

RAPPORTS D'OFFICE PARLEMENTAIRE

# Le développement des réacteurs nucléaires innovants en France

Rapport n° 217 (2023-2024), déposé le 14 décembre 2023

Autres formats

- CONCLUSIONS DE L'AUDITION PUBLIQUE DU 23 NOVEMBRE 2023 SUR LE DÉVELOPPEMENT DES RÉACTEURS NUCLÉAIRES INNOVANTS EN FRANCE
  - I. SYNTHÈSE DES RAPPORTEURS
  - II. RECOMMANDATIONS
- TRAVAUX DE L'OFFICE
  - I. COMPTE RENDU DE L'AUDITION PUBLIQUE DU 23 NOVEMBRE 2023
    - A. LES START-UP ET L'INNOVATION DANS LE DOMAINE DES RÉACTEURS À NEUTRONS RAPIDES ET LA FERMETURE DU CYCLE
    - B. AVANCÉES ET PERSPECTIVES POUR LES RÉACTEURS À EAU PRESSURISÉE
    - C. L'ACCOMPAGNEMENT DE LA CERTIFICATION DES SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES INNOVANTES
    - D. DÉBAT ET CONCLUSIONS SUR LA PLACE DES START-UP DANS LE DÉVELOPPEMENT DES RÉACTEURS NUCLÉAIRES DU FUTUR
  - II. EXTRAITS DU COMPTE RENDU DE LA RÉUNION DE L'OPECST DU MARDI 14 DÉCEMBRE 2023 PRÉSENTANT LES CONCLUSIONS DE L'AUDITION PUBLIQUE

## Les informations clés

### NATURE

Rapport de l'OPECST

### STRUCTURE EN CHARGE

Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

### RAPPORTEURS



Stéphane PIEDNOIR



Olga GIVERNET

### NOTICE DU DOCUMENT

Voir la notice

N° 1997

N° 217

ASSEMBLÉE NATIONALE

SÉNAT

CONSTITUTION DU 4 OCTOBRE 1958

SESSION ORDINAIRE 2023 - 2024

SEIZIÈME LÉGISLATURE

Enregistré à la présidence de l'Assemblée nationale

Enregistré à la présidence du Sénat

le 14 décembre 2023

le 14 décembre 2023

### RAPPORT

*au nom de*

L'OFFICE PARLEMENTAIRE D'ÉVALUATION

DES CHOIX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

*sur*

Le développement des réacteurs nucléaires innovants en France

*Compte rendu de l'audition publique du 23 novembre 2023*

*et de la présentation des conclusions du 14 décembre 2023*

par Mme Olga GIVERNET, députée, et  
M. Stéphane PIEDNOIR, sénateur,

Déposé sur le Bureau de l'Assemblée nationale

Déposé sur le Bureau du Sénat

par M. Pierre HENRIET,

par M. Stéphane PIEDNOIR

*Premier vice-président de l'Office*

*Président de l'Office*

Composition de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

**Président**

M. Stéphane PIEDNOIR, sénateur

**Premier vice-président**

M. Pierre HENRIET, député

**Vice-présidents**

M. Jean-Luc FUGIT, député

Mme Florence LASSARADE, sénatrice

M. Victor HABERT-DASSAULT, député

Mme Anne-Catherine LOISIER, sénatrice

M. Gérard LESEUL député

M. David ROS, sénateur

**DÉPUTÉS**

**SÉNATEURS**

Mme Christine ARRIGHI

M. Arnaud BAZIN

M. Philippe BERTA

Mme Martine BERTHET

M. Philippe BOLO

Mme Alexandra BORCHIO FONTIMP

Mme Maud BREGEON

M. Patrick CHAIZE

M. Hendrik DAVI

M. André GUIOL

Mme Olga GIVERNET

M. Ludovic HAYE

M. Maxime LAISNEY

M. Olivier HENNO

M. Aurélien LOPEZ-LIGUORI

Mme Sonia de LA PROVÔTÉ

M. Yannick NEUDER

M. Pierre MÉDEVIELLE

M. Jean-François PORTARRIEU

Mme Corinne NARASSIGUIN

Mme Mereana REID ARBELOT

M. Pierre OUZOULIAS

M. Alexandre SABATOU

M. Daniel SALMON

M. Jean-Philippe TANGUY

M. Bruno SIDO

Mme Huguette TIEGNA

M. Michaël WEBER

# CONCLUSIONS DE L'AUDITION PUBLIQUE DU 23 NOVEMBRE 2023 SUR LE DÉVELOPPEMENT DES RÉACTEURS NUCLÉAIRES INNOVANTS EN FRANCE

## I. SYNTHÈSE DES RAPPORTEURS

L'audition du 23 novembre 2023 sur le développement des réacteurs nucléaires innovants en France s'inscrit dans le contexte de la relance de la filière nucléaire, initiée à Belfort en février 2022 par le Président de la République, après plus de 20 ans d'attentisme et de renoncements, l'un des derniers étant la décision, officialisée dans l'été 2019, d'arrêt (ou de suspension) du programme sur le réacteur à neutrons rapides Astrid.

Astrid était un projet de réacteur refroidi au sodium de 800 mégawatts électriques - préfigurant un réacteur de production dépassant 1 000 mégawatts - qui prenait la suite des réacteurs expérimentaux Rapsodie et Phénix, ainsi que du réacteur de puissance Superphénix, de 1 200 mégawatts électriques, qui a été arrêté en 1997, bien qu'il ait atteint, comme cela a été rappelé lors de l'audition, un taux de disponibilité de 96 % en 1996. Plusieurs réacteurs du même type sont exploités en Chine, en Inde et en Fédération de Russie, le plus puissant, le BN-800 russe, atteignant 800 mégawatts électriques.

L'annonce, fin 2021, du plan d'investissement « France 2030 » laissait déjà entrevoir un revirement sur l'énergie nucléaire, puisqu'il comportait un volet destiné à « *faire émerger en France des réacteurs nucléaires de petite taille, innovants et avec une meilleure gestion des déchets.* »

Cette ambition a commencé à se concrétiser par la proclamation, le 23 juin et le 27 novembre 2023, des lauréats de l'appel à projets « Réacteurs nucléaires innovants » de France 2030. Les deux premiers participaient d'ailleurs à l'audition.

À l'échelle européenne, après la création, en février 2023, à l'initiative de la France, de l'Alliance euro-

péenne pour le nucléaire, la Commission européenne a officiellement annoncé, le 7 novembre dernier, la prochaine mise en place d'une « alliance industrielle pour soutenir le déploiement des petits réacteurs nucléaires en Europe ».

Par ailleurs, l'audition du 23 novembre s'inscrivait pleinement dans la continuité des travaux de l'Office sur l'innovation dans le domaine de l'énergie. Elle a notamment permis de mesurer le chemin parcouru depuis la publication, en juillet 2021, du rapport sur « L'énergie nucléaire du futur et les conséquences de l'abandon du projet de réacteur nucléaire de 4<sup>e</sup> génération Astrid » dont Thomas Gassilloud, député, et Stéphane Piednoir, sénateur, sont les rapporteurs. Certaines des préconisations découlant de l'audition du 23 novembre 2023 étaient déjà, pour partie, mentionnées dans ce document.

Même si cela va de soi, il apparaît utile de souligner que l'audition du 23 novembre 2023 n'avait pas vocation à l'exhaustivité. Dans le temps limité d'une matinée, elle se concentrait sur l'innovation dans le domaine des réacteurs, qu'ils soient basés sur des technologies de rupture ou au contraire éprouvées, en mettant l'accent sur le rôle des *start-up*.

Certaines des questions soulevées par les membres de l'Office ou les participants seront approfondies à l'occasion de prochains travaux. Par exemple, celles touchant au stockage des déchets radioactifs seront traitées le 25 janvier 2024, dans le cadre d'une audition dédiée à l'évaluation du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR), dont les rapporteurs sont le député Hendrik Davi et le sénateur Bruno Sido.

L'audition du 23 novembre 2023 était structurée en deux tables rondes, consacrées à l'innovation dans le domaine des réacteurs avancés, innovation dans laquelle les *start-up* jouent un rôle de premier plan, et dans celui de la filière des réacteurs à eau pressurisée, à laquelle appartiennent les réacteurs du parc nucléaire actuel. Ces tables rondes étaient suivies d'une intervention coordonnée de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur l'accompagnement de la certification des solutions technologiques innovantes.

\*

\* \*

Pour la première table ronde, compte tenu du très grand nombre de projets de petits réacteurs modulaires, dits SMR (*small modular reactor*) en cours - de l'ordre de 80 dans le monde -, les rapporteurs ont restreint leur champ d'investigation aux réacteurs à neutrons rapides, capables de mettre en oeuvre une fermeture complète du cycle du combustible. En effet, dès l'origine du programme nucléaire civil, la France a fait le choix d'un cycle du combustible fermé, dont l'objectif ultime est d'assurer la complète indépendance du pays pour sa production d'électricité. C'est la raison pour laquelle la loi du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs prévoit, dans son article 3, la construction d'un réacteur de ce type. Par ailleurs, l'article 6 de cette même loi dispose que « *La réduction de la quantité et de la nocivité des déchets radioactifs est recherchée notamment par le retraitement des combustibles usés* », ce qui confirme sur le plan législatif l'orientation prise en faveur de la fermeture du cycle.

De plus, les rapporteurs n'ont retenu que des *start-up* françaises ou, pour l'une d'entre elles, européenne disposant d'un établissement en France.

Cette table ronde regroupait les deux premières *start-up* lauréates du premier appel à projets de France 2030 sur les « Réacteurs nucléaires innovants » : NAAREA et NEWCLEO, ainsi que deux *start-up* essaimées du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) : HEXANA et STELLARIA.

Les débats ont mis en évidence la diversité des approches technologiques retenues pour concevoir des réacteurs nucléaires de nouvelle génération : NAAREA et STELLARIA misent sur des réacteurs à sels fondus, HEXANA se concentre sur les réacteurs refroidis au sodium, héritiers directs d'Astrid, tandis que NEWCLEO se tourne vers les réacteurs refroidis au plomb. Ces réacteurs se distinguent aussi par leur puissance, allant de 80 mégawatts thermiques à plusieurs centaines de mégawatts. Cette diversité reflète la recherche de solutions adaptées à différents besoins industriels : production, à plus ou moins grande échelle, d'électricité, de chaleur, d'hydrogène, désalinisation, etc.

Il est clairement apparu que la fermeture du cycle du combustible constituait une préoccupation commune à ces *start-up*. D'une part, la question de l'insertion des différents concepts de réacteurs dans le cycle existant a bien été prise en compte, même si elle reste à mettre en oeuvre : tous nécessitent, en effet, la production de nouveaux types de combustibles. D'autre part, ces nouveaux réacteurs permettraient un recyclage beaucoup plus abouti des matières valorisables issues de l'enrichissement de l'uranium et des combustibles nucléaires : uranium appauvri ou de retraitement, plutonium, voire thorium. Certains intervenants ont même évoqué le potentiel de transmutation des actinides mineurs, un aspect également mentionné dans la loi de 2006.

Afin d'atteindre ces objectifs ambitieux, notamment en termes de délais, les entreprises entendues mobilisent des investissements privés conséquents, prévoient des partenariats avec des acteurs de

l'industrie ou des institutions de recherche et sollicitent le soutien des autorités pour accélérer le développement de leurs projets.

Un point mérite tout particulièrement d'être souligné : elles s'appuient toutes sur l'acquis scientifique et technologique des travaux de recherche et développement menés depuis plusieurs dizaines d'années en France, notamment sur les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, ou en Europe, en particulier en Italie, pour les réacteurs rapides refroidis au plomb.

À cet égard, ces *start-up* mobilisent les compétences et l'expérience de chercheurs, d'ingénieurs et de techniciens, français et européens, qui ont travaillé sur des installations telles que Phénix et Superphénix ou sur le projet Astrid. Elles assurent ainsi un rôle très important de préservation des connaissances, y compris en faisant appel à des personnels retraités, et de valorisation des investissements réalisés dans le passé, en France et en Europe, sur les réacteurs à neutrons rapides.

La seconde table ronde était consacrée à l'innovation sur les réacteurs à eau pressurisée, technologie sur laquelle est basé notre parc actuel.

Cette table ronde a mis en évidence le dynamisme de la filière nucléaire française. Les intervenants ont, en particulier, mis l'accent sur l'innovation, la collaboration entre les acteurs du secteur, et la contribution de la filière nucléaire à la transition énergétique ainsi qu'à la décarbonation de l'économie française.

Jean-François Debost, directeur général de Nuclear Valley, a souligné le rôle de ce pôle de compétitivité de plus de 430 adhérents, soutenu par plusieurs ministères et collectivités locales, dans la promotion de l'innovation nucléaire, en particulier auprès des PME et des *start-up*.

Olivier Bard, délégué général du Groupement des industriels français de l'énergie nucléaire (GIFEN), a présenté le rôle de cette organisation créée en 2018 qui fédère 500 entreprises de la filière nucléaire et oeuvre pour la mobilisation et la performance collective de la filière. À ce titre, elle couvre divers domaines, notamment les compétences, la formation, la sûreté, la qualité, et la transformation numérique.

Bernard Salha, directeur technique groupe et directeur de la R&D d'EDF, a mis en avant l'importance de l'innovation pour les réacteurs à eau pressurisée, y compris les réacteurs existants. Il a évoqué les nouvelles briques technologiques, comme l'intelligence artificielle et la fabrication additive, qui peuvent contribuer à améliorer la performance et la sûreté des réacteurs.

Enfin, Frédéric Hofmann, directeur du programme SMR France d'EDF, a présenté le réacteur de type SMR à eau pressurisée NUWARD, qui intègre des innovations telles que la construction modulaire, une chaudière intégrée, et la cogénération, offrant des avantages potentiels en termes de rapidité de construction, de sûreté, et de décarbonation de la chaleur industrielle.

La dernière partie de l'audition sur le développement des réacteurs nucléaires innovants en France était consacrée à l'accompagnement de la certification des solutions technologiques innovantes, avec des interventions conjointes d'Olivier Gupta, directeur général de l'ASN, et de Philippe Dupuy, responsable de la mission réacteurs innovants, ainsi que de Jean-Christophe Niel, directeur général de l'IRSN, et de Karine Herviou, directrice générale adjointe chargée de la sûreté nucléaire.

L'ASN a d'abord rappelé les trois principes fondamentaux qui s'appliquent à tous les réacteurs nucléaires, grands ou petits : la responsabilité première de l'exploitant dans la sûreté de son installation, l'exigence d'un haut niveau de protection des personnes et de l'environnement, et la transparence, avec des règles plus exigeantes que dans d'autres secteurs industriels.

Pour les porteurs de projets de petits réacteurs qui souhaitent que leurs réacteurs soient autorisés dans plusieurs pays, se pose la question de la standardisation et de l'harmonisation des règles de sûreté à l'échelle internationale. L'ASN et d'autres autorités de sûreté nucléaire travaillent sur des objectifs de sûreté harmonisés pour les petits réacteurs modulaires et cherchent des moyens de coopération internationale pour examiner les dossiers de sûreté simultanément dans plusieurs pays.

Les petits réacteurs nucléaires, qui seraient préférentiellement implantés près de zones industrielles ou densément peuplées, nécessitent des démonstrations de sûreté rigoureuses. En effet, même si les petits réacteurs sont de moindre puissance, ils peuvent contenir des quantités importantes de produits radioactifs. Les exigences de sûreté doivent donc permettre de limiter considérablement les conséquences des accidents potentiels. Il convient notamment de prouver que les rejets radioactifs restent négligeables en cas d'accident. Cela constitue un défi, en particulier en l'absence de retour d'expérience significatif sur certaines des technologies présentées.

L'IRSN a en effet indiqué que les projets de SMR présentent des maturités variables, avec un retour d'expérience limité pour certains concepts. La recherche et le développement sont donc essentiels pour soutenir à la fois la conception et la démonstration de sûreté de ces réacteurs. L'ASN et l'IRSN travaillent d'ores et déjà avec les concepteurs de réacteurs innovants sur ces questions.

Ces enjeux de sûreté concernent également le cycle du combustible associé aux réacteurs. De ce fait, la sûreté des installations de traitement du combustible doit être examinée conjointement avec celle



du réacteur.

L'IRSN a souligné qu'il se tenait prêt à contribuer à la formation des *start-up* sur les questions de sûreté nucléaire et à partager ses outils, par exemple de modélisation des accidents graves.

\*

\* \*

Les rapporteurs ont identifié cinq recommandations, qui prennent en compte un certain nombre des questions soulevées lors des débats particulièrement riches de cette audition.

La première recommandation porte sur les moyens alloués à l'ASN et à l'IRSN, indépendamment du projet de réforme de leur organisation. Les instances chargées de la sûreté et de la radioprotection doivent en effet disposer d'un effectif suffisant, en nombre et en qualité, pour accompagner les innovations technologiques, en France, mais aussi en lien avec les autres pays européens.

Leur capacité à répondre dans des délais raisonnablement courts, et surtout prévisibles, tout en ne dérogeant jamais à la rigueur de leur démarche en matière de sûreté et de radioprotection, constitue une condition indispensable à l'innovation dans le domaine des réacteurs, en particulier lorsqu'elle est portée par des *start-up*, qui doivent être en capacité d'afficher des calendriers clairs et resserrés pour parvenir à décrocher de nouveaux financements.

Aussi bien le directeur général de l'ASN que celui de l'IRSN ont confirmé, sans aucune ambiguïté, la nécessité d'un tel renfort. Pour l'ASN, il devrait intervenir à partir de 2025 et se poursuivre dans la durée. Pour l'IRSN, qui travaille en amont de l'ASN, cet accroissement des moyens apparaît indispensable dès aujourd'hui. Dans le cas contraire, l'IRSN devrait recourir à une solution dégradée, par redéploiement, ce qui se ferait au détriment d'autres dossiers.

Ce renforcement des moyens est une recommandation que l'Office avait déjà formulée dans son rapport du mois de juillet dernier sur l'organisation du contrôle de la sûreté et de la radioprotection, élaboré par Jean-Luc Fugit, député, et Stéphane Piednoir, sénateur, tout comme dans celui de juillet 2021 sur l'avenir de l'énergie nucléaire.

La deuxième recommandation rejoint les propos tenus par plusieurs intervenants de l'audition, aussi bien du côté des *start-up*, des autorités chargées de la sûreté que d'EDF, sur la nécessité d'un renforcement du soutien à la recherche et à l'innovation. Des progrès importants ont été accomplis ces dernières années, mais l'audition a bien mis en lumière que cet effort doit être poursuivi et sans doute amplifié. Il conviendrait par conséquent de revoir les moyens alloués dans ce domaine au CEA et à l'IRSN, mais aussi de remobiliser le CNRS et la recherche universitaire.

En lien avec ce besoin de montée en puissance de la recherche, la troisième recommandation concerne l'approfondissement de la coopération européenne, et au-delà internationale, sur la recherche et l'innovation dans le domaine nucléaire. Ainsi que l'a souligné Bernard Salha, « *les enjeux d'innovation sont tellement importants qu'il serait opportun de les partager entre plusieurs pays européens et de fédérer des actions* ».

De plus, avec la diversification des pistes technologiques et l'augmentation du coût des plateformes de recherche, la coopération à l'échelle européenne et internationale devient indispensable pour couvrir un champ suffisamment large, tout en modérant, ou du moins en optimisant les dépenses.

Il ne s'agit pas de contourner Euratom, mais il faut bien constater, après plus de 60 ans, que ce traité n'a pas contribué de façon suffisante à faire progresser sur notre continent les technologies nucléaires innovantes dans le domaine des réacteurs de fission.

Grâce à sa place dans les sciences et technologies de l'atome, la France a sans aucun doute un rôle de premier plan à jouer, au moins aussi important que dans le développement de l'aéronautique et du spatial en Europe.

Une initiative dans le domaine de la recherche et du développement serait d'ailleurs un prolongement naturel de la nouvelle Alliance européenne pour le nucléaire, qu'elle renforcerait, en ouvrant de nouvelles perspectives à nos partenaires.

C'est précisément ce que l'OPECST avait proposé dans son rapport de juillet 2021, tout comme l'ouverture d'une telle coopération à des pays proches, comme le Royaume Uni et l'Ukraine, ou plus éloignés, comme le Japon (à l'époque l'Australie, mais AUKUS est venu mettre à mal cette option).

La quatrième recommandation concerne l'adaptation - prudente - de la législation et de la réglementation aux besoins particuliers des technologies innovantes. En effet, la loi du 22 juin 2023 relative à l'accélération des procédures liées à la construction de nouvelles installations nucléaires à proximité de sites nucléaires existants et au fonctionnement des installations existantes ne prend pas spécifiquement en compte ces besoins, exprimés lors de l'audition.

Il conviendrait, en particulier, que le Gouvernement étudie de quelle façon la mise en place de dispositifs expérimentaux sur les sites de recherche nucléaire actuels pourrait être simplifiée ou leur

construction anticipée, tout en respectant strictement les règles de protection de la population et de l'environnement.

La cinquième recommandation porte sur la prise en compte de l'impact des nouveaux réacteurs sur le cycle du combustible nucléaire, en anticipant sur les besoins de combustible de ces nouveaux projets, mais aussi en examinant comment ils peuvent permettre d'atteindre l'objectif de fermeture du cycle prévu par la loi, qui a été laissé de côté depuis la suspension du projet Astrid.

Enfin, les rapporteurs se sont interrogés sur le besoin, évoqué par plusieurs membres de l'OPECST, de sensibiliser la population à la possibilité que des installations nucléaires soient un jour implantées à proximité de zones industrielles ou densément peuplées. Après réflexion, il leur a semblé qu'une telle démarche d'installation serait prématurée, car il reste à ce jour trop d'inconnues sur les conditions dans lesquelles, en termes de sûreté nucléaire et de radioprotection, mais aussi de sécurité, ceci pourrait être envisagé.

Il conviendra que l'Office suive avec beaucoup d'attention le développement de ces technologies pour juger du moment le plus opportun pour initier une telle démarche. À cet égard, il serait utile que l'Office prolonge la mission confiée à la Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs (CNE2) sur le suivi des développements sur les réacteurs avancés et étudie comment celle-ci pourrait être à terme inscrite dans les textes.

## II. RECOMMANDATIONS

1. Renforcer dans la durée les moyens de l'ASN et de l'IRSN afin d'accompagner les innovations technologiques et permettre l'instruction des dossiers des réacteurs innovants dans des délais raisonnablement courts et prévisibles, sans qu'il ne soit jamais dérogé à la rigueur actuelle en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection, tout en veillant à l'instruction parallèle des enjeux de sécurité.

2. Amplifier le soutien à la recherche et à l'innovation en matière de réacteurs innovants, en renforçant les moyens du CEA et de l'IRSN ainsi qu'en mobilisant le CNRS et la recherche universitaire.

3. Approfondir les coopérations européennes et internationales sur la recherche et l'innovation dans le domaine nucléaire, promouvoir le lancement d'une « initiative » dans la recherche et le développement des réacteurs innovants et y donner à la France un rôle de premier plan.

4. Adapter, de façon prudente, le cadre juridique du déploiement de l'énergie nucléaire pour mieux prendre en compte les besoins des technologies innovantes, par exemple en définissant un cadre spécifique pour des dispositifs expérimentaux implantés sur les sites de recherche nucléaires actuels, dans le strict respect des règles de protection de la population et de l'environnement.

5. Prendre en compte l'impact des réacteurs innovants sur le cycle du combustible nucléaire, tant au regard des besoins en combustible que de l'objectif de fermeture du cycle prévu par la loi.

## TRAVAUX DE L'OFFICE

### I. COMPTE RENDU DE L'AUDITION PUBLIQUE DU 23 NOVEMBRE 2023

#### Audition publique sur le développement des réacteurs nucléaires innovants en France

**M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur.** - Chers collègues, je vous souhaite la bienvenue à cette audition publique de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST) consacrée au développement des réacteurs nucléaires innovants en France. L'Office a déjà travaillé sur ce sujet, notamment dans le cadre d'un rapport de juillet 2021 : « L'énergie nucléaire du futur et les conséquences de l'abandon du projet de réacteur nucléaire de quatrième génération Astrid », dont j'ai été le corapporteur avec le député Thomas Gassilloud.

Dans ce cadre, nous avons formulé plusieurs préconisations. Certaines sont en voie de se concrétiser, par exemple fédérer les pays européens favorables au nucléaire, renforcer les moyens dévolus à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) ou encore prolonger sur plusieurs années le soutien accordé au projet de petit réacteur à eau pressurisée français NUWARD.

Deux ans et demi après la publication de ce rapport, il nous a paru utile de faire un point sur le développement des réacteurs nucléaires innovants en France, indépendamment de leur technologie.

Cette audition comportera trois séquences distinctes, avec deux tables rondes. La première table ronde nous permettra d'entendre quatre *start-up* qui développent des réacteurs à neutrons rapides (RNR), avec une attention particulière sur la fermeture du cycle, qui est toujours inscrite dans la loi. La seconde table ronde montrera, avec les représentants d'EDF, du Groupement des industriels français de l'énergie nucléaire (GIFEN) et de NUWARD, que les innovations concernent aussi la technolo-

gie des réacteurs à eau pressurisée (REP). Le pôle de compétitivité Nuclear Valley fera le lien entre les deux tables rondes. La matinée se conclura par une intervention coordonnée de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), sur l'accompagnement de la certification des solutions techniques innovantes, fondamental pour la réussite de l'innovation en matière nucléaire.

J'ai également sollicité la participation à nos débats de représentants de la Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs (CNE2). Elle sera représentée par l'un de ses membres, Philippe Gaillochet, ainsi que par son secrétaire général et conseiller scientifique, François Storrer. L'Office avait en effet saisi la CNE2 en mars 2022 pour évaluer l'impact des nouveaux projets de réacteurs sur le cycle des matières et des déchets radioactifs. Nous avons d'ailleurs eu le plaisir d'auditionner la CNE2 voici quelques semaines.

Cette matinée n'a évidemment pas vocation à l'exhaustivité. Elle marque le commencement d'une série de travaux relatifs au secteur nucléaire en France. La prochaine étape sera une audition sur l'évaluation du Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR).

Je rappelle que nos travaux sont diffusés en direct sur le site internet du Sénat et que la vidéo sera ensuite disponible à la demande sur les sites de l'Assemblée et du Sénat. Il sera par ailleurs possible aux internautes, comme nous en avons pris l'habitude, de soumettre des questions en ligne, par l'intermédiaire de la plateforme dont le lien figure sur les pages internet de l'Office. Certaines de ces questions pourront ainsi être posées aux participants lors de l'audition.

**M. Pierre Henriet, député, premier vice-président de l'Office.** - Le Parlement, et particulièrement l'OPECST, étudie avec beaucoup d'attention les enjeux des réacteurs à neutrons rapides, mais également ceux des réacteurs à eau pressurisée. Cette matinée vise à faire un point de situation sur l'avancement des innovations. Notre rôle consiste également à éclairer le grand public sur les perspectives réalistes de ces développements, ainsi qu'à définir un cadre politique favorable à l'avenir de la filière nucléaire, notamment dans le contexte de la reprise des programmes nucléaires observée depuis un peu plus d'un an.

## A. LES START-UP ET L'INNOVATION DANS LE DOMAINE DES RÉACTEURS À NEUTRONS RAPIDES ET LA FERMETURE DU CYCLE

**Mme Olga Givernet, députée, rapporteure.** - L'avenir du nucléaire est en train de s'écrire. Il est porté par l'ingéniosité et le dynamisme de nombreuses *start-up*, de l'ordre de quatre-vingts à travers le monde. Cette première table ronde réunit quatre *start-up* qui développent de nouveaux réacteurs à neutrons rapides. Elle sera l'occasion de prendre connaissance de leurs projets et de comprendre de quelle façon ils s'inscrivent dans la logique de « fermeture » du cycle du combustible. En effet, notre pays a fait le choix d'un cycle du combustible nucléaire dit fermé, qui consiste à traiter les combustibles usés pour récupérer les matières valorisables, uranium et plutonium. Cette stratégie trouverait sa pleine mesure avec le déploiement de réacteurs nucléaires à neutrons rapides, capables de multi-recycler le combustible usé et d'utiliser les matières nucléaires présentes sur notre territoire, avec à la clé plusieurs centaines d'années de ressource énergétique. Le développement d'un tel réacteur est d'ailleurs prévu par la loi du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs.

Nous débutons cette table ronde avec l'entreprise NAAREA (*Nuclear Abundant Affordable Resourceful Energy for All*), une entreprise française lauréate de l'appel à projets Réacteurs nucléaires innovants de l'Agence nationale de la recherche (ANR). Elle est représentée par Jean-Luc Alexandre et Christophe Béhar, habitué des auditions de l'OPECST lorsqu'il était directeur de l'énergie nucléaire au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA).

**M. Jean-Luc Alexandre, président fondateur NAAREA.** - NAAREA, créée il y a trois ans, vise à fournir de l'électricité et de la chaleur décarbonées à des industriels. Nous nous inscrivons dans la fermeture du cycle de la matière et avons retenu une technologie qui avait déjà démontré sa capacité à éliminer certains produits de vie très longue. Nous avons choisi un petit réacteur de 40 mégawatts électriques ou 80 mégawatts thermiques, qui permet, par exemple, de fournir la consommation résidentielle d'une ville de la taille de Bordeaux, Strasbourg ou Nantes, ou d'alimenter des gros îlots industriels : des hauts fourneaux, de grosses usines de voitures ou de dessalement d'eau dans les zones en stress hydrique, *etc.*

Cette solution peut être délivrée rapidement à des industriels. Elle est très compacte, puisque l'îlot nucléaire tient dans un container de la taille d'un autobus, et peut être complété d'un deuxième îlot pour produire de l'électricité à partir de la chaleur. Nous avons choisi un réacteur à sels fondus, dont la viabilité a été démontrée aux États-Unis au siècle dernier, que nous avons combiné avec les neutrons rapides pour pouvoir fissionner le plutonium et, à terme, des actinides mineurs et de l'uranium.

La miniaturisation dans un petit container nous permet de nous affranchir de l'eau pour refroidir le réacteur, qui n'a donc pas besoin d'être placé à côté d'une source froide comme une rivière ou la mer. Cette solution permet également de ne pas avoir d'impact sur la ressource en eau, le refroidissement s'effectuant grâce à la convection naturelle.

Cette technologie est assez prometteuse, puisqu'elle offre une pilotabilité quasiment instantanée, qui permet de compenser, par exemple, l'intermittence des énergies renouvelables, dont elle constitue un complément idéal. Elle permet également d'accompagner la charge d'une usine, qui n'est jamais continue. L'électricité et la chaleur d'usage industriel sont produites à partir d'une source à très haute température, 650 degrés, qui répond aux besoins de nombreux procédés industriels. La chaleur fatale à 75 degrés générée lors de la production d'électricité permet de chauffer des bâtiments et d'apporter ainsi une réponse globale aux besoins industriels.

L'entreprise, en croissance rapide depuis janvier 2022, est aujourd'hui composée de 175 collaborateurs. Elle est financée sur fonds privés français par des bureaux de gestion de fortune familiale. L'objectif à présent est de lever les sommes nécessaires pour construire un prototype. Nous prévoyons une mise sur le marché à partir de 2030, ce qui implique une cadence assez soutenue pour effectuer toutes les démonstrations de sûreté et de sécurité nécessaires sur des petits objets ayant vocation à être fabriqués en grande série, dans une usine. Une fois le réacteur construit, il peut être transporté sur son lieu d'implantation.

**M. Christophe Béhar, directeur AMO (assistance maîtrise d'ouvrage) et CTO (*Chief Technical Officer* ou directeur technique), NAAREA.** - Dès le début de nos travaux au sein de NAAREA, nous avons pris en compte le cycle du combustible. Je n'avais pas beaucoup de mérite, puisque j'ai été durant plusieurs années responsable d'Astrid au sein du CEA. Nous avons examiné de quelle manière il nous était possible de nous insérer dans le cycle du combustible du parc de réacteurs à eau pressurisée (REP).

Nos sels combustibles utiliseront du plutonium, de l'uranium appauvri et des sels de chlorure. À terme, notre plutonium devrait provenir de La Hague, dont les capacités devraient être revues à l'horizon 2040. À ce moment-là, il serait bon que nos besoins soient pris en compte, sachant qu'EDF continuera probablement à fabriquer des combustibles MOX pour ses réacteurs à eau pressurisée.

Par ailleurs, pour limiter la production de chlore 36 par activation neutronique - le chlore 36 posant des problèmes pour le stockage des déchets radioactifs - il sera nécessaire de procéder à une séparation isotopique du chlore naturel, qui comprend les deux isotopes 35 et 37. Nous séparerons ces isotopes, afin d'enrichir le chlore naturel en chlore 37, réduisant ainsi la formation de chlore 36.

Nous fabriquerons notre combustible et nous l'injecterons dans nos réacteurs. Une fois que ce combustible sera usé - notre objectif de durée de fonctionnement étant actuellement de trois à quatre ans à pleine puissance, nous le déchargerons. Comme nous ne souhaitons pas développer un nouveau procédé de retraitement, nous utiliserons un « atelier passerelle », pour extraire du sel et le réinjecter dans l'unité de fabrication des sels combustibles. En effet, les colis de verre fabriqués à La Hague pour conditionner les déchets à vie longue ne supportent pas un excès de sel.

En conclusion, aucune innovation forte ne sera requise sur les unités de retraitement actuellement en service : les deux systèmes, c'est-à-dire les réacteurs à eau pressurisée et les réacteurs à sels fondus, peuvent fonctionner parallèlement.

**Mme Olga Givernet, députée, rapporteure.** - Je cède la parole à Sylvain Nizou et Paul Gauthé, de la société HEXANA, dont le projet concerne un réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium.

**M. Sylvain Nizou, CEO, HEXANA.** - HEXANA, *spin-off* du CEA, conçoit un réacteur nucléaire modulaire AMR (*Advanced modular reactor*) de quatrième génération, qui s'appuie sur la technologie des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium. Ce système vise à fournir une solution crédible et une alternative à l'utilisation des combustibles fossiles dans l'industrie, en remplacement du pétrole, du gaz et du charbon, en fournissant de la chaleur à haute température, à 500 degrés, et de l'électricité, de façon très flexible.

Nous proposons un réacteur modulaire de 400 mégawatts thermiques. Deux réacteurs couplés délivrent donc 800 MW thermiques, soit 300 MW électriques, associés à un dispositif de stockage de chaleur, qui permet d'acheminer l'énergie vers l'utilisateur de manière très flexible et de dissocier le fonctionnement et le rythme du réacteur de la consommation de l'utilisateur.

Notre objectif consiste à démarrer une tête de série industrielle en 2035 sur un site français, afin de déployer d'ici à 2050 une dizaine d'installations en France, au service des zones industrielles les plus consommatrices d'énergie et les plus émettrices du CO<sub>2</sub>. Nous avons choisi cette technologie pour trois raisons simples.

La première raison concerne la maturité et la crédibilité du cœur technologique embarqué dans cette solution innovante. Nous nous appuyons sur la technologie des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium - considérée comme la plus mature pour les réacteurs de quatrième génération, puisqu'elle bénéficie de plus de 400 ans de fonctionnement cumulé de réacteurs à l'échelle mondiale. En France, le réacteur Phénix a permis de qualifier les matériaux et le combustible MOX. Le projet de réacteur Superphénix a démontré la faisabilité à l'échelle industrielle de cette technologie, avec un taux de disponibilité de 96 % sur les dernières années. Enfin, le projet Astrid a permis de renouveler les compétences, de qualifier et de développer de nouveaux outils de calcul. HEXANA va capitaliser sur cette connaissance et ce savoir-faire développés en France, en bénéficiant d'un accès à la



propriété intellectuelle et au savoir-faire du CEA et d'EDF.

La deuxième raison justifiant le choix de cette technologie est liée aux performances. En fournissant de la chaleur à l'industrie - en particulier de la chaleur à haute température - et de l'électricité, nous allons résoudre la problématique de l'ultra-dépendance au pétrole, au gaz et au charbon, en particulier dans les secteurs de l'acier, de la chimie, du ciment, de la production d'hydrogène ou de carburant. Ainsi, une journée de fonctionnement de cette solution équivaut à la production de 200 tonnes d'hydrogène bas carbone.

Enfin, cette technologie permet d'engager la fermeture du cycle du combustible nucléaire, en utilisant un combustible MOX produit à partir de plutonium et d'uranium appauvri, des ressources disponibles en quantités importantes et qui représentent des volumes d'énergie considérables, pour plusieurs siècles.

Cette stratégie permet d'améliorer l'impact environnemental, en sortant d'un processus extractiviste, mais aussi de réduire la dépendance aux prix de marché du minerai d'uranium, de regagner en souveraineté énergétique et de maîtriser le coût de l'énergie.

**M. Paul Gauthé, CTO & co-fondateur, HEXANA.** - Je viens du CEA où j'ai travaillé sur l'exploitation du réacteur sodium Phénix qui a fonctionné jusqu'en 2009 à Marcoule, puis sur le projet Astrid en sûreté et en conception. Chez HEXANA, nous poursuivons l'idée d'un réacteur modulaire, plus petit, plus compact et plus sûr, puisque le sodium est un métal liquide qui n'a pas besoin d'être en pression et qui permet de refroidir le réacteur simplement avec l'air, en convection naturelle, sans électricité et sans eau.

Notre spécificité réside également dans l'association d'un réacteur au sodium à un système de stockage thermique dans des sels fondus de nitrate, ce qui permet de produire de l'électricité de façon extrêmement flexible, sans variation de la puissance du réacteur. Cette approche accroît la durée de vie du réacteur, découple la partie nucléaire de la partie industrielle et élimine la présence d'eau dans le système. Nous utilisons du MOX RNR, un mélange d'uranium appauvri et de plutonium provenant des combustibles usés. Ce MOX peut être qualifié, fabriqué et retraité, puisqu'il a été utilisé pour Phénix et Superphénix. Les Russes ont récemment annoncé l'utilisation de MOX dans leurs réacteurs rapides au sodium. Nous savions déjà le faire il y a cinquante ans. Le multi-recyclage du plutonium est également une réalité. En outre, nous avons vérifié la possibilité d'accepter plusieurs types de plutonium, issu des combustibles uranium ou MOX des réacteurs à eau pressurisée.

Le réacteur est suffisamment puissant pour être isogénérateur - c'est-à-dire qu'il consomme autant de combustible qu'il en produit - ouvrant la voie à une ère du nucléaire durable ; cette technologie nous permettrait de devenir « l'Arabie saoudite de l'énergie décarbonée ». En conclusion, HEXANA aspire à raviver l'esprit de conquête du nucléaire français, en visant une réalisation rapide plutôt qu'à la fin du siècle.

**Mme Olga Givernet, députée, rapporteure.** - Nicolas Breyton et Lucas Tardieu vont à présent nous présenter STELLARIA, société également essaimée du CEA, qui propose une nouvelle génération de réacteurs à sels fondus, à destination des grands industriels.

**M. Nicolas Breyton, CEO de STELLARIA.** - STELLARIA conçoit le premier réacteur à sels fondus, de deux fois 110 mégawatts électriques, qui assure la régénération de son combustible au sein même du cœur. Le réacteur Stellarium a été développé dans le cadre d'une alliance industrielle avec Orano, le CEA, mais aussi Technip et Schneider Electric. La société est née d'une rencontre entre des experts techniques d'Astrid et des experts des besoins des industriels électro-intensifs, opérant dans divers secteurs, tels que les mines, les centres de données, les zones portuaires, *etc.* Nous avons aussi été à l'écoute des besoins d'EDF et d'Orano pour la fermeture du cycle, besoins que notre projet satisfait complètement.

L'objectif consiste à fournir une tête de série d'ici 2035, destinée aux grands clients industriels qui doivent fonctionner vingt-quatre heures sur vingt-quatre avec une énergie décarbonée à bas coût, produite en juste à temps, en suivant la courbe de la demande. Pour réindustrialiser et électrifier le pays, il faut garantir des factures d'énergie stables à long terme.

La filière industrielle a pour objectif de fermer le cycle, en valorisant pleinement l'uranium et le plutonium issus des réacteurs à eau pressurisée, ainsi que les matières contenues dans les combustibles usés, et, si possible, d'incinérer l'américium et les autres actinides mineurs. Notre stratégie vise donc à diminuer la dépendance aux mines étrangères, pour atteindre la souveraineté énergétique.

La somme de ces besoins converge vers une technologie de rupture, conduisant à la création d'une nouvelle filière à neutrons rapides à combustibles liquides. Les combustibles liquides présentent l'avantage de fournir une électricité très rapidement commandable à la hausse et à la baisse, constituant ainsi un complément aux énergies intermittentes. En outre, le réacteur Stellarium peut s'arrêter très rapidement grâce à la dilatation naturelle des combustibles liquides, ce qui apporte une sûreté intrinsèque par conception, y compris en cas de perte totale du circuit primaire. Il fonctionne à pression atmosphérique et en convection naturelle, ce qui empêche le dégazage en cas d'accident. Enfin, il n'y a pas de risque de fusion de cœur puisque celui-ci est naturellement fondu. La zone d'ex-

clusion de sûreté est donc très limitée, ce qui permet un déploiement nouveau dans des grandes zones industrielles. Nous avons choisi des sites sur lesquels les services de sécurité existent.

Nous pouvons fournir deux fois 110 mégawatts électriques en autonomie pendant quinze ans sur une surface compacte de la taille d'un ou deux terrains de football, ce qui permet de résoudre le problème du foncier dans des zones plus contraintes. L'autonomie étant totale durant quinze ans, le combustible reste sur site, ce qui évite les transports inutiles.

Par ailleurs, le réacteur Stellarium fournit la capacité de multirecycler les combustibles usés issus des réacteurs à eau pressurisée, s'inscrivant parfaitement dans la stratégie de fermeture du cycle. Il est tolérant et peut fonctionner avec différents types de combustibles liquides mélangés dans le sel : le MOX, même dégradé, l'uranium de retraitement et le thorium. Nous avons 9 000 tonnes de thorium ainsi que 320 000 tonnes d'uranium appauvri sur notre sol, qui sont valorisables. De ce fait, le Stellarium permet une diversification des approvisionnements et une gestion de l'inventaire du plutonium civil, ainsi qu'un renforcement de notre souveraineté.

Les déchets de haute activité peuvent être transmutés dans notre réacteur, réduisant ainsi la demi-vie moyenne de ces déchets de 300 000 ans à 300 ans. De plus, le Stellarium ouvre la perspective nouvelle d'un renouvellement de 100 % du combustible pendant son fonctionnement normal : il remplace instantanément les matières fissionnées par des matières fertilisées au sein même de son cœur, comme une voiture qui renouvellerait son carburant. Cela permettra d'offrir une stabilité de production électrique inégalée et une grande continuité de service, donc de garantir une facture énergétique stable et prévisible pour les industriels.

Pour réussir ce projet, nous avons trois besoins immédiats. Premièrement, nous avons besoin de zones dédiées au sein des sites de recherche existants pour mener rapidement des expériences scientifiques. Deuxièmement, il est essentiel de mettre en place des procédures simplifiées pour obtenir les autorisations nécessaires à ces expériences à petite échelle. Ces autorisations devront être accordées dans le respect le plus strict des normes de sûreté, les exigences devant, comme le suggère un rapport de l'OPECST, être proportionnées au risque radiologique réel. Enfin, nous aurons besoin de créer en un temps record, avec nos partenaires Orano et le CEA, les sels combustibles de recherche nécessaires pour procéder à ces expériences. La simplification des autorisations pour ces combustibles de recherche sera également un enjeu majeur.

À plus long terme, il faudra envisager la perspective de nouveaux sites nucléaires permettant de déployer ces petits réacteurs dans des zones industrielles. Compte tenu de la crise énergétique et de l'explosion des besoins en uranium, l'heure des réacteurs à neutrons rapides est venue. Ils constituent la meilleure solution environnementale pour offrir une énergie à la hauteur des besoins industriels, une énergie souveraine, sûre, décarbonée, durable et renouvelable pendant des siècles.

**Mme Olga Givernet, députée, rapporteure.** - Nous achevons cette table ronde avec l'intervention de NEWCLEO, représentée par Ludovic Vandendriesche. NEWCLEO est une société d'origine italienne implantée à Lyon - nos amis italiens ayant gardé un haut niveau scientifique en physique nucléaire malgré l'abandon, sans doute provisoire, de son utilisation pour l'énergie. NEWCLEO développe des réacteurs nucléaires rapides refroidis au plomb.

**M. Ludovic Vandendriesche, directeur général France, NEWCLEO.** - NEWCLEO a été créée en 2021 sur financement privé, à l'initiative de fondateurs italiens. Elle s'est implantée dans un premier temps au Royaume Uni avant de créer en 2022 une entité à Lyon, afin d'accompagner la renaissance du nucléaire, annoncée par le Président de la République. Au milieu de cette année, elle a été lauréate de France 2030, dans le cadre de l'appel à projets sur les réacteurs nucléaires innovants. Notre vocation est d'être un acteur compétitif de la transition énergétique et de proposer un nucléaire durable.

Nous proposons un concept de réacteur SMR (*small modular reactor*) de quatrième génération à neutrons rapides refroidi au plomb. Cette technologie est fondée sur un acquis conséquent en France et sur vingt-cinq années de R&D en Europe, notamment en Italie, sur les réacteurs au plomb. Il s'agit d'un nucléaire vertueux et durable dans le cadre de la fermeture du cycle du combustible, qui permet un recyclage des matières valorisables issues des déchets nucléaires. Nous avons vocation à nous inscrire dans un écosystème collaboratif pour développer un réacteur nucléaire dont la puissance est de 200 mégawatts électriques, mais également une usine de fabrication de combustible MOX RNR, différent de celui utilisé actuellement en France. Les applications sont multiples, la principale portant sur la génération d'électricité et l'alimentation du réseau.

Nous avons déjà réalisé deux levées de fonds, en 2021 et début 2022, pour un total de 500 millions d'euros. Une troisième levée est en cours, pour atteindre un milliard d'euros. Le calendrier inclut la construction d'une installation d'essai sur le site de Brassimone en Italie d'ici 2026, puis d'un démonstrateur industriel et d'une usine de combustibles MOX en France à l'horizon 2030. Nous souhaitons nous appuyer sur une *supply chain* européenne intégrée dès les phases de conception, pour respecter ces objectifs de livraison assez ambitieux, et donc sur un modèle de partenariat, voire d'acquisition d'un certain nombre de fournisseurs stratégiques.

Nos priorités portent sur une forme de labellisation par le Gouvernement français, en tant que fabricant de combustible MOX RNR. Nous recherchons également l'appui du Gouvernement pour l'acqui-

sition de deux sites nucléaires existants, l'un pour pouvoir implanter notre premier réacteur démonstrateur industriel, l'autre pour l'usine de fabrication de combustibles MOX.

**M. Stéphane Calpena, directeur de la sûreté et des processus réglementaires, NEWCLEO.** - NEWCLEO souhaite fabriquer du combustible MOX pour ses propres besoins et ceux de nos confrères. Le choix du plomb s'appuie sur vingt-cinq à trente années de recherche et développement (R&D) en Italie. Celle-ci a continué après la fermeture de Superphénix, sur lequel beaucoup d'Italiens ont travaillé. De nombreux collaborateurs de NEWCLEO proviennent des équipes de Phénix, Superphénix et Astrid. Par ailleurs, le plomb ne réagit pas avec l'air et l'eau, ce qui représente un progrès par rapport au sodium. De plus, la convection naturelle fonctionne bien. Contrairement aux réacteurs à eau pressurisée, il n'existe aucun risque de fuite, l'ensemble étant regroupé dans une seule cuve.

Le réacteur est auto-stabilisant : quand la température monte un peu trop, la réaction nucléaire est étouffée, à travers un équilibre en conditions accidentelles, qui intervient probablement entre 600 et 700 degrés. La marge est importante, l'ébullition du plomb intervenant à 1 740 degrés, et nous souhaitons la valoriser auprès de l'Autorité de sécurité nucléaire et de l'IRSN. Notre technologie repose également sur de nombreux systèmes passifs et une capacité de rétention des radionucléides par le plomb. Nous poursuivons la R&D. Le précurseur, situé en Italie, ne sera pas un réacteur nucléaire, puisque des chaufferettes électriques remplacent le combustible, mais il est quasiment à l'échelle. Plusieurs réunions sont planifiées avec l'Autorité de sûreté nucléaire sur l'inspection en service et les aspects de corrosion qui sont les points regardés de près pour ce type de réacteurs.

**Mme Olga Givernet, députée, rapporteure.** - Je vous propose de passer à présent au débat. Avez-vous été en mesure de quantifier vos besoins en combustible ? Comment allez-vous les approvisionner ?

**M. Christophe Béhar.** - Nous avons quantifié les quantités de combustible nécessaire au déploiement d'une flotte de réacteurs. Celui-ci proviendrait de l'usine de retraitement de La Hague mise à niveau, mais nous envisageons également de faire venir des combustibles usés de l'étranger, afin qu'ils soient retraités pour pouvoir ensuite fournir du plutonium pour nos besoins.

**M. Paul Gauthé.** - De notre côté, nous avons besoin de deux tonnes de MOX pour démarrer un réacteur. Nous savons le fabriquer et l'avons fait à l'atelier de technologie du plutonium de Cadarache, pour les réacteurs Phénix et Superphénix. Désormais, l'enjeu consiste à réindustrialiser un atelier MOX RNR au plus vite. Orano pourrait être un acteur, puisqu'il devait alimenter le réacteur Astrid. Mais nous sommes également intéressés par le projet de NEWCLEO.

**M. Lucas Tardieu, architecte réacteur, STELLARIA.** - Les calculs fournissent une évaluation de ce que consomme un réacteur. La régénération constante du combustible au sein de notre réacteur permet de limiter les transports ainsi que l'appel à une usine de retraitement, sollicitée tous les 15 ans. Les calculs sont en cours pour bien déterminer le besoin.

**M. Ludovic Vandendriesche.** - Les ordres de grandeur sont également de deux tonnes pour nous. Notre usine de fabrication de MOX a vocation à être modulaire, la capacité de production démarrant à 20 tonnes pour croître jusqu'à 60 tonnes, afin d'accompagner le déploiement du parc au fil des années.

**M. Alexandre Sabatou, député.** - Qu'attendez-vous concrètement des pouvoirs publics ? Vous estimez-vous suffisamment soutenus ? La réglementation et les normes en vigueur représentent-elles des obstacles importants pour le développement de vos technologies ?

**M. Jean-Luc Alexandre.** - Nous remercions les pouvoirs publics d'avoir accompagné NAAREA sur l'appel à projets France 2030. Ce soutien permet d'envoyer un signal aux investisseurs privés, qui ont besoin de voir que l'État croit à notre projet. Au-delà du label, il est important d'accompagner les *start-up* dans la réalisation des démonstrations de sûreté, notamment grâce aux ressources que l'État a pu développer, comme les outils de calcul scientifique déjà homologués. Homologuer de nouveaux logiciels serait extrêmement long. En outre, l'État pourrait nous aider à accélérer nos projets, en mettant à disposition un site nucléaire pour nos prototypes.

**M. Sylvain Nizou.** - L'appel à projets France 2030 permet d'enclencher une dynamique forte et de faire émerger des acteurs sur des technologies existantes, ou qui doivent encore faire leurs preuves de concept. Il est également très important de donner aux autorités de sûreté les moyens d'expertiser les projets. Nous espérons bénéficier des acquis du passé, dans la mesure où la technologie RNR sodium a déjà été licenciée sur le sol français. Enfin, il est essentiel d'impulser une dynamique et une planification sur le combustible, pour accompagner les acteurs émergents sur des concepts innovants.

**M. Nicolas Breyton.** - Nous nous considérons comme un catalyseur de la recherche publique. Le projet est gagnant-gagnant si nous identifions ensemble les moyens d'accélérer les procédures et d'utiliser des installations existantes, pour trouver des solutions afin d'accélérer les *roadmaps*.

**M. Ludovic Vandendriesche.** - Les actions déjà réalisées par le Gouvernement depuis un an et demi

sont assez exceptionnelles. Elles nous ont permis d'initier nos travaux et notre implantation sur le territoire. À présent, nous avons besoin que la thématique « combustible » soit intégrée de manière beaucoup plus concrète et pragmatique dans l'appel à projets sur les réacteurs nucléaires innovants. Pour le moment, elle demeure trop écartée. Dans ce cadre, l'attribution de sites est primordiale.

**M. Stéphane Calpena.** - Il importe de donner aux institutions de sûreté les moyens de suivre les nouveaux pétitionnaires. En outre, les délais d'obtention d'un décret d'autorisation de création (DAC) sont aujourd'hui très longs, six à sept ans. Nous aimerions que la loi du 22 juin 2023 soit amendée, pour permettre le début de la construction nucléaire avant l'obtention du DAC, aux risques et périls des pétitionnaires.

**M. Jean-Luc Fugit, député, vice-président de l'Office.** - Je m'adresse notamment à NAAREA. Comment envisagez-vous concrètement la fermeture du cycle du combustible ? Comment voyez-vous le financement des opérations de développement de ce nouveau nucléaire, compte tenu des contraintes pesant par ailleurs sur les finances publiques ? La loi du 22 juin 2023 vous semble-t-elle adaptée à vos secteurs ?

**M. Daniel Salmon, sénateur.** - Quelle est votre estimation du prix du mégawattheure (MWh) ? Existe-t-il de la place pour plusieurs modèles concurrents ?

**M. Maxime Laisney, député.** - Vous comptez tous sur le MOX, mais les informations dont nous disposons sur l'usine Melox font état d'un grand nombre de rebuts. Le pari que vous effectuez tous est celui d'une production en série et en quantité. Sous quels délais les usines de fabrication et les puissances installées seront-elles opérationnelles ? Quel en sera le coût ? Au-delà du développement des concepts, souhaitez-vous également réaliser l'exploitation, qui relève pour l'instant du monopole d'EDF ?

**M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur.** - Considérez-vous que la décision d'arrêter le projet Astrid, prise dans l'été 2019, a mis fin à la possibilité de créer des réacteurs à neutrons rapides ? Les délais que vous annoncez semblent ambitieux. Pensez-vous réellement pouvoir les tenir ?

**M. Christophe Béhar.** - S'agissant de la fermeture du cycle, nous allons tous recycler le plutonium et nous partageons tous la technologie à neutrons rapides. Ensuite, si notre projet n'utilise pas de MOX, les autres participants à cette table ronde utiliseront probablement du MOX RNR, qui n'est pas exactement le même que celui des réacteurs à eau légère. Enfin, je fais partie de ceux qui pensent qu'il n'y aura pas à terme de nucléaire durable sans réacteurs à neutrons rapides.

**M. Jean-Luc Alexandre.** - La question du niveau des prix est capitale pour la compétitivité. Nous sommes sur un marché international : au niveau mondial, la demande électrique sera multipliée par trois ou quatre au cours des trente prochaines années. Le prix sera très attractif pour plusieurs raisons. Le niveau de sûreté passif sera très élevé pour la quatrième génération, induisant un impact direct sur les coûts d'investissement. Ensuite, nous sommes à la fois concepteur, fabricant, exploitant et mainteneur, soit le *business model* utilisé par la France dans un grand nombre de secteurs où elle est numéro un mondial, comme le secteur ferroviaire ou le secteur de l'eau. Nous serons plus compétitifs que les secteurs des énergies fossiles et des énergies renouvelables.

**M. Sylvain Nizou.** - S'agissant de la loi d'accélération du nucléaire, nous considérons qu'il est nécessaire de travailler avec l'État sur les questions de planification, pour l'installation des nouveaux réacteurs sur des sites existants ou de nouveaux sites. Aujourd'hui, HEXANA ne se revendique pas exploitant et collaborera activement avec ses partenaires, dont EDF. Enfin, nous nous positionnons dans une stratégie de capitalisation des acquis du projet Astrid, au service du futur.

**M. Paul Gauthé.** - Le prix de l'uranium a été multiplié par quatre depuis l'arrêt d'Astrid, ce qui rappelle l'urgence de réinvestir dans les réacteurs à neutrons rapides. Ensuite, le réacteur sodium s'appuie sur un écosystème encore existant, notamment l'entreprise Framatome. Enfin, les RNR sont des concepts de réacteurs sans pression. Nous ne sommes donc pas en concurrence avec la *supply chain* des REP, qui ont besoin de gros forgés. Nous sommes plutôt utilisateurs de chaudronnerie et de produits mécanosoudés.

**M. Nicolas Breyton.** - Les compétences qui ont été développées sur Astrid servent à d'autres projets, comme ceux qui vous sont présentés aujourd'hui. Je propose de créer une école des RNR, afin que les jeunes qui arrivent sur le marché soient aussi formés sur les réacteurs rapides.

**M. Ludovic Vandendriesche.** - Le *business model* de NEWCLEO est fondé à la fois sur un modèle d'exploitation des réacteurs, très probablement en collaboration étroite avec l'exploitant historique, et sur un modèle de licence, plutôt applicable à nos clients internationaux. Nous essaierons de faire valoir la *supply chain* que nous aurons développée pour les composants principaux des installations que nous placerons sous licence.

## B. AVANCÉES ET PERSPECTIVES POUR LES RÉACTEURS À EAU PRESSURISÉE



**M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur.** - L'innovation dans le nucléaire porte aussi sur la technologie actuellement la plus répandue, celle des réacteurs à eau pressurisée, dont les représentants du pôle de compétitivité Nuclear Valley vont à présent nous parler, ainsi que des enjeux communs aux jeunes entreprises du nucléaire.

**M. Jean-François Debost, directeur général, Nuclear Valley.** - Notre association a été créée en 2005 à Chalon-sur-Saône, sous l'égide du ministre de l'énergie. Elle a vu son label de pôle de compétitivité renouvelé pour quatre années supplémentaires par la Première ministre en avril 2023. Sa mission première consiste à faire émerger des solutions d'innovation, notamment auprès des PME.

Nous fédérons aujourd'hui une communauté de 430 adhérents, auxquels s'ajoutent 400 autres entreprises qui participent à nos travaux. Nuclear Valley compte 56 % de PME et TPE, notamment une trentaine de *start-up*, dont quinze ont déposé un dossier lors de l'appel à projets « Réacteurs nucléaires innovants » de France 2030. Notre association est aujourd'hui cofinancée par deux ministères : le ministère de l'Économie et des Finances et le ministère de la Défense pour la propulsion nucléaire - le premier petit réacteur français a été embarqué sur le Redoutable en 1971. Notre pôle de compétitivité est également financé par le conseil régional de Bourgogne-Franche-Comté et celui d'Auvergne-Rhône-Alpes, ainsi que par deux intercommunalités : le Grand Chalon et la communauté urbaine du Creusot Montceau. Ce soutien public représente environ un tiers de nos ressources.

Nos missions, définies dans la convention signée avec les pouvoirs publics, s'articule autour de quatre axes : l'émergence de solutions innovantes ; l'animation économique pour aider ces PME à créer de l'emploi au sein de nos territoires ; l'accompagnement à la levée de fonds, avec la présence de quinze fonds d'investissement français dans notre club d'investisseurs Nuc Tech, dont le fonds souverain Fonds France Nucléaire et Definvest, des bureaux de gestion de fortune familiale et des banquiers privés ; enfin, le développement de l'emploi-compétence, enjeu important pour la filière nucléaire française, à travers le soutien aux métiers du nucléaire.

Dans le cadre du premier appel d'offres de France 2030, nous accompagnons onze des quinze initiatives qui ont déposé un projet.

**M. Romain Monier, directeur technique, Nuclear Valley.** - Notre rôle consiste à intervenir à n'importe quel stade du projet de nos adhérents, en partant de l'idéation dans notre domaine d'activité stratégique, en facilitant la formation des consortiums, en les assistant pour construire leurs projets et en faisant expertiser et labelliser ceux-ci par notre conseil scientifique. Dans le cadre de l'appel à projets France 2030 pour les réacteurs innovants, notre conseil scientifique ne se substitue pas à l'expertise du CEA, mais il apporte son expertise aux briques technologiques transverses aux projets, parfois jusqu'aux réacteurs à eau pressurisée.

Nous accompagnons ces initiatives dans la recherche de leurs futurs partenaires industriels, afin qu'ils puissent commencer à construire leur *supply chain* et intégrer les contraintes technologiques dès la conception des *designs*. Nous les accompagnons également vers les guichets de financement un peu plus classiques pour les applications REP avec des projets i-Démo régionalisés ou des projets d'innovation régionaux. Au sein de l'appel à projets France 2030, 77 projets ont été lauréats pour la partie nucléaire, représentant un investissement total de 343 millions d'euros, qui devrait répondre aux enjeux du parc.

**M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur.** - Monsieur BARD, pouvez-vous nous présenter le rôle du Groupement des industriels français de l'énergie nucléaire (GIFEN), qui fédère 500 entreprises depuis 2018 ?

**M. Olivier Bard, délégué général, GIFEN.** - Le GIFEN a été créé pour doter la filière d'une organisation semblable à celle d'autres filières, à l'instar de l'aéronautique, en regroupant un certain nombre d'organisations. Nous coopérons très étroitement avec les acteurs préexistants, à commencer par Nuclear Valley. Le GIFEN couvre plus de 90 % des entreprises de la filière, parmi lesquelles figurent les exploitants, mais aussi les fournisseurs de tous rangs, dont des PME, des ETI et des organisations professionnelles.

Nous fédérons une filière qui représente 200 000 emplois, dont 50 % des entreprises sont exportatrices et 80 % travaillent pour d'autres secteurs que le nucléaire. Le GIFEN a trois missions : fédérer la filière pour sa mobilisation et sa performance collective ; fournir des services d'intérêt commun aux entreprises ; représenter la filière, y compris sur la scène européenne ou internationale.

Le GIFEN organise ses travaux autour de différents axes : les compétences, la formation sur la sûreté et la qualité, le développement international, la transformation numérique, les affaires européennes et la communication. Il s'est d'abord attaché à travailler sur les compétences et sur les capacités industrielles. Nous avons remis récemment les résultats du programme Match, qui visait à doter la filière d'un outil structuré et collaboratif pour prévoir les besoins en compétences et piloter la mise en adéquation de la mobilisation de la filière.

Ce programme a identifié un besoin de 60 000 équivalents temps plein sur le cœur de la filière et

100 000 au total sur les dix ans à venir. Il a également permis de travailler sur des leviers d'action pour mener à bien une mise en adéquation en termes de développement de ressources, de renforcement de performance opérationnelle et de soutenabilité économique. L'objectif consiste à permettre aux entreprises de préparer les plans de recrutement et d'investissement qu'elles pourront engager quand le nouveau programme nucléaire sera effectivement lancé.

Le GIFEN porte une démarche innovante, qui a vocation à irriguer les enjeux et les actions de la dynamique industrielle nécessaire pour optimiser les gains de performance attendus de l'enchaînement des projets. Ce programme industriel permet de renforcer l'efficacité de réplication des projets et l'optimisation des modes d'exécution. Le GIFEN pilote, en collaboration avec le pôle Nuclear Valley, une commission R&D et innovation au sein de laquelle les entreprises se réunissent mensuellement et travaillent sur des sujets d'innovation communs. Ce cadre permet aux petites entreprises de trouver les moyens de coopérer sur des sujets qu'elles ne pourraient pas traiter seules. Une feuille de route a également été établie pour la période 2023-2027 sur des sujets d'intérêts transverses pour la filière, comme le cycle de l'eau, les nouveaux combustibles, la valorisation des matières, la transformation numérique, la fabrication additive, *etc.*

En conclusion, l'innovation irrigue tous les efforts de la filière ; elle s'étend de l'émergence de solutions totalement innovantes jusqu'à la nécessaire démarche industrielle d'amélioration continue, à travers un équilibre entre la réplication industrielle et l'injection de nouveaux procédés, pour améliorer la performance sur les dix à vingt ans à venir.

**M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur.** - Je cède la parole à Bernard SALHA, directeur R&D d'EDF.

**M. Bernard Salha, directeur technique groupe et directeur de la R&D, EDF.** - L'innovation concerne aussi les réacteurs à eau pressurisée. EDF maintient ses réacteurs existants et futurs, EPR2 et NUWARD, au meilleur niveau technologique. Sur le parc existant, le niveau de sûreté que nous mettons en oeuvre sur nos REP, dans le cadre des quatrièmes visites décennales du palier 900 mégawatts, est fondé sur une référence EPR. Il s'agit de mettre en oeuvre des modifications permises par l'innovation pour mettre les réacteurs existants au même niveau de sûreté que ces derniers. Ensuite, l'EPR2 tient compte du retour d'expérience du premier réacteur EPR à Flamanville, mais aussi de toutes les innovations, notamment en matière de rapidité de construction, de façon à mieux maîtriser les délais.

Par ailleurs, le processus d'innovation dans les REP est évolutionnaire, grâce à des briques technologiques, à l'instar de ce qui se pratique dans d'autres secteurs tels que l'aéronautique. Ces briques sont des éléments techniques qui permettent d'améliorer la performance, en venant s'insérer dans la conception d'un réacteur. À titre d'exemple, nous développons aujourd'hui des outils pour fiabiliser les plannings d'arrêt de nos réacteurs, en faisant appel aux meilleures techniques disponibles en intelligence artificielle. Nous utilisons aussi l'intelligence artificielle pour piloter l'avancement et la qualité de construction des chantiers neufs, gérer les aléas et exploiter notre documentation existante, que nous avons entièrement numérisée et mise aux normes les plus modernes.

Un autre exemple de brique technologique est la fabrication additive. Nous transférons dans le nucléaire les premiers succès rencontrés dans l'hydraulique, grâce au soutien apporté par France Relance. Le projet Arqane fédère ainsi plusieurs acteurs et permet de tester ces solutions. Dans le domaine du combustible, nous cherchons à développer des *enhanced accident tolerant fuels* (EATF), c'est-à-dire des combustibles plus tolérants aux accidents. Dans le domaine du cycle du combustible, nous étudions la question du multi-recyclage en REP, visant à maîtriser les quantités de plutonium qui tournent dans nos réacteurs. Enfin, dans le domaine environnemental, nous sommes en train de tester des innovations, afin de limiter la consommation d'eau de nos réacteurs dotés de tours aéroréfrigérantes. Nous testons sur le site du Bugey, dans un banc d'expérimentation nommé Mistral, un processus inventé par une *start-up* américaine qui pourrait être déployé plus largement.

Ensuite, il existe des SMR à eau pressurisée, mais également des projets de réacteurs produisant de la chaleur. Par exemple, le projet Calogena que nous avons soutenu vise à produire de la chaleur pour les réseaux de chaleur. D'autres projets européens existent en la matière, notamment en Finlande. Nos collègues américains ont également développé de nombreux réacteurs à eau pressurisée ou à eau bouillante fondés sur des technologies existantes, à l'image du projet Nuscale ou du projet BWRX-300 de General Electric, dont nos collègues canadiens d'Ontario Power Generation envisagent une première mise en service avant 2030.

L'intérêt des projets REP est double : ils utilisent une technologie qui a fait ses preuves, un atout majeur en termes de conception, de construction et d'analyse de sûreté ; ils utilisent des combustibles connus, quasiment disponibles dans des usines existantes, ce qui n'est pas le cas pour les SMR de quatrième génération.

Nous estimons que ces SMR à eau pressurisée ont une probabilité raisonnable de produire de l'électricité autour des années 2030. Nous sommes en outre très intéressés par la démarche de nos collègues sur les AMR, en raison de leur dynamisme entrepreneurial. Cependant, il s'agit de démarches de *start-up*, qui comportent donc des risques plus élevés. En conclusion, les démarches sur l'eau pressurisée, les SMR et les AMR ne doivent pas être opposées ; elles s'enrichissent entre elles.

**M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur.** - À présent, Monsieur Frédéric HOFMANN va nous exposer les perspectives du programme NUWARD, sur lequel nous fondons beaucoup d'espoirs.

**M. Frédéric Hofmann, directeur du programme SMR France, EDF.** - Le programme NUWARD est aujourd'hui le projet le plus avancé en France. Il est porté par EDF, avec le concours de l'ensemble de la filière nucléaire française : le CEA, Technicatome, Naval Group et Framatome, récemment rejoints par un partenaire européen : Tractebel. Ce projet est soutenu par l'État à hauteur de 500 millions d'euros, au titre de France Relance et de France 2030. Cette centrale comprend deux réacteurs intégrés à eau pressurisée, qui délivrent au total 340 mégawatts électriques et de la chaleur.

Fondée sur le savoir-faire français et l'expérience acquise depuis des décennies, cette centrale bénéficie en outre des hautes technologies et de nombreuses innovations de rupture. La première concerne la construction modulaire, principe commun aux SMR : les modules du NUWARD SMR seront assemblés dans des usines - ce qui représente environ 70 % du travail à réaliser pour le construire, puis acheminés sur site pour y être assemblés, et enfin placés et reliés entre eux. Ce système présente de nombreux avantages, notamment en termes de durée de construction : le NUWARD SMR sera ainsi construit en quarante mois. De plus, ce système permettra de réduire les risques et les coûts selon la règle du 1-3-8 : pour accomplir l'équivalent d'une heure de travail en usine, il en faudrait trois dans un atelier aux abords du site et huit sur le site lui-même. Ensuite, il sera nécessaire de créer un certain nombre d'usines pour fabriquer ces modules, lesquels permettront de soutenir la réindustrialisation qui nous est chère.

La deuxième innovation concerne la chaudière intégrée. Dans les réacteurs de forte puissance, le circuit primaire est composé de plusieurs pièces : la cuve contenant le combustible chargée de chauffer l'eau du circuit primaire ; les générateurs de vapeur produisant l'électricité et les pompes primaires permettant de prendre l'eau du circuit primaire pour la réinjecter dans la cuve. Dans le NUWARD SMR, les générateurs de vapeur et les pompes primaires sont intégrés à la cuve.

Cette innovation est rendue possible par un certain nombre d'autres innovations, notamment des générateurs de vapeur à plaques en titane qui permettent de rendre ce système bien plus compact. Compte tenu de ces technologies et de sa petite taille, cette chaudière présente plusieurs intérêts, notamment un système de sûreté passif qui répond aux meilleurs standards internationaux et facilite l'acceptabilité du NUWARD SMR à proximité des centres de consommation.

La troisième innovation concerne la capacité de cogénération : le NUWARD SMR produit de la chaleur bas carbone en plus de l'électricité. La centrale de production peut soit créer 100 % de son énergie sous forme d'électricité (340 MW), soit utiliser une partie de la chaleur du coeur pour la délivrer directement au client. Dans ce cas, il est possible de délivrer 100 MW de chaleur, tout en conservant 310 MW d'électricité, soit une puissance totale de 20 % supérieure.

Aujourd'hui en France, 45 % de l'énergie finale consommée correspond à des besoins de chaleur, soit 700 térawattheures (TWh) par an. Près de 60 % de cette chaleur est carbonée ; ce qui signifie que nous devons décarboner 400 TWh de chaleur. Un NUWARD SMR peut produire 0,8 TWh de chaleur par an. Enfin, les innovations liées aux usages de cette chaleur nous conduisent à être sollicités par des industriels de la pétrochimie, des papetiers et des sucriers qui cherchent à se décarboner. Parmi les autres débouchés figure l'hydrogène, puisque l'une de nos innovations en développement porte sur des électrolyseurs à haute température qui permettent d'utiliser à la fois l'électricité et la chaleur, ainsi que de réduire la consommation d'énergie associée à la production d'hydrogène. Enfin, il est possible de citer la chaleur urbaine ou la désalinisation d'eau de mer.

**M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur.** - Je propose à présent d'ouvrir le débat.

**M. Maxime Laisney, député.** - Le SMR NUWARD procède-t-il par captage et rejet d'eau comme pour les gros réacteurs traditionnels ?

Il me semble que le design des EPR2 n'est pas achevé. Combien de milliers d'heures d'ingénierie sont-elles encore nécessaires ? Framatome est-il capable de produire en série les pièces maîtresses ? Voici un an, j'avais posé la question au PDG de Framatome qui avait répondu ne pas être prêt pour le couvercle. La loi adoptée cette année évoque six EPR2, peut-être huit ou plus. Sera-t-il possible de produire plus de six EPR2, soit le nombre sur lequel le PDG d'EDF, M. Luc Rémont, m'avait dit qu'il s'était engagé ?

**M. Frédéric Hofmann.** - Le circuit primaire est effectivement alimenté par de l'eau, mais elle circule. La consommation d'eau intervient dans la production d'électricité, lorsqu'elle est utilisée pour refroidir par évaporation. Il est aussi possible d'utiliser un circuit ouvert qui prélève l'eau dans la rivière, pour la réchauffer et la restituer à l'aval, ce qui évite la consommation d'eau mais élève la température de la rivière.

**M. Bernard Salha.** - L'EPR2 est en réalité à un stade de conception bien plus avancé que celui des autres réacteurs qui ont été évoqués. La conception détaillée est en cours. Nous travaillons actuellement sur une perspective de six réacteurs, mais huit autres ont également été évoqués.



**M. Olivier Bard.** - Du point de vue industriel, les entreprises ont besoin d'être mobilisées sur une cadence, au bon niveau de performance. Ainsi, un programme de huit réacteurs correspond à une cadence d'un réacteur par an en France. Il est important de réfléchir en termes de cadence pour avoir une vision industrielle des conditions de succès d'un tel programme.

**M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur.** - Les besoins en électricité sont en très forte croissance au niveau mondial. Comment la France se situe-t-elle au sein de la compétition internationale en matière nucléaire, notamment face aux projets Hitachi et Rolls-Royce ? Quelles sont les éventuelles conséquences de l'abandon du projet de *start-up* américaine NuScale, en particulier pour le projet NUWARD ? Enfin, il semble possible d'augmenter la puissance d'un REP existant. Est-ce désormais envisageable en France ?

**M. Bernard Salha.** - La concurrence internationale est effectivement forte. Ainsi que Jean-Luc Alexandre l'a indiqué, le volume d'électricité à produire en Europe est considérable, *a fortiori* en ajoutant les besoins liés à l'hydrogène et à la chaleur. Il y a donc une place pour plusieurs acteurs et l'enjeu porte plus sur le démarrage des projets SMR, aucune construction n'étant réalisée. Au niveau européen, l'initiative EU Partnership, reconnue par la Commission européenne au début du mois de novembre, vise à développer les conditions permettant le déploiement des SMR en Europe. La France est très bien dotée sur l'ensemble de ce secteur d'activité. Nous disposons de nombreux atouts sur les réacteurs existants, mais également les nouveaux réacteurs. Enfin, nous nous efforçons effectivement d'augmenter la puissance des REP, mais cette augmentation ne peut être que de quelques pour cent, quelle que soit la méthode utilisée. Il est possible d'augmenter le rendement de la turbine, comme nous pourrions le faire sur nos réacteurs de 900 mégawatts, ou d'accroître la puissance du réacteur lui-même en élevant sa température, ce qui est un peu plus complexe.

**M. Jean-François Debost.** - L'ensemble des cinq projets NuScale n'ont pas été abandonnés, seul celui de l'Idaho l'a été. Aujourd'hui, il existe à peu près 80 projets de SMR ou d'AMR. Le département d'État américain a estimé que le marché s'élèverait à 180 milliards d'euros à l'horizon 2040. Compte tenu des besoins, je partage donc les propos de Monsieur Salha : il y a de la place pour tout le monde. Les deux tiers des quinze initiatives que nous suivons ont un niveau de maturité technologique (*Technology Readiness Level* ou TRL) supérieur à six ou sept, pas très éloigné de neuf. La marche à monter n'est donc pas si haute. Pour les enjeux d'investissement, il est important que la deuxième partie du fonds France Nucléaire soit levée par l'État. En effet, nos PME auront plus que jamais besoin de fonds propres pour poursuivre leurs innovations. Dans le cadre de France Relance, 160 projets ont été déposés mais 74 seulement ont pu être retenus, puisqu'il n'y avait pas assez de subventions.

Lors des trois dernières années, le pôle a labellisé pour plus de 600 millions d'euros d'actifs de projets de R&D, dont 80 % sont portés par des petites entreprises situées sur vos territoires. Elles ont plus que jamais besoin de votre soutien et de celui de l'État.

**M. Frédéric Hofmann.** - Le modèle de développement de NuScale est un peu différent : ils ont développé et fait licencier un design auprès des autorités américaines. Désormais, ils cherchent un site pour le construire. NUWARD travaille sur une tête de série en France, afin de démontrer sa crédibilité technique et commerciale, pour pouvoir ensuite le vendre et développer l'effet de série.

## C. L'ACCOMPAGNEMENT DE LA CERTIFICATION DES SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES INNOVANTES

**Mme Olga Givernet, députée, rapporteure.** - Nous allons terminer ces exposés par les interventions de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur un sujet stratégique pour l'innovation dans le domaine nucléaire : l'accompagnement de la certification des solutions technologiques innovantes. En effet, si les grandes entreprises du secteur nucléaire sont rompues aux contraintes de certification de leurs nouveaux projets, tel n'est pas le cas des *start-up*, elles-mêmes soumises à d'autres contraintes, notamment de financement qui leur imposent d'avancer à un rythme soutenu dans leurs développements, comme elles en ont fait état lors de la première table ronde.

J'ai d'abord le plaisir de donner la parole au directeur général de l'ASN, Olivier Gupta, ainsi qu'à Philippe Dupuy, responsable de la mission réacteurs innovants.

**M. Olivier Gupta, directeur général, Autorité de sûreté nucléaire (ASN).** - Nous avons été conduits à évoquer la question des petits réacteurs au cours d'auditions récentes et je voudrais ici en profiter pour dissiper toute ambiguïté. Trois principes fondamentaux s'appliquent à l'ensemble des réacteurs. Le premier concerne la responsabilité première de l'exploitant. Il ne suffit pas de respecter des règles fixées par l'autorité. L'exploitant doit d'abord proposer une installation sûre et en apporter la démonstration. Le deuxième principe porte sur l'exigence d'un haut niveau de protection des personnes et de l'environnement pour les réacteurs, mais aussi pour les usines de fabrication et de retraitement de leurs combustibles, ainsi que pour la gestion des déchets. L'ASN ne fera pas de compromis sur ce point. Le troisième principe, extrêmement important, a trait aux règles de transparence, qui sont bien plus exigeantes que dans le reste de l'industrie.

Cela étant, ces réacteurs innovants posent naturellement des questions spécifiques, qui appellent



des réponses elles aussi spécifiques. La première concerne le niveau de sûreté attendu. La différence essentielle entre les gros et les petits réacteurs porte sur les sites d'implantation. Les petits réacteurs ont vocation à être implantés sur des sites industriels, qui sont parfois bien plus proches de zones densément peuplées que ne le sont les gros sites nucléaires aujourd'hui. Il est inenvisageable d'évacuer la population dans de telles zones, contrairement à ce qui est prévu aujourd'hui dans les plans d'intervention autour des sites nucléaires. Dès lors, les démonstrations de sûreté de ces réacteurs doivent fournir la preuve que les rejets restent négligeables. De ce point de vue, les petits réacteurs ont des caractéristiques favorables, mais encore faut-il le démontrer de façon rigoureuse. Ici, l'une des difficultés porte sur le moindre retour d'expérience sur ces technologies. Les deux conditions pour la sûreté sont donc la réduction des conséquences des accidents à due proportion de la proximité des zones densément peuplées et la rigueur des démonstrations attendues à cet effet.

La deuxième question concerne le souhait de la plupart des porteurs de projets que ces réacteurs soient autorisés dans les mêmes conditions dans plusieurs pays, ce qui pose l'enjeu de la standardisation et de l'harmonisation des règles de sûreté à l'échelle internationale. Dans le cadre de l'Association des responsables de sûreté nucléaire d'Europe de l'Ouest (WENRA), nous avons lancé un travail commun sur des objectifs de sûreté harmonisés pour les petits réacteurs modulaires. Mais nous souhaitons aller plus loin, pour viser un objectif de standardisation. Celui-ci est cependant difficile à atteindre, dans la mesure où la responsabilité en matière de sûreté nucléaire reste nationale. Aussi, est-il exclu, pour l'ASN et ses homologues, d'accepter des autorisations instruites dans un autre pays sans les examiner. La meilleure option consisterait à faire travailler ensemble les autorités nationales, à un stade très précoce du développement de ces projets, pour procéder à l'examen conjoint d'un même dossier de sûreté présenté simultanément dans plusieurs pays par un même porteur de projet. Nous avons agi de la sorte sur le projet NUWARD, d'abord avec nos homologues finlandais et tchèques, avant d'élargir l'examen conjoint aux Pays-Bas, à la Pologne et à la Suède. Il s'agit là d'une première à l'échelle mondiale, qui me semble constituer la voie la plus prometteuse.

La troisième question relève des pratiques d'instruction avec les nouveaux entrants. Nous devons établir un dialogue avec plusieurs acteurs qui viennent nous voir simultanément et que nous avons à coeur de traiter équitablement. À cet effet, nous avons monté une équipe dédiée pilotée par Philippe Dupuy. Nous veillons à engager nos ressources de manière proportionnée à la maturité des projets. Ces échanges nous ont permis d'identifier des questions difficiles sur les plans techniques, par exemple certains de ces projets envisagent l'absence d'opérateur sur site, ou juridiques, comme le partage de responsabilité lorsque le propriétaire du réacteur et celui du terrain sur lequel il est implanté sont distincts. L'instruction des objectifs de sûreté, la coopération internationale, le dialogue technique, etc. ne se feront pas sans des moyens supplémentaires pour l'ensemble ASN et IRSN. Nous travaillons sur ces sujets techniques de manière commune avec l'IRSN, avec une équipe conjointe interlocutrice des porteurs de projets, sans aucun compromis en matière de sûreté, de rigueur des démonstrations et de transparence.

**Mme Olga Givernet, députée, rapporteure.** - À présent, la parole revient à Jean-Christophe Niel, directeur général, et Karine Herviou, directrice générale adjointe en charge de la sûreté nucléaire, de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire.

**M. Jean-Christophe Niel, directeur général, Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN).** - L'IRSN a déjà pratiqué une expertise sur des réacteurs autres que ceux d'EDF, comme les réacteurs à eau pressurisée ukrainiens ou ceux de la propulsion navale, puisque l'IRSN assure l'appui technique de l'Autorité de sûreté nucléaire défense, de même que des réacteurs à neutrons rapides comme Phénix, Superphénix et, plus récemment, Astrid. Je peux également mentionner les réacteurs de quatrième génération, qu'ils soient refroidis au gaz, au sodium ou au plomb, des réacteurs très haute température, à eau supercritique ou à sels fondus. Beaucoup de SMR utilisent aujourd'hui ces technologies.

Nous avons travaillé sur nos modes d'instruction réglementaires et d'expertise pour ces SMR innovants, y compris dans le cadre des échanges internationaux, puisque nous appuyons l'ASN dans le cadre de la revue de NUWARD. L'IRSN a même travaillé sur un processus de *licensing* commun. Il s'agit évidemment de renforcer la maîtrise des processus pour des concepteurs qui ne sont pas encore complètement familiers des réglementations et des attentes en termes de démonstration de sûreté, voire de sécurité nucléaire et de radioprotection. L'IRSN a mis en place des séminaires sur la maturation des projets, a identifié des chefs de projets : Philippe Dupuy pour l'ASN et Sébastien Israël pour l'IRSN, et dispose de contacts plus ou moins avancés avec l'ensemble des concepteurs présents aujourd'hui. Par ailleurs, l'IRSN a donné un avis sur le dossier d'options de sûreté du réacteur Jimmy et a reçu cet été celui du réacteur NUWARD.

Le niveau de maturité des projets est variable et s'appuie en partie sur le retour d'expérience (REX) acquis. Celui-ci est très élevé sur les réacteurs à eau légère soit pressurisée soit bouillante : plusieurs milliers d'années-réacteur d'exploitation cumulées ; élevé pour les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium : plusieurs centaines d'années ; moyen pour les réacteurs à haute température : une centaine d'années. Pour les autres concepts, le retour d'expérience est bien sûr beaucoup plus limité.

Pour la majorité des projets, des travaux de R&D, utiles à la modélisation, sont nécessaires en sup-

port à la conception, mais aussi à la démonstration de sûreté. Les efforts de R&D ont historiquement porté sur les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium et les réacteurs à haute température. La plupart des projets proposent des programmes de R&D ambitieux, intégrant la réalisation de maquettes ou de prototypes, afin de disposer *in fine* de données représentatives. Dans le cas des réacteurs de quatrième génération, l'IRSN a identifié, dans un rapport de 2014, des sujets de R&D sur les matériaux - compte tenu des environnements à haute température, 400 à 500 degrés pour le plomb, ou corrosifs, comme les sels fondus -, le contrôle et l'inspection des installations - rendus difficiles par la compacité des installations ou l'opacité des fluides caloporteurs -, ainsi que l'étude des phénomènes accompagnant les accidents graves - avec des phénomènes de dégagement d'énergie ou des rejets radioactifs ou chimiques. Ces travaux de R&D doivent être menés en lien avec la filière concernée.

S'agissant de la sûreté, même si ces réacteurs sont de moindre puissance que ceux actuellement en fonctionnement - la plage est large entre des réacteurs de quelques mégawatts et de quelques centaines de mégawatts -, ils renferment des quantités importantes de produits radioactifs. Dans la mesure où certains concepteurs envisagent des implantations à proximité de zones habitées ou de grands sites industriels, les exigences de sûreté doivent permettre de limiter notablement les conséquences des situations accidentelles envisageables. En fonction de la filière, la taille du réacteur peut avoir un effet sur les caractéristiques de sûreté qui peut être favorable. Par exemple, pour les réacteurs à haute température, une taille réduite limitera le comportement neutronique du cœur.

De manière générale, il est utile de privilégier des concepts « pardonnants » c'est-à-dire peu sensibles aux événements qui peuvent se produire dans l'installation ou à l'extérieur de celle-ci. De plus, les enjeux de sûreté concernent également le cycle du combustible. La sûreté des installations associées doit donc être examinée de manière concomitante à celle du réacteur. Nous considérons que la construction de maquettes en appui de la justification de sûreté des installations doit être envisagée par les concepteurs. Les prototypes devraient être instrumentés de manière spécifique, pour répondre à la compréhension nécessaire des enjeux de sûreté. En conclusion, l'IRSN peut contribuer à la formation aux sujets de la sûreté nucléaire et de sa démonstration. Nous disposons du système de logiciels *Accident Source Term Evaluation Code* (ASTEC), en particulier pour les accidents graves, que nous sommes prêts à partager avec ceux qui le souhaiteraient.

## D. DÉBAT ET CONCLUSIONS SUR LA PLACE DES START-UP DANS LE DÉVELOPPEMENT DES RÉACTEURS NUCLÉAIRES DU FUTUR

**M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur.** - Nous avons beaucoup parlé de Phénix, Superphénix et Astrid. Considérez-vous que le retour d'expérience sur Astrid permettrait de certifier plus rapidement les petits projets ? En effet, les *start-up* que nous avons entendues nous font part d'un horizon à 2035, court à l'échelle nucléaire.

**M. Alexandre Sabatou, député.** - Ces petits réacteurs seront plutôt implantés dans des sites industriels, dont certains seront probablement des sites Seveso. Les normes appliquées à ces réacteurs nucléaires sont-elles proportionnées aux normes appliquées aux sites industriels, notamment Seveso ? Ensuite, pouvez-vous revenir sur les risques concrets ? J'ai cru comprendre que des phénomènes comme la dilatation des sels liquides semblent atténuer les dégâts potentiels sur les installations en cas de problème.

**M. Daniel Salmon, sénateur.** - La fonction chaleur apportée par les SMR constitue une nouveauté et implique notamment leur implantation dans des espaces plus denses en termes de population. Les technologies utilisées ne sont pas exemptes de problèmes potentiels, notamment le plomb ou le sodium qui a causé de nombreux incidents sur Superphénix. De quelle manière ces risques seront-ils pris en compte ? Au-delà de la sûreté, il convient également de mentionner les risques relatifs à la sécurité, ne serait-ce qu'en raison de la situation géopolitique. À ce titre, que pensez-vous de la dissémination de sites nucléaires dans de nombreux endroits en France, mais aussi dans le monde ? De quelle manière envisagez-vous cette problématique ? Par exemple, la situation rencontrée en Ukraine, où la Russie a bombardé une centrale nucléaire, ne pourrait-elle pas se reproduire sur de plus petits sites et quelles en seraient les conséquences ?

**M. Hendrik Davi, député.** - Je pense que nous sommes tous convaincus de la nécessité de décarboner notre économie. En revanche, je ne suis pas persuadé qu'il faille multiplier par trois ou par quatre la consommation d'électricité au niveau planétaire. À l'échelle de 200 ou 300 ans, cela ne sera pas durable. Par ailleurs, je regrette que nous n'ayons pas évoqué aujourd'hui le bilan des échecs passés. L'ASN et l'IRSN peuvent-ils les mentionner ? Les projets Phénix, Superphénix et Astrid ont certes été abandonnés pour des motifs politiques, mais aussi pour des raisons techniques et scientifiques.

Par ailleurs, je conçois que les *start-up* soient dans une logique de communication et cherchent à nous convaincre que leurs projets sont géniaux. Mais en tant que législateur, j'ai besoin de comprendre quels sont les verrous scientifiques et industriels, quels sont les risques en termes de sûreté et de sécurité, quels sont les risques économiques, notamment à la lumière de l'expérience des EPR.

Enfin, ces solutions posent un véritable problème d'acceptabilité. Pour que celle-ci progresse au sein

de la société, il faut que la sûreté et la sécurité soient assurées, d'où l'importance du travail réalisé par l'ASN et l'IRSN. Comment pouvez-vous éclairer le législateur et les citoyens sur la pertinence des projets proposés en matière de sûreté et de sécurité ? C'est extrêmement important : si vous ne parvenez pas à convaincre des parlementaires, vous ne parviendrez pas à convaincre des citoyens.

**M. Maxime Laisney, député.** - Nous avons compris que l'un des avantages des SMR porte sur le multi-recyclage dans le coeur des réacteurs. Cependant, que faire des déchets ultimes, qui surviendront bien, malgré tout ?

Par ailleurs, je fais partie de ceux qui ne sont toujours pas convaincus de l'intérêt de la fusion entre l'ASN et l'IRSN, puisque vous travaillez déjà en bonne intelligence, notamment sur ces projets de réacteurs innovants. Le projet actuel de création de l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR) prévoit une fusion, mais aussi une séparation de l'expertise de sûreté et de sécurité. Cette séparation est-elle pertinente, alors que les SMR seront situés à proximité d'installations industrielles et d'habitations ?

**M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur.** - Cette matinée ne porte pas sur le projet de rapprochement entre l'ASN et l'IRSN, sujet sur lequel une audition publique a déjà été organisée. Aujourd'hui, nous traitons des réacteurs innovants. Par conséquent, nos interlocuteurs sont invités à répondre librement à toutes les questions liées à l'innovation dans le domaine des réacteurs.

**M. Olivier Gupta.** - Certaines de vos questions portent sur l'acceptabilité de ces réacteurs. À cet égard, le niveau de sûreté constitue une condition nécessaire mais non suffisante de cette acceptabilité. Un débat doit donc intervenir à un moment donné, mais il ne revient pas à l'ASN de l'organiser. Je pense, par exemple, que le public n'est pas conscient que les nouveaux réacteurs ne seront pas construits sur des sites nucléaires. Ensuite, l'ASN n'est pas aujourd'hui chargée de la sécurité nucléaire, mais ce sujet devra être instruit au même rythme que celui de la sûreté nucléaire.

S'agissant des exigences de sûreté, vous évoquiez à la fois la sûreté et la présence éventuelle de ces réacteurs sur des sites Seveso. La proximité des populations implique des objectifs de sûreté renforcés, notamment en termes de limitation plus forte des rejets. De plus, sur un site Seveso, il peut exister une rétroaction de l'usine sur le réacteur lui-même et je pense que les porteurs de projet en sont conscients. Enfin, la fixation des exigences de sûreté est proportionnée aux enjeux de sûreté. Les exigences ne sont pas les mêmes pour une grande installation qui présente des risques importants et une petite installation présentant très peu de risques. Les plus petits de ces réacteurs peuvent être considérés comme des objets intermédiaires. Ceux qui atteignent la centaine de mégawatts se rapprochent d'une installation nucléaire de base. Quoi qu'il en soit, les démonstrations de sûreté requièrent dans tous les cas un certain niveau de rigueur.

**M. Philippe Dupuy, responsable de la mission réacteurs innovants, Autorité de sûreté nucléaire (ASN).** - Je souhaite apporter quelques éléments supplémentaires sur la proportionnalité des exigences de sûreté face aux enjeux. La réglementation française en matière nucléaire est assez « légère » : elle est surtout fondée sur des objectifs de démonstration, et non sur des moyens. Nous ne sommes pas écrasés par des normes et la charge de la preuve doit être apportée par les exploitants.

Ensuite, les enjeux ne dépendent pas uniquement de la taille du réacteur : ce n'est pas parce qu'un réacteur est plus petit ou moins puissant qu'il contient une quantité de matières radioactives moins importante. En effet, contrairement aux réacteurs REP qui sont rechargés à peu près tous les ans ou tous les deux ans, certains de ces réacteurs innovants sont chargés une première fois et ont une durée de vie, avec un même coeur, de vingt ans. Leur inventaire initial est donc considérable. En résumé, la puissance n'est pas l'enjeu intrinsèque en matière de sûreté.

D'autres enjeux doivent être mentionnés, comme la proximité des populations et l'innovation. Nous attendons ainsi une démonstration : une exigence essentielle en matière de sûreté porte sur le caractère éprouvé des solutions qui sont proposées pour un site industriel. Dans le cas contraire, il faut en passer d'abord par un réacteur expérimental. Dès lors, l'IRSN doit consacrer du temps à l'expertise.

**M. Jean-Christophe Niel.** - L'IRSN évalue l'effet du réacteur sur son environnement ; par exemple, l'impact d'un accident nucléaire sur les installations industrielles. Nous avons l'habitude de le faire, notamment à Gravelines. Mais l'effet inverse, c'est-à-dire l'impact de l'installation industrielle sur le réacteur, doit tout autant être évalué, comme c'est déjà le cas à la centrale du Tricastin.

Vous nous avez demandé de quelle manière nous pouvons éclairer les parlementaires. Aujourd'hui, l'expertise de l'IRSN sur les SMR débute, à l'image de notre avis sur le dossier d'options de sûreté concernant le réacteur Jimmy. Dès que les objets seront finalisés, ils pourront faire l'objet d'une expertise qui sera présentée aux parlementaires. Il sera intéressant de mettre en évidence les enjeux qui distinguent ces réacteurs d'un point de vue démonstration de sûreté des réacteurs de puissance actuels.

**Mme Karine Herviou, directrice générale adjointe en charge de la sûreté nucléaire, Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN).** - Monsieur le président, vous nous avez demandé si



le travail déjà effectué sur Astrid permettait de gagner du temps sur les projets. En la matière, l'expertise n'a pas été très approfondie, puisqu'elle s'est arrêtée à l'examen d'un dossier d'orientation de sûreté. Cependant, ce travail a permis de fixer les exigences de sûreté attendues. Ces exigences ont été reprises dans le dossier HEXANA, notamment en matière d'inspection en service. Le CEA a certainement pris en compte ces exigences et j'espère que les *start-up* en ont conscience.

Dans le cadre de ce document, pour définir les exigences et les solutions attendues, nous avons réalisé un bilan complet du retour d'expérience de conception et d'exploitation des réacteurs Phénix, Superphénix et Rapsodie. De manière générale, la France dispose d'une compétence avérée sur les réacteurs au sodium et elle maîtrise la réaction sodium-eau sur les gros réacteurs. Désormais, il importe d'examiner comment le principe fondant cette maîtrise, consistant à écarter les composants contenant du sodium de ceux contenant de l'eau, peut être transféré à la conception ramassée de petits réacteurs.

L'IRSN avait établi que sur le projet Astrid, le niveau de sûreté atteignable était équivalent à celui exigé aujourd'hui pour les EPR. Pour les autres technologies, nous avons identifié un certain nombre de verrous technologiques et de points qui doivent absolument être approfondis en termes de démonstration de sûreté. Ils nécessitent effectivement des travaux de R&D parfois importants. Je pense, par exemple, à l'évaluation des rejets en cas d'accident et de fusion du cœur pour les réacteurs refroidis au plomb, connaissance dont nous ne disposons pas encore. La R&D est également nécessaire pour les réacteurs à sels fondus, même si certains aspects comme l'absence de réactivité sont favorables, afin de fournir une démonstration suffisante.

**M. Paul Gauthé.** - S'agissant de la technologie sodium, le retour d'expérience d'Astrid est assez important. Ainsi, un dossier d'orientations de sûreté a été soumis et un dossier d'options de sûreté a été rédigé, mais n'a pas eu le temps d'être soumis. HEXANA souhaite s'appuyer sur cette connaissance et la valoriser. Nous connaissons les vingt recommandations formulées à l'époque par l'ASN et nous les prendrons en compte. Ensuite, nous ne réalisons pas un copier-coller d'Astrid pour accélérer à tout prix la procédure.

Plus généralement, nous considérons que le retour d'expérience sur la technologie sodium constitue un patrimoine scientifique et technique extrêmement précieux : nous pouvons être fiers de Phénix et de Superphénix. En 1996, Superphénix présentait un taux de disponibilité de 96 %, produisait plus de 3,7 TWh d'électricité bas-carbone et n'avait enregistré aucune fuite de sodium, ni de réaction sodium-eau. Phénix, qui était un réacteur expérimental, a connu une trentaine de fuites de sodium d'au maximum deux kilogrammes et cinq réactions sodium-eau, sans aucune conséquence sur l'environnement ou les personnes. L'exploitant sait gérer le risque industriel, par la vidange du circuit et la réparation. J'ai vécu deux de ces fuites à Phénix, en 2007 et 2009. Je peux témoigner que le problème est avant tout industriel.

Je rappelle également que le premier producteur mondial de sodium est français. Ce fluide industriel, utilisé dans les batteries, l'énergie solaire à concentration, l'industrie pharmaceutique, *etc.*, présente des risques connus et maîtrisés par les technologies et par le REX d'exploitation. Nous capitalisons sur le REX d'exploitation de Phénix et de Superphénix, en collaboration avec notre partenaire EDF, dans le but de concevoir non un réacteur d'ingénieur, mais un réacteur d'exploitant. En effet, c'est l'exploitant qui assume la responsabilité de la sûreté, comme l'a souligné Olivier Gupta.

Sur la question de la durabilité, un réacteur sodium permet de valoriser les 340 000 tonnes d'uranium appauvri présentes sur notre sol, mais aussi le plutonium des combustibles usés. Les concepts de réacteurs isogénérateurs, comme ceux d'HEXANA ou de STELLARIA, permettent d'aller vers un nucléaire durable et d'obtenir une autonomie énergétique très importante. S'agissant de l'impact climatique, un RNR produit deux grammes de CO<sub>2</sub> par kilowattheure. Si l'on supprime les mines et l'enrichissement, on divise par deux les externalités du nucléaire sur l'environnement. De plus, une émission de deux grammes de CO<sub>2</sub> par kilowattheure est cinq fois inférieure à celle d'une éolienne et dix fois inférieure à celle d'un panneau solaire. Il s'agit donc d'une technologie extrêmement peu émettrice de carbone.

Par ailleurs, un RNR sodium est très peu gourmand en matériaux critiques, puisque le sodium est le sixième élément le plus présent dans la croûte terrestre. De plus, nous veillons à ne pas utiliser de lithium, de cobalt de graphite, *etc.* Le réacteur est donc très sobre du point de vue énergétique, climatique et des matériaux critiques. Il s'agit donc d'une énergie réellement durable, sur tous les critères. Enfin, le nucléaire sans déchets n'existe pas, mais un RNR permet de diminuer grandement leur quantité et leur radiotoxicité, le plutonium n'étant plus un déchet mais une ressource. Les déchets se réduisent en ce cas aux produits de fission, dont l'activité a presque disparu après 300 ans, et aux actinides mineurs, qui peuvent être transmutés au moins en partie.

**M. Christophe Béhar.** - Ce qui vient d'être indiqué pour les réacteurs sodium est valable pour tous les réacteurs à neutrons rapides.

**M. Nicolas Breyton.** - Notre engagement est avant tout environnemental. Le taux de retour énergétique est exceptionnel, car il est supérieur à 100, quand celui du pétrole ne cesse de diminuer, de 15 à 20 actuellement contre 60 au début du siècle dernier. Un taux de retour énergétique inférieur à 10 ne permet pas à une société moderne- c'est-à-dire une société dotée d'un système de retraites, d'un



système éducatif ou d'un système de santé - de se perpétuer. La densité énergétique de l'uranium est de l'ordre d'un million de fois supérieure à celle du pétrole et celle du réacteur Stellarium de l'ordre de 70 millions de fois supérieure à celle d'une batterie lithium-ion.

Notre technologie n'a plus besoin de mine, récupère toutes les matières existantes et fournit de l'énergie en abondance. Ensuite, les zones à risques, ATEX (« atmosphère explosive ») ou Seveso, sont très sérieusement prises en compte dès la conception du réacteur, qui est quasi entièrement enterré et de ce fait en capacité de résister aux séismes. Ces caractéristiques, associées à l'utilisation d'une basse pression et de sels inertes - le chlorure de sodium (NaCl) 37, assimilable à du sel de table - témoignent de l'intégration précoce des impératifs de durabilité, de continuité de service et de sécurité dans les phases initiales du projet.

**M. Ludovic Vandendriesche.** - S'agissant du REX sur la fabrication du combustible MOX RNR, l'un d'entre vous faisait référence à l'exploitation de l'usine Melox. Ce point a été pris en compte : dans le cadre de notre projet, nous avons travaillé sur le REX des installations existantes et les améliorations à apporter pour la fabrication de MOX RNR. Par ailleurs, le concept même de la fermeture du cycle du combustible contribue grandement à l'acceptation du public, même si d'autres aspects doivent être pris en compte.

**M. Frédéric Hofmann.** - Il ne faut pas non plus réduire l'utilisation des SMR aux sites industriels et Seveso. Le modèle de développement du réacteur NUWARD consiste à remplacer des centrales à charbon et à profiter ainsi du foncier disponible, de la connexion au réseau et de la source froide pour décarboner la génération d'électricité. Le dimensionnement et les conditions d'exploitation sont adaptés en fonction des contraintes.

**M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur.** - J'ajoute qu'une présidente de région s'est exprimée favorablement en ce sens, pour remplacer une centrale à charbon.

**M. Jean-Luc Alexandre.** - Le métier d'un industriel consiste à travailler à partir d'une analyse de risques. Nous allons très loin dans ce domaine, le plus en amont possible, en enrichissant la liste d'exigences fournie par les autorités. Ensuite, nous avons réalisé un retour d'expérience des échecs passés : un cinquième de nos équipes est composé de seniors ayant travaillé sur tous les projets dont nous avons parlé aujourd'hui. Ils transmettent leur expérience, qui n'a pas été formalisée, et leur savoir-faire aux jeunes générations. Le plan Match du GIFEN, sur les 100 000 emplois nécessaires dans les 10 prochaines années, implique, pour toute la filière, d'assurer cette transmission aux nouvelles générations.

**M. Bernard Salha.** - Notre débat met en lumière la nécessité d'innover. Les problèmes sont complexes, certains doivent nécessairement être traités : l'ASN et l'IRSN ont souligné les besoins de recherche en matière de sûreté. Il conviendrait vraiment de plaider pour le renforcement du soutien à la recherche et à l'innovation. Les actions mises en oeuvre au titre de France Relance et de France 2030 ont permis de lancer cette démarche, qui constitue déjà un beau succès. Cependant, un long chemin demeure encore à parcourir. Le rôle de soutien de l'État et de fédération des acteurs, ainsi que la dynamique au sein de l'OPECST, sont des facteurs importants pour résoudre les nombreuses questions restant à traiter.

Par ailleurs, la dimension européenne doit être soulignée. Plusieurs pays européens sont très intéressés par le redémarrage ou la construction de nouveaux réacteurs. De nouvelles manières de coopérer sont nécessaires, comme l'a dit Olivier Gupta. À ce titre, les enjeux d'innovation sont tellement importants qu'il serait opportun de les partager entre plusieurs pays européens et de fédérer des actions. En Italie, en Belgique et en Suède, nos collègues travaillent sur les réacteurs au plomb. Il en va de même pour les autres technologies évoquées aujourd'hui. Cette dimension européenne représente sans aucun doute un levier très important que la représentation parlementaire pourrait promouvoir.

**Mme Olga Givernet, députée, rapporteure.** - Je souhaite relayer une question posée en ligne. Dans le cadre des réacteurs innovants, les moyens alloués à l'ASN et à l'IRSN sont-ils à la hauteur des enjeux et des ambitions gouvernementales, notamment pour leur permettre d'être suffisamment compétitifs en termes d'attractivité ? Des informations me sont parvenues laissant penser que d'autres organismes seraient plus attractifs sur le plan des salaires.

**M. Olivier Gupta.** - L'ASN réunit une équipe autour de Philippe Dupuy, suffisante pour l'année 2024, mais l'effort devra être poursuivi dans la durée. Actuellement, nous avons des discussions préliminaires, mais ces activités vont monter en puissance. Nous aurons besoin que le Gouvernement et le Parlement renforcent les moyens mis à notre disposition.

**M. Jean-Christophe Niel.** - Lorsque l'ASN a des besoins, l'IRSN en a également en amont, puisqu'elle assure l'expertise pour l'ASN. Aujourd'hui, en matière de R&D et d'expertise, l'IRSN dispose de moins de cinq personnes. À brève échéance, il nous faudrait rassembler une douzaine de personnes. Dans le premier trimestre 2024, nous aurons un certain nombre de rendez-vous basés sur les méthodes développées pour l'EPR et l'EPR2, sous forme de séminaires. Aujourd'hui, nous envisageons un séminaire par mois, par concept et par thématique, couvrant des sujets tels que les accidents graves, les agressions, etc. Sans moyens supplémentaires, nous serons obligés d'agir par redéploiement, après

coordination avec l'ASN, en prélevant des ressources dans d'autres domaines.

**M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur.** - Je vous remercie pour ces nombreux et riches échanges. À titre personnel, j'ai relevé des pistes prometteuses sur la filière des RNR, à la suite d'Astrid, qui permettraient d'assurer la fermeture du cycle, inscrite dans nos codes. Je rappelle également que le Japon, qui était notre principal partenaire sur Astrid, a élargi son accord avec la *start-up* américaine Terra Power pour la conception de ce type de réacteur, ce qui prouve d'ailleurs que la France n'est pas isolée dans cet objectif du nucléaire durable. L'Office continuera à suivre de très près ces sujets, et nous mènerons peut-être d'autres auditions plus spécifiquement dédiées à la question du cycle du combustible. Pour des raisons d'efficience, j'ai souhaité qu'on s'en tienne aujourd'hui aux réacteurs, mais l'amont et l'aval du cycle ne doivent pas être oubliés. Je suis convaincu que nous serons amenés à nous retrouver dans les prochaines semaines et les prochains mois.

## II. EXTRAITS DU COMPTE RENDU DE LA RÉUNION DE L'OPECST DU MARDI 14 DÉCEMBRE 2023 PRÉSENTANT LES CONCLUSIONS DE L'AUDITION PUBLIQUE

### Examen des conclusions de l'audition publique du 23 novembre 2023 sur le développement des réacteurs nucléaires innovants en France

**M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur.** - Chers collègues, l'ordre du jour comporte deux points : la présentation des conclusions de l'audition publique consacrée au développement des réacteurs nucléaires innovants en France, qui s'est tenue le 23 novembre dernier au Sénat, et la présentation des actes du quarantième anniversaire de l'Office.

Olga Givernet et moi-même allons vous présenter le premier point. Vous connaissez le contexte de l'audition publique du 23 novembre : la relance de la filière nucléaire, initiée à Belfort en février 2022 par le discours du Président de la République, après plus de vingt ans d'attentisme, parfois aussi de renoncements. L'un des derniers était la décision d'arrêt du programme Astrid, officialisée au cours de l'été 2019, qui a donné lieu à la publication d'un rapport de l'Office en juillet 2021.

Astrid était un projet de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium de 600 ou 800 mégawatts électriques préfigurant un réacteur de production qui dépasserait, à terme, 1 000 mégawatts. Il prenait la suite des réacteurs expérimentaux Rapsodie et Phénix, ainsi que du réacteur de puissance Superphénix, de 1 200 mégawatts électriques, arrêté en 1997, bien qu'il ait atteint, comme cela a été rappelé lors de l'audition, un taux de disponibilité de 96 % en 1996. Plusieurs réacteurs du même type sont exploités en Chine, en Inde et en Fédération de Russie. Le plus puissant, le BN-800 russe, atteint 800 mégawatts électriques.

L'annonce, fin 2021, du plan d'investissement « France 2030 » laissait déjà entrevoir un revirement sur l'énergie nucléaire, puisqu'il comportait un volet spécifiquement destiné à « *faire émerger en France des réacteurs nucléaires de petite taille, innovants et avec une meilleure gestion des déchets* ».

Cette ambition a commencé à se concrétiser par la proclamation, le 23 juin 2023 et le 27 novembre 2023, des lauréats de l'appel à projets « Réacteurs nucléaires innovants » de France 2030. Les deux premiers lauréats participaient d'ailleurs à la première table ronde de notre audition. À l'échelle européenne, après la création, en février 2023, à l'initiative de la France, de l'Alliance européenne pour le nucléaire, la Commission européenne a officiellement annoncé, le 27 novembre dernier, la prochaine mise en place d'une « *alliance industrielle pour soutenir le déploiement des petits réacteurs nucléaires en Europe* ».

L'audition du 23 novembre s'inscrivait pleinement dans la continuité des travaux de l'Office sur l'innovation dans le domaine de l'énergie. Elle a notamment permis de mesurer le chemin parcouru depuis la publication, en juillet 2021, du rapport sur « *L'énergie nucléaire du futur et les conséquences de l'abandon du projet de réacteur nucléaire de quatrième génération Astrid* » dont j'étais le co-rapporteur avec le député Thomas Gassilloud. Certaines des préconisations que nous allons vous présenter à la suite de cette synthèse étaient déjà, pour partie, mentionnées dans ce document.

Même si cela va de soi, il nous semble utile de souligner que l'audition du 23 novembre n'avait pas vocation à l'exhaustivité. Dans le temps limité d'une matinée, nous avons choisi de nous concentrer sur l'innovation dans le domaine des réacteurs, qu'ils soient basés sur des technologies de rupture - essentiellement les réacteurs à neutrons rapides - ou au contraire éprouvées - les actuels réacteurs à eau pressurisée - en mettant l'accent sur le rôle des *start-up*.

Certaines des questions soulevées par nos collègues ou par les participants seront approfondies dans de prochains travaux de l'Office. Par exemple, celles touchant au stockage des déchets radioactifs seront traitées le 25 janvier prochain, dans le cadre d'une audition publique dédiée à l'évaluation du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR), dont les rapporteurs sont Hendrik Davi et Bruno Sido.

L'audition du 23 novembre dernier était structurée en deux tables rondes consacrées à l'innovation,

la première dans le domaine des réacteurs avancés - innovation dans laquelle les *start-up* jouent un rôle de premier plan -, la seconde dans celui de la filière des réacteurs à eau pressurisée, à laquelle appartiennent les réacteurs du parc nucléaire actuel. Ces tables rondes étaient suivies d'une intervention coordonnée de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur l'accompagnement de la certification de ces solutions technologiques innovantes. Ce sujet est essentiel.

**Mme Olga Givernet, députée, rapporteure.** - Pour la première table ronde, compte tenu du très grand nombre de projets de petits réacteurs modulaires, dits SMR (*small modular reactor*) - de l'ordre de 80 dans le monde -, nous avons restreint notre champ d'investigation aux réacteurs à neutrons rapides, capables de mettre en oeuvre une fermeture complète du cycle du combustible. En effet, dès l'origine du programme nucléaire civil, la France a fait le choix d'un cycle du combustible fermé, dont l'objectif ultime est d'assurer la complète indépendance du pays pour sa production d'électricité. C'est la raison pour laquelle la loi du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs prévoit, dans son article 3, la construction d'un réacteur de ce type. Par ailleurs, l'article 6 de cette même loi dispose que « *la réduction de la quantité et de la nocivité des déchets radioactifs est recherchée notamment par le retraitement des combustibles usés* », ce qui confirme sur le plan législatif l'orientation prise en faveur de la fermeture du cycle.

De plus, nous n'avons retenu que des *start-up* françaises, l'une d'entre elles étant européenne mais disposant d'un établissement en France.

Cette table ronde regroupait donc les deux premières *start-up* lauréates du premier appel à projets de France 2030 sur les « Réacteurs nucléaires innovants » : NAAREA et NEWCLEO, ainsi que deux *start-up* essaimées du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) : HEXANA et STELLARIA.

Les débats ont mis en évidence la diversité des approches technologiques retenues pour concevoir des réacteurs nucléaires de nouvelle génération. NAAREA et STELLARIA misent sur des réacteurs à sels fondus, HEXANA se concentre sur les réacteurs refroidis au sodium, héritiers directs d'Astrid, tandis que NEWCLEO se tourne vers les réacteurs refroidis au plomb. Ces réacteurs se distinguent aussi par leur puissance, allant de 80 mégawatts thermiques à plusieurs centaines de mégawatts. Cette diversité reflète la recherche de solutions adaptées à différents besoins industriels : la production, à plus ou moins grande échelle, d'électricité, mais aussi de chaleur, d'hydrogène ou la désalinisation, *etc.* Il est clairement apparu que la fermeture du cycle du combustible constituait une préoccupation commune à ces *start-up*.

La question de l'insertion des différents concepts de réacteurs dans le cycle actuel a bien été prise en compte, même si elle reste à mettre en oeuvre. En effet, tous nécessitent la production de nouveaux types de combustibles. Ces nouveaux réacteurs permettraient un recyclage beaucoup plus abouti des matières valorisables issues de l'enrichissement de l'uranium et des combustibles nucléaires ; qu'il s'agisse d'uranium appauvri, d'uranium de retraitement, de plutonium, voire de thorium. Certains intervenants ont même évoqué le potentiel de transmutation des actinides mineurs, un aspect également mentionné par la loi de 2006.

Afin d'atteindre ces objectifs ambitieux, notamment en termes de délais, les entreprises que nous avons entendues mobilisent des investissements privés conséquents, prévoient des partenariats avec des acteurs de l'industrie ou des institutions de recherche et sollicitent le soutien des autorités pour accélérer le développement de leurs projets. Nous y reviendrons dans le cadre de nos préconisations.

Un point mérite tout particulièrement d'être souligné : ces entreprises s'appuient toutes sur l'acquis scientifique et technologique des travaux de recherche et développement (R&D) menés depuis plusieurs dizaines d'années en France, notamment sur les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, ou en Europe, en particulier en Italie, pour les réacteurs rapides refroidis au plomb.

À cet égard, elles mobilisent les compétences et l'expérience de chercheurs, d'ingénieurs et de techniciens, français et européens, qui ont travaillé sur des installations telles que Phénix et Superphénix ou sur le projet Astrid. Ces *start-up* assurent ainsi un rôle très important de préservation des connaissances, y compris en faisant appel à des personnels retraités, et de valorisation des investissements réalisés dans le passé, en France et en Europe, sur les réacteurs à neutrons rapides.

**M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur.** - La seconde table ronde était consacrée à l'innovation sur les réacteurs à eau pressurisée, technologie sur laquelle est basé notre parc actuel.

Cette table ronde a mis en évidence le dynamisme de la filière nucléaire française. Les intervenants ont, en particulier, mis l'accent sur l'innovation, sur la collaboration entre les différents acteurs du secteur, sur la contribution de la filière nucléaire à la transition énergétique ainsi qu'à la décarbonation de notre économie. En premier lieu, Jean-François Debost, directeur général de Nuclear Valley, a souligné le rôle de ce pôle de compétitivité fort de plus de 430 adhérents, soutenu par plusieurs ministères et collectivités locales, dans la promotion de l'innovation nucléaire, en particulier auprès des PME et des *start-up*.

En deuxième lieu, Olivier Bard, délégué général du Groupement des industriels français de l'énergie nucléaire (GIFEN), a présenté le rôle de cette organisation. Créée en 2018, elle fédère 500 entreprises de la filière nucléaire et oeuvre pour la mobilisation et la performance collective de cette filière. À ce titre, elle intervient dans divers domaines, notamment les compétences, la formation, la sûreté, la qualité, et la transformation numérique.

En troisième lieu, Bernard Salha, directeur technique groupe et directeur de la R&D d'EDF, a mis en avant l'importance de l'innovation pour les réacteurs à eau pressurisée, y compris les réacteurs existants. Il a évoqué les nouvelles briques technologiques, comme l'intelligence artificielle et la fabrication additive, qui peuvent contribuer à améliorer la performance et la sûreté des réacteurs.

Enfin, Frédéric Hofmann, directeur du programme SMR France d'EDF, a présenté le projet de SMR à eau pressurisée NUWARD, qui intègre des innovations telles que la construction modulaire, une chaudière intégrée, et la cogénération, offrant des avantages potentiels en termes de rapidité de construction, de sûreté, et de décarbonation de la chaleur industrielle.

**Mme Olga Givernet, députée, rapporteure.** - La dernière partie de l'audition sur le développement des réacteurs nucléaires innovants en France était consacrée à l'accompagnement de la certification des solutions technologiques innovantes, avec des interventions conjointes d'Olivier Gupta, directeur général de l'ASN, et de Philippe Dupuy, responsable de la mission réacteurs innovants, ainsi que de Jean-Christophe Niel, directeur général de l'IRSN, et de Karine Herviou, directrice générale adjointe chargée de la sûreté nucléaire.

L'ASN a d'abord rappelé les trois principes fondamentaux qui s'appliquent à tous les réacteurs nucléaires dans le domaine de la sûreté : la responsabilité première de l'exploitant dans la sûreté de son installation ; l'exigence d'un haut niveau de protection des personnes et de l'environnement ; la transparence, avec des règles plus exigeantes que dans d'autres secteurs industriels.

Pour les porteurs de projets, qui souhaitent que leurs petits réacteurs soient autorisés dans plusieurs pays, se pose la question de la standardisation et de l'harmonisation des règles de sûreté à l'échelle internationale. L'ASN et d'autres autorités de sûreté nucléaire travaillent sur des objectifs de sûreté harmonisés pour les petits réacteurs modulaires. Elles cherchent des moyens de coopération internationale pour examiner les dossiers de sûreté simultanément dans plusieurs pays.

Les petits réacteurs nucléaires, qui seraient préférentiellement implantés près de zones industrielles ou densément peuplées, nécessitent des démonstrations de sûreté rigoureuses. En effet, même si les petits réacteurs sont de moindre puissance, ils peuvent contenir des quantités importantes de produits radioactifs. Les exigences de sûreté doivent donc permettre de limiter considérablement les conséquences des accidents potentiels. Il convient notamment de prouver que les rejets radioactifs restent négligeables en cas d'accident. Cela constitue un défi, en particulier en l'absence de retour d'expérience significatif sur certaines des technologies présentées.

L'IRSN a en effet indiqué que les projets de SMR présentent des maturités variables, avec un retour d'expérience limité pour certains concepts. La recherche et le développement sont donc essentiels pour soutenir à la fois la conception et la démonstration de sûreté de ces réacteurs. L'ASN et l'IRSN travaillent d'ores et déjà avec les concepteurs de réacteurs innovants sur ces questions.

Ces enjeux de sûreté concernent également le cycle du combustible associé aux réacteurs. De ce fait, la sûreté des installations de traitement du combustible doit être examinée conjointement avec celle du réacteur.

L'IRSN a souligné qu'il se tenait prêt à contribuer à la formation des *start-up* sur les questions de sûreté nucléaire et à partager ses outils, par exemple de modélisation des accidents graves.

**M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur.** - Après ce compte rendu des propos tenus dans le cadre de ces tables rondes, nous souhaitons vous présenter cinq recommandations, qui prennent en compte un certain nombre des questions soulevées lors des débats particulièrement riches de cette audition.

Notre première recommandation porte sur les moyens alloués à l'ASN et à l'IRSN, indépendamment du projet de réforme de leur organisation. Les instances chargées de la sûreté et de la radioprotection doivent en effet disposer d'un effectif suffisant, en nombre et en qualité, pour accompagner les innovations technologiques, en France, mais aussi en lien avec les autres pays européens.

Leur capacité à répondre dans des délais raisonnablement courts, et surtout prévisibles, tout en ne dérogeant jamais à la rigueur de leur démarche en matière de sûreté et de radioprotection, constitue une condition indispensable à l'innovation dans le domaine des réacteurs, en particulier lorsqu'elle est portée par des *start-up*, qui doivent être en capacité d'afficher des calendriers clairs et resserrés pour parvenir à obtenir de nouveaux financements.

Aussi bien le directeur général de l'ASN, Olivier Gupta, que celui de l'IRSN, Jean-Christophe Niel, nous ont confirmé sans aucune ambiguïté la nécessité d'un tel renfort. Pour l'ASN, il devrait intervenir à partir de 2025 et se poursuivre dans la durée. Pour l'IRSN, qui travaille légèrement en amont de l'ASN, cet accroissement des moyens apparaît indispensable dès aujourd'hui. Dans le cas contraire,



l'IRSN devrait recourir à une solution dégradée, par redéploiement, ce qui se ferait au détriment d'autres dossiers.

Ce renforcement des moyens est une recommandation que l'Office avait déjà formulée dans son rapport du mois de juillet dernier sur l'organisation du contrôle de la sûreté et de la radioprotection, dont je suis, avec Jean-Luc Fugit, le rapporteur, tout comme dans celui de juillet 2021 sur l'avenir de l'énergie nucléaire.

Notre deuxième recommandation rejoint les propos tenus par plusieurs intervenants de l'audition, aussi bien du côté des *start-up*, des autorités chargées de la sûreté, que d'EDF, sur la nécessité d'un renforcement du soutien à la recherche et à l'innovation. Certes, des progrès importants ont été accomplis ces dernières années, mais l'audition a bien mis en lumière que cet effort doit être poursuivi et sans doute amplifié. Il conviendrait par conséquent de revoir les moyens alloués dans ce domaine au CEA et à l'IRSN, mais aussi de remobiliser le CNRS ainsi que la recherche universitaire.

En lien avec ce besoin de montée en puissance de la recherche, notre troisième recommandation concerne l'approfondissement de la coopération européenne, et au-delà internationale, sur la recherche et l'innovation dans le domaine nucléaire. Ainsi que l'a souligné Bernard Salha, « *les enjeux d'innovation sont tellement importants qu'il serait opportun de les partager entre plusieurs pays européens et de fédérer des actions* ».

De plus, avec la diversification des pistes technologiques et l'augmentation du coût des plateformes de recherche, la coopération à l'échelle européenne et internationale devient indispensable pour couvrir un champ suffisamment large, tout en modérant ou du moins en optimisant les dépenses. Il ne s'agit pas de contourner Euratom, mais il faut bien constater, après plus de 60 ans, que ce traité n'a pas contribué de façon suffisante à faire progresser sur le continent européen les technologies nucléaires innovantes dans le domaine des réacteurs de fission.

Grâce à sa place dans les sciences et technologies de l'atome, la France a sans aucun doute un rôle de premier plan à jouer, au moins aussi important que dans le développement de l'aéronautique et du spatial en Europe. Une initiative dans le domaine de la recherche et du développement serait d'ailleurs un prolongement naturel de la nouvelle Alliance européenne pour le nucléaire, qu'elle renforcerait, en ouvrant de nouvelles perspectives à nos partenaires. C'est précisément ce que l'OPECST avait proposé dans son rapport de juillet 2021, tout comme l'ouverture d'une telle coopération à des pays proches, comme le Royaume-Uni et l'Ukraine, ou plus éloignés, comme le Japon. À l'époque l'Australie avait aussi été évoquée, mais l'accord de coopération tripartite AUKUS est venu mettre à mal cette option.

Notre quatrième recommandation concerne l'adaptation de la législation et de la réglementation aux besoins particuliers des technologies innovantes. En effet, la loi relative à l'accélération des procédures liées à la construction de nouvelles installations nucléaires à proximité de sites nucléaires existants et au fonctionnement des installations existantes ne prend pas spécifiquement en compte les besoins exprimés lors de l'audition. Il conviendrait, en particulier, que le Gouvernement étudie de quelle façon la mise en place de dispositifs expérimentaux sur les sites de recherche nucléaire actuels pourrait être simplifiée ou leur construction anticipée, tout en respectant strictement les règles de protection de la population et de l'environnement.

La cinquième recommandation porte sur la prise en compte de l'impact des nouveaux réacteurs sur le cycle du combustible nucléaire, en anticipant sur les besoins de combustible de ces nouveaux projets, mais aussi en examinant comment ils peuvent permettre d'atteindre l'objectif de fermeture du cycle prévu par la loi de 2006, qui a été laissé de côté depuis la suspension du projet Astrid.

Enfin, nous nous sommes interrogés sur le besoin, évoqué par plusieurs de nos collègues, de sensibiliser la population à la possibilité que des installations nucléaires soient un jour implantées à proximité de zones industrielles ou densément peuplées. Il nous a semblé qu'une telle démarche serait prématurée, car il reste à ce jour trop d'inconnues sur les conditions dans lesquelles, en termes de sûreté nucléaire, de radioprotection, mais aussi de sécurité, cela pourrait être envisagé.

Il conviendra que l'OPECST suive avec beaucoup d'attention le développement de ces technologies pour juger du moment le plus opportun pour initier une telle démarche. À cet égard, il serait sans doute utile que l'Office prolonge la mission confiée à la Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs (CNE2) sur le suivi du développement des réacteurs avancés et étudie comment celle-ci pourrait être, à terme, inscrite dans les textes.

**M. Arnaud Bazin, sénateur.** - Ces recommandations me semblent empreintes de bon sens et n'appellent pas de ma part d'observation particulière. Néanmoins, je veux exprimer deux frustrations.

L'audition était passionnante, mais le caractère contraint de son horaire a frustré beaucoup de collègues présents, car la matière était particulièrement dense. Néanmoins, ces contraintes sont inhérentes à l'exercice et nous nous y plions.

Par ailleurs, j'aurais davantage tiré profit de ces passionnants échanges si, en amont, j'avais disposé,

soit du propos préalable d'un expert, soit d'un document vulgarisant les techniques qui allaient nous être présentées, en nous donnant des indications sur la maturité des concepts ainsi que sur les capacités industrielles à les réaliser. Contextualiser le débat aurait permis de rendre davantage pertinentes nos questions à destination des intervenants.

Lorsque les auditions sont aussi techniques, il est important que nous ayons les ressources nécessaires, afin de poser les questions les plus pertinentes possibles. J'ignore si cela a déjà été réalisé, car je suis un nouveau membre de l'Office.

**M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur.** - Je maintiens qu'il faut contenir la durée de ces auditions, afin qu'elles restent dynamiques, notamment pour ne perdre personne en cours de route. Au demeurant, l'audition a duré deux heures et demie.

Concernant la vulgarisation, j'entends la demande de disposer de documents permettant d'appréhender plus facilement le sujet. Si, lors ma première participation à une réunion de l'Office, il y a six ans, on m'avait parlé de réacteurs à neutrons rapides ou refroidis au plomb, j'aurais été un peu perdu. Cependant, je ne doute pas de la capacité de nos collègues à assimiler très rapidement ces concepts. En France, la technologie des réacteurs à neutrons rapides existe depuis plusieurs décennies. Mais il est indéniable qu'un temps d'acculturation est nécessaire pour se familiariser avec ce large éventail de nouvelles technologies plus ou moins complexes et plus ou moins réalisables.

**Mme Olga Givernet, députée, rapporteure.** - Certains intervenants ont également pu ressentir une certaine frustration de ne pouvoir approfondir leur propos, mais ils étaient informés en amont de ces contraintes de temps. J'ignore si leurs supports de présentation ont été communiqués aux membres de l'OPECST, mais nous pourrions nous en assurer. Il est vrai que notre compréhension du domaine nucléaire s'enrichit au fil des questions posées, ce qui contribue à éclairer progressivement nos collègues sur ce sujet complexe.

De surcroît, nous sommes dans une phase de rupture et de relance du nucléaire. Par conséquent, je souhaite que nous puissions poursuivre des échanges réguliers sur ces questions. Par ailleurs, outre la dynamique des débats, j'ai apprécié que nous puissions retenir l'essentiel du propos des *start-up*, tout en évitant de nous égarer dans des considérations secondaires.

**M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur.** - Je rappelle que nous avons limité les débats au sujet de la fission nucléaire, alors que nous aurions pu également aborder celui de la fusion. Ceci illustre la difficulté à déterminer le champ de nos travaux.

**M. Maxime Laisney, député.** - La réunion du 23 novembre était ma première participation aux travaux de l'Office. Malgré son contenu dense et technique, je vous remercie pour la conduite des travaux. J'ai pu intervenir à plusieurs reprises et j'espère ne pas avoir abusé de mon temps de parole. Les conclusions sur lesquelles il nous est demandé de nous prononcer me semblent assez fidèles à nos travaux, même si j'ai noté quelques manques dans le compte rendu.

Vous avez été assez exhaustif sur les propos tenus lors de l'audition, y compris ceux tenus par l'ASN et l'IRSN. Ceci dit, l'ASN a souligné que certains projets ne prévoient aucun personnel sur site en phase d'exploitation et l'IRSN a ajouté que cette absence pouvait causer des problèmes de maintenance en service. Ce point ne me semble pas mineur.

Par ailleurs, l'IRSN a pointé cinq enjeux importants. Le premier consiste à expertiser au même rythme les aspects de sûreté et de sécurité, afin d'éviter toute déconvenue. Si les projets sont relativement sûrs mais pas sécurisés, ils ne pourront aboutir, y compris pour des raisons économiques. Le deuxième enjeu - que vous avez-vous-même souligné - est qu'une R&D importante reste à mener, en particulier sur les technologies à sels fondus et au plomb qui ne sont pas complètement maîtrisées comme peut l'être la filière des réacteurs à eau pressurisée (REP). Le troisième enjeu concerne la réaction entre l'eau et le sodium, utilisé dans au moins l'un des projets, qui représente un défi technique de taille. Le quatrième enjeu porte sur la résistance des matériaux. Le cinquième enjeu souligné par l'IRSN concerne l'importance de tenir un débat public sur les SMR. Cela fait écho à votre sixième recommandation, qui n'en est pas encore une à ce stade.

J'avais posé deux questions aux participants sans obtenir de réponse. La première concernait le calendrier de déploiement industriel de ces SMR. En effet, on nous fait un peu rêver avec tous ces prototypes, mais si l'on veut vraiment qu'ils décarbonent l'économie française, ils doivent être mis en service assez rapidement. En attendant, les émissions de gaz à effet de serre s'accumulent dans l'atmosphère. Ce n'est donc pas un mince enjeu.

Ma deuxième question portait sur le prix du kilowattheure. Je n'ai obtenu aucune réponse concrète, si ce n'est que certains intervenants ont dit vouloir développer puis exploiter leurs réacteurs, et espérer, durant la phase d'exploitation, avoir à la fois un retour sur investissement et des prix raisonnables.

Sur la première recommandation, je partage évidemment la volonté d'obtenir des moyens supplémentaires pour l'ASN et l'IRSN. Malheureusement, un projet de fusion est prévu. À cet égard, lorsque j'ai interrogé le directeur général de l'IRSN lors d'une réunion de la commission des Affaires écono-

miques de l'Assemblée nationale, il m'a affirmé que les démissions avaient déjà augmenté cette année de plus de 50 % par rapport aux années précédentes. Même si des moyens supplémentaires sont dégagés, si le projet de fusion rebute les personnels, nous n'aurons pas avancé.

Sur la deuxième recommandation, il faudra réaliser davantage de R&D si l'on souhaite développer des SMR. Personnellement, je suis opposé à un tel développement et je considère que ces investissements devraient plutôt être consacrés aux énergies renouvelables, ainsi qu'aux enjeux de stockage et de flexibilité.

Je n'ai rien à ajouter concernant la troisième recommandation.

La quatrième recommandation préconise d'adapter la loi. Cela ne me semble pas sérieux six mois à peine après sa promulgation. Lors de l'examen du texte à l'Assemblée nationale, j'ai interrogé plusieurs fois la ministre sur la prise en compte des SMR. Deux fois, elle m'a répondu par l'affirmative. En vérité, tous savaient que ce n'était pas le cas. Il y a quinze jours, quand je lui ai posé cette question en audition, la ministre m'a répondu que les SMR n'étaient pas prévus dans l'immédiat et n'intéresseront le législateur qu'en 2030 ou 2040.

J'ai également une question sur la cinquième recommandation, qui propose d'anticiper les besoins en combustibles. Cela peut-il être fait dans le cadre du travail sur le PNGMDR qui va commencer en janvier 2024 ou faut-il prévoir un rapport spécifique sur le sujet ?

J'ajoute que l'un des usages promis par les SMR est la production d'hydrogène. Or, j'ai constaté que, si l'Office a déjà travaillé sur ce sujet, les questions liées à la sécurité-incendie et aux fuites n'ont pas été abordées. Pourtant, la molécule d'hydrogène est la plus légère de l'univers. Par conséquent, elle est beaucoup plus volatile que les gaz existants. Il s'agit donc d'un véritable problème. J'ai d'ailleurs été invité par le Service départemental d'incendie et de secours de mon département (SDIS). Les sapeurs-pompiers m'ont indiqué qu'ils ne participent pas à l'élaboration des normes régulant les installations sur lesquelles ils sont appelés à intervenir. Ils ont souligné les risques spécifiques liés à l'hydrogène ; par exemple une personne plaçant sa main à vingt centimètres d'une flamme d'hydrogène ne sentira rien, alors que sa main brûlera si elle est au-dessus de celle-ci. Ce sujet mériterait donc d'être expertisé, afin que nous ne nous lancions pas inutilement dans une nouvelle technologie sans savoir véritablement gérer ce vecteur énergétique.

**M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur.** - Tout d'abord, je suis content de vous entendre dire que le déploiement des SMR - je reprends vos propos - fait « rêver ».

Concernant les manques, nous vous avons fait un compte rendu synthétique de l'audition. Nous ne pouvons reprendre point par point toutes les problématiques des nouvelles technologies - par exemple la réaction du sodium à l'eau et à l'air - car le compte rendu deviendrait un rapport. Nous sommes obligés de nous concentrer sur un certain nombre de points saillants.

S'agissant de l'adaptation de la loi au déploiement des SMR, il me semble qu'il y a une marge de manœuvre entre six mois après l'adoption de la loi et l'horizon 2030. Nous sommes en 2023 et il n'est pas rare que des lois soient revisitées un ou deux ans après leur adoption. À un moment donné, il est apparu nécessaire de voter un texte d'accélération de la production d'électricité d'origine nucléaire. Qu'il faille légèrement adapter le dispositif pour prendre en compte de nouveaux besoins spécifiques ne me choque pas.

Sur la nécessité de moyens supplémentaires, nous sommes d'accord. Puisque nous sommes dans la phase finale de l'examen du projet de loi de finances, vous avez remarqué que des moyens sont déjà inscrits pour la revalorisation des postes et des statuts, notamment à l'IRSN. Un signal positif est donc envoyé. Nous aurons probablement l'occasion de revenir sur ce projet de rapprochement des deux structures. Pour le moment, il est sans doute moins nécessaire de piller les compétences que de les mutualiser, y compris au niveau mondial.

En ce qui concerne la sécurité de l'hydrogène, les risques sont connus, tout comme ceux résultant des caractéristiques physiques du sodium. Aujourd'hui, l'hydrogène représente un axe de recherche et de production énergétique, mais aussi de prospection de gisements natifs d'hydrogène situés dans certaines formations géologiques. En France, il existe notamment des projets visant à identifier de tels gisements, évitant ainsi le recours au vaporeformage du méthane ou à l'électrolyse. Il s'agit d'une piste très prometteuse, mais nous n'en sommes qu'aux balbutiements. En définitive, il n'existe pas d'industrie neutre en matière de sécurité.

**Mme Olga Givernet, députée, rapporteure.** - Je salue le fait que l'Office ait pu se saisir de ce sujet alors même que des financements étatiques sont déjà engagés. Nous allons observer l'évolution de ces technologies qui ne sont pas complètement matures. Nous avons donc encore un peu de temps devant nous, même si certains acteurs sont très optimistes. Je souhaite qu'ils puissent tenir leurs engagements, car nous aurons des besoins dans les années à venir et nous devons franchir un palier pour développer de nouvelles infrastructures, qu'il s'agisse d'EPR2 ou de SMR. Il faudra peut-être auditionner régulièrement les acteurs de ce secteur, afin d'anticiper les avancées réalisées et de nous assurer de la cohérence dans les choix technologiques dont certains seront peut-être même abandonnés.

**M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur.** - Je n'ai pas répondu sur le combustible, mais je vais donner tout à l'heure la parole à Bruno Sido qui est expert sur le PNGMDR. Nous n'avons pas de réelle inquiétude sur l'approvisionnement. Il est vrai que certains pays producteurs d'uranium, comme le Kazakhstan ou le Niger, peuvent présenter des risques en termes de stabilité. Cependant, nous avons aussi des partenaires fiables, tels que l'Australie et le Canada, qui sont des démocraties stables alliées de la France. Il n'y a donc pas de difficulté en la matière. Par ailleurs, la France dispose sur son territoire de 320 000 tonnes d'uranium appauvri, utilisables dans les REP après un nouvel enrichissement ou directement dans des réacteurs à neutrons rapides. Ceux-ci représentent une voie prometteuse vers une énergie nucléaire durable. Bien que certains gouvernements aient rejeté cette option par le passé, il faudra nécessairement y revenir.

**M. Daniel Salmon, sénateur.** - Effectivement, je trouve ce compte rendu assez fidèle à ce qui a été dit, bien qu'il ne puisse être exhaustif.

J'avais posé quelques questions concernant en particulier la sécurité, que je considère comme une grande absente des débats, bien que nous ayons un peu évoqué une sûreté passive. Cette sécurité me semble assez difficile à assurer pour ces SMR, puisque nous comptons les mettre hors du périmètre habituel des sites nucléaires, très protégés. Qu'en est-il de la dissémination des SMR dans des zones industrielles ? Se pose également la question de l'exportation des SMR, qui induit un problème de prolifération nucléaire. Ces questions sont sérieuses.

J'avais également posé une question sur le coût du mégawatt installé et sur celui du mégawattheure produit, sans obtenir de réponse. Historiquement, la tendance a été d'augmenter graduellement la puissance des réacteurs, pour bénéficier d'économies d'échelle. Avec les SMR, nous opérons soudainement une volte-face. Aujourd'hui, il est entendu que des économies substantielles ne seront possibles avec les SMR que si quelques milliers d'unités sont produites, un scénario qui ne semble pas acquis.

Nous parlons de « collaboration » entre *start-up*, alors que j'ai surtout pu observer de la compétition. Bien que ces acteurs soient issus du même sérail, chacun essaie de tirer son épingle du jeu. Ainsi, la compétition va s'accroître. Or, si elle peut être source d'émulation, elle présente aussi quelques risques. La question est aussi celle de la place du secteur privé dans le domaine nucléaire.

En outre, ces *start-up* bénéficient de financements publics. Comment l'État y trouvera-t-il son compte ? Un euro ne peut être investi simultanément en deux endroits, alors que nous sommes confrontés à des défis dans l'efficacité énergétique, par exemple pour la rénovation des bâtiments. Même si nous consacrons un budget important à cette recherche, les SMR ne verront pas le jour avant 2040. Ce sera trop tard, car c'est dans la prochaine décennie qu'il faut agir.

J'ajoute que nous parlons beaucoup de « nouvelles » technologies. Pourtant il y a peu de « neuf », exception faite de la miniaturisation ; encore celle-ci existait-elle déjà dans certains sous-marins ou certaines plateformes russes. D'ailleurs, nous pouvons voir que certaines technologies, comme les neutrons rapides, sont mises en oeuvre en Chine ou en Russie. Ces pays peu transparents ne sont pourtant pas de grands modèles de démocratie.

Concernant les préconisations, je ne suis pas un fervent partisan du nucléaire. En effet, je pense qu'il faut utiliser ailleurs l'argent public. Il est d'ailleurs difficile de se positionner sur ce rapport, voter en sa faveur me gêne, même s'il est fidèle à ce qui a été dit.

**M. Gérard Leseul, député, vice-président de l'Office.** - Je vous remercie pour cette restitution d'une audition à laquelle je n'ai malheureusement pas pu participer. Je ne peux donc pas me prononcer sur les quelques manques qui ont été évoqués. Néanmoins, je formulerai quelques remarques et questions.

La première recommandation indique qu'un renfort des moyens de l'ASN « *devrait intervenir à partir de 2025 et se poursuivre dans la durée* ». Je m'interroge sur l'emploi du conditionnel : sommes-nous absolument certains que ce renfort va intervenir, ou s'agit-il d'un souhait ? On ne sait pas si l'on exprime une appréciation prudente ou une très forte recommandation de ce que souhaite l'Office. Ceci mériterait d'être précisé.

La deuxième recommandation est relative à la R&D. Je partage l'idée que nous devons la renforcer, mais il serait utile de préciser qu'elle concerne aussi le traitement des déchets.

Sur la troisième recommandation, il est écrit dans le deuxième paragraphe qu'une coopération européenne et internationale devient indispensable pour « *couvrir un champ suffisamment large tout en modérant les dépenses* ». Je préférerais une formulation plus positive, comme « *pour permettre une mutualisation* » ou une « *optimisation* ».

La quatrième recommandation évoque l'adaptation des dispositions législatives et réglementaires. Nous avons été nombreux à nous exprimer avec beaucoup de prudence sur le sujet. Donc, je proposerais de préciser qu'une telle adaptation doit être « prudente », l'existence de *start-up* intégralement privées dans le domaine des technologies innovantes n'étant pas pour rassurer. Le paragraphe suivant dispose qu'il faut respecter strictement la règle de protection de la population et de l'environne-



ment. J'ai envie d'ajouter l'idée de « consultation citoyenne ». De mon point de vue, cela est fondamental si nous voulons permettre une relative confiance de nos concitoyens en matière nucléaire.

Enfin, dans l'avant-dernier paragraphe de la sixième recommandation, les rapporteurs disent s'être « interrogés sur le besoin, évoqué par plusieurs membres de l'OPECST, de sensibiliser la population à la possibilité que les installations nucléaires soient un jour implantées à proximité de zones industrielles ou densément peuplées. - ceci a été rappelé dernièrement par la ministre à plusieurs reprises, contrairement à ce que nous avons pu comprendre dans les premiers échanges - Après réflexion, il leur a semblé qu'une telle démarche serait prématurée ». Si vous le voulez bien, j'aimerais préciser que nous parlons d'une démarche « d'installation » dans les zones concernées, et non de la démarche de consultation, de concertation ou d'information des citoyens.

**M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur.** - Je pense que Daniel Salmon a raison et que nous aurions pu évoquer la sécurité qui est un sujet important. Nous savons que les centrales nucléaires sont très surveillées et sécurisées. Néanmoins, des risques nouveaux apparaissent, notamment avec la prolifération des SMR à l'exportation.

Il n'y a pas vraiment de volte-face en matière de puissance des réacteurs, même si nous pouvons observer un changement de paradigme, puisque nous sommes passés de 900 à 1 300, voire 1 600 mégawatts pour les EPR.

Pour les SMR, il s'agit aussi de remplacer des moyens de production d'électricité très carbonés, par exemple une centrale à charbon située dans une région qui nous est commune avec Philippe Bolo. La production d'électricité à partir de charbon étant la plus émettrice de carbone, la présidente de la région Pays de la Loire s'est prononcée sur une étude d'implantation d'un SMR en lieu et place de la centrale existante, ce qui pose évidemment la question de la création d'un nouveau site nucléaire. Pour remplacer la centrale de Cordemais, il ne faut pas un réacteur de 1 000 mégawatts, mais de quelques centaines de mégawatts tout au plus. Un projet de SMR serait de ce fait adapté. Pour autant, je n'écarte pas la question de la sécurité.

Concernant la compétition entre *start-up*, un plan et des appels à projets ont été lancés. Certains lauréats étaient d'ailleurs présents à l'audition. La compétition fera émerger les meilleurs projets, les plus solides technologiquement sur tous les aspects, notamment pour la sûreté et la sécurité. Pour les choisir, il faut bien avancer dans les projets afin de ne pas rester au stade des études préalables. Cela demande de l'argent. Je regrette que ces moyens n'aient pas été consacrés à la filière nucléaire depuis la fin des années 1990.

Nous ajouterons aux conclusions que ce n'est pas la démarche de consultation citoyenne que nous voulons reporter mais bien celle liée à l'installation. Nous pouvons aussi ajouter, en accord avec ma co-rapporteuse, « *adaptation prudente* », même si les textes de loi sont toujours prudents.

**M. Gérard Leseul, député, vice-président de l'Office.** - Serait-il possible d'avoir un document synthétisant les technologies innovantes qui font l'objet de projets ?

**M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur.** - Nous essaierons de mettre cela à disposition. Nous pouvons faire un point en partant de la filière actuelle. Je ne sais pas si nous parviendrons à inclure toutes les technologies existantes, mais nous traiterons au moins de celles présentées lors de l'audition.

*L'Office adopte les conclusions de l'audition publique du 23 novembre 2023 et autorise la publication, sous forme de rapport, du compte rendu de l'audition et de ces conclusions.*

LES THÈMES ASSOCIÉS À CE DOSSIER

 Société

 Recherche, sciences et techniques

 Énergie