



Paris, le 25 novembre 2020

Audition sur les conséquences de l'arrêt du programme ASTRID

Audition de Madame Valérie Faudon, déléguée générale de la Société française d'énergie nucléaire (Sfen) par les parlementaires de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST).

Tout d'abord je souhaiterais vous remercier, au nom de la Sfen, de nous recevoir aujourd'hui. La Sfen est une société savante, qui rassemble les scientifiques et ingénieurs du nucléaire depuis 1973. Notre raison d'être est de « permettre aux esprits curieux de se faire de nouvelles idées sur le nucléaire » et notre nouvelle signature est « faire avancer le nucléaire ».

La décision de l'arrêt du programme ASTRID et de la mise en place d'un nouveau programme structurant « *Promouvoir une économie circulaire au sein de la filière* » a été actée par la signature du Contrat stratégique de la filière nucléaire le 28 janvier 2019. Pour rappel, le Comité stratégique de la filière nucléaire (CSFN), qui a rédigé ce projet, a, comme tous les comités stratégiques de filière, une configuration tripartite : organisations syndicales – Etat – Industriels. Parmi ces derniers, on peut citer EDF, le CEA, et Orano. Il est important de rappeler qu'il y a eu consensus, au sein des industriels de la filière, sur cet accord.

Au niveau de la Sfen, cette décision a d'abord été une déception pour beaucoup de nos adhérents, attachés à l'excellence de la recherche nucléaire française dans le domaine des réacteurs à neutrons rapides. L'avant-projet sommaire (APS) d'ASTRID a reçu en 2016 le grand prix Sfen, qui est la plus haute récompense française en matière de recherche scientifique sur le nucléaire. Les études d'avant-projet d'ASTRID ont représenté 10 ans (2010-2019) de travaux menés par plus de 600 ingénieurs, chercheurs et techniciens sous la maîtrise d'ouvrage du CEA avec Framatome, EDF, et aussi une dizaine d'industriels français et étrangers. En toute transparence, la décision de l'arrêt du programme ASTRID est toujours une source de discussions intenses et « franches » dans nos groupes et sections. Nos publications ont montré le dynamisme de la recherche en Russie, en Chine, et aux Etats-Unis. Nous avons prévu d'organiser bientôt des séminaires internes qui j'espère permettront à la Sfen de jouer son rôle d'éclairage mais aussi de lieu de débats et de propositions pour « faire avancer le nucléaire ». J'en profite pour annoncer que la Sfen est en train de se doter d'un conseil scientifique, avec des personnalités extérieures, qui sera spécialement chargé de veiller à la rigueur scientifique et à la diversité des points de vue de nos publications.

Je vais me concentrer aujourd'hui sur les points qui semblent faire consensus à l'heure actuelle et qu'il nous semble impératif d'avoir à l'esprit.

Rappel : nous avons besoin de plus d'innovation au niveau mondial dans l'énergie nucléaire :

- Les grandes institutions internationales (Nations Unies, Organisation de coopération et de développement économiques, Union européenne) indiquent que toutes les technologies sobres en carbone (énergies renouvelables, nucléaire et captage du carbone & stockage) devront être mises en œuvre pour parvenir à une décarbonation en profondeur d'ici le milieu de ce siècle. Ainsi, dans le dernier rapport du GIEC publié en 2018, les quatre trajectoires illustratives à 1,5 °C du résumé pour décideurs montrent une utilisation de deux à six fois plus importante de l'énergie nucléaire d'ici 2050.
- Selon l'AIE, depuis 2000, le montant total des investissements publics en R&D dans les énergies propres a doublé, pour faire face aux défis de la décarbonation. Pourtant, **le niveau actuel de soutien public à la R&D nucléaire (fission et fusion) est resté constant**, autour de 4 milliards de dollars USD par an (2014). Ce décrochage des moyens disponibles pour l'innovation nucléaire est d'autant plus inquiétant que le secteur privé est aujourd'hui moins enclin à investir dans la R&D nucléaire, pour diverses raisons : signaux politiques mitigés ou négatifs, manque de visibilité sur les perspectives de rentabilité (temps longs, perspectives de revenus peu claires compte tenu des designs de marché).
- Ce décrochage est d'autant plus préoccupant que l'industrie nucléaire entreprend actuellement une nouvelle vague de projets créatifs autour de :
 - **technologies de réacteurs innovants : nous sommes dans une période d'effervescence en matière de conception de nouveaux réacteurs.** De nombreuses idées intéressantes avaient été abandonnées dans les années 60, pour cause de verrous technologiques et/ou pour favoriser une standardisation industrielle sur les réacteurs à eau légère. Aux Etats-Unis, ont été recensées une cinquantaine de start-ups¹ sur de nouveaux concepts de réacteurs. Beaucoup ont été créées par de jeunes chercheurs engagés dans de nouvelles solutions pour lutter contre le changement climatique. Huit d'entre elles ont déjà présenté un dossier de certification à l'Autorité de sûreté américaine (NRC)². Parmi elles, on compte six réacteurs à neutrons rapides, dont trois réacteurs aux sels fondus. Tous sont des réacteurs de petite capacité, allant du micro-réacteur (1 à 5 MWe) au mini-réacteur (400MWe).

Concepts de réacteurs GEN IV en cours d'inspection par l'Autorité de sûreté (NRC) Source : NRC

Développeur	Réacteur	Type	Puissance (MWe)
Oklo	OKLO	MMR Sodium	1 à 5
Westinghouse	eVinci	MMR Plomb	1 à 5
X-Energy	XE-100	HTGR TRISO	75
Terrestrial	ISMR	RSF thermique	190
TerraPower	MCFR	RSF rapide	300 à 400
Kairos power	KP-FHR	RSF TRISO	140

SEPTEMBRE OCTOBRE 2019 | REVUE GÉNÉRALE NUCLÉAIRE #5

¹ Third Way Energy

² RGN États-Unis, la GEN IV en effervescence, sept-oct 2019

- **technologies transverses**, comme la transformation numérique ou le développement et le test de nouveaux matériaux. Sur le numérique, nos échanges internationaux nous laissent penser que la filière française est à la pointe, avec de gros efforts en cours, sur des projets comme le Product lifecycle management (PLM), la continuité numérique de la filière (GIFEN), les jumeaux numériques, et les solutions dans le domaine du démantèlement. Certains de ces projets ont reçu un soutien de l'Etat.
- **nouvelles applications** : chaleur urbaine, désalinisation, chaleur industrielle, production d'hydrogène. L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA)³ rappelait⁴ qu'aujourd'hui 43 réacteurs nucléaires dans le monde génèrent du chauffage urbain, la plupart en Europe de l'Est et en Russie. Haiyang⁵, une ville côtière de l'Est de la Chine, a démarré en ce mois de novembre 2020 une usine de co-génération qui doit permettre d'alimenter en chaleur décarbonée 30 millions de m2 de bâtiments.
- Dans le même temps, **une grande partie de l'infrastructure de R&D (réacteurs de recherche, laboratoires) au niveau mondial devient obsolète** et doit être rénovée ou renouvelée. Cette infrastructure est nécessaire pour soutenir l'exploitation du parc actuel dans la durée, et aussi le développement de cette nouvelle vague de réacteurs innovants. Elle est aussi indispensable pour produire les radio-isotopes nécessaires au développement de la médecine nucléaire, un secteur en forte croissance dans les années et décennies à venir. Elle nécessite de lourds investissements pour prolonger et renouveler les installations, et ne pourra se faire sans des coopérations et mutualisations au niveau international.

Il faut garder aussi à l'esprit un élément de contexte : selon le président du GIEC dans son compte-rendu du rapport SR1,5 publié fin 2018, les deux principaux défis à relever d'ici 2050 pour le nucléaire au niveau mondial sont d'un côté, la compétitivité par rapport aux autres technologies non fossiles, et de l'autre l'accélération de son rythme de déploiement. Les Etats devront donc à la fois soutenir cette vague d'innovation sans précédent sur les réacteurs de demain, et aussi aider leurs industries nationales à relever ces deux défis actuels, avec les générations de réacteurs industriellement disponibles aujourd'hui. C'est le cas en particulier pour la France.

1. Sur la question de l'urgence d'un point de vue des ressources :

Le contrat de filière signé en janvier 2019 par l'Etat et le CSFN indique que « *le recyclage complet requiert la mise au point d'une nouvelle technologie de réacteurs et d'usines du cycle dite de Génération IV car il n'est pas accessible dans les réacteurs et usines actuels. Il n'est pas aujourd'hui, ni à un horizon antérieur à la dernière partie du XXIème siècle nécessaire de le mettre en œuvre à grande échelle dans la mesure où les ressources en uranium naturel sont abondantes et disponibles à prix acceptable, au moins jusqu'à cet horizon* ».

En effet, la France recycle son combustible, ce qui permet d'économiser aujourd'hui 10 % d'uranium naturel, et jusqu'à 25 % à partir de 2023, conformément à la stratégie d'EDF de valoriser l'uranium issu du retraitement des combustibles usés. Les ressources mondiales connues et estimées par l'OCDE-NEA sont de 120 ans, à taille du parc constante.

⁴ IAEA : guidance on nuclear energy cogeneration

⁵ Nuclear Engineering International May 2020 China's nuclear heating project approved, 11 may 2020

Il est aussi clair que le renouvellement nucléaire, rendu nécessaire par l'arrivée à 60 ans d'une grande partie du parc actuel à partir de 2035-2040, se fera avec des réacteurs à eau légère de troisième génération (EPR2).

La Sfen fait deux remarques :

- La France doit être préparée à une **possible accélération des programmes nucléaires** mondiaux d'ici 2030, alors que de nombreux pays, à commencer par l'UE, ont déclaré depuis la nouvelle ambition d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. Une telle accélération serait à vrai dire une excellente nouvelle pour le climat. Ainsi la Chine a annoncé en septembre 2020 pour la première fois un objectif de neutralité carbone pour 2060 : la prestigieuse université de Tsinghua⁶ a présenté un plan qui prévoit, en plus de beaucoup de renouvelables, un parc nucléaire multiplié par 4, ce qui correspond au double du parc américain actuel. Le président de l'exploitant chinois CNNC a annoncé en octobre 2019 à Vienne⁷ qu'il serait bientôt en mesure de construire « 6 à 8 réacteurs par an ». On peut s'attendre aussi à ce que les Etats-Unis, après l'élection de Joe Biden, annoncent bientôt enfin un objectif de neutralité carbone, et avec, une nouvelle ambition sur le nucléaire. Plusieurs organisations (AIEA, OCDE, WNA) suivent aujourd'hui les projets de constructions neuves au niveau mondial, ainsi que ceux d'activités extractives : ils évaluent régulièrement de manière prospective l'équilibre offre-demande de l'uranium. Cette dynamique doit faire l'objet d'un suivi attentif, sachant que, au vu du temps de développement des projets et de leur construction, elle est à l'échelle de la décennie ou plus.
- **Un report de plusieurs dizaines d'années du programme de multi-recyclage en réacteurs à neutrons rapides (RNR) ne doit pas remettre en cause la classification en « matières » des réserves actuelles d'uranium appauvri et de plutonium.** L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), dans son avis du 8 octobre⁸ 2020, qui n'est que consultatif, estimait que « *la valorisation d'une matière radioactive peut être considérée comme plausible si l'existence d'une filière industrielle est réaliste à un horizon d'une trentaine d'années* ». La Sfen a rappelé, dans le cas de l'uranium appauvri⁹, que les conditions d'entreposage de ces matières sont satisfaisantes d'un point de vue de la sûreté dans la durée et que la valorisation de ces matières présente des bénéfices environnementaux, économiques et stratégiques qui justifient qu'elles restent classifiées en matières au-delà de cent ans. Enfin, le programme de multi-recyclage en REP a pour objectif de stabiliser à la fois les inventaires de combustibles usés et de plutonium. Pour rappel, ce programme, mené par le Orano, CEA, EDF et Framatome, est un des programmes structurants du contrat de filière et est soutenu par le plan de relance du gouvernement.

2. Sur la question de la concurrence internationale relative aux RNR :

Sur le sujet des réacteurs de demain, on peut dire que la France dispose d'une avance stratégique dans trois domaines : **1/** la chimie séparative et le retraitement (usine de traitement Orano La Hague dans le Cotentin) **2/** la fabrication du combustible MOX (usine de Melox dans le Gard) **3/** les réacteurs rapides au sodium, avec l'expérience acquise dans les projets Phénix (1973-2009) et Superphénix (1986-1998).

- La France dispose d'une maîtrise industrielle des technologies de traitement et recyclage (points 1 et 2), qui constitue aussi le socle des systèmes nucléaires avancés (réacteurs de

⁶ China's Top Climate Scientists Plan Road Map to 2060 Goal- Bloomberg News Bookmark September 28, 2020

⁷ RGN 08.10.2019 Le Président du GIEC à l'AIEA : « le climat a besoin de toute l'aide possible »

⁸ Avis n° 2020-AV-0363 de l'ASN du 8 octobre 2020

⁹ SFEN, La gestion de l'uranium appauvri et son caractère valorisable, octobre 2020

4^{ème} génération). La Sfen se félicite que la filière industrielle de recyclage soit pérennisée dans l'accord stratégique de filière. D'abord grâce au **déploiement du MOX sur les paliers 1300MW**, et aussi, sous condition de faisabilité industrielle (c'est l'un des objets du programme de R&D sur MRREP), dans le parc EPR2 renouvelé. Le programme MRREP devrait permettre aussi de **progresser techniquement sur des sujets communs au multi-recyclage en REP et en RNR** (comme le traitement des MOX usés à l'échelle industrielle ou certains sujets de fabrication des combustibles) et, si la décision était prise, de commencer le déploiement progressif des installations du cycle qui seront nécessaires.

- En revanche, nous estimons que **la France qui, comme la Russie, dispose d'une avance technologique sur les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na), pourrait perdre son statut de leader**. A côté de la Russie, l'Inde, les Etats-Unis et la Chine investissent désormais pour développer cette technologie. La France étant seule, vraiment porteuse, de la compétence RNR-Na en Europe. C'est donc tout notre continent qui risque de perdre ses compétences sur une technologie de RNR qui est, il faut le rappeler, la plus mûre pour l'exploitation commerciale. Pour rappel :
 - Les russes bénéficient d'une expérience en opération de deux réacteurs RNR-Na¹⁰, dont le premier depuis 1980.
 - L'Inde a annoncé en mai 2020 le démarrage de son nouveau réacteur PFBR (un 500MW RNR-Na) pour fin 2021.
 - Le Département de l'énergie (DOE) américain a annoncé en octobre 2020 un soutien de 80 millions de USD¹¹, qui pourrait être suivi¹² de 400 millions à 4 milliards de USD au cours des 5 à 7 prochaines années à Terrapower, la société fondée par Bill Gates, pour la construction avec General Electric d'un démonstrateur de son réacteur « Natrium » qui utilise le sodium comme caloporteur. Le même DOE a annoncé un projet de réacteur expérimental d'irradiation, le « Versatile test reactor (ou VTR) » ; il s'agit d'un réacteur refroidi au sodium à spectre rapide pour lequel le congrès américain a validé près de 300 millions de dollars de financement pour 2021. La construction du réacteur sur le site d'Idaho National Laboratory serait prévue d'ici 2026 avec un budget entre 3 et 6 milliards de USD.
 - La Chine construit, quant à elle, actuellement un RNR-Na, le CFR-600. D'une manière générale, on peut recenser en Chine aujourd'hui des projets de R&D et de démonstrateurs sur quasiment toutes les technologies, du sodium¹³ aux sels fondus, soulignant la stratégie d'investigation « tous azimuts' » et sa volonté de s'affranchir des technologies occidentales pour développer ses propres brevets.

3. Sur la question du maintien et/ou du développement des compétences sur les RNR :

La nouvelle feuille de route du programme R&D du CEA, outre qu'il approfondit et valorise les acquis du programme ASTRID, a pour objet de maintenir les compétences clefs en matière de R&D, et, on l'espère, constituer un portefeuille de brevets valorisable à l'avenir.

- A ce stade il semble y avoir consensus sur les sujets sélectionnés à la fois sur le volet réacteur et sur le volet cycle. Pour rappel sur le volet réacteur, ce sont : **1/** des travaux de recherche sur la physique des réacteurs et les matériaux qui concernent la simulation multi-physique et multi-échelle, les accidents graves, le combustible, les matériaux du cœur et de la chaudière ; **2/** des développements technologiques ciblés, par exemple sur

¹⁰ Les réacteurs russes Beloyarsk-3 (BN-600) et Beloyarsk-4 (BN-800) qui produisent depuis 2016 de l'ordre de 9 TWh/an sur le réseau russe. La construction d'un premier réacteur BN1200 a été repoussé (source WNA). Les russes ont lancé entre temps un projet de démonstrateur RNR-Pb BREST OD 300 (source : Nuclear Engineering International 22 Mai 2020)

¹¹ Terrapower DOE Natrium demonstration award 13 Octobre 2020

¹² Sciencemag DOE picks two advanced nuclear reactors demonstration projects

la mesure et la visualisation dans le sodium ; enfin, **3/** des études d'esquisse « pour poursuivre les innovations et la simplification de l'architecture du RNR-Na ». Sur le volet cycle, il y a aussi trois composantes identifiées **1/** le développement de procédés avancés pour les usines futures, tenant compte des flux de plutonium, et la question de l'efficacité économique ; **2/** la démonstration du caractère « recyclable » des matières ; enfin **3/** la gestion des déchets, avec le maintien d'une R&D sur la séparation et la transmutation des actinides mineurs. A noter que deux premières composantes sont communes aux multi-recyclage en REP et en RNR.

- On peut aussi se féliciter des partenariats internationaux dans le cadre de ce programme de R&D. Tout d'abord le Japon, avec qui une coopération, démarrée en 2014 dans le cadre du programme ASTRID, se poursuivra jusqu'en 2024. La Russie est aussi un partenaire étroit de la France où l'expertise est connue en matière de RNR, et qui dispose d'un certain nombre d'installations expérimentales. Ainsi le projet de recherche français d'irradiation en RNR de plutonium issu de MOX REP usé fait l'objet d'un accord de coopération entre le CEA, EDF et les partenaires russes. Le CEA a aussi signé un accord de coopération avec les États-Unis dans le cadre du projet VTR.
- **On peut se féliciter enfin aussi de la décision, dans le nouveau programme de recherche sur les RNR français, de s'intéresser à d'autres filières dites « de rupture »**, à commencer par un travail sur la faisabilité des concepts de réacteur nucléaire à sels fondus (MSR) en « spectre rapide », accompagnées d'une veille scientifique sur les autres filières, gaz, plomb, haute température. Au-delà de la gestion des matières, ces filières, qui resteront pour plusieurs années moins compétitives dans la production d'électricité que les filières à eau légère, pourront donner, du fait de leur modularité, leur plein potentiel dans des nouvelles applications, sur lesquelles il n'existe aujourd'hui que très peu d'alternatives, comme par exemple la décarbonation de certains secteurs industriels (en alternative à la biomasse).

Nous pensons néanmoins qu'il est important d'attirer l'attention sur deux points qui nous paraissent essentiels :

- Le premier est qu'on ne peut maintenir une compétence technologique et industrielle uniquement en faisant de la R&D. L'expérience de l'EPR de Flamanville a montré que l'on ne peut maintenir une compétence sur les constructions neuves si on n'assure pas une bonne continuité entre les projets. Aujourd'hui, les générations qui ont participé au projet Superphénix sont parties ou sont en train de partir à la retraite, et nous n'avons pas de relais pour organiser la transmission sur certains métiers. On peut espérer que la relance d'un programme de constructions neuves (EPR2) permettra de reconstituer des compétences utiles aussi du côté des RNR, même si ces réacteurs ont des spécificités, en particulier côté supply chain (ateliers avec des alliages et matériaux spécifiques).
- Le second est qu'on peut craindre (même si on manque de données sur ce sujet) que la filière peine à recruter les meilleurs talents de recherche sans projet de réacteurs de 4^{ème} génération. Les Etats-Unis l'ont bien compris : s'ils comptent aujourd'hui toujours sur les réacteurs à eau légère, comme le petit réacteur modulaire (SMR) de Nuscale, pour renouveler et développer leur infrastructure de production, ils soutiennent fortement les start-ups sur les RNR afin de constituer une pépinière de talents et de technologies pour demain. Il est essentiel que la France organise aussi la gestion de ses talents, par exemple via des collaborations avec des projets à l'étranger, et en mettant plus en visibilité les projets les projets de technologies disruptives et les nouvelles applications du nucléaire.

En conclusion : pour une R&D forte, il faut une industrie forte et des alliances internationales fortes

- **La France a besoin d'une industrie nucléaire forte :**

La relocalisation, et, au-delà, la souveraineté technologique et industrielle du pays, sont revenus sur le devant de la scène. Dans son livre « le décrochage industriel », Elie Cohen mettait en avant l'importance de l'écosystème territorial, fait des interactions entre fournisseurs et donneurs d'ordre, entre laboratoires et usines, et même entre start-up et tissu industriel. Les allers-retours entre laboratoires et usines sont décisifs dans les processus d'innovation incrémentale. Pour une R&D nucléaire forte, pour soutenir les réacteurs d'aujourd'hui comme ceux de demain, la France a besoin de rebâtir une industrie nucléaire forte. Une étude du BCG pour la Sfen fin 2018 montrait que de nombreuses entreprises de la filière souffraient déjà du manque de visibilité sur l'avenir du nucléaire en France. La filière attend aujourd'hui, pour recruter et investir, une décision sur le programme industriel de constructions neuves, actuellement en cours d'instruction dans le cadre de la PPE.

- **La France a besoin d'alliances internationales fortes :**

Nous l'avons vu : la recherche nucléaire a besoin d'investissements sur les infrastructures de recherche, sur des démonstrateurs sur de nouveaux concepts. Pour participer à cet élan, la France, qui peut s'appuyer sur son leadership technique et industriel sur le traitement et le recyclage, doit développer des partenariats avec tous les grands acteurs du nucléaire dans le monde. Or :

- On peut regretter que la France, plusieurs fois sollicitée par les Etats-Unis, le Canada et le Japon pour participer à l'initiative ministérielle NICE¹⁴ (Nuclear Innovation : Clean Energy Future) dans le cadre des Clean Energy Ministerial (CEM), n'ait toujours pas répondu présente.
- On peut regretter le soutien insuffisant de l'UE, à la fois en matière de financements des projets de nouveaux concepts de réacteurs de fission (dans le cadre Euratom), mais aussi dans la mise en place des outils de financement nécessaires au maintien d'une filière nucléaire européenne forte, à ce jour, le nucléaire n'est toujours pas inclus dans la taxonomie pour une finance durable

¹⁴ RGN, 29.05.2018, NICE Future : une coalition d'Etats soutient le nucléaire