

NUCLÉAIRE : UNE ÉNERGIE D'AVENIR



ITER : en haut à gauche l'installation électrique, au centre le chantier, à droite le bâtiment administratif

Tergiversations, tactiques politiciennes, arrêts, abandons... cette filière, ex-fleuron de l'industrie française, est bien malmenée. Secouée par des problèmes à répétition sur les chantiers EPR, menacée dans son intégrité par les coups de boutoir libéraux sous l'égide de Bruxelles, minée par une perte de compétences... la filière peine à convaincre les décideurs politiques de son caractère incontournable pour décarboner la production d'énergie. Pis, dans les sphères influentes proches du gouvernement, le soutien au nucléaire s'effrite au point de le considérer comme un complément aux énergies renouvelables, pour pallier leur production intermittente. Après avoir pilonné inlassablement le retraitement du combustible, pour mieux saboter l'avènement d'une filière à neutrons rapides, les détracteurs s'attaquent maintenant... aux déchets, une question clé de l'acceptabilité sociétale.

Mais même malmenée, des perspectives sont là pour offrir (ou non) à la filière nucléaire, un avenir à court, moyen, long et même très long terme...

FERMETURE DU CYCLE : UNE OUVERTURE VERS L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Recycler à l'envi le combustible utilisé afin de réduire au mieux la quantité des déchets ultimes... tel est l'objectif des réacteurs à neutrons rapides.

Aujourd'hui, malgré l'abandon du projet de prototype de réacteur à neutrons rapides (RNR) ASTRID, la communication du gouvernement et des grands acteurs de la filière se veut rassurante... La nouvelle stratégie de gestion des combustibles usés repousse à plus tard la question de la fermeture du cycle. Au lieu de réduire les déchets, il est proposé de stabiliser le volume du plutonium formé lors de l'irradiation du combustible en réacteur, en imitant tant que faire se peut les opérations prévues dans un RNR... c'est-à-dire recycler plus d'une fois les combustibles nucléaires dans les réacteurs REP (réacteurs à eau pressurisée) du parc actuel, y compris les EPR à venir. Sur un rythme de « sénateur » : le déploiement progressif du moxage des tranches 1300 MWe, un moxage qui est aujourd'hui réservé aux tranches de 900 MW. Dans la décennie à venir, des études pour démontrer la faisabilité d'introduire un tour supplémentaire de recyclage en REP, en utilisant un combustible qui sera fabriqué avec comme matière première du combustible usé ayant déjà subi un 1^{er} tour de recyclage. Ce nouveau combustible, appelé MOX-2, va être testé dans le parc REP actuel. Enfin, la cible pour un premier réacteur chargé complètement en combustible MOX-2 serait l'EPR2 (une optimisation de l'EPR actuel), dont la décision de construction n'est pas encore prise à ce jour. Mais la perspective d'une véritable fermeture du cycle, dans un parc composé de réacteurs à neutrons rapides (RNR) se résume à ce jour à un simple programme d'études de R&D visant, sur le papier, à maintenir un socle de compétences en physique nucléaire des RNR et des procédés du cycle associés.

Le recyclage multiple en REP n'est pas « la » solution pour réduire les déchets

Compte tenu de l'importance du parc de production électrique, la France a toujours misé sur une gestion avancée des combustibles usés pour réduire le volume des déchets nucléaires. Le réacteur à neutrons rapides (RNR) était le choix retenu. Mais l'histoire se répète : après Superphénix, victime d'un chantage politique (pour construire la gauche plurielle), c'est maintenant la construction du prototype de RNR nouvelle génération ASTRID, qui est reportée sine die. Ceci se fait sur fond de considérations pseudo-économiques (le combustible étant bon marché

ÉTAPES DU CYCLE COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE EN FRANCE

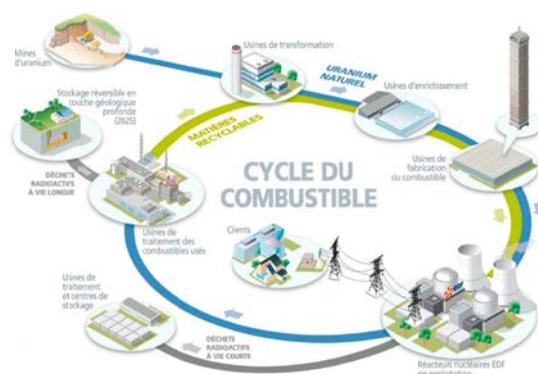


Schéma issu de Faits et chiffres EDF 2019

aujourd'hui), derrière lesquelles se cache un possible abandon à terme du nucléaire, par manque d'optimisation de la gestion du combustible usé. Pourtant, la gestion des matières et déchets radioactifs (dont les combustibles usés) ne peut pas être renvoyée à plus tard, ni ne doit être instrumentalisée pour éliminer le nucléaire des énergies décarbonées.

Le recyclage multiple en REP, c'est-à-dire l'utilisation plus d'une fois du combustible, n'a rien d'une solution innovante : il est étudié au CEA depuis plus de vingt ans. Tant que la perspective de mise en service de réacteurs à neutrons rapides était ouverte, les conclusions pointaient que cette voie était économiquement non-viable, à moins de viser des taux de combustion nettement supérieurs à ceux aujourd'hui pratiqués en REP. Il n'est donc pas surprenant de parler aujourd'hui d'un « stockage actif » du plutonium, car faute de pouvoir le réduire, cela stabilisera le stock... et pour le reste on verra plus tard. Bruxelles s'en émeut et tente d'exclure le nucléaire de sa taxonomie, qui vise à favoriser l'émergence d'énergies propres et décarbonées. Pourtant, dans le rapport du GIEC 2019, le bilan CO₂ du nucléaire est légèrement meilleur que celui du photovoltaïque... oui, mais il y a les déchets ! L'acceptabilité sociale du nucléaire dépendra toujours, en grande partie, de la capacité à réduire au minimum les déchets ultimes. Le recyclage multiple en REP, qui se limite à l'ajout d'un simple tour supplémentaire, ne répond que partiellement à cette exigence. Pourquoi alors déployer tant d'efforts pour développer le concept d'une économie circulaire dans les domaines les plus divers... et se refuser d'appliquer ce principe au nucléaire, si ce n'est pour y nuire ?

SMALL IS BEAUTIFUL AVEC LES SMR ?

Changement de paradigme avec ce nouveau concept de **Small Modular Reactor** (petit réacteur modulaire). « La » solution aux problèmes actuels du nucléaire ?

Ces réacteurs de faible puissance (25 à 300 MW) sont très compacts : une paire tiendrait dans une piscine olympique. Leur design est simplifié et ils sont assemblés en usine, d'où des gains en coûts, délais, qualité de fabrication, nombre de transports... Ils ont donc beaucoup d'avantages.

Le projet français NUWARD (NUclear foreWARD : en avant le nucléaire) repose sur un modèle de propulsion navale militaire qui bénéficie d'un très grand retour d'expérience, aussi bien industriel, que pour la conception, la construction et le fonctionnement.

En cas d'incident, les SMR intègrent une sûreté passive avec un délai de plusieurs jours pour intervenir, ce qui est un plus pour les applications visées, comme la fourniture d'électricité à des contrées très éloignées, ou des villes aujourd'hui alimentées par des centrales carbonées (Sibérie, sites miniers...).

Ces futures centrales nucléaires seraient composées de multiples SMR (par exemple un projet aux USA en prévoit 12). Elles augmenteraient aussi la pilotabilité de la fourniture d'électricité et élargiraient la gamme d'applications : dessalement de l'eau de mer, production d'hydrogène par électrolyse haute température, chaleur industrielle, chauffage urbain...

De sérieux freins, outre les nombreux avantages

Le SMR français NUWARD est avant tout un modèle de réacteur prévu pour l'exportation (Asie, Afrique, Europe centrale qui devra fermer ses centrales thermiques...). Le SMR donnerait un accès plus simple au nucléaire, avec un coût d'entrée moins élevé. Or, le marché, estimé à 10 % des nouvelles capacités nucléaires à installer (environ 100 Md € au total), peine à se développer. À ce jour, seul un SMR Russe est en fonctionnement et un autre est en construction en Chine. Aux États-Unis, où les SMR ont bénéficié d'un important soutien d'investisseurs privés au cours de la décennie écoulée, la confiance des industriels semble marquer le pas. Mais ceci n'empêche pas que, depuis 2018, les projets d'étude sur des modèles de SMR pullulent partout dans le monde, dont certains sont basés sur des concepts de SMR à neutrons rapides.

NUWARD, qui bénéficie d'un soutien gouvernemental à travers le plan de relance du nucléaire, prévoit dans sa feuille de route le dépôt d'un dossier d'options de sûreté en 2022, puis un avant-projet détaillé en 2026, et enfin la mise en service d'un prototype après 2035... Mais face aux nombreux projets dans le monde qui sont déjà à un

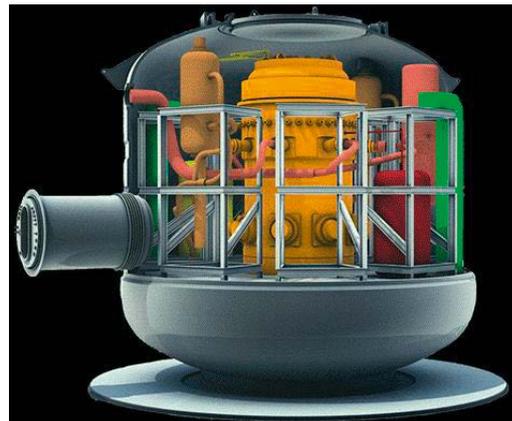
stade plus avancé, il y a incontestablement le risque pour la France d'arriver en retard sur un marché limité : car premier arrivé, premier servi pour la commercialisation...

Un autre écueil, et non des moindres : le coût du MWh !

Si par le passé, la course à une puissance toujours plus élevée diminuait le prix de l'électricité, cette course au gigantisme est aujourd'hui, à tort ou à raison, considérée par beaucoup comme une impasse. Pour réaliser des économies d'échelle, les SMR changent d'approche en misant sur le nombre. Mais cela suppose que le marché pour un seul modèle soit relativement important, donc une demande mondiale suffisamment importante pour permettre à un petit sous-ensemble des nombreux modèles en cours d'étude de tirer leur épingle du jeu. Des estimations aujourd'hui disponibles tendent à démontrer que le prix du kWh en sortie d'un SMR serait au mieux équivalent à celui de l'EPR, mais il sera probablement au-dessus. Concernant la diversification des applications du nucléaire, il n'existe pas de données accessibles aujourd'hui. Par exemple, dans une vision de décarbonation des transports, il n'y a pas d'éléments disponibles pour affirmer que l'hydrogène qui serait produit massivement par le couplage d'un SMR avec une « gigafactory » d'électrolyseurs Haute Température serait un modèle économiquement viable pour produire à bas coût de l'hydrogène décarboné...

Coup de poker ? Opération de communication vers les acteurs de la filière ? Sauvegarde des compétences à court terme ? Écartelée entre une volonté politique de réduire la part du nucléaire dans la production d'électricité, l'arrêt d'ASTRID, la prolongation du parc actuel... la perspective d'un développement de réacteurs SMR avec un panel d'applications très variées est bien mince. Donc small is beautiful ? Pas sûr...

NUWARD : Le SMR français, plus facile à fabriquer, à assembler, à exploiter



LES RÉACTEURS À SEL FONDU : DES RÉACTEURS EN RUPTURE

Et si l'on jetait par-dessus bord toutes nos certitudes sur la "constitution" d'un réacteur nucléaire de fission où le combustible est solide, enrichi en matières fissiles, entouré d'une gaine pour former un assemblage plongé dans une cuve pressurisée... Les MSR (molten salt reactors) ou réacteurs à sel fondu ont pour particularité par rapport à l'existant que le combustible circule sous forme liquide. Sur le papier les MSR présentent un certain nombre d'avantages, notamment en termes de sûreté nucléaire, ce qui favoriserait l'acceptation sociétale du nucléaire.

Finis tout emballement du cœur car la quantité de combustible dans le cœur y est ajustée en permanence. Finis aussi les risques de dégradation ou d'explosion car les radiations n'ont aucun effet sur le combustible liquide (alors que les crayons de combustible solides dans les REP se fragilisent sous l'effet du bombardement neutronique).

Les MSR présentent aussi l'avantage de fonctionner à pression ambiante (dans les REP l'eau de refroidissement est à 155 bars) et en cas d'arrêt d'urgence le combustible liquide est vidangé par gravité dans des réservoirs assurant naturellement l'évacuation de la chaleur : donc aucun problème de refroidissement !

En plus, le MSR le mieux étudié dans le monde fonctionne au thorium (et non à l'uranium) : un élément très abondant dans la croûte terrestre qui produit nettement moins de transuraniens, qui sont rangés parmi des déchets ultimes particulièrement dangereux en raison de leur durée de vie très longue (fardeau inéluctable des REP).

De sérieux avantages pour les réacteurs à sels fondus avec, en plus, le fait qu'ils fonctionnent soit comme un REP ou comme un RNR (Réacteur à Neutrons Rapides).

Mais les MSR présentent aussi des inconvénients

Car de l'Uranium 235 ou du Plutonium restent nécessaires pour amorcer le cycle thorium : ce qui n'élimine donc pas totalement les actinides mineurs : un déchet « ultime », c'est-à-dire non réutilisable, qui concentre une très forte radioactivité (près de 600 g d'actinides mineurs sont générés par tonne de combustible irradié).

Corrosion, radioprotection, retraitement du combustible usé liquide... sont d'autres inconvénients. Et il ne faut pas oublier que l'introduction de réacteurs MSR dans un parc existant obligerait à doubler les installations industrielles du cycle, car les procédés de fabrication et de retraitement sont fondamentalement différents.

Toutefois pour la France, devant l'abandon politique de la filière RNR avec Astrid, le cycle thorium dans un réacteur à sels fondus pourrait constituer une solution attractive. Dans un parc mixte constitué de MSR et de REP, ce serait le plutonium produit par les REP qui sert de matière première pour amorcer le cycle thorium dans les MSR.

Mais si les réacteurs à sel fondu connaissent un net regain d'intérêt et font l'objet d'études sérieuses au plan international, trop vanter leur sûreté intrinsèque par rapport aux REP menace l'image des réacteurs actuels avec le risque de faire avorter toute approche d'un nucléaire innovant...





Un des six aimants annulaires qui ceintureront le Tokamak pour confiner le plasma

Dossier Options

ITER : RÉACTEUR D'APRÈS-DEMAIN DE FUSION NUCLÉAIRE CONTRÔLÉE

C'est le graal des physiciens et de nombreuses équipes y travaillent de par le monde pour développer un réacteur produisant une électricité propre et en quantité presque illimitée.

ITER reproduit la réaction de fusion atomique au cœur de notre soleil et des étoiles. Un tel réacteur à fusion serait donc capable de produire une énergie presque sans limite, sans la moindre émission de gaz à effet de serre et quasiment sans déchets. Son principe est de fusionner deux noyaux atomiques légers (fusion), alors que les réacteurs nucléaires actuels cassent un gros noyau atomique instable en plusieurs morceaux (fission). Les deux réactions génèrent de l'énergie, mais la fusion en produit beaucoup plus. Le problème, de taille, est qu'il est extrêmement difficile de recréer sur terre les conditions gravitationnelles et de température existantes au cœur du soleil. Il faut donc trouver le moyen de contenir et de confiner la réaction de fusion.

Le projet le plus avancé est celui d'ITER

Situé en France, non loin de Cadarache (13), ITER est le plus grand programme scientifique au monde et le plus important ouvrage de génie civil en cours de construction en Europe. La technologie utilisée est celle de la cage magnétique, le Tokamak qui doit maintenir sous contrôle, à l'aide d'aimants surpuissants, la matière devenue plasma à 150 millions de degrés Celsius. Le premier plasma expérimental est prévu en 2030, puis un démonstrateur industriel pourrait voir le jour... d'ici 2060. C'est un défi scientifique et technologique immense, car pour devenir économiquement intéressant et mettre des MWh sur le réseau, il faudra atteindre un facteur 30 entre la quantité colossale d'énergie nécessaire pour entretenir le plasma et l'énergie extraite de ce plasma.

Trois verrous technologiques à lever

Pour auto-entretenir le plasma dans la chambre à vide, il faut produire en permanence et in situ du tritium pour alimenter les réactions de fusion. ITER a prévu des couvertures dites tritigènes, ce qui en partie constitue la taille finale de la machine. Pour confiner le plasma et le stabiliser dans le temps, les champs magnétiques sont énormes. Le projet américain SPARC compte produire les mêmes efficacités de plasma qu'ITER, avec une machine 4 fois plus petite, en doublant la force du champ magnétique comparé à celui d'ITER. C'est un pari scientifique qui repose sur une percée très récente dans le domaine des aimants qui développe une technologie supraconductrice capable de produire un champ magnétique encore plus puissant que celui d'ITER.

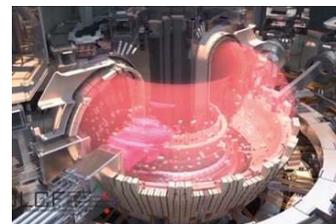
Enfin, pour produire de l'électricité, il faudra extraire la cha-

leur, énorme, produite en permanence à l'intérieur du plasma confiné. Dans l'état actuel, les lois de la physique appliquées aux matériaux disponibles, le tungstène plus particulièrement, limitent les capacités d'extraction à 20 MW/m². Pour ITER, la cible à atteindre est de 10 MW/m² avec des « monoblocs tungstène ». Il faut donc beaucoup de surface pour évacuer l'énorme puissance de fusion du plasma, d'où la taille gigantesque de la machine.

ITER est une « cathédrale de la technologie » pour les uns, un projet pharaonique fustigé par d'autres. C'est un savant consensus entre différents paramètres physiques : supraconductivité, champs magnétiques, capacité d'extraction de la chaleur...

La technologie ITER ou de ses clones (en Chine CFETR, au Japon JT-60SA) n'est pas la seule voie étudiée pour maîtriser la combustion du plasma. Des voies alternatives font l'objet de recherches intenses à l'image de SPARC (USA) ou STELLERATOR-W7X en Allemagne. Avec cette dernière, pas besoin de générer le courant plasma par induction, car les bobines « tordues » génèrent toutes les composantes du champ magnétique, mais sont pour le moment moins efficaces en termes de confinement du plasma.

Toutes ces machines, existantes et celles en conception, sont de beaux outils de recherche. Elles associent science, industrie, recherche technologique, coopérations internationales... Le futur prototype de démonstration technologique ITER intégrera toutes les avancées de la recherche mondiale. Gageons que cette aventure scientifique se traduise en réalité industrielle, au service de l'humanité et non au service de la finance.



Montage de la cage magnétique avec son plasma à l'intérieur (rendu visible en rose)



Les composants d'ITER et les pays associés