'un réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium a été arrêté fin 2019. Une décision que l'ancien haut-commissaire à l'énergie atomique Yves Bréchet qualifia d'« ânerie historique »

7 La centrale Phénix est un réacteur surgénérateur de démonstration de la filière dite « à neutrons rapides », refroidi au sodium. Ce réacteur a été définitivement arrêté en 2009.

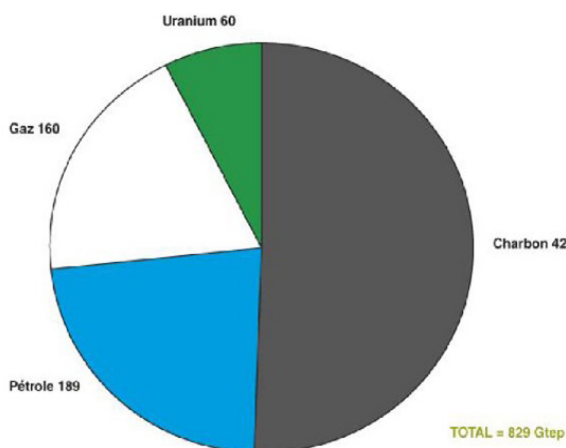


Figure 1 : Poids énergétique de l'uranium par rapport au gaz, charbon et pétrole, si on l'utilise dans les réacteurs à eau actuels (source : Joel Guidez -Les réacteurs rapides, réacteurs du futur).

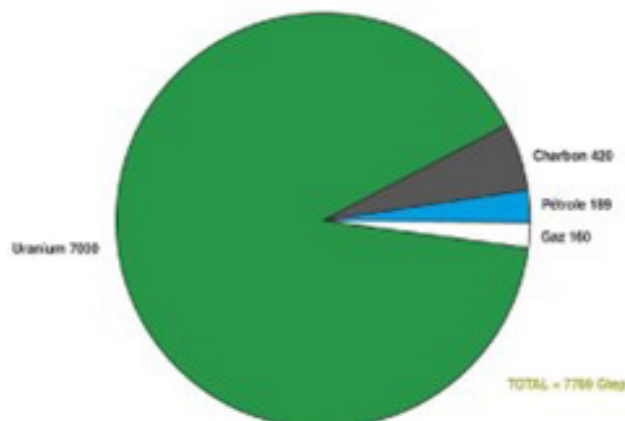
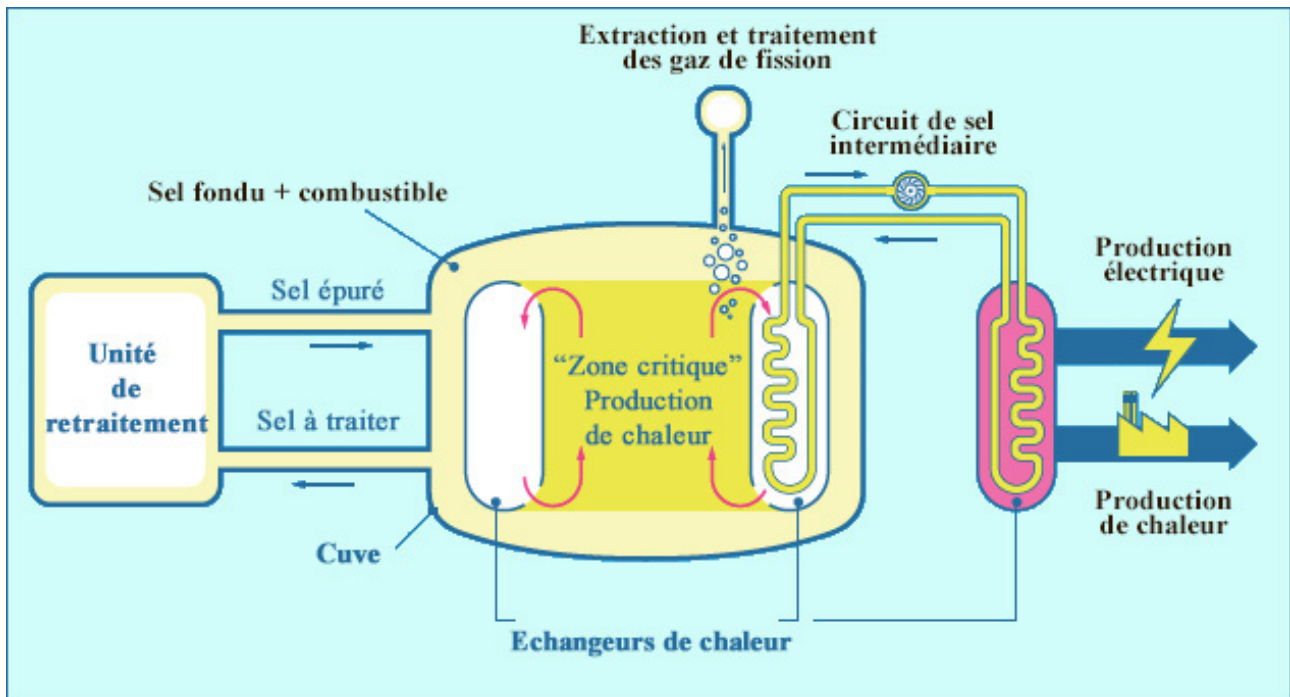


Figure 2 : Poids énergétique de l'uranium si on l'utilise dans les réacteurs rapides (source : Joel Guidez -Les réacteurs rapides, réacteurs du futur).



Figures 3 : Schéma de fonctionnement d'un RNR à sels fondus ((Source: CNRS/IN2P3).

En particulier, les réacteurs à sels fondus présentent un fort potentiel du point de vue de la fermeture du cycle du combustible en facilitant le retraitement du combustible, et du point de vue de la sûreté en bénéficiant du caractère liquide du sel (figure 3). Leur intérêt est que les sels fondus peuvent monter beaucoup plus haut en température que l'eau : 700°C. Cela ouvre des possibilités étendues de cogénération.

Comparé à un réacteur rapide refroidi au sodium, un réacteur à sel fondu présente des caractéristiques plus favorables du point de vue neutronique pour brûler l'ensemble des actinides mineurs. La possibilité de vidanger le réacteur facilite sa maintenance et son maintien à l'état sûr après l'arrêt du réacteur. Il fonctionne à plus haute température, ce qui améliore son rendement thermodynamique mais complexifie la gestion des dilatations et nécessite de maîtriser les phénomènes de corrosion en milieu sel fondu.

De nombreux partenariats à l'échelle nationale et européenne travaillent d'ores et déjà à lever des verrous technologiques dans le domaine des matériaux et de la corrosion en milieu sel fondu. Cependant,

la viabilité industrielle de cette solution reste à démontrer et nécessite la fabrication d'un prototype permettant de valider les choix techniques nécessaires en particulier au niveau des matériaux.

## Les RNR au niveau international

De nombreux projets de RNR sont en exploitation ou en développement à l'international. La Chine, l'Inde, le Japon et la Russie sont les quatre seuls pays exploitant des réacteurs rapides refroidis au sodium, avec les réacteurs CEFR, PFBR, JOYO BN-600 et BN800. Ces quatre pays disposent de programmes de R&D ambitieux complémentaires destinés à fermer le cycle du combustible en utilisant des réacteurs à neutrons rapides.

Outre-Atlantique, un grand nombre de startups travaillent à la conception de réacteurs rapides, la plus avancée étant à l'heure actuelle Terrapower, qui développe à la fois un réacteur rapide refroidi au sodium (le concept Natrium) et un réacteur à sel fondu en spectre rapide (le MCFR). D'autres startups comme Oklo ou Moltex travaillent également sur ce type de réacteurs.

L'Union européenne finance plusieurs projets en lien avec les réacteurs rapides (ALFRED, ALLEGRO, ESFR-SIMPLE) et diverses startups françaises et européennes développent des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (Otrera, Hexana), au plomb (Newcleo, Blykalla) ou à sels fondus (Naarea, Thorizon, Stellaria).

## Conclusion

Il est urgent de reprendre les travaux des filières RNR avant d'être définitivement distancés par les autres nations nucléaires qui en ont bien compris tout l'intérêt. Le moment est venu de dépasser la connaissance académique pour développer des outils industriels et les déployer à l'horizon de 2035, afin d'être en mesure de lancer une filière industrielle à l'horizon 2050, date prévisible des tensions économiques et géopolitiques sur la ressource en uranium.

Des décisions rapides sont attendues pour entamer la construction de prototypes, tandis qu'il faut dimensionner les installations du cycle du combustible pour un déploiement industriel. ■