

SOMMAIRE

1

p. 326

L'appel à projets du Gouvernement

2

p. 326

**Des réacteurs de puissance
aux petits réacteurs modulaires**

3

p. 327

**Panorama par filière des projets
de petits réacteurs modulaires suivis
par l'ASN et l'IRSN**

4

p. 327

**Mise en place d'un cadre progressif
d'échanges techniques avec l'ASN et l'IRSN**

5

p. 328

**Des enjeux de sûreté nouveaux
et des objectifs de sûreté à adapter**

6

p. 329

**La nécessité d'une vision intégrant
le « cycle du combustible »**

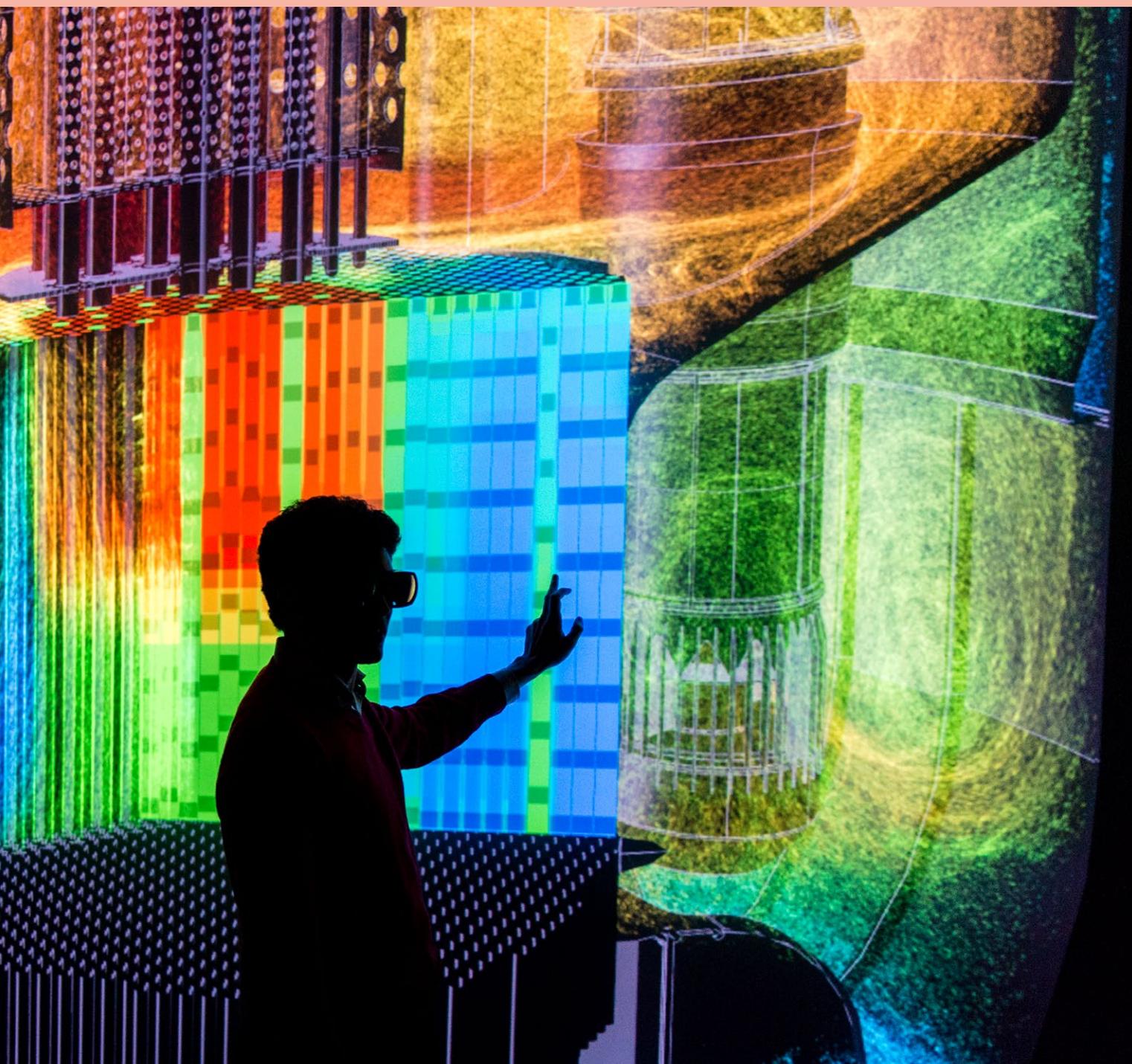
7

p. 329

**Un enjeu de standardisation
et de coopération internationale**



L'émergence des projets de petits réacteurs modulaires



11

Plusieurs projets de petits réacteurs modulaires (PRM ou *Small Modular Reactors* – SMR) sont en cours de développement dans le monde. Il s'agit de réacteurs d'une puissance inférieure à 300 mégawatts électriques (MWe), principalement fabriqués en usine. Ils utilisent des technologies variées: celle des réacteurs à eau sous pression (REP) ou des technologies avancées (réacteurs à haute température, à sels fondus, à neutrons rapides, etc.).

Les caractéristiques des PRM, en particulier leur faible puissance et leur compacité, constituent des facteurs favorables pour la sûreté.

L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) considère que ces caractéristiques doivent être mises à profit par les concepteurs pour proposer des réacteurs visant des objectifs de sûreté plus ambitieux que les réacteurs de forte puissance de troisième génération.

L'ASN participe à des groupes de travail internationaux portant sur les PRM. Dans ce cadre, elle échange avec ses homologues étrangères dans l'objectif de promouvoir l'établissement de référentiels internationaux ambitieux, de partager ses pratiques et de bénéficier du retour d'expérience (REX) de ses homologues.

1 L'appel à projets du Gouvernement

Le Gouvernement a lancé en mars 2022 un programme d'appel à projets de réacteurs nucléaires innovants visant à faire émerger un nouvel écosystème de start-ups nucléaires, complémentaires avec les champions du secteur.

S'inscrivant dans le cadre du [plan France 2030](#) visant à décarboner l'économie, cet appel à projets vise notamment au développement de nouveaux concepts de réacteurs nucléaires permettant :

- en plus de la production d'électricité, de répondre également au besoin de production de chaleur avec des températures

de plusieurs centaines de degrés, constituant ainsi, pour de nombreux procédés industriels, une alternative à l'utilisation du gaz ;

- de favoriser la fermeture du « cycle du combustible nucléaire⁽¹⁾ » et d'améliorer la gestion des déchets radioactifs, en permettant la réduction de leur volume ou de leur activité.

C'est dans ce contexte que sont apparues en 2022 et 2023 une dizaine de nouvelles sociétés porteuses de projets de PRM (ou SMR).

2 Des réacteurs de puissance aux petits réacteurs modulaires

Jusqu'à présent, les réacteurs nucléaires industriels exploités en France visaient uniquement la production massive d'électricité. Le [parc électronucléaire français](#) s'est ainsi construit progressivement avec une tendance régulière à l'accroissement de la puissance de ces réacteurs, passant pour les premiers de 900 MWe, à 1 300 MWe, puis 1 450 MWe et, enfin, 1 600 MWe pour le [réacteur EPR de Flamanville](#).

Visant en particulier le marché de la fourniture directe d'énergie à des clients industriels, les nouveaux concepteurs de réacteurs répondant à l'appel à projets du Gouvernement s'inscrivent en rupture avec le modèle historique en développant des réacteurs

de 10 à 400 fois moins puissants que le réacteur EPR de Flamanville (voir tableau 1).

Cette réduction significative de puissance implique également une adaptation radicale du modèle économique de développement de ces petits réacteurs, d'une part en cherchant à réduire les délais de construction, d'autre part en s'appuyant sur une standardisation et une production de série.

C'est ce nouveau modèle industriel d'une production de série avec une large part de préfabrication en usine qui a déterminé ce qualificatif de petits réacteurs « modulaires ».

TABLEAU 1 Puissance thermique comparée des réacteurs

	PUISANCE THERMIQUE ^(*) DU CŒUR DU RÉACTEUR
Réacteur EPR de Flamanville 3	4 300 mégawatts thermiques (MWth)
Petits réacteurs modulaires ayant répondu à l'appel à projets	10 à 540 MWth

* Au regard d'une fourniture d'énergie dorénavant non exclusivement sous forme électrique, la puissance caractéristique de ces PRM est exprimée en matière de puissance thermique de leur cœur.

1. La France a fait le choix d'un « cycle du combustible nucléaire » incluant le retraitement des combustibles usés. Ce retraitement permet la récupération de matières valorisables (uranium et plutonium), tandis que les autres composés (produits de fission et actinides mineurs) constituent les déchets ultimes. À l'heure actuelle, seule une partie des matières issues du retraitement sont effectivement réemployées pour la fabrication de nouveaux combustibles. La notion de « cycle du combustible nucléaire "fermé" » correspond à l'objectif de retraiter plusieurs fois les combustibles et de réemployer la totalité des matières récupérées, voire, pour certains projets de réacteurs innovants, de consommer également les déchets tels que les produits de fission et actinides mineurs.

TABLEAU 2 Projets de PRM en cours d'étude

FILIÈRE TECHNOLOGIQUE	PROJET	PUISSANCE D'UN RÉACTEUR (MWth)	ÉTAPE VISÉE À COURT TERME
Réacteur à eau légère	NUWARD	540	Prototype industriel
	CALOGENA	30	
Réacteur refroidi au sodium	OTRERA	300	
	HEXANA	400	
Réacteur à haute température	JIMMY	10 à 20	
	BLUE CAPSULE	150	
Réacteur refroidi au plomb	NEWCLEO	80 (puis 450 à terme)	Réacteur expérimental
Réacteur à sels fondus	NAAREA	80	
	STELLARIA	250	
	THORIZON	250	

3 Panorama par filière des projets de petits réacteurs modulaires suivis par l'ASN et l'IRSN

Le tableau 2 présente la liste des dix projets de PRM actuellement suivis par l'ASN et l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), classés en fonction du degré de maturité technologique de la filière du réacteur. Il convient en particulier de distinguer :

- **les réacteurs nucléaires refroidis et modérés par de l'eau légère**

Cette filière constitue la grande majorité des réacteurs exploités actuellement dans le monde.

- **les réacteurs dits de « génération IV »**

Ces filières de réacteurs, déjà connues et explorées depuis de nombreuses années, n'avaient jusqu'à présent fait l'objet que de développements de quelques réacteurs expérimentaux ou de prototypes, sans exploitation à une échelle industrielle.

En 2015, l'IRSN avait effectué une [évaluation](#) du niveau de maturité de ces différentes filières et avait identifié les besoins de développement de connaissances scientifiques et techniques. L'IRSN avait conclu que seuls les réacteurs à neutrons rapides (RNR) refroidis au sodium (tels que les réacteurs [Phénix](#) et [Superphénix](#) qui ont été exploités en France) et les réacteurs à haute température refroidis au gaz utilisant du graphite comme modérateur disposaient d'un REX exploitable pour envisager à court terme un passage vers une possible phase industrielle.

Cette différence de maturité des différentes filières technologiques conduit notamment certains projets à commencer par une étape de développement d'un réacteur expérimental avant d'envisager de développer un prototype industriel.

4 Mise en place d'un cadre progressif d'échanges techniques avec l'ASN et l'IRSN

Afin de se préparer au mieux à d'éventuelles [demandes d'autorisation de création](#) de ces différents projets de réacteurs innovants, et en vue d'une mobilisation des ressources proportionnée au niveau de maturité du développement de chaque projet, un cadre progressif d'échanges techniques (voir tableau 3) en quatre phases a été mis en place :

PHASE 1 Contact prospectif

Au cours d'une courte réunion, le porteur de projet est invité à présenter à l'ASN et à l'IRSN :

- les principales caractéristiques de son projet de réacteur (filière, puissance, forme d'énergie délivrée, taille du marché visé en nombre de réacteurs, type de site d'implantation, etc.),
- l'état d'avancement de la conception du réacteur et son planning de développement,
- les capacités techniques et financières actuelles de la société porteuse du projet, ainsi que son plan de croissance (appels de fonds et croissance des effectifs).

À l'issue de ce contact prospectif, le porteur du projet est invité à poursuivre son développement afin d'atteindre les trois objectifs suivants :

1. **Maturité minimale du projet technique** : le porteur de projet dispose d'une première esquisse conceptuelle complète de son projet ;
2. **Capacité du porteur de projet à engager des échanges techniques** : le porteur de projet dispose en propre d'une équipe technique suffisante (estimée à environ une vingtaine d'ingénieurs) pour pouvoir engager des échanges techniques avec l'ASN et l'IRSN sur l'ensemble des thématiques techniques associées à la démonstration de la sûreté de son réacteur ;
3. **Pérennité financière minimale du porteur de projet** : la société porteuse du projet dispose de garanties financières suffisantes pour assurer son développement au moins sur les 18 à 24 prochains mois.

TABLEAU 3 État des échanges techniques entre les porteurs de projet de PRM, l'ASN et l'IRSN

PROJET	CONTACT PROSPECTIF	REVUE PRÉPARATOIRE	PRÉ-INSTRUCTION (OPTIONS DE SÛRETÉ)	INSTRUCTION DEMANDE D'AUTORISATION DE CRÉATION
NUWARD			En cours	
CALOGENA		Planifiée		
OTRERA	À reconduire			
HEXANA	À reconduire			
JIMMY		Finalisée		
BLUE CAPSULE	À reconduire			
NEWCLEO		En cours		
NAAREA		En cours		
STELLARIA	À reconduire			
THORIZON	À reconduire			

PHASE 2 Revue préparatoire du projet

Dès lors que la maturité du projet est considérée comme suffisante au regard des trois critères précédemment cités, un cycle de réunions thématiques d'échange est mis en place.

Ce cycle de réunions vise à permettre à l'ASN et l'IRSN, au travers de présentations et d'échanges de questions-réponses, de disposer d'une vision d'ensemble précise du projet. En particulier, ces réunions permettent de comprendre sa conception particulière, de dresser un état des connaissances disponibles et à acquérir, et de bien appréhender les principales orientations de sûreté du projet.

Cette phase implique un premier niveau de mobilisation des spécialistes de l'IRSN mais ne constitue qu'un échange d'informations préparatoire à de futures instructions. Aucune position technique sur le projet n'est exprimée à ce stade par l'ASN et l'IRSN.

PHASE 3 Une pré-instruction des options de sûreté structurantes du projet

Avant de finaliser la conception détaillée de son réacteur, le porteur de projet a ensuite la possibilité de demander à l'ASN, au titre de l'[article R. 593-14 du code de l'environnement](#), son avis sur tout ou partie des éléments structurants de son projet préalablement à l'engagement d'une procédure d'autorisation de création.

Dans le cadre de projets de réacteurs innovants, l'ASN recommande aux porteurs de projet de recourir à cette phase de pré-instruction qui permet d'engager de premières expertises techniques et de disposer de positions de l'autorité sur une liste concertée de sujets identifiés à enjeu à l'issue de la phase de revue préparatoire.

PHASE 4 L'instruction de la demande d'autorisation de création

Enfin, une fois que la conception détaillée du projet de réacteur est prête, le dépôt d'une demande d'autorisation de création peut être envisagé.

Cette phase constitue une nouvelle montée en puissance de l'engagement des ressources de l'ASN et de l'IRSN. En effet, outre l'évaluation technique complète du projet, interviennent désormais également une évaluation des caractéristiques du site d'implantation et la réalisation d'un programme d'inspections du pétitionnaire, qui acquiert *de facto* le statut d'exploitant, visant notamment à contrôler son système de management et sa capacité à maîtriser sa sous-traitance.

5 Des enjeux de sûreté nouveaux et des objectifs de sûreté à adapter

Alors que le site d'implantation d'un nouveau réacteur électro-nucléaire de puissance est un des éléments du projet qui peut, dans une certaine mesure, faire l'objet d'un choix, ce n'est pas le cas pour de nombreux projets de PRM.

En effet, en visant en particulier le marché de la production de chaleur industrielle, le site d'implantation d'un PRM est imposé par la localisation du client à qui il va délivrer son énergie. Aussi, de nombreux projets de PRM ambitionnent de se déployer sur des sites industriels situés à proximité, voire au sein même de zones urbaines.

Une telle implantation près de zones de forte densité de population ou industrielles est envisagée par les porteurs de projet, car ces réacteurs sont susceptibles de pouvoir atteindre des niveaux de sûreté significativement supérieurs à ceux des gros réacteurs électrogènes actuels. La plus faible puissance à évacuer en cas d'accident devrait ainsi permettre de combiner des systèmes de sûreté passifs et actifs, apportant une diversification accrue des

dispositions de sûreté, des délais de grâce⁽²⁾ allongés et une meilleure protection des barrières de confinement. En outre, certaines des nouvelles filières proposées présentent des caractéristiques spécifiques (telles que la performance de confinement intrinsèque des combustibles particuliers des réacteurs à haute température) qui permettent également de viser une diminution significative des rejets radioactifs en cas d'accident, même les plus graves.

Si ces réacteurs peuvent prétendre *a priori* atteindre des niveaux de sûreté supérieurs à ceux des réacteurs électrogènes de grande puissance, l'ASN considère qu'il est nécessaire de définir les objectifs de sûreté à atteindre pour pouvoir envisager une telle implantation proche des populations.

L'ASN a pour cela mis en place un groupe de travail pluraliste pour mener une réflexion sur des objectifs de sûreté renforcés à fixer pour envisager de telles implantations.

2. Délai pendant lequel la sûreté peut être assurée sans qu'aucune intervention ne soit nécessaire (par exemple le délai pendant lequel, en cas de perte totale des alimentations électriques, la sûreté peut être assurée de manière passive en attendant le rétablissement d'une source d'alimentation de secours).

TABLEAU 4 Présentation des filières technologiques et des combustibles associés envisagés dans les PRM

FILIÈRE TECHNOLOGIQUE	DISPONIBILITÉ ACTUELLE DU COMBUSTIBLE SPÉCIFIQUE ASSOCIÉ
Réacteur à eau légère	• Capacité industrielle existante
Réacteur à neutrons rapides, refroidi au sodium ou au plomb	• Capacité de production industrielle à développer
Réacteur à haute température	• Aucune capacité industrielle de production de ce type particulier de combustible (TRISO ^(*)) • Nécessité de disposer d'uranium enrichi à près de 20 % (HALEU ^(**))
Réacteur à sels fondus	• Aucune capacité industrielle de production de ce type particulier de combustible (mélange U et PU intégré dans des sels de chlorure) • Nécessité de développer des capacités d'enrichissement du chlore naturel en chlore-37 ^(***)

* Le combustible à particules est dit « TRISO » pour « Tri-Structural Isotropic ». Le noyau constitué d'oxyde d'uranium, de carbone et d'oxygène est entouré de trois couches isolantes qui servent de première barrière de confinement pour retenir les produits de fission.

** L'uranium de type « HALEU » (*High-Assay Low-Enriched Uranium*) est enrichi à une teneur en isotope d'uranium-235 plus élevée (elle varie de 5 à 20%) que l'uranium faiblement enrichi (*Low Enriched Uranium – LEU*) conventionnel utilisé dans les combustibles des REP et des réacteurs à eau bouillante (REB).

*** Le chlore naturel est constitué de deux isotopes stables: le chlore-35 (à 75%) et le chlore-37 (à 25%). Dans le cœur du réacteur, le chlore-35 se transforme par capture d'un neutron en chlore-36 qui est un isotope radioactif de très longue durée de vie et dont la solubilité et la mobilité au travers des couches géologiques en font un déchet difficile à gérer.

6 La nécessité d'une vision intégrant le « cycle du combustible »

Le développement de ces projets de réacteurs modulaires est conditionné par la disponibilité du combustible nécessaire à leur fonctionnement. Cette disponibilité s'entend non seulement en matière d'existence de moyens de production industrielle des combustibles, mais également en matière de capacité de production (voir tableau 4).

Deux porteurs de projet de PRM ont également engagé en 2023 des échanges techniques avec l'ASN et l'IRSN sur des projets de développement d'usine de fabrication de leur combustible :

- JIMMY, concernant un projet d'usine de fabrication de combustible TRISO ;
- NEWCLEO, concernant un projet d'usine de fabrication de combustible MOX⁽³⁾ pour RNR.

Concernant les projets de réacteurs à sels fondus (NAAREA, STELLARIA et THORIZON), ces porteurs de projet travaillent en collaboration avec Orano qui pourrait envisager de développer à terme des moyens de production de ce type de combustible.

Au-delà du sujet de leur fabrication, l'ASN souligne également la nécessité de faire agréer les moyens de transport de ces nouveaux combustibles, neufs et usés, et de prévoir le développement des filières de retraitement et de gestion des déchets associés.

7 Un enjeu de standardisation et de coopération internationale

Malgré le niveau déjà élevé d'harmonisation au niveau international des standards de sûreté de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) et, à l'échelle européenne, des objectifs et des niveaux de référence de sûreté adoptés par l'Association des autorités de sûreté nucléaire des pays d'Europe de l'Ouest (*Western European Nuclear Regulators' Association – WENRA*), chaque projet de construction d'un modèle de réacteur dans un nouveau pays conduit généralement à en modifier la conception originale pour s'adapter au contexte réglementaire national et aux exigences de l'exploitant local.

Si le coût de ces adaptations reste supportable dans le cas des gros réacteurs électronucléaires, cela n'est plus nécessairement le cas pour des PRM, dont le modèle économique repose sur une production de série pour réduire leur coût et atteindre leur seuil de rentabilité, impliquant donc qu'un même modèle puisse être autorisé par plusieurs pays.

Afin de lever les freins potentiels au développement de ces nouveaux réacteurs, plusieurs initiatives internationales ont émergé.

L'AIEA mobilise ses membres au travers d'une initiative baptisée « [NHSI](#) » (*Nuclear Harmonization and Standardisation Initiative*) visant à développer et à encourager des modes de coopération internationale pour réaliser des instructions conjointes d'un même modèle de réacteur par plusieurs autorités de sûreté, ou pour permettre à un pays de prendre connaissance des évaluations déjà réalisées par d'autres pays en vue d'éventuellement alléger sa propre charge d'instruction.

L'ASN participe à ces travaux et a présenté à l'occasion de la Convention internationale sur la sûreté nucléaire les enseignements et les résultats concrets de la [pré-évaluation conjointe](#) (*Joint Early Review – JER*) du réacteur Nuward (voir encadré page suivante) réalisée avec les autorités de sûreté nucléaire finlandaise (STUK) et tchèque (SUJB). Au regard de l'intérêt et du succès de cette coopération entre trois autorités de sûreté, Nuward a souhaité approfondir cette JER en lançant une seconde phase à laquelle, en plus de la participation des trois précédentes autorités déjà impliquées, se sont jointes également les autorités de sûreté nucléaire des Pays-Bas (ANVS), de la Pologne (PAA) et de la Suède (SSM).

3. Le combustible MOX est un combustible nucléaire constitué par un mélange d'oxyde d'uranium appauvri et de plutonium.

IDENTIFICATION DES ENJEUX DE SÛRETÉ ET DES ÉVOLUTIONS RÉGLEMENTAIRES NÉCESSAIRES POUR LES PRM AU TRAVERS DU CAS CONCRET DU RÉACTEUR NUWARD SMR



Projet de petit réacteur modulaire Nuward SMR.

Le réacteur Nuward SMR est un projet de petit réacteur modulaire à eau sous pression développé par [Nuward](#), filiale du groupe EDF, et ses partenaires (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives – CEA, Naval Group, TechnicAtome, Framatome et Tractebel). Chaque unité est composée de deux modules de 170 MWe chacun, immergés et hébergés au sein d'un même bâtiment, partiellement enterré. Ce concept intègre certaines innovations majeures en matière de sûreté, notamment une gestion passive du refroidissement du réacteur en cas d'accident.

Revue conjointe menée par plusieurs autorités de sûreté

Au premier trimestre 2022, l'ASN a engagé, avec ses homologues tchèque (SUJB) et finlandaise (STUK), avec l'appui de l'IRSN ainsi que son homologue tchèque (SÚRO), une [évaluation préliminaire](#) des principales options de sûreté du projet Nuward. Cet examen a conduit à l'identification, sur un cas concret, des avantages en matière de sûreté des PRM, ainsi que des questions qu'ils peuvent soulever. Il a également permis la comparaison des différentes exigences, pratiques et expériences des trois régulateurs impliqués et l'identification d'opportunités d'évolution des réglementations et pratiques nationales. Pour sa part, cet examen a permis à Nuward de disposer d'éléments pour développer une conception plus standardisée.



L'ASN a engagé, le 14 novembre 2023, avec cinq homologues européennes, la seconde phase de la revue des options de sûreté du projet de réacteur Nuward.

Le [rapport de clôture](#) de cette coopération multilatérale a présenté le programme et la méthode de travail adoptés, ainsi que les principaux enseignements.

Le 14 novembre 2023, l'ASN a engagé la seconde phase de cette revue. À cette occasion, les autorités de sûreté néerlandaise (ANVS), polonaise (PAA) et suédoise (SSM) rejoignent l'initiative. Cette phase implique également les appuis techniques des autorités de sûreté.

Dans la continuité de la première, la seconde phase aura pour objectif d'identifier, sur un projet concret, les atouts et les interrogations que soulèvent les PRM en matière de sûreté et d'adaptation aux différents cadres réglementaires nationaux. Lors de cette nouvelle phase, l'évaluation sera étendue à de nouveaux sujets techniques. La revue portera

notamment sur les barrières de confinement, l'évaluation des conséquences radiologiques d'un accident et l'architecture des systèmes électriques et de contrôle-commande.

Instruction par l'ASN des options de sûreté du réacteur

En parallèle de cette revue conjointe, EDF a sollicité en juin 2023 l'avis de l'ASN sur les options de sûreté du réacteur Nuward SMR comme prévu par l'[article R. 593-14 du code de l'environnement](#). Cette instruction portera sur l'ensemble du projet. Elle prendra en compte les recommandations du [Guide n°22 de l'ASN](#) relatif à la conception des REP. L'ASN portera une attention particulière sur l'évaluation des approches et dispositifs innovants du réacteur Nuward.

01

02

03

04

05

06

07

08

09

10

11

12

13

14

15

AN