Institut ied

Energie ■ Développement

Décembre 2018

NUCLEAIRE 4ÈME GENERATION

Réacteurs à Neutrons Rapides : le projet ASTRID

Où en est le prototype de Réacteur à neutrons rapides (RNR) français, dénommé ASTRID, dont la conception a été lancée en 2006 ?

Compte tenu des besoins énergétiques en France et dans le monde, que peuvent apporter les RNR en termes d'économie des ressources, de gestion du cycle du combustible, du traitement des déchets, de l'attractivité de la filière industrielle ? Quelles difficultés présentent-ils en matière de sûreté, de coûts, de mise au point de technologies, de tissu industriel ? Pour enrichir les débats, IED a procédé à une étude sur ce sujet complexe mais cependant crucial pour le pays. Principaux enseignements...

Dans le contexte de lutte contre le changement climatique, des politiques de transition énergétique sont envisagées dans le monde pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. En Europe, elles devraient conduire à des évolutions majeures du mix énergétique. La part des énergies renouvelables devrait augmenter de façon considérable. Atteindre au minimum 35 % d'énergie produite à partir de sources d'énergie renouvelable dans la consommation d'énergie finale d'ici à 2030, tel est l'objectif de l'Union Européenne.

La part des énergies fossiles (charbon, gaz, fioul) devrait diminuer drastiquement à terme dans le mix mondial (aujourd'hui, 85,5 % de la consommation d'énergie primaire selon l'Agence internationale de l'énergie).

En Europe, le parc fossile de production d'électricité est en forte baisse du fait de l'effondrement des prix de gros de l'électricité. Ceci résulte du développement des énergies renouvelables subventionnées et de l'absence d'une réglementation claire sur les réserves de capacité nécessaires. L'éolien et le solaire constituent l'essentiel des énergies renouvelables intermittentes (ENRi) ; mais leurs caractéristiques imposent le recours à des moyens de production pilotables et immédiatement disponibles (biomasse, hydraulique, charbon, gaz, fioul et nucléaire) ; elles posent également un problème de stabilité du réseau électrique dans lequel l'équilibre production-consommation doit être assuré à tout instant.

Dans cette situation, quelle place dans la production d'électricité pour l'énergie nucléaire française ?

La France dispose d'un mix énergétique très peu émetteur de gaz à effet de serre en raison de la place actuelle du nucléaire. Remplacer cette énergie par des ENRi n'est efficace ni du point de vue des émissions de CO_2 ni de celui de l'équilibre production-consommation. Ainsi, même si cette énergie pose des problèmes d'acceptation, liés principalement à la sûreté et à la gestion des déchets, elle doit continuer à jouer un rôle important dans le mix énergétique du futur, estime IED.

LE NUCLÉAIRE D'AUJOURD'HUI ET DE DEMAIN

La place du nucléaire dans l'approvisionnement en énergie de la planète dans le futur dépend de plusieurs paramètres : la disponibilité du combustible, la sûreté d'exploitation, une gestion responsable des combustibles usés et des déchets, la compétitivité du kWh.

Un peu de physique nucléaire : lors de son passage en réacteur, l'uranium (U) subit :

- des réactions de fission qui produisent l'énergie et conduisent à la formation de produits de fission dont une faible proportion est à vie longue. Le potentiel énergétique de ces produits est inexistant, ils sont destinés au stockage géologique.
- des réactions de capture neutronique conduisant à la formation de noyaux plus lourds, tels le plutonium (Pu) et des actinides mineurs (AM). Ces radionucléides sont des éléments à vie longue.

Deux modes de gestion des combustibles usés sont possibles. **Le cycle ouvert** où les combustibles usés sont considérés comme des déchets ultimes, destinés au stockage géologique. **Le cycle fermé** où les combustibles usés sont traités pour séparer les matières valorisables (U et Pu) qui sont recyclées.

Le cycle ouvert est le plus utilisé dans le monde. Les réacteurs à eau légère (REL) consomment de l'U faiblement enrichi. Ils brûlent à peine 0,8 % de l'U naturel. Le Pu est considéré comme un déchet.

En France, le cycle du combustible des REL n'est plus complètement ouvert depuis presque trente ans. Le Pu est recyclé une fois dans les combustibles dits MOX. Mais seuls les RNR, dont le cycle est complètement fermé, recyclent plusieurs fois le Pu.

Le mono-recyclage du Pu dans les REL permet une économie d'U naturel d'environ 12 %. Le multi-recyclage dans les RNR permet une utilisation cent fois meilleure. **On tend donc vers l'utilisation de 100 % de l'U naturel** et la possibilité d'utiliser les stocks existants d'U appauvri (sous-produit de l'enrichissement).

Si le nucléaire doit se développer dans le futur, la question des ressources en uranium se pose (elles sont répertoriées dans le Red Book publié par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique et l'Agence de l'Energie Nucléaire). On distingue les ressources conventionnelles (minières : 18 MtU) de celles non conventionnelles (U extrait avec d'autres minerais tels l'or, le cuivre ou les phosphates : 21 MtU), soit environ 40 MtU au 1er janvier 2015.

Les réserves d'U conventionnelles représentent environ 280 années de fonctionnement si la puissance mondiale installée actuelle est maintenue et sensiblement moins si cette puissance venait à augmenter significativement pour faire diminuer les émissions de gaz à effet de serre. Dans l'hypothèse très volontariste d'une croissance d'au moins un facteur 4 de cette puissance d'ici à 2050, les ressources d'U pourraient être engagées entre 2040 et 2100 (l'uranium engagé par une centrale nucléaire est l'uranium nécessaire au fonctionnement de cette centrale jusqu'à sa mise à l'arrêt- on considère une durée de fonctionnement de 60 ans).

La mise en œuvre de RNR permettrait de prolonger de façon très importante le recours à l'énergie nucléaire. Ainsi en France, le recours au stock existant d'U appauvri assurerait une durée de 5 000 ans pour un parc de même puissance qu'actuellement.

Le cycle fermé présente aussi des avantages **en matière de gestion des déchets.** Le recyclage systématique de l'U et du Pu dans les RNR permet d'utiliser le plutonium comme un combustible plutôt que d'avoir à le traiter comme un déchet. Les RNR ouvrent en outre la voie à l'option de la séparation-transmutation des AM, mais cette option pose des problèmes technologiques difficiles à résoudre et reste un sujet de recherche à très long terme.

HISTORIQUE DES RNR DANS LE MONDE

Les RNR ayant existé et arrêtés, en fonctionnement ou en construction dans le monde sont tous des RNR refroidis au sodium. D'autres filières font l'objet d'études de par le monde à des degrés d'avancement divers. La quasi-totalité du retour d'expérience des RNR concerne la filière refroidie au sodium. Plus de 20 réacteurs ont fonctionné depuis 1951 (EBR1, USA) et représentent plus de 400 années*réacteurs de fonctionnement. En France : Rapsodie 40 MWth (1967-1983), Phénix 250 MWe (1973-2009) et Superphénix 1200 MWe (1985-1997). Le développement initial de la filière a été mené aux Etats-Unis, en France, au Royaume Uni, en URSS et au Japon. Aujourd'hui, la Russie, la Chine et l'Inde portent le développement de cette filière avec 5 réacteurs en fonctionnement et 3 en construction.

Réacteurs en fonctionnement, en construction et en projet

En Russie, BN-600 (560 MWe) est en service depuis 1981 et BN-800 (789 MWe) depuis 2016. BOR-60 (60 MWth) est un réacteur de recherche en service depuis 1969. La construction du réacteur expérimental MBIR (150 MWth) a débuté en 2015. Le pays développe un réacteur BN-1200 à combustible oxyde ou nitrure et travaille sur les RNR refroidis au plomb ou au plomb bismuth.

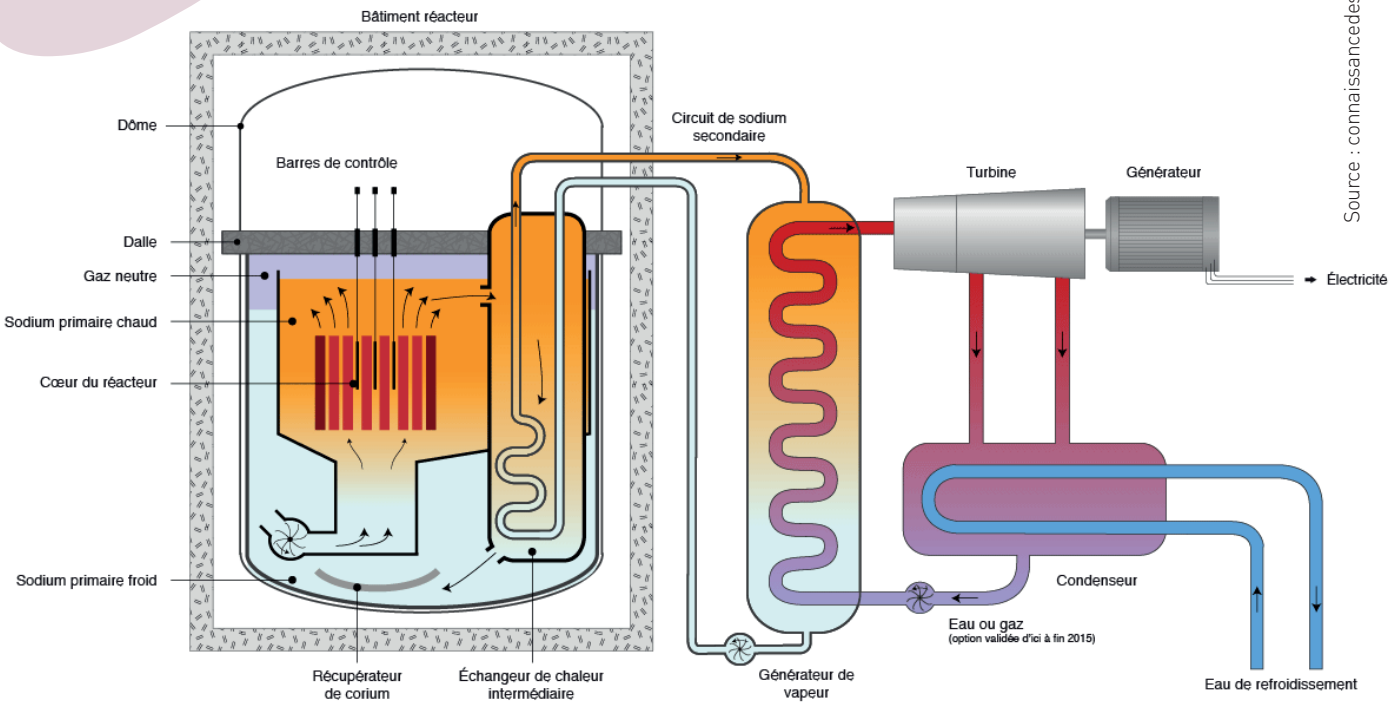
En Inde, un réacteur expérimental FBTR (40 MWth) est en service depuis 1985. Le prototype PFBR (500 MWe) est en construction (mise en service prévue en 2019). Deux autres réacteurs de même puissance sont prévus dont la conception présente des évolutions significatives par rapport au PFBR. La conception d'un réacteur rapide expérimental de 150 MWe a commencé. Doté d'un cœur à combustible métallique, ce réacteur aura pour missions de qualifier industriellement ce type de combustible et de remplacer le réacteur FBTR. Des unités commerciales de 1 000 MWe sont envisagées, avant le passage ultérieur au cycle du thorium.

En Chine, le CEFR (65 MWth), réacteur expérimental, a été mis en service en 2010. La construction d'un prototype, le CFR-600, a débuté en décembre 2017.

Superphénix

LE PROJET ASTRID

SCHÉMA DE PRINCIPE



Source : connaissancedesenergies.org

Objectifs d'ASTRID :

Qualifier des options innovantes dans les domaines de la sûreté et de l'opérabilité et servir de test pour utiliser des techniques d'inspection et de réparations avancées, des capacités de transmutation le cas échéant. Permettre à la France de disposer des éléments nécessaires pour être prête pour un déploiement industriel des RNR, si le projet est jugé nécessaire compte tenu de sa politique de gestion des combustibles usés, de l'état prévu des ressources en U naturel et du mode de gestion des AM.

GENÈSE ET DÉVELOPPEMENT DU PROJET

En 1997, le gouvernement Jospin décide d'arrêter Superphénix, alors que le réacteur vient de fonctionner correctement en 1996.

A partir de 2000, au niveau international, les organismes de R&D - notamment les Etats-Unis, la France et le Japon - lancent le programme Génération 4. Ce programme vise à développer des réacteurs plus performants que les précédents, en particulier dans les domaines de la sûreté, de l'économie des ressources, de la gestion des déchets.

Le CEA, avec l'appui des pouvoirs publics, considère que la stratégie des recherches sur l'énergie nucléaire en France doit s'appuyer sur ce partenariat international, pour permettre de mettre en œuvre une stratégie de recherche plus flexible. La technologie des RNR réunit un large consensus international. Entre 2000 et 2005, les recherches portent sur les filières RNR gaz et RNR sodium avec la perspective d'un choix entre ces deux filières à l'horizon 2015-2020. Le CEA porte principalement son effort sur la filière RNR gaz.

JANVIER 2006 : une accélération considérable du projet

Le président Chirac lance la conception d'un prototype de RNR qui doit entrer en service en 2020. Selon les techniciens et scientifiques, seuls les RNR sodium ont une maturité suffisante pour pouvoir espérer tenir ce planning et permettre une implication plus importante de la part des industriels. La France se focalise sur ce type de RNR et engage un programme de R&D élaboré par le CEA, EDF et Areva. Le RNR gaz devient désormais une filière alternative à développer au niveau européen.

Dans le cadre du programme d'investissements d'avenir, la convention Etat-CEA de septembre 2010 confirme le rôle de maître d'ouvrage du CEA et apporte un financement supplémentaire de 625 M€ au projet... ce qui lui donne les moyens de son ambition pour les premières phases. Le projet comprend principalement les études de conception du réacteur, la réalisation d'installations technologiques de qualification de composants, la conception d'un atelier de fabrication des combustibles, des programmes lourds de R&D (accidents graves et neutronique).

La convention Etat-CEA prévoit une participation financière des partenaires de 20 à 30 % pour la phase initiale, qui devait augmenter dans des proportions significatives (mais non quantifiées) pour les phases ultérieures. Leur participation n'a pas atteint les proportions attendues. Une telle situation, aggravée par les difficultés financières d'Areva, aurait pu être anticipée avant 2010.

Introduction des RNR dans le parc français : des scénarios par paliers

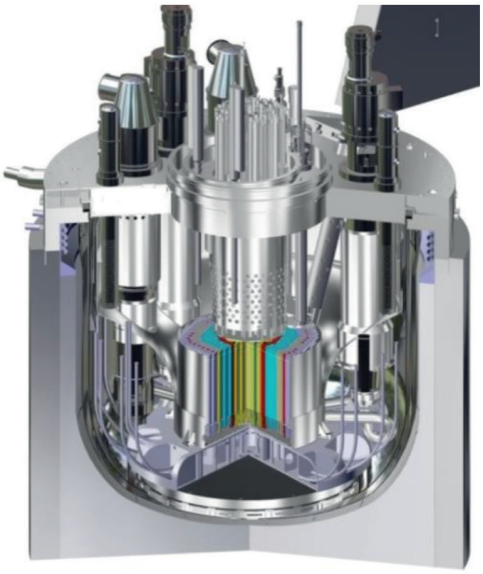
Le CEA et ses partenaires EDF et Areva ont effectué de nombreuses études de scénarios axées sur la question de la gestion durable des matières nucléaires. Ces études sont basées sur un parc de référence Réacteur à eau pressurisée (REP) de 63,2 GWe en cycle ouvert sans recyclage du Pu, produisant annuellement 420 TWh. L'introduction de la filière RNR est réalisée selon plusieurs étapes successives :

Etape 0	parc de référence cycle ouvert. Consommation d'U naturel de 7 600 t/an et production nette de Pu de 10,5 t/an
Etape A	la totalité du Pu est recyclée sous forme de combustibles MOX, situation française actuelle. Les produits de fission et actinides mineurs sont des déchets destinés au stockage profond, les combustibles MOX usés sont entreposés. Consommation d'U naturel de 6 300 t/an et production nette de Pu de 7,4 t/an
Etape B	les combustibles MOX usés sont recyclés, ce qui permet de stabiliser le stock des combustibles MOX REP usés. 3 RNR d'une puissance de 1 000 MWe sont alimentés uniquement par le Pu issu du traitement des combustibles MOX REP. Les assemblages MOX RNR sont entreposés en attendant l'étape suivante. Consommation d'U naturel de 5 800 t/an et production nette de Pu de 7,1 t/an
Etape C	ce parc mixte REP-RNR comprend 40 % de RNR. Mise en œuvre du multi-recyclage du Pu dans les RNR et dans les REP. Consommation d'U naturel de 2 700 t/ an et production nette de Pu nulle
Etape D	suppression de tout besoin d'U naturel pour alimenter le parc et stabiliser l'ensemble des inventaires. Les stocks d'U appauvri entreposés sur le sol français (290 000 t en 2013 et 410 000 t en 2030 selon l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) sont utilisés. Le parc est constitué de RNR ou d'un parc mixte RNR-REP, les REP étant chargés à 100 % de MOX. Consommation d'U naturel nulle. L'appoint en uranium appauvri est de 60 t/an.

La succession de ces étapes doit être accompagnée d'un développement parallèle des usines de fabrication et de retraitement du combustible, sur lesquelles notre pays dispose d'un savoir-faire reconnu internationalement.

ACQUIS ET DIFFICULTÉS DU PROJET ASTRID

- 1500 MW th-~600 MWe
- Architecture de type intégrée
- Circuit secondaire en sodium
- Cœur CFV (faible coefficient de vidange)
- Combustible UO2-PuO2
- Stratégie pour les accidents graves (récupérateur de corium, tubes de transfert de corium)
- Architecture diversifiée pour la fonction d'évacuation de la puissance résiduelle
- Configuration actuelle :
  - 3 pompes primaires
  - 4 échangeurs intermédiaires
  - 4 circuits secondaires



Source : document CEA

Ce projet a suscité une incontestable dynamique scientifique, technologique et industrielle jusqu'au développement d'un avant-projet détaillé (APD) relatif au réacteur et aux installations du cycle associées. Au CEA, à EDF et à Framatome, il a permis de reconstituer des compétences reposant sur de jeunes ingénieurs en lien avec ceux de la génération Phénix-Superphénix... et de commencer à restaurer un tissu industriel nécessaire au soutien d'un tel projet.

23 janvier 2018 : planning du projet ASTRID, le plus récent et public, présenté à l'Assemblée Nationale par Mounir Mahjoubi, Secrétaire d'Etat chargé du numérique : fin de la phase d'APD en 2019, consolidation en 2020-2023, décision de construction en 2023, phase de développement en 2024-2028, construction en 2029 pour une première criticité en 2039.

Nombre d'options ont réuni un consensus des équipes impliquées. La question de la sûreté a été clairement identifiée. Toutefois, les premiers retours – non négatifs- de l'Autorité de Sûreté ne doivent pas inciter au relâchement de l'effort dans ce domaine. Deux sujets posent encore problème.

La conversion d'énergie. Dans tous les RNR sodium, un générateur vapeur (GV) sodium secondaire-eau fabrique la vapeur envoyée à la turbine. Le système de conversion à gaz – décidé par le CEA comme système de référence pour ASTRID - permet d'éliminer le risque de réaction sodium-eau. Mais ce choix comporte des risques associés à une innovation totale et une pénalité économique du fait d'un moindre rendement. L'éventualité d'une réaction sodium-eau ne doit pas être négligée, toutefois elle ne constitue pas un problème de sûreté insurmontable, estime IED. Les efforts de R&D pour développer le système de conversion à gaz pourraient s'effectuer au détriment de ceux nécessaires à la qualification d'un GV sodium-eau-vapeur.

La taille du réacteur, un choix essentiel. La taille de référence de 600 MWe a été confirmée en 2015. La taille d'ASTRID doit être suffisamment élevée pour que l'expérience tirée de la conception permette de lancer l'étape suivante, c'est-à-dire un réacteur industriel (de l'ordre de 1000 MWe) ; en outre une telle taille permet de couvrir les coûts de fonctionnement grâce à la production d'électricité. Une taille réduite (100 ou 200 MWe) ne permettrait pas d'atteindre les objectifs assignés au prototype et imposerait une étape supplémentaire qui décrédibiliserait l'ensemble de la stratégie ; de plus les économies attendues d'une petite taille risquent de ne pas être au rendez-vous car le coût des composantes fixes (études, sûreté, compétences) est loin d'être proportionnel à la taille du réacteur.

LE RNR, UNE TECHNOLOGIE INDISPENSABLE À UNE PERSPECTIVE ÉNERGÉTIQUE À LONG TERME

Réduire les émissions de CO_2 en mettant tous ses œufs dans les ENR (éolien et solaire) pose problème en raison de leur caractère intermittent, sauf à disposer de solutions de stockage massif de l'électricité, qui ne sont pas actuellement disponibles et dont le développement sera long et coûteux. Faire appel à l'énergie nucléaire, moyen de production massive d'électricité pilotable, reste donc indispensable.

Les RNR apportent une disponibilité quasi-infinie des matières nucléaires et une gestion améliorée des déchets grâce au cycle fermé du combustible. Le développement de cette filière en France repose aujourd'hui sur le projet ASTRID. Des décisions négatives ont déjà été prises sur des grandes installations de R&D en soutien à la réalisation d'ASTRID. IED pense au contraire qu'il faut laisser le choix ouvert jusqu'en 2023 : dégager les moyens pour finir l'APD et réaliser la phase de consolidation prévue jusqu'en 2023 ; un des objectifs de cette phase est de définir un coût réaliste et crédible pour l'ensemble du projet. Le réacteur ASTRID doit être d'une puissance suffisante pour permettre l'extrapolation à un réacteur industriel.

Cette période jusqu'à 2023 doit être également mise à profit pour constituer l'entité qui sera propriétaire-exploitant d'ASTRID, et qui aura donc à prendre la décision de construire. Cette entité devra rassembler les pouvoirs publics (au travers du CEA), EDF en tant qu'électricien mais aussi au travers de sa filiale Framatome, Orano puisque le cycle du combustible est un élément essentiel du projet, et éventuellement des partenaires étrangers.

Cela devra permettre une décision de construction en 2023, laquelle décision sera instruite en fonction des perspectives de l'étape suivante qui marque le début de l'industrialisation avec la construction de quelques unités de RNR destinés à consommer le plutonium des combustibles MOX usés, et également en fonction de l'évolution du nucléaire dans le monde.

Si le projet de construction d'un réacteur ASTRID devait être abandonné, on s'orienterait au mieux vers une recherche de base, qui ne permet pas de créer et maintenir le savoir-faire industriel. On s'en remettrait alors à des constructeurs étrangers (Russes, Indiens ou Chinois) pour disposer un jour des RNR permettant d'assurer un nucléaire durable.

AUTEURS :
Jean BARRA • Jean-Louis CARBONNIER
Jean-Michel DELBECQ • Alain GOURIOU • Bernard SALLES
COORDINATION / RÉDACTION :
Evelyne CHESNEAU

Création : www.unegraphiste.com - Photos de couverture : IED - ©EDF-Didier Marc - Legoupi Sylvie - Conty Bruno - Getty images/Art Jazz

Institut ied
Energie ■ Développement

15, rue Kléber ■ 93100 MONTREUIL
Tél. 01 48 51 17 00
ied.montreuil@wanadoo.fr

Consultable sur notre site :
public.institut-energie-developpement.com