

11

# **L'émergence des projets de petits réacteurs modulaires**



- 1**  
— **L'appel à projets du Gouvernement** p. 335
- 2**  
— **Des réacteurs de puissance aux petits réacteurs modulaires** p. 335
- 3**  
— **Panorama par filière des projets de petits réacteurs modulaires suivis par l'ASN et l'IRSN** p. 336
- 4**  
— **Mise en place d'un cadre progressif d'échanges techniques avec l'ASN et l'IRSN** p. 337
- 5**  
— **Des enjeux de sûreté nouveaux et des objectifs de sûreté à adapter** p. 338
- 6**  
— **La nécessité d'une vision intégrant le « cycle du combustible »** p. 339
- 7**  
— **Un enjeu de standardisation et de coopération internationale** p. 339



**P**lusieurs 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 pour concevoir des réacteurs répondant à des objectifs de sûreté plus ambitieux que les réacteurs de forte puissance actuels.

L'ASN participe à des groupes de travail internationaux portant sur les PRM. Dans ce cadre, elle échange avec ses homologues étrangers dans l'objectif de promouvoir l'établissement de référentiels internationaux ambitieux, de partager ses pratiques et de bénéficier du retour d'expérience 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 projet 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<sup>(1)</sup> » 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 France en 2022 et 2023 une dizaine de nouvelles sociétés porteuses de projet de PRM.

Cette émergence de nombreux projets de PRM est globale et n'est pas un phénomène uniquement national : de très nombreux pays sont concernés, au premier rang desquels se trouvent les grandes nations nucléarisées que sont les États-Unis, le Canada, la Chine et la Russie. Au total, ce sont plus d'une soixantaine de projets de PRM qui sont en cours de développement au niveau mondial.

## 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 de 900 MWe pour les premiers réacteurs à 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, d'où leur qualificatif de « petits » réacteurs (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

	Puissance thermique (*) du cœur du réacteur (MWth)
Réacteur EPR de Flamanville	4 300
Petits réacteurs modulaires ayant répondu à l'appel à projets	20 à 540

\* 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 et non de puissance électrique délivrée.

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.

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

**Les différents types de technologies de PRM en France**



**Réacteurs à eau légère**

- Combustible solide uranium
- Modérateur eau
- Caloporteur eau



**Réacteurs à métal liquide**

- Combustible solide Mélange uranium et plutonium (MOX-RNR)
- Pas de modérateur
- Caloporteur métal liquide (sodium, plomb)



**Réacteurs à haute température**

- Combustible solide uranium (particules TRISO)
- Modérateur graphite ou eau lourde
- Caloporteur gaz hélium ou sodium



**Réacteurs à sel fondu**

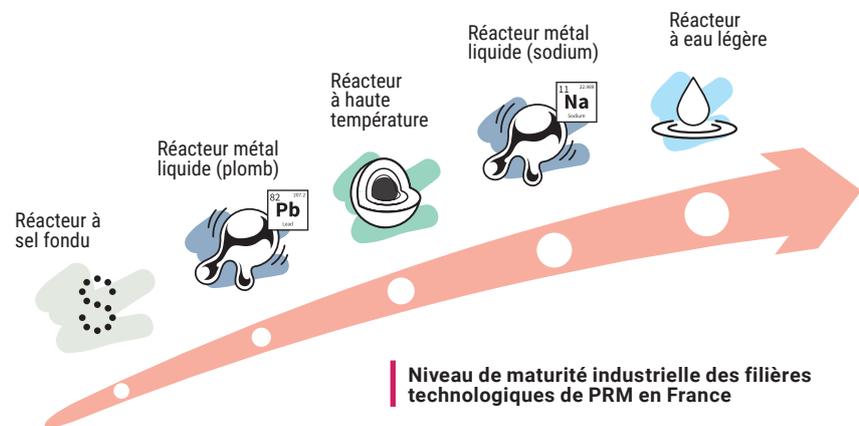
- Combustible liquide plutonium sous la forme d'un sel
- Pas de modérateur
- Caloporteur sel fondu

Les réacteurs à eau constituent la grande majorité des réacteurs exploités actuellement dans le monde, tandis que les autres technologies de PRM, déjà connues et développées depuis de nombreuses années, n'avaient en général jusqu'à présent conduit à la réalisation que de quelques réacteurs expérimentaux ou de prototypes, sans exploitation à une échelle industrielle.

En 2015, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) avait évalué le niveau de maturité de ces autres technologies de réacteurs 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 (HTR) refroidis au gaz utilisant du graphite comme modérateur, disposaient d'un retour d'expérience exploitable pour envisager à court terme un passage vers une possible phase industrielle.

Cette variété de degrés de maturité des différentes filières technologiques implique notamment pour certains projets de commencer par une étape de développement d'un réacteur expérimental avant d'envisager de développer un prototype industriel.



Le tableau 2 présente la liste des dix projets de PRM actuellement suivis par l'ASN et l'IRSN, classés en fonction du degré de maturité technologique de la filière du réacteur.

**TABEAU 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	Prototype industriel
	Hexana	400	
Réacteur à haute température	Jimmy	20	Réacteur expérimental
	Blue Capsule	150	
Réacteur refroidi au plomb	Newcleo	90	Réacteur expérimental
Réacteur à sel fondu	Naarea	20	
	Stellaria	Quelques centaines de kWth	
Réacteur à sel fondu	Thorizon	250	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 projets de réacteurs innovants, et en vue d'une mobilisation des ressources proportionnée au niveau de maturité de chaque projet, un cadre progressif d'échanges techniques en quatre phases a été mis en place.

### PHASE 1

#### Suivi prospectif

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

- les grandes caractéristiques de son projet de réacteur (technologie, puissance, forme d'énergie délivrée, amont et aval du « cycle du combustible », etc.),
- l'état d'avancement de la conception du réacteur et de sa démonstration de sûreté,
- le calendrier de développement de son projet,
- 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, l'ASN apprécie la maturité de l'ensemble du projet au regard des trois éléments suivants :

- **Maturité minimale du projet technique :** le porteur de projet dispose d'une première esquisse conceptuelle complète et stabilisée de son projet ;

- **Capacité du porteur de projet à engager des échanges techniques :** le porteur de projet dispose en propre d'une équipe technique suffisante pour pouvoir engager des échanges techniques avec l'ASN sur l'ensemble des thèmes techniques associés à la démonstration de la sûreté de son réacteur ;

- **Pérennité financière minimale du porteur de projet :** la société porteuse du projet dispose de garanties financières suffisantes pour assurer son développement à moyen terme.

Dans le cas où la maturité d'ensemble n'apparaît pas suffisante pour engager une revue préparatoire, le porteur de projet est invité à poursuivre son développement avant de reprendre contact avec l'ASN.

### PHASE 2

#### Revue préparatoire du projet

Lorsque la maturité du projet répond aux trois critères précédents, un cycle de réunions thématiques d'échanges est mis en place.

Ce cycle de réunions vise à permettre à l'ASN, au travers de présentations et d'un dialogue technique, de disposer d'une vision d'ensemble du projet, de comprendre ses choix de conception, de faire un point sur l'état des connaissances disponibles ou à acquérir, et d'appréhender

les principales orientations de sûreté sur lesquelles le porteur de projet compte s'appuyer pour établir et justifier sa démonstration de sûreté.

Un séminaire de synthèse peut être organisé pour clôturer ce cycle de réunions.

**Cette phase ne constitue qu'un échange d'informations préparatoire à de futures instructions. Aucun avis ni décision n'est établi sur le projet à ce stade par l'ASN.**

### 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](#), un avis officiel et public sur une 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 ciblées 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 car, outre l'évaluation technique complète du projet, intervient 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. Il s'agit notamment de contrôler son système de management et sa capacité à maîtriser sa sous-traitance.

**TABEAU 3** État des échanges techniques entre les porteurs de projet de PRM, l'ASN et l'IRSN au 31 décembre 2024

Projet	Suivi prospectif	Revue préparatoire	Pré-instruction (options de sûreté)	Instruction demande d'autorisation de création
Nuward			Dossier retiré (*)	
Calogena			En cours (**)	
Otrera	x			
Hexana	x			
Jimmy				En cours (***)
Blue Capsule	x			
Newcleo		Terminée		
Naarea		Terminée		
Stellaria	x			
Thorizon		En cours		

\* EDF a retiré le 12 septembre 2024 sa demande d'avis sur les options de sûreté du réacteur Nuward SMR.

\*\* La société Calogena a déposé le 31 octobre 2024 une demande d'avis à l'ASN sur une partie des options de sûreté retenues pour son projet de PRM CAL30.

\*\*\* Dépôt d'une demande de décret d'autorisation de création le 3 mai 2024 pour la construction d'un réacteur destiné à fournir de la chaleur industrielle à une usine du Groupe Cristal Union, située sur le site de Bazancourt (51). L'analyse de recevabilité du dossier par l'ASN est terminée. Les suites à donner à cette analyse sont en cours d'examen par la Mission de la sécurité nucléaire et de la radioprotection.

## Demande d'autorisation de création du premier petit réacteur modulaire en France



Le 3 mai 2024, la société Jimmy Energy a déposé auprès du ministre chargé de la sûreté nucléaire une demande d'autorisation de création de son premier PRM dénommé « Fermi ». Il s'agit d'un projet de réacteur HTR d'une puissance de 20 mégawatts thermiques (MWth) destiné à fournir de la chaleur industrielle décarbonée à une usine du Groupe Cristal Union située sur le site de Bazancourt (51), à une distance d'environ 15 km de Reims (voir carte ci-dessous).

Cette technologie de réacteur se caractérise notamment par l'utilisation de combustible particulier, conditionné sous la forme de billes appelées « particules TRISO ». Ces particules d'environ 1 mm de diamètre se composent d'un noyau d'oxyde d'uranium enrobé de couches successives de céramique et de carbure de silicium.

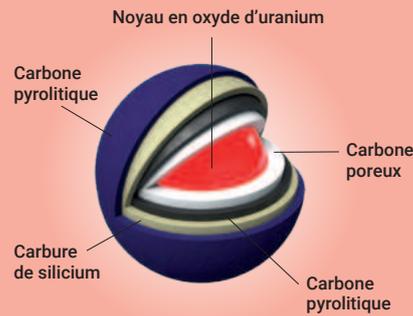
L'intérêt de l'utilisation de ces particules TRISO est que leurs caractéristiques en matière de résistance et d'étanchéité

sont censées permettre d'assurer intrinsèquement le maintien du confinement des matières radioactives qu'elles renferment dans toutes les situations accidentelles susceptibles d'affecter le réacteur.

L'ASN, avec l'appui de l'IRSN, a achevé en 2024 l'analyse de la recevabilité du dossier déposé. Les conclusions et les suites qui seront données par le ministre chargé de la sûreté nucléaire en matière de recevabilité du dossier sont attendues début 2025.



### Particules TRISO (TRI-structural ISOTropic)



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

Alors que le site d'implantation d'un nouveau réacteur électronucléaire 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 PRM sont susceptibles de pouvoir atteindre des niveaux de sûreté significativement supérieurs à ceux des gros réacteurs électrogènes actuels. En effet, sur ces PRM, la plus faible puissance à

évacuer en cas d'accident permettrait de combiner des systèmes de sûreté passifs et actifs, apportant une meilleure diversification des dispositions de sûreté, des délais de grâce<sup>(2)</sup> 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 HTR) qui permettent également de viser une diminution significative des rejets radioactifs en cas d'accident, même les plus graves.

Si ces PRM 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 le niveau de sûreté requis pour pouvoir envisager une telle implantation proche des populations et d'installations industrielles existantes présentant elles-mêmes des risques.

L'ASN a donc mis en place un cadre pluraliste d'échanges associant des parties prenantes pour mener une réflexion sur des objectifs de sûreté renforcés à fixer pour envisager de telles implantations. Les premiers éléments issus de ces échanges, qui traduisent des attentes sociétales sur le niveau de sûreté renforcé attendu pour de tels projets d'implantation de réacteurs à proximité de zones urbaines, ont été valorisés par l'ASN dans le cadre des travaux d'harmonisation engagés avec ses homologues européens.

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).

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

De manière connexe avec le développement de ces projets de réacteurs modulaires apparaît inévitablement le sujet de 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 des échanges techniques avec l'ASN et l'IRSN sur des projets de développement d'une 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<sup>(3)</sup> 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.

**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) <sup>(*)</sup> + • Nécessité de disposer d'uranium enrichi à près de 20 % (HALEU) <sup>(**)</sup>
Réacteur à sel fondu	• Aucune capacité industrielle de production de ce type particulier de combustible (mélange d'uranium et de plutonium intégré dans des sels de chlorure) • Nécessité de développer des capacités d'enrichissement du chlore naturel <sup>(***)</sup> en chlore-37 pour éviter la formation de chlore-36

\* 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.

\*\*\* Le chlore naturel est constitué de deux isotopes stables : le chlore-35 (à 75 %) et le chlore-37 (à 25 %). Le problème du chlore-35 est que dans le cœur d'un réacteur, il 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.

## 7 — Un enjeu de standardisation et de coopération internationale

Malgré le niveau déjà élevé d'harmonisation 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 WENRA (*Western European Nuclear Regulators Association*), chaque projet de construction d'un nouveau modèle de réacteur dans un pays conduit généralement à en adapter la conception pour se conformer au contexte réglementaire national et aux exigences propres de l'exploitant local (notamment l'organisation envisagée à la fois pour l'exploitation courante, mais aussi pour la gestion des situations d'urgence, en lien avec les pouvoirs publics locaux).

Le modèle économique des PRM repose sur une fabrication en série pour réduire les coûts par des économies d'échelle. Les porteurs de projet visent ainsi à ce qu'un même modèle puisse être autorisé dans plusieurs pays.

Afin de lever les freins potentiels au développement de ces nouveaux petits réacteurs pouvant contribuer à la décarbonation de l'économie mondiale, plusieurs initiatives internationales émergent. 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 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 de ces trois autorités de sûreté déjà impliquées, se sont jointes également les autorités de sûreté nucléaire des Pays-Bas (ANVS) et de la Pologne (PAA).

Au niveau des autorités de sûreté européennes, WENRA avait pris position [dès 2021](#) sur le fait que les objectifs de sûreté fixés en 2010 pour tout nouveau réacteur restaient applicables pour les PRM, mais en les considérant comme un niveau d'exigence minimal. WENRA estimait en effet que l'état de l'art de la conception et des technologies mises en œuvre pour ces

petits réacteurs doivent permettre d'atteindre une réduction significative des rejets radioactifs des accidents par rapport aux réacteurs actuels de forte puissance.

Sur la base de ce constat, WENRA a alors constitué un groupe de travail (GT) pour élaborer des propositions de révision de ces objectifs de sûreté. L'ASN, avec le support d'autres autorités de sûreté, a soutenu au sein de ce GT la position affichée devant l'OPECST en janvier 2024, à savoir que l'implantation envisagée par les industriels de réacteurs nucléaires, à proximité de zones urbaines densément peuplées ou de zones industrielles, ne pouvait être envisagée qu'à condition d'atteindre un niveau de sûreté plus élevé, garantissant que les rejets radiologiques resteront négligeables en cas d'accident, y compris les plus graves. Les échanges se poursuivent car, à ce stade, aucun consensus n'a pu être trouvé au niveau européen sur le fait de réviser ou non les objectifs de sûreté actuels, afin d'explicitier cet attendu de renforcement de la sûreté. En effet, quelques pays défendent un *statu quo* sur les objectifs de sûreté actuels publiés (correspondant au niveau de sûreté des réacteurs de type EPR) et envisagent de se prononcer au cas par cas et de manière discrétionnaire sur le caractère suffisant du niveau de sûreté de chaque projet.

3. Le combustible MOX est un combustible nucléaire constitué par un mélange d'oxyde d'uranium appauvri et de plutonium produit par l'usine Melox d'Orano. Il peut être utilisé dans les 24 réacteurs de 900 MWe. En France, le combustible MOX utilise exclusivement du plutonium civil, extrait du combustible irradié.