



Contribution au plan « *France 2030* »

POSITION DE LA SFEN

Mercredi 13 Octobre 2021

France 2030 : Le gouvernement dévoile un plan d'investissement d'un milliard d'euros pour l'innovation nucléaire, une annonce majeure avant une nécessaire décision industrielle sur le renouvellement du parc nucléaire français

La Société Française d'Énergie Nucléaire (Sfen) est une association scientifique à but non lucratif, qui rassemble 4 000 professionnels, ingénieurs, techniciens, chimistes, médecins, professeurs, et étudiants, des sites industriels et des organismes de recherche nucléaire français. La Sfen est un lieu d'échanges pour celles et ceux qui s'intéressent à l'énergie nucléaire et à ses applications. Sa raison d'être est « Permettre aux esprits de partager et de se faire des idées nouvelles sur le nucléaire ». Elle est membre fondateur de l'European Nuclear Society (ENS).

Dans le cadre de la présentation du plan « France 2030 » le 12 octobre, le Président de la République a dévoilé un programme d'investissement de 30 milliards d'euros pour « *faire émerger les futurs champions technologiques de demain et accompagner les transitions des secteurs d'excellence français* », répartis autour de dix objectifs. Le premier d'entre eux, intitulé « *Faire émerger en France des réacteurs nucléaires de petite taille, innovants et avec une meilleure gestion des déchets* » s'est vu allouer une enveloppe d'un milliard d'euros. Le Président a précisé qu'il aura l'occasion de revenir, dans les semaines qui viennent, sur l'opportunité de construire de nouveaux réacteurs, en faisant référence au travail en cours sur les scénarios de neutralité carbone à 2050 portés par RTE.

La Sfen se félicite que le nucléaire soit reconnu comme **indispensable à l'atteinte des objectifs nationaux de décarbonation et de réindustrialisation**, et reçoive un soutien de l'Etat pour que **la France soit un acteur majeur dans la course à l'innovation** sur les petits réacteurs innovants de demain :

- Le nucléaire est un terrain propice aux innovations de rupture tant dans ses usages que dans la conception, la construction et l'exploitation des installations nucléaires. Il est l'objet d'une

véritable effervescence au niveau mondial, principalement aux Etats-Unis, en Russie, en Chine, au Royaume-Uni et au Canada.

- Le plan doit permettre de soutenir les prochaines étapes de la conception du projet SMR français Nuward™, pour engager la construction d'un premier réacteur en France d'ici 2030.
- Le plan prévoit aussi le lancement de plusieurs projets de recherche sur des technologies différentes.

La Sfen rappelle **qu'il est urgent de prendre une décision sur la construction de six réacteurs EPR2**, destinés à progressivement remplacer les réacteurs existants et assurer notre sécurité d'approvisionnement à partir de 2035.

1. Le nucléaire est propice aux innovations de rupture, et fait l'objet d'une effervescence de nouveaux concepts au niveau mondial :

Le nucléaire est une technologie qui n'est qu'au début de l'exploration de ses usages et l'invention de solutions techniques pour une énergie bas-carbone, avec un **fort potentiel d'innovation** :

- **dans les utilisations de la technologie nucléaire** : des réacteurs actuels jusqu'au SMR (Small Modular Reactor), voir même micro-réacteurs (MMR). La petite taille de ces réacteurs leur permet de servir des sites isolés (Grand Nord Canadien, Sibérie, Iles), d'être semi-enterrés, ou même embarqués (réacteurs mobiles). Ils sont particulièrement adaptés au remplacement des centrales charbon qui se situent majoritairement dans la même gamme de puissance. Elle permet aussi de renouveler les approches de sûreté et le dialogue avec les autorités lors des phases de conception et de certification.
- **dans les technologies de réacteurs et de combustibles** avec des réacteurs modulaires de 4ème génération (Advanced Modular Reactor – AMR) parmi lesquels des réacteurs à sels fondus (Molten Salt Reactor - MSR) et des petits réacteurs rapides refroidis au sodium. Ces technologies permettent de nouvelles approches dans la gestion des matières et des déchets.
- **dans ses applications** : au-delà de l'électricité, le nucléaire permet de produire de la chaleur urbaine ou industrielle, et, via des systèmes hybrides, permet de produire massivement de l'hydrogène bas-carbone et de dessaler l'eau de mer. Les MMR sont aussi étudiés pour l'exploration spatiale.

On peut noter ainsi que, concernant le second objectif du plan 2050, « devenir le leader de l'hydrogène vert », le nucléaire permettra de décarboner la production d'hydrogène. Le Président de la République a rappelé que « *Les renouvelables* (qui reçoivent 500 millions d'euros du plan, ndr) *ne seront jamais suffisants en Europe* » pour produire suffisamment d'hydrogène décarboné, ce qui est cohérent avec l'analyse de l'avis récent de la Sfen sur l'hydrogène¹.

Le nucléaire fait partie de ces domaines où il se passe actuellement, « *d'extraordinaires accélérations (de l'innovation) du monde* » : selon le think tank Third Way², 130 projets de réacteurs innovants

1 « Hydrogène : comment l'énergie nucléaire peut servir l'ambition française » Sfen, 27 avril 2021

2 Third Way Energy: 2020 Advanced Nuclear Map: Progress Amidst a Tumultuous Year, Decembre 2020

sont actuellement en développement dans le monde. Selon l'OCDE-NEA, Les SMR pourraient couvrir jusqu'à 10 % de la production nucléaire dans le monde d'ici 2040.

Aux Etats-Unis on constate depuis plusieurs années une effervescence sur l'innovation nucléaire. Une multitude d'acteurs privés tablent sur la technologie et son caractère bas-carbone pour remplacer les centrales thermiques à charbon et à gaz, et atteindre les objectifs climatiques : on liste plus de 50 concepts de SMR et Advanced Modular Reactors (AMR).

- Un écosystème s'est mis en place, et mobilise à la fois des capitaux publics et privés pour plusieurs milliards de dollars.
- Un premier SMR a été certifié en 2020 (Nuscale) avec un démonstrateur prévu avant 2030.
- Le DOE (Department of Energy) a renforcé son soutien aux réacteurs avancés avec une volonté de reprendre le leadership technologique par rapport à la Chine et à la Russie, et a mis en place des programmes pour accélérer la certification et le déploiement de deux concepts de réacteurs avancés d'ici 2030, dont le projet Natrium, développé par GE-Hitachi¹ et TerraPower (Bill Gates). Il se compose d'un réacteur à spectre rapide² refroidi au sodium (RNR-Na) de 345 MW et d'un système de stockage à sels fondus pour s'intégrer dans un mix électrique « à forte composante renouvelable ». Chacun des projets a reçu en un financement initial de 80 millions de dollars, avec 1,6 milliard de dollars qui sera alloué à chacun des deux projets pour les sept ans à venir.
- L'Infrastructure Investment and Jobs Act doit renforcer le soutien fédéral à ces projets

La Russie et la Chine montrent un fort et constant soutien aux réacteurs innovants, motivé par des enjeux de souveraineté :

- La **Russie** montre une avance dans le domaine des réacteurs de 4ème génération (filière sodium et filière plomb) en lien avec leur stratégie de fermeture du cycle et d'incinération des actinides mineurs. Elle soutient les projets de SMR avec une centrale flottante déjà en exploitation et des projets de réacteurs pour répondre aux besoins des sites miniers.
- La **Chine** soutient l'ensemble des systèmes de 4ème génération à la fois pour la fermeture du cycle et les applications calogènes (chaleur industrielle). Elle a renforcé le développement dans le domaine des SMR, avec une première mise en service en septembre 2021. Le même mois, le pays a démarré un prototype de réacteurs de haute température (HTR-PM), destiné aux applications industrielles.

Le Royaume Uni et Canada accélèrent dans le domaine des SMR :

- Le **Royaume-Uni** a inclus les SMR et les réacteurs avancés (AMR) dans le "10-point plan" de Boris Johnston fin 2020 et a renforcé son soutien au projet SMR de Rolls-Royce (200 millions de £). Il a identifié un besoin de capacité de 14 GW nucléaire pour atteindre son objectif de neutralité climatique à 2050, et met en avant les applications du nucléaire pour la production de chaleur industrielle et d'hydrogène bas-carbone.
- Le **Canada** a lancé de nombreuses initiatives aux niveaux national et des provinces avec des applications très diverses afin de répondre aux objectifs de décarbonation des sites isolés (centrales charbons, sites miniers). Une première procédure de certification est en cours, avec une forte mobilisation de l'autorité de sûreté nationale pour définir un cadre adapté à la certification des réacteurs innovants

La France a de nombreux atouts pour être un acteur majeur sur ces concepts du futur, du fait de ses centres de recherche et aussi sa filière industrielle, troisième du pays avec 220 000 salariés et 3 200 entreprises, répartis sur tout le territoire. Les activités de la filière nucléaire contribuent à ce que Elie Cohen et Pierre-André Buigues appellent la richesse d'un « écosystème territorial », fait « des interactions entre fournisseurs et donneurs d'ordre, entre laboratoires et usines, et même entre start-up et tissu industriel »³. Selon le CSFN, la filière nucléaire investit 970 millions d'euros par an en recherche, en particulier dans des domaines comme la mécanique, la résistance des matériaux, les fabrications métallurgiques innovantes et l'instrumentation, des activités qui bénéficient naturellement aux autres filières industrielles. 120 thèses sont lancées chaque année par la Direction des énergies du CEA, la plupart en partenariat avec les universités, partout en France.

« Nous devons réinvestir pour être à la pointe de l'innovation dans les technologies de ce secteur », a déclaré Emmanuel Macron.

2. Le plan doit permettre de soutenir les prochaines étapes de la conception du projet SMR français Nuward™

Une partie de l'enveloppe d'un milliard d'euros doit participer à la construction d'un réacteur modulaire de petite puissance, un SMR, en France en 2030.

Le projet français Nuward™ est un réacteur de 170 MW, prévu pour être construit par paire. Il est développé par un consortium de plusieurs acteurs français, dont EDF, le CEA, Technicatome et Naval Group. Basé sur la technologie à eau légère des réacteurs actuels, il offre une grande compacité et de nouvelles options de sûreté : par exemple, la puissance résiduelle du réacteur à l'arrêt serait évacuée par des systèmes de refroidissement passifs, et le bâtiment de l'îlot nucléaire pourrait être semi-enterré afin de faciliter la protection de la centrale contre les agressions externes. La petite puissance permet la suppression de certains systèmes, la simplification du design et l'amélioration de sa constructibilité et de sa compétitivité. Le design très compact et intégré, facilitera une fabrication en usine et un assemblage sur site plus rapide, avec l'objectif d'atteindre des effets de série et de réduire les coûts. Il est à souligner La France possède une expérience de premier plan en matière de réacteurs compacts grâce à la propulsion navale.

La **phase d'avant-projet sommaire (APS)** ou conceptual design, est en cours et doit aboutir en 2022 avec le dépôt d'un dossier d'options de sûreté auprès de l'ASN. Elle a reçu le soutien du plan de relance pour 50M€. Cette phase est dédiée aux choix des grandes options de conception, à du prédimensionnement et à la montée en maturité technologique et industrielle relative aux options choisies. Par exemple, comme dans les autres projets de réacteurs innovants dans le monde, des maquettes à échelle réduite puis à taille réelle de certains équipements peuvent être fabriquées et testées pour confirmer les procédés de fabrication, les performances, les plages de fonctionnement. Des essais sont ainsi lancés pour les générateurs à plaques qui seront inclus dans la cuve, ou pour les moteurs immergés des futurs mécanismes de commande de grappes immergés.

Ce travail devra se poursuivre après 2022 par une étape de basic design puis de detailed design pour commencer à construire un premier exemplaire (premier béton) à l'horizon 2030.

³ Elie Cohen et Pierre André Buigues, le décrochage industriel, Fayard, 2014.

Même s'il paraît recommandé de construire le premier prototype en France, le réacteur Nuward n'est pas prioritairement destiné à renouveler le parc nucléaire actuel. Il pourrait y contribuer en complément des EPR2, mais son objectif est l'export afin de remplacer les centrales à charbon (300-400MW). Il peut aussi de manière pratique être conçu dès le départ pour des applications dans les domaines de la chaleur et la production d'hydrogène avec de l'électrolyse haute-température, et adapté aux besoins des systèmes énergétiques territoriaux où l'on projette de l'implanter.

Au niveau européen une action a été engagée pour créer une dynamique européenne autour de NUWARD : 'supply chain' européenne, pre-licensing concerté entre Autorités de sûreté des pays intéressés par les SMR, exploration de cas d'usages avec des énergéticiens européens. L'IRSN a publié très récemment une note d'information sur la sûreté des réacteurs modulaires de faible puissance indiquant que « les principes de conception retenus à ce stade pour le projet Nuward apparaissent intéressants ».

3. Le plan inclurait aussi le lancement de plusieurs projets de recherche sur des technologies différentes de réacteurs AMR

Au-delà de Nuward, le Président a aussi développé dans son discours du 12 octobre que la France devait « réinvestir pour être à la pointe de l'innovation de rupture ». Pour y parvenir, « nous devons ouvrir le jeu de manière totalement inédite ». L'objectif est de progresser sur deux sujets clefs : « améliorer toujours et encore la sûreté en baissant les coûts et réduire les déchets qui est un point clé quand on parle de nucléaire ». S'agissant de ce dernier point, l'idée est de faire émerger des réacteurs à neutrons rapides, seuls à même de mettre en œuvre la transmutation des actinides mineurs, c'est-à-dire la transformation des déchets à vie longue en déchets à vie courte (inférieure à 300 ans).

Des modèles « ouverts » d'innovation ont déjà été mis en place dans plusieurs pays pour soutenir la conception et le développement des AMR :

- **Aux Etats-Unis** : le ministère de l'énergie (DOE) a annoncé fin 2020 un soutien de 1,5 milliards⁴ de dollars, juste pour l'année fiscale 2021, à la R&D nucléaire dont 280 millions pour le programme « Advanced Reactor Demonstration Program » (ARDP). Ce programme vise à accélérer le développement des réacteurs avancés par un mode de partage des coûts avec les acteurs privés. Le programme prévoit des soutiens, correspondant à des degrés de maturité différents, qui vont de la résolution de défis techniques, opérationnels et réglementaires, à la démonstration de réacteurs avancés pour aboutir à des centrales opérationnelles dans les cinq à sept ans. A ce jour, **dix concepts différents**, à différents stades de maturité, sont soutenus par le programme.
- **Au Japon** : le programme « Nuclear Energy x Innovation Promotion » (NEXIP)⁵ a été lancé fin 2020 par le METI, en collaboration avec la JAEA (Japan Atomic Energy Agency), là encore pour accélérer le développement des AMR. Le programme comprend des soutiens financiers pour le secteur privé, des soutiens sous forme d'accès aux laboratoires publics, et des initiatives visant au développement des compétences

Dans l'écosystème nucléaire français, l'innovation sur les systèmes de production nucléaire est portée aujourd'hui par les grands acteurs de la filière (CEA, EDF, Framatome et Orano). Plusieurs actions ont été lancées déjà par les grands acteurs pour trouver des successeurs aux systèmes Gen IV :

⁴ « Les Etats-Unis s'engagent vers le déploiement des premiers SMR » RGN Janvier-Février 2021

⁵ [https://www.jaea.go.jp/04/kokusaibu/ja/event/20201022/pdf/2.Keynote\(METI\).pdf](https://www.jaea.go.jp/04/kokusaibu/ja/event/20201022/pdf/2.Keynote(METI).pdf)

- CEA, Orano, EDF, Framatome et le CNRS travaillent sur un concept de AMR-MSR convertisseur d'actinides. En effet, la technologie des réacteurs à sels fondus à spectre rapide présente un intérêt pour la filière, permettant une transmutation efficace tout en minimisant les opérations de transport et de manipulation des actinides mineurs. Concrètement, la mise en œuvre d'un tel projet permettrait une réduction drastique du volume et de la durée de vie des déchets ultimes, par l'incinération des actinides mineurs.
- Framatome travaille sur des briques technologiques dans le cadre de différents projets à l'étranger et a mis en place une « Ecole de design » pour travailler sur de nouveaux concepts de réacteurs avancés. Il a signé à cet effet un accord de coopération en mars 2021 avec l'IN2P3 (CNRS)⁶.
- le CEA a lancé des recherches sur des AMR-sodium (un concept évolutionnaire dans la lignée de New ASTRID 150 MWe et un autre concept plus en rupture)

L'écosystème d'innovation en France demeure néanmoins relativement étroit : au-delà de ces projets portés par les grands donneurs d'ordre, les initiatives du secteur privé dans le domaine ou projets de start-up sont très réduites.

Il conviendra au gouvernement de préciser comment il souhaite procéder pour mettre en place un process adapté à l'écosystème français. Mais on pourrait imaginer par exemple, en s'inspirant des Etats-Unis et du Japon, que le gouvernement appelle les différents acteurs du marché, des grands industriels aux start-ups naissantes, à proposer des projets **en rupture avec le cadre habituel d'innovation dans le secteur nucléaire** : que ce soit en matière de sûreté, de gestion des matières, de méthodes de conception/de construction, ou d'applications. Un process de sélection, sur des critères à déterminer, permettrait alors de soutenir alors plusieurs projets AMR, ou des briques technologiques associées, au cours des différentes phases de leur conception.

Il faut noter que les moyens expérimentaux publics devront être sûrement renforcés pour permettre aux acteurs privés de valider et qualifier à la fois les briques technologiques et les systèmes intégrés. Une telle initiative, auquel pourrait s'associer le système d'enseignement et de la recherche, contribuerait aussi de manière forte, comme on l'a vu aux Etats-Unis, à renforcer **l'attractivité du secteur auprès des étudiants et des jeunes générations**.

⁶ « L'IN2P3 collabore avec l'École de Design de Framatome sur les réacteurs avancés » 31 mars 2021