

# Comment renforcer la dynamique d'innovation de la filière nucléaire française ?

Par Jean-François DEBOST

Directeur général du pôle de compétitivité Nuclear Valley

Et Bernard SALHA

Commission Innovation GIFEN, président de SNETP, CTO et directeur R&D d'EDF

Le nucléaire civil redémarre dans le monde, autant d'opportunités pour positionner une offre technologique française ambitieuse. Forte de ses 67 années d'expérience dans le nucléaire civil, forte des projets d'innovation accélérée par les plans « France Relance » et « France 2030 », la France fait la course dans le peloton de tête du nucléaire mondial. Face à la concurrence, nous allons devoir accélérer l'innovation et la mise sur le marché des solutions technologiques de nos PME et *start-up*. Cela nécessitera un soutien important des pouvoirs publics dans la durée, ainsi qu'un renforcement des fonds propres de nos ETI - PME, qui sont des industries à forte intensité capitalistique. Enfin, l'Europe devra protéger les intérêts industriels et économiques de ses pays membres sur le marché d'ores et déjà très concurrentiel du nouveau nucléaire.

**F**orte de 56 réacteurs en exploitation, d'une filière de production et recyclage du combustible complète, d'un réacteur neuf en fin de construction à Flamanville, et de projets de réacteurs de grandes tailles (EPR2) et de petites tailles (SMR et AMR) annoncés par les pouvoirs publics, d'un centre de stockage de déchets de haute activité vie longue en cours de finalisation, d'une chaîne d'approvisionnement complète, de ses laboratoires, de ses *start-up*, la France fait la course dans le peloton de tête du nucléaire mondial.

C'est un atout majeur pour notre pays.

Le nucléaire est en France une des composantes clé de la décarbonation, de l'atteinte de la neutralité carbone en 2050, et peut l'être de la stabilité des prix de l'électricité<sup>1</sup>, à des prix abordables pour l'industrie comme pour les clients particuliers.

C'est aujourd'hui une filière mature avec en France un parc de réacteurs et des outils industriels ayant une moyenne d'âge de 40 ans environ. Des TPE, PME, grandes entreprises, *start-up* et centres de recherches représentant plus de 3 000 entités portent ces activités avec environ 220 000 emplois engagés.

L'enjeu est désormais de poursuivre l'exploitation dans la durée et de faire émerger les innovations qui garantiront l'avenir de la filière pour les 40 années qui viennent.

Ces innovations amèneront avec elles de nouveaux talents essentiels pour l'avenir de la filière.

Or l'industrie nucléaire apparaît jusqu'ici comme une industrie réputée pour sa stabilité.

Plusieurs raisons en sont la cause.

C'est d'abord une industrie sensible. Plusieurs accidents majeurs l'ont marquée. Elle produit aussi des déchets à vie longue. Dans ces conditions, ses procédés sont très rigoureusement établis, suivis et contrôlés à l'instar d'autres industries sensibles comme l'aéronautique ou le spatial. Rigueur de sûreté et innovation sont-elles contradictoires ? Nous verrons que non un peu plus loin.

C'est aussi une industrie de temps long. Il faut compter une quinzaine d'années entre le lancement des études d'un projet de nouveau réacteur et la production des premiers kilowatt heures d'électricité. C'est l'échelle de temps des projets d'infrastructures, autoroute ou voie ferrée. Il n'est aussi pas étonnant que jusqu'ici nous n'ayons vu quasi exclusivement que de très grands acteurs publics ou proches lancer ce type de projet. Ils sont les seuls à avoir les capacités financières suffisantes dans la durée.

C'est enfin une industrie de petites séries pour les réacteurs à grande puissance. Là où les constructeurs d'avions annoncent des commandes de la centaine d'unités, dans le nucléaire civil, il est exceptionnel jusqu'ici de dépasser la dizaine de projets.

<sup>1</sup> Notamment à l'issue de l'accord intervenu au conseil énergie du 17 octobre 2023 permettant un découplage partiel avec les prix du gaz, alors que ce couplage avait temporairement affaibli cet avantage du nucléaire en 2022 et 2023.

Cependant, les 3 dernières années ont vu la floraison de beaucoup d'acteurs privés à l'international aussi bien qu'au niveau national qui proposent des innovations remarquables.

Au niveau national, le GIFEN au travers de sa commission Innovation et le pôle de compétitivité Nuclear Valley œuvrent aujourd'hui à faire émerger un nouveau dynamisme dans notre industrie nucléaire. Les perspectives sont prometteuses.

Nous vous proposons de décrypter quelques clés pour réussir.

## Innovation et sûreté

La sûreté est indissociable de la pérennité de l'industrie nucléaire. Ce principe s'applique à chaque exploitant. Tous sont d'ailleurs solidaires en cas d'accident sérieux touchant l'un d'entre eux.

La sûreté n'est pas à confondre avec l'immobilisme.

La sûreté des réacteurs existants s'améliore d'ailleurs au cours du temps au travers des ré-examens décennaux des installations et en tenant compte des enseignements des incidents rencontrés, mineurs ou majeurs et des retours d'expérience à l'international. Les réacteurs 900 MW du parc français, conçus dans les années 1970-1980 vont atteindre un niveau de sûreté proche de celui des réacteurs EPR au terme de leur quatrième visite décennale. Les innovations de l'EPR conçues dans les années 1990-2000 ont ainsi tiré celles de ces réacteurs au service d'un encore meilleur niveau de sûreté. L'industrie française a su mettre au point les méthodes et outils permettant de réaliser les modifications nécessaires sur des réacteurs pourtant déjà construits et de manière générale sur toutes les installations nucléaires de base (INB). Pensons aux robots qui ont permis de renforcer la protection du radier de ces réacteurs sur la référence que constitue l'EPR.

Cette innovation tirée par la sûreté sur les installations existantes est avant tout une innovation de méthodes d'ingénierie et d'outils de réalisation. Ce sont des « briques technologiques » nouvelles mises au point par des entreprises de toute taille du secteur répondant à des cahiers des charges exigeants.

L'analyse sûreté peut être aussi tirée par des innovations technologiques issues d'autres secteurs. Pensons aux méthodes de fabrications additives, aux nouvelles technologies d'examen non destructifs ou aux nouveaux outils numériques utilisant des technologies de l'information innovantes comme les jumeaux numériques, l'intelligence artificielle, l'IoT, la réalité virtuelle ou augmentée. Il faudra définir les règles de sûreté permettant de juger de l'acceptabilité de leur usage sur les systèmes critiques du nucléaire comme le fait aujourd'hui le secteur aéronautique avec des pièces issues de la fabrication additive sur les moteurs d'avion ou avec l'IA comme aide pour le suivi du trafic aérien. À l'industrie et aux régulateurs de définir des programmes de travail sur des cas concrets forts de ces expériences transverses et d'y consacrer des moyens adaptés.

La démonstration de sûreté des nouveaux petits réacteurs modulaires (SMR) pose de nouveaux défis.

La viabilité de leur modèle économique repose sur la fabrication de séries, et donc de l'implantation de réacteurs dans des pays différents avec le moins d'écart possible. Or les règles de sûreté sont des compétences nationales et des différences existent souvent entre États alors même que les projets sont réalisés par les mêmes vendeurs. L'exemple le plus fameux est le panneau de repli câblé du contrôle de commande numérique de l'EPR au Royaume-Uni, requis par le régulateur britannique alors que le régulateur français n'exige pas cette technologie.

Pour les SMR une démarche multinationale de sûreté sur un projet est indispensable pour éviter de tels écarts.

L'approche conjointe du projet Nuward et des autorités de sûreté finlandaises, françaises et tchèques pour analyser ensemble les caractéristiques techniques porte la promesse d'une belle réussite.

Sur les réacteurs de grandes tailles, y compris existants, ce renforcement de la proximité des analyses techniques est aussi un atout majeur tout particulièrement s'agissant de la poursuite de l'exploitation des réacteurs dans la durée jusqu'à 60 ans voire au-delà.

## Innovation et financement

Dans une industrie du temps long, très capitalistique, où chaque solution technologique se doit d'être qualifiée par l'exploitant et validée par l'autorité de sûreté, il y a peu de place pour l'imprévu et donc pour l'innovation spontanée. Les petites structures, nombreuses dans la chaîne de sous-traitance de la filière nucléaire, ont besoin d'être soutenues pour parvenir à innover. Il nous faut donc, aux côtés de la puissance publique, construire et adapter des mécanismes pour faciliter l'émergence de l'innovation dans la filière et transformer les innovations technologiques de nos PME et *start-up* en succès commerciaux et parts de marché à l'international. Le nucléaire civil redémarre dans beaucoup de pays, autant d'opportunités pour positionner une offre technologique française ambitieuse. Comment accompagner et financer ces innovations ? Nous proposons ci-après quelques pistes « pratiques » :

- Faciliter la rencontre technologique entre le petit acteur innovant et l'utilisateur final. En encourageant par exemple des programmes passerelles entre les grands industriels de la filière, les laboratoires / instituts de recherche et les *start-up*/TPE/PME (accès pour les porteurs de projets à des laboratoires, des expertises, des expérimentations en conditions réelles « bacs à sable » chez les exploitants...).
- Favoriser l'émergence de l'innovation avec des réflexions en coûts complets incluses dans les critères d'achat des appels d'offre des donneurs d'ordres.
- Fédérer une communauté d'investisseurs français autour de la thématique du nucléaire. Ce travail a été entamé par le pôle Nuclear Valley, qui a créé un

Club Investisseurs « Nuc Tech » regroupant le Fonds France Nucléaire, BPI Investissements et 13 acteurs du financement privé.

- Renforcer les fonds propres des petits acteurs. Pour les *start-up* qui s'y lancent, innover dans le nucléaire constitue un véritable parcours du combattant, avec un ticket d'entrée très élevé. Il s'agirait de créer un fonds d'amorçage / capital risque pour les *start-up* de la filière nucléaire, et un fonds de capital développement investissant des « petits » tickets (0,5 à 3 M€ - Small Cap) pour les projets d'investissement des petites PME industrielles. Ces fonds s'inscriraient en complémentarité du Fonds France Nucléaire.
- Mettre en œuvre des dispositifs de facilitation et de soutien financier public complémentaires. Des systèmes de contre-garantie ou caution apportés par BPI France pourraient par exemple inciter les acteurs privés à financer les projets.

## Nouveaux réacteurs SMR et AMR

Les annonces présidentielles de février 2022 confortées par le lancement de l'AAP France 2030 « Réacteurs innovants » ont incontestablement stimulé et accéléré l'innovation de rupture au sein de la filière française. Des nouveaux modèles de petits réacteurs, des nouveaux combustibles nucléaires (HALEU, RSF), de nouveaux usages, de nouveaux services associés émergent. Le Pôle de compétitivité Nuclear Valley accompagne ainsi aujourd'hui plus de 15 initiatives de nouveaux réacteurs innovants de générations III+ et IV (< 300 MWe). La dynamique française sur ce marché mondial prometteur, estimé à 150 milliards de dollars à horizon 2040, est lancée. Un vent nouveau, rafraîchissant souffle sur notre filière.

L'AIEA (Agence Internationale de l'Énergie Atomique) recense dans le monde plus de 80 initiatives de « petits » réacteurs innovants en cours de développement. La concurrence est d'ores et déjà prégnante. Les États-Unis et le Royaume-Uni sont déjà très agressifs commercialement sur le futur marché européen du SMR/AMR (par exemple l'américain NuScale en Pologne et Roumanie). Début 2023, le projet français Nuward a lui signé des accords de coopération de développement de nouveaux projets en Finlande, Suède et Pologne.

Mais la route sera longue et coûteuse. Selon le projet, nous estimons l'effort initial d'investissement pour un démonstrateur de 1 à 5 Mds€ par technologie, tout particulièrement lorsqu'un développement du combustible est nécessaire. L'allocation France 2030<sup>2</sup> dévolue à ces réacteurs ne nous paraît pas suffisante pour couvrir l'ensemble des projets. Un soutien financier complémentaire des États, des régions mais aussi pourquoi pas des industriels du secteur privé, devant décarboner leur *process*, sera nécessaire.

Pour conquérir des parts de marché, les initiatives françaises devront à la fois pousser loin la logique de série,

de fourniture conventionnelle, mais aussi faire la preuve de la fabrication modulaire, tout en accélérant quelques technologies disruptives permettant aux concepts-réacteurs d'éclore rapidement, à un prix compétitif.

L'Europe n'est pas en reste. À l'initiative de la France, l'Alliance du Nucléaire regroupant à date 14 États membres de l'Europe se mobilise. La plate-forme européenne de recherche sur le nucléaire SNETP est également au rendez-vous. On pourra souligner notamment :

- Le plan SMR/AMR européen (EU SMR pré-partnership) en collaboration étroite entre les industriels, les régulateurs, et la communauté de recherche européenne de R&D&I avec la participation active de différents services de la Commission européenne.
- Des projets européens en cours ou en préparation dans le cadre du programme européen Euratom.
- Des capacités de test et de qualification seront financées par Euratom, sur les technologies qui intéressent France 2030. Certaines capacités d'essai, coûteuses et essentielles, non disponibles en France nécessiteront des accords de partenariats pour mutualiser les développements par filière de réacteur et éviter les doublons ;
- Cependant, le programme Euratom lié à la fission, de moins de 60 M€/an pour la R&D&I, devrait être significativement revu à la hausse. Pourquoi ne pas être innovant en inscrivant dans la feuille de route des fonds FEDER gérés par les régions le financement de projet d'innovations dans le nouveau nucléaire ? Ou inclure les projets nucléaires dans le portefeuille de *innovation fund* ou même du programme "Permanent structured cooperation : PESCO" à l'instar de la défense européenne ?
- L'Europe, à l'image de ce qu'elle a fait pour les batteries et l'hydrogène, pourrait également lancer un IPCEI (Important Projects of Common European Interest) SMR/AMR ou une alliance industrielle pour faciliter la mobilisation des fonds nécessaires.

L'Europe se doit de protéger les intérêts industriels et économiques de ses pays membres sur le marché de demain très concurrentiel des SMR/AMR et devra prendre des mesures appropriées (imposer du *local-content* en Europe, lever les barrières d'Export Control Intra EU...).

Enfin, pour les initiatives SMR et AMR qui n'auront pas été retenues à l'AAP France 2030, les solutions techniques développées, d'intérêt filière, pourraient incrémenter non seulement la valeur ajoutée des initiatives lauréates mais aussi nourrir la modernisation du parc nucléaire existant. Elles mériteront donc toute notre attention et notre soutien.

## Briques technologiques

Dans le secteur du nucléaire, le nombre de modèles de réacteurs produit par un même vendeur est très limité, deux ou trois. Ces modèles restent également pendant de nombreuses années sur le marché. Ce paysage

<sup>2</sup> <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/09.06.2023-DP-France2030-Nucleaire-formation-et-innovation.pdf> ; 1,2 G€annoncés en juin 2023.

avec peu de nouveaux produits donne ainsi l'image d'un certain immobilisme.

Or l'innovation existe dans notre secteur et elle réside souvent dans des « sous-projets » ou des « briques technologiques ».

Elles sont de plus petites tailles – coût élémentaire de quelques millions à quelques dizaines de millions d'euros – et sont également accessibles à des petites entreprises voire des *start-up*.

En termes de communication, elles sont cependant relatives à des sujets très pointus, peu accessibles au non-expert, bien moins flamboyantes et donc visibles que les nouveaux projets de réacteurs.

Pourtant la filière nucléaire est extrêmement active et pertinente pour proposer de telles briques innovantes. Et les chances de succès sont aussi plus importantes.

La démarche France Relance lancée en 2021 a été particulièrement efficace.

Dans le dossier de retour d'expérience que nous avons présenté à la DGE en décembre 2021, nous citons 160 projets déposés, 77 lauréats pour un montant investi par les industriels de 343 M€ pour un soutien de l'État de 100 M€.

Le pourcentage de soutien s'est révélé assez modeste en moyenne, autour de 25 % pour les grandes entreprises et 40 % pour les plus petites, attestant par là

même la relative insuffisance de l'enveloppe de soutien public au regard de l'épaisseur du portefeuille d'innovations des entreprises,

Nous recommandons donc vivement, en complément du dispositif lancé pour les nouveaux SMR dans le cadre France 2030, de lancer rapidement un dispositif similaire pour soutenir, accélérer l'innovation technologique de la filière nucléaire française, pour utiliser encore davantage ce portefeuille d'innovations pour le nouveau nucléaire et le parc existant

## Conclusion

À l'heure de la réindustrialisation, de la souveraineté énergétique et de l'objectif de neutralité carbone à horizon 2050, force est de constater que la filière nucléaire française et ses ETI, PME se mobilisent et innoveront pour être au rendez-vous. Il faut néanmoins aller plus vite et plus loin.

Le pôle Nuclear Valley et le GIFEN sont prêts à accompagner les pouvoirs publics pour mettre en œuvre les recommandations proposées dans cet article.