

Le projet de réacteur NUWARD (EDF, CEA, Naval Group, Technicatome).

# Les SMR, un nouveau nucléaire ?

**Bernard Boullis**

Conseiller du Haut-Commissaire à l'Énergie Atomique, CEA

## Quelle place pour le nucléaire dans le mix énergétique ?

L'énergie nucléaire présente aujourd'hui un visage contrasté. En retrait dans plusieurs pays européens comme l'Allemagne, la Belgique, la Suisse, l'Italie..., elle connaît un dynamisme soutenu dans des pays orientaux, en Chine, en Russie notamment.

En France, la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie préparée par le Gouvernement a confirmé l'objectif d'une di-

**Les petits réacteurs nucléaires pourraient constituer une solution pour un mix énergétique qui peut difficilement reposer exclusivement sur des énergies intermittentes. Mais de nombreux défis restent à relever avant d'envisager leur industrialisation.**

minution de la part du nucléaire dans la production d'électricité. Elle devrait être ramenée de plus de 70% aujourd'hui à 50% à l'horizon 2035, avec une mise à l'arrêt des réacteurs les plus anciens, tout en ouvrant la possibilité d'en construire de nouveaux.

On s'interroge quant à ce que devra ou pourra être le « mix » énergétique de demain : davantage d'électricité, avec moins de combustibles fossiles et une part importante des énergies renouvelables assurément ; leur développement, partout dans le monde au cours de la dernière décen-

nie est impressionnant. Toutefois, comme le montre la figure 1, la part des énergies renouvelables reste encore très marginale dans le mix énergétique mondial.

On perçoit aujourd'hui les difficultés d'une stratégie « tout EnR », qui montre clairement certaines faiblesses importantes, la gestion de l'intermittence en premier lieu. De son côté l'énergie nucléaire, qui concentre de nombreuses critiques voire des peurs et que beaucoup voyaient déjà condamnée à un déclin inexorable, a fait preuve de sa fiabilité et de sa robustesse pendant la crise sanitaire que nous tra-

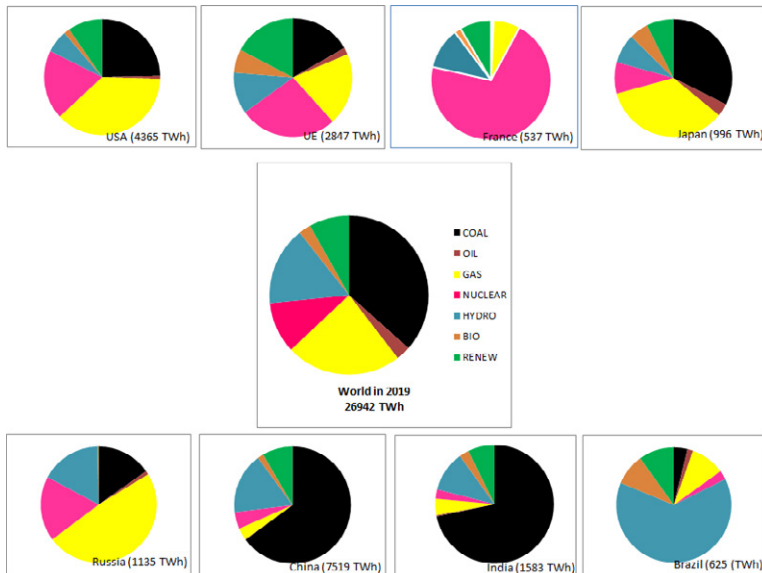


Figure 1 : Structure de la production électrique en 2019 – source AIE 2020.

... versions. L'énergie nucléaire peut ainsi constituer un contributeur important au mix énergétique dans ce siècle et au-delà, mais elle doit vraisemblablement évoluer pour s'adapter aux évolutions du marché et aussi à certaines aspirations de la société. On trouve là une des principales raisons de l'essor aujourd'hui observé de concepts de réacteurs modulaires et de taille plus modeste que les réacteurs actuels, les fameux petits réacteurs modulaires, « SMR » pour *Small Modular Reactor*.

## Quelles options pour l'avenir ?

Le renouveau des systèmes nucléaires a été largement discuté par des experts internationaux au tout début des années 2000 notamment à l'occasion du forum international « génération IV ». Trois principaux critères ont été mis en avant pour guider le développement de nouveaux systèmes nucléaires : la sûreté, le coût, la soutenabilité.

C'est ce dernier aspect, plus nouveau et aux vastes contours, qui a en fait essentiellement guidé la réflexion et la recherche. C'est là que des évolutions majeures étaient attendues tant pour économiser les ressources en uranium naturel que pour réduire les déchets ultimes. Les réacteurs à neutrons rapides en ont été la vedette, en France avec le projet ASTRID, mais aussi au Japon, en Russie, aux Etats-Unis, en Chine... L'idée qui prévalait était que le nucléaire allait connaître une expansion rapide face au défi climatique, et la promesse d'un recyclage à l'infini de l'uranium et du plutonium, voire d'autres éléments à vie longue, laissait augurer une énergie nucléaire possible sur des millénaires, sans recours à la mine, et avec des déchets ultimes limités en quantité et en nocivité...

Le contexte a en fait depuis profondément changé. Les suites de la crise financière en 2008, puis de l'accident de Fukushima en 2011 notamment, ont amené une modification, sinon une inversion, des aspirations ou besoins de progrès. On n'envisage plus une raréfaction des ressources en uranium pour les décennies prochaines, et la très forte exigence de soutenabilité a laissé place à

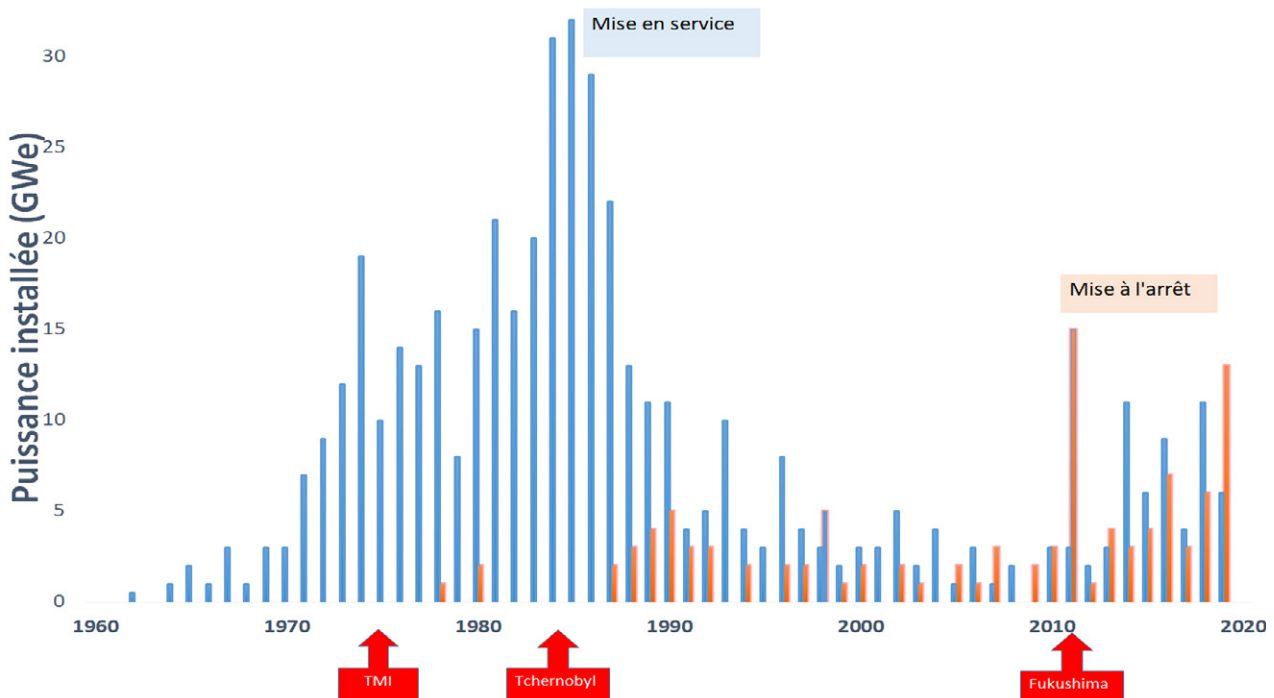


Figure 2 : Le déploiement des différentes générations de réacteurs nucléaires dans le monde.

un nouvel équilibre, avec de nouvelles aspirations et des exigences renforcées en matière de sûreté et de maîtrise des coûts.

Avec cette « nouvelle donne », les systèmes dits de troisième génération, et en particulier l'EPR, constituent certes la figure de proue. Ils ont fait leurs preuves notamment dans le domaine de la sûreté, et ce sont eux qui devraient assurer pour l'essentiel le renouvellement des capacités nucléaires dans les décennies qui viennent ; en France avec une nouvelle version dite « EPR2 », pour laquelle on s'est notamment attaché à réduire les coûts de réalisation.

Dans le même temps, la réalisation de prototypes pour les systèmes de quatrième génération a dans plusieurs pays été renvoyée à plus tard. Il en est ainsi en France, aux Etats-Unis, au Japon. Seules la Russie, et avec un peu de retard l'Inde et la Chine poursuivent leurs projets de réacteurs rapides au sodium.

On assiste parallèlement à un foisonnement de nombreux concepts, qu'il s'agisse de compléter les technologies actuelles pour mieux répondre à certains besoins, ou de préparer les futurs mix énergétiques, en prenant en compte au mieux les divers critères.

La figure 2 met en perspective le déploiement des différentes générations de réacteurs nucléaires dans le monde au cours des dernières décennies.

## Les SMR, pourquoi ?

C'est ainsi que s'est manifesté un intérêt important pour les SMR. Rompant avec un paradigme jusque-là bien établi, qui faisait de réacteurs toujours plus imposants une panacée économique et qui conduisait à des « paliers » technologiques de puissance croissante (en France, des 900 MW des premiers réacteurs à eau aux 1 650 MW de l'EPR).

On on prête aujourd'hui un avenir commercial intéressant pour des réacteurs de

## “ On envisage aujourd'hui un avenir commercial intéressant pour des réacteurs de taille modeste de quelques centaines de MW ou même de quelques MW. ”

taille modeste de quelques centaines de MW ou même de quelques MW, on parle alors de microréacteurs, pour des applications de niche dans les domaines de la défense ou du spatial, par exemple.

L'engouement pour ces petits réacteurs modulaires vient de ce qu'ils « cochent plusieurs cases » intéressantes dans le contexte actuel :

- ils complètent « l'offre nucléaire » traditionnelle en permettant d'aborder des marchés nouveaux, de quelques dizaines à quelques centaines de MW, qu'il s'agisse de remplacer des centrales à charbon vieillissantes et polluantes comme l'envisage le département américain de l'énergie (DOE) aux Etats-Unis, d'apporter une source d'énergie dans des zones isolées, comme par exemple des sites miniers au Canada, ou de répondre à des besoins également non électrogènes, comme par exemple la production de chaleur, la production d'eau douce par dessalement, la production d'hydrogène, etc. ;

- ils peuvent, par leur capacité à un déploiement modulaire donc progressif, faciliter l'arrivée de « nouveaux entrants », notamment de la part de pays souhaitant recourir à l'énergie nucléaire mais reculant devant l'ampleur de l'investissement et les frais financiers nécessaires à l'implantation de centrales plus classiques (réacteurs mais aussi infrastructures, réseau,...). Cette flexibilité que permet la modularité constitue également un gage de meilleure manœuvrabilité, en cas de mix énergétique diversifié avec des fermes éoliennes ou solaires de quelques centaines de MW ;

- ils devraient, c'est du moins le pari qui est fait, s'avérer *in fine* moins onéreux ;

- une simplification du design, une part importante de la réalisation, voire des tests effectués en usine permettant ensuite une durée de construction réduite, avec des effets de série importants et rapidement accessibles ;

- une taille de cœur réduite est également un élément favorable au plan de la sûreté : source limitée en cas d'incident, mais aussi dans un tel cas une plus grande capacité à évacuer de façon naturelle la chaleur, le rapport surface/volume est augmenté, d'où une possibilité accrue de faire appel à des systèmes de sûreté purement passifs, c'est-à-dire des contre-réactions spontanées en cas d'incident, sans intervention humaine.

## Des projets à foison...

Des projets de SMR sont à l'étude dans presque tous les continents : Amérique du Nord avec Canada et USA, Amérique du Sud avec l'Argentine, péninsule arabique, Russie, Chine, Asie du sud-est, Europe avec le Royaume Uni, et la France avec le projet de centrale NUWARD, porté par EDF, constitué de deux petits réacteurs de 170 MW chacun au sein d'un même îlot (Voir illustration en tête d'article).

Ils découlent, pour l'essentiel d'entre eux et au premier ordre, d'une miniaturisation des concepts de réacteur à eau légère, déjà opérée pour propulser des navires de surface ou des sous-marins, mais dans un cadre et avec des contraintes toutes autres. Les principales innovations technologiques portent sur la recherche de la plus forte compacité par intégration poussée des composants.



●●● La Russie a déjà mis en service un concept de barge flottante en mer de Sibérie Orientale : deux réacteurs de 32 MW, destinés à l'alimentation électrique, devant être complétés par des unités homologues pour chauffage urbain. Pour la plupart des projets, on envisage une première mise en service d'installations au cours de cette décennie. Leur retour d'expérience, tant en ce qui concerne la réalisation que l'opération, permettra de vérifier si les bénéfices attendus sont au rendez-vous, même si, comme pour tout nouveau prototype, il y aura vraisemblablement quelques adaptations nécessaires et « plâtres à essuyer ».

Alors on pourrait assister à un déploiement plus massif de ces technologies sur plusieurs segments. Par exemple au Canada, une « feuille de route » envisage des applications allant d'unités de quelques MW (alimentation de sites miniers isolés) à quelques centaines de MW (remplacement des centrales à charbon) en passant par des tailles intermédiaires pour le traitement des schistes bitumineux ou des unités de chimie lourde.

## Mais les défis restent à relever !

Les SMR peuvent donc représenter un formidable potentiel de développement pour l'industrie nucléaire. Encore faut-il qu'ils fassent leurs preuves, qu'ils confirment les espoirs placés en eux aux plans technique et financier. Il faudrait aussi que certaines questions, notamment politiques, soulevées par cette perspective trouvent une solution pleinement acceptée.

### Les déchets nucléaires

Il y a tout d'abord la question des déchets nucléaires, générique à toute la filière et caractérisée par l'éloignement de la position des acteurs du domaine («*le stockage géologique des déchets nucléaires est une option efficace et sûre sur la durée*») de celle du public dont une partie importante rejette les solu-

tions aujourd'hui avancées. C'est pour certains le « talon d'Achille » du nucléaire, qui peut conditionner son déploiement futur. Au premier ordre, cela ne change rien à la façon dont la question se pose. Au rendement de conversion électrique près, qui devrait en outre rester voisin de celui que l'on connaît dans les centrales actuelles modernes, à une quantité d'électricité fournie correspond toujours la même quantité de produits de fission (PF) radioactifs : de l'ordre de 0,1 tonne de produits de fission (PF) par TWh d'électricité, quelle que soit la taille et même quel que soit le type de réacteur.

### La gestion du combustible

Là où les choses peuvent différer, c'est dans la gestion du combustible, et notamment celle du combustible dit « usé » que l'on retire des réacteurs. Si les SMR connaissent le succès que certains attendent, on pourrait observer une multiplication des lieux d'entreposage de combustible, qu'il s'agisse de combustible « frais », en général combustible enrichi à moins de 5% en  $^{235}\text{U}$ , ou surtout de combustible « usé », lequel contient près de 1% de plutonium à son déchargement.

La question épineuse des risques de détournement de matières fissiles à des fins non pacifiques (on évoque souvent le « risque de prolifération ») se pose peut-être ici avec davantage d'acuité et l'on se doit de pouvoir apporter les meilleures garanties de sécurité en la matière. C'est une des raisons qui amènent à considérer, pour ces réacteurs de taille modeste, la possibilité de services de gestion du combustible de type « *take back* » transparents pour l'exploitant. Cela comprend fourniture, reprise et remplacement, sous contrôle international, par un opérateur de services centralisés de cycle du combustible, qui pourra le traiter et/ou le conditionner sous une forme appropriée. Mais il faudra dans ce cas retourner ensuite les déchets finaux au pays utilisateur, qui devra prendre à sa charge leur gestion ultime ; c'est en tous cas ce qu'exige la loi française, qui

## L'auteur



**Bernard Boullis** a été de 2007 à 2017 Directeur des programmes pour l'aval du cycle du combustible au CEA,

au sein de la Direction de l'Énergie Nucléaire. Diplômé de l'École Centrale de Paris, il a rejoint le CEA en 1977, et a été impliqué depuis plus de 40 années dans les problématiques de l'aval du cycle (procédés pour les usines de la Hague, gestion des déchets ultimes, technologies pour les futures générations de systèmes nucléaires). Il est aujourd'hui Conseiller auprès du Haut-Commissaire à l'Énergie Atomique. Il est professeur honoraire de l'INSTN et enseigne dans des Ecoles d'ingénieurs. Il a été, jusqu'en 2019 membre du Conseil Scientifique du CEA, ainsi que du Comité Scientifique de l'ASN.

exclut la possibilité d'importer ou d'exporter des déchets pour une durée indéfinie.

### Les ressources naturelles

Enfin, avec les SMR comme avec les réacteurs nucléaires classiques, se pose la question de la durabilité des ressources naturelles nécessaires à leur fonctionnement. Les réserves identifiées d'uranium dans le monde permettent aujourd'hui d'envisager, à niveau de consommation stabilisé, la poursuite du nucléaire au cours de ce siècle sans risque de pénurie, hors problème de nature géopolitique limitant la circulation des matières. Et si l'essor des SMR était tel qu'il renforçait notablement la pression sur les ressources en minerais ? Ce n'est vraiment pas pour tout de suite, mais quel que soit l'horizon de la raréfaction, il convient de s'y préparer et de l'anticiper suffisamment tôt.

On retrouve l'intérêt de développer des systèmes plus économes en uranium, et donc les fameux réacteurs à neutrons rapides qui, si le nucléaire devait être pérenne, devront tôt ou tard être déployés. Et les SMR n'échappent pas à cette exigence du long terme : on voit aujourd'hui déjà de nombreuses équipes de recherche étudier pour les besoins futurs des concepts de petits réacteurs à neutrons rapides. On parle dans ce cas d'AMR – « *Advanced Modular Reactors* » - pour les distinguer des « SMR », terme réservé à la génération qui vient.

Le foisonnement est là aussi impressionnant. La petite taille permet vraisemblablement davantage de laisser libre cours à des innovations qui constituent parfois de véritables révolutions de concepts, comme par exemple des caloporteurs gazeux, des combustibles liquides avec les réacteurs à sels fondus. Cela témoigne de la solidité du concept SMR, de sa force et de la capacité d'évolution et de transformation qu'il porte peut-être, au-delà de la percée des premières réalisations à venir.

## En conclusion...

L'énergie nucléaire, forte de plus d'un demi-siècle de développements autour d'une technologie reine, les réacteurs à eau, semble devoir évoluer pour affronter les enjeux du futur : toujours chercher à améliorer encore la sûreté des réacteurs, porté en France par les EPR, améliorer la compétitivité économique, c'est l'objectif de l'EPR2, mais aussi pouvoir mieux répondre à des besoins émergents et, au-delà, au défi de la soutenabilité.

Les SMR paraissent pouvoir porter une partie de la réponse, en présentant des caractéristiques a priori favorables sur bien des aspects relatifs à la sûreté et au coût. Ils permettent de compléter une « offre nucléaire » jusqu'alors essentiellement limitée à la production massive d'électricité dans des centrales toujours plus imposantes.

Mais au-delà de ces caractéristiques techniques intéressantes et originales, l'avènement des SMR porte peut-être d'autres signes qui témoignent d'évolutions qui pourraient également s'avérer importantes.

Une possible aspiration de la société à une décentralisation plus prononcée pourrait faire des SMR, dont la puissance peut se comparer à celle de fermes éoliennes ou solaires, une voie facilitant un renouveau dans l'attrait des options nucléaires aujourd'hui rejetées par certains. L'impressionnant foisonnement de nouveaux concepts auquel on assiste peut par ailleurs être le marqueur d'une évolution importante dans le développement des projets nucléaires. Souvent à l'origine le fait de petites structures, des « *start-up* », notamment aux Etats-Unis, issues de l'association de chercheurs universitaires et de partenaires industriels, soutenus par l'administration fédérale, ces initiatives semblent témoigner de ce qui s'apparente à une modernisation de la R&D nucléaire : davantage « *bottom-up* », elles constituent une évolution notable par rapport à un passé où le nucléaire était un domaine strictement étatique, avec de grands projets focalisant les efforts menés pour l'essentiel par de grands laboratoires nationaux, se traduisant certes par des réussites remarquables mais dans une démarche peut-être moins adaptée à une donne plus ouverte et plus incertaine. ■

## Résumé

Le mix énergétique de demain devrait reposer sur davantage d'électricité, avec moins de combustibles fossiles et une part importante d'énergies renouvelables. Cependant, on perçoit aujourd'hui les difficultés d'une stratégie tout EnR. Au début des années 2000, l'énergie nucléaire a suscité de bons espoirs reposant sur le développement d'une nouvelle génération de réacteur. Mais la crise financière de 2008 et surtout l'accident de Fukushima en 2011 ont modifié les aspirations des pays en renforçant les exigences en matière de sûreté et de maîtrise des coûts. Dans ce contexte nouveau, les petits réacteurs nucléaires présentent des atouts : leur petite taille permet une meilleure intégration dans les réseaux existants, à un prix plus accessible et dont la sûreté est plus simple à garantir que celle des grands réacteurs. Mais les défis à relever restent importants notamment celui de la gestion des déchets et de l'utilisation des ressources naturelles. De nombreux projets de SMR ont été lancés sur presque tous les continents. L'approche décentralisée retenue par les Etats Unis pour le développement de ces petits réacteurs, associant universitaires, industriels et l'administration, pourrait s'avérer gagnante. ■

## Abstract

The energy mix of tomorrow should be based on more electricity, with less fossil fuels and a significant share of renewable energies. However, today we can see the difficulties of an all renewable energy strategy. In the early 2000s nuclear power generated good hope based on the development of a new generation of reactors. But the 2008 financial crisis and especially the Fukushima accident in 2011 changed the aspirations of countries and reinforced requirements in terms of safety and cost control. In this new context, small nuclear reactors have advantages: their small size allows better integration into existing networks, at a more affordable price and whose safety is easier to guarantee than that of large reactors. But the challenges to be met remain significant, particularly that of waste management and the use of natural resources. Numerous SMR projects have been launched on almost all continents. The decentralized approach adopted by the United States for the development of these small reactors, associating academics, industrialists and the administration, could prove to be successful. ■