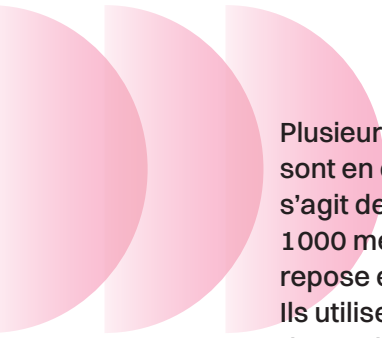


009

**Les projets de petits
réacteurs modulaires**

- 1. Des réacteurs de puissance aux petits réacteurs modulaires** P—322
- 2. Panorama par filière des projets de petits réacteurs modulaires suivis par l'ASNR** P—323
- 3. La mise en place d'un cadre progressif d'échanges techniques avec l'ASNR** P—324
- 4. Des enjeux de sûreté nouveaux et des objectifs de sûreté à adapter** P—325
- 5. La nécessité d'une vision intégrant le « cycle du combustible »** P—325
- 6. Un enjeu de standardisation et de coopération internationale** P—326





Plusieurs projets de petits réacteurs modulaires (PRM ou *Small Modular Reactors* – SMR) sont en cours de développement dans le monde. Selon les critères retenus par l'AIEA, il s'agit de réacteurs d'une puissance inférieure à 300 mégawatts électriques (MWe) ou 1000 mégawatts thermiques (MWth). La viabilité économique de ces petits réacteurs repose en outre sur une production en série s'appuyant sur une conception modulaire. 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 et de radioprotection (ASNR) considère que ces caractéristiques doivent être mises à profit pour concevoir des réacteurs répondant à des objectifs de sûreté nucléaire plus ambitieux que les réacteurs de forte puissance actuels.

L'ASNR 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 les bonnes pratiques et de bénéficier du retour d'expérience de ses homologues.

Après une phase d'émergence de projets qu'avait suivie l'ASNR afin de se préparer aux futures instructions, l'année 2025 a été celle de leur maturation. Tous les projets ont ainsi avancé dans le développement de leur réacteur avec parfois, toutefois, des évolutions significatives de conception conduisant à une révision de leurs calendriers prévisionnels de dépôt de dossiers à l'ASNR, ou à décaler certaines des instructions déjà engagées. Fin 2025, l'ASNR est sollicitée par des demandes d'avis sur des options de sûreté de deux projets et par l'instruction d'une nouvelle demande d'autorisation de création d'un réacteur expérimental.

1 — 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 1600 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.

Cette réduction significative du niveau de puissance implique également une adaptation 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 à ce nouveau modèle industriel d'une production de série avec une large part de préfabrication en usine que fait référence le terme « modulaire ».

2 — Panorama par filière des projets de petits réacteurs modulaires suivis par l'ASNR

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.

Le **tableau 1** présente la liste des dix projets de PRM actuellement suivis par l'ASNR, classés en fonction de la filière du réacteur. Les projets présentés visent une étape du programme de développement et non pas l'ensemble de la stratégie de développement des projets industriels.

Les programmes de développement peuvent être différents en fonction des filières et des projets. Ils peuvent nécessiter le passage par différentes étapes parmi les typologies suivantes :

- **Réacteur expérimental** : réalisation d'expériences en vue de l'acquisition de connaissances théoriques nécessaires pour finaliser la conception du réacteur industriel (démonstrateur / tête de série) et sa démonstration de sûreté ;
- **Démonstrateur / prototype industriel** : réacteur visant à justifier pour les investisseurs ou les clients de l'atteinte d'un niveau de maturité industrialisable, ainsi que, si nécessaire, à réaliser des essais de validation de choix technologiques pour finaliser la conception du réacteur industriel et sa démonstration de sûreté ;
- **Tête de série** : premier réacteur industriel pleine échelle.

Les différents types de technologies de PRM en France



Réacteurs à eau légère

- Combustible solide uranium
- Modérateur eau
- Caloporteur eau



Réacteurs à haute température

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



Réacteurs à métal liquide


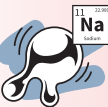

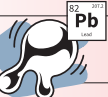

- Combustible solide Mélange uranium et plutonium (MOX-RNR)
- Pas de modérateur
- Caloporteur métal liquide (sodium, plomb)



Réacteurs à sel fondu

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

TABLEAU 1
Projets de PRM en cours d'étude

Filière technologique	Société	Puissance d'un réacteur (MWth)	Étape visée à court terme
 Réacteur à eau légère	Nuward	en cours de redéfinition	Tête de série
	Calogena	30	CAL 30 : tête de série
 Réacteur refroidi au sodium	Otrera	200	Otrera one : démonstrateur / prototype
	Hexana	400	Démonstrateur / tête de série
 Réacteur à haute température	Jimmy	en cours de redéfinition	FERMI : tête de série
	Blue Capsule	150	Démonstrateur / tête de série
 Réacteur refroidi au plomb	Newcleo	90	LFR-30 : démonstrateur / prototype
 Réacteur à sel fondu	Stellaria	200 kWth	ALVIN : réacteur expérimental
	Thorizon	en cours de définition	Thorizon pionner : démonstrateur / prototype Thorizon one : tête de série

3 — La mise en place d'un cadre progressif d'échanges techniques avec l'ASNR

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'ASNR :

- 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'ASNR 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'ASNR 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 du projet est invité à poursuivre son développement avant de reprendre contact avec l'ASNR.

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'ASNR, 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 formulé sur le projet à ce stade par l'ASNR.

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'ASNR, 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'ASNR 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'ASNR 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 le statut d'exploitant nucléaire. Il s'agit notamment de contrôler son système de management et sa capacité à maîtriser sa chaîne de sous-traitance.

TABLEAU 2

État des échanges techniques entre les porteurs de projet de PRM et l'ASNR au 1^{er} mars 2026^(*)

Société	Suivi prospectif	Revue préparatoire	Pré-instruction (options de sûreté)	Instruction demande d'autorisation de création
Nuward		●		
Calogena			●	
Otrera		●		
Hexana		●		
Jimmy				●
Blue Capsule		●		
Newcleo			●	
Stellaria				●
Thorizon	●			

* Les informations de ce tableau sont datées au 1^{er} mars 2026, mais sont susceptibles d'avoir évolué depuis. Pour retrouver l'actualité sur ce sujet, veuillez vous référer à la page dédiée aux PRM du site Internet de l'ASNR.

TABLEAU 3

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 de combustibles MOX spécifiques 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 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 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.

4 — 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 l'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 pour l'industrie ou le chauffage urbain, 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 s'implanter sur des sites industriels ou à proximité, voire au sein de zones urbaines.

Une implantation près de zones de forte densité de population 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⁽¹⁾ allongés et une meilleure protection des barrières de confinement.

Avec le projet de recherche **PASTIS**⁽²⁾ (*Passive Systems Thermal-hydraulic Investigations for Safety*), l'ASNR étudie les phénomènes physiques mis en jeu dans les systèmes de sûreté passifs dédiés à l'évacuation de la puissance résiduelle d'un réacteur à eau légère en

situations incidentelles ou accidentelles. La plateforme expérimentale a été achevée en 2025 et les expérimentations pourront commencer en 2026.

En outre, certaines des nouvelles filières proposées présentent des caractéristiques spécifiques (telles que la performance de confinement intrinsèque des combustibles particuliers des **HTR**⁽³⁾ - *High Temperature Reactors*) 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'ASNR considère qu'il est nécessaire d'adapter les objectifs de sûreté requis pour pouvoir envisager une telle implantation proche des populations.

L'ASNR a donc engagé une réflexion pour définir les objectifs de sûreté renforcés à fixer pour envisager de telles implantations, en tenant compte des attentes sociétales sur le niveau de sûreté des projets de PRM concernés. Le fruit de cette réflexion vient par ailleurs alimenter les travaux d'harmonisation des objectifs de sûreté portés par l'ASNR avec ses homologues européennes dans le cadre de **WENRA** (*Western European Nuclear Regulators Association*).

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

De manière indissociable au développement de ces projets de réacteurs modulaires apparaît 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 3**).

Deux porteurs de projet de PRM ont également engagé des échanges techniques avec l'ASNR 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⁽⁴⁾ pour réacteurs à neutrons rapides.

Au-delà du sujet de leur fabrication, l'ASNR 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. Les informations relatives à l'instruction des usines de fabrication des combustibles des PRM sont précisées au **chapitre 11** du présent rapport.

1. 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).

2. Études des systèmes thermohydrauliques de sûreté passifs.

3. Réacteur à haute température.

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

6 — 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, chaque projet de construction d'un nouveau modèle de réacteur dans un pays conduit généralement à 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 faciliter l'émergence de ces nouveaux petits réacteurs pouvant contribuer à la décarbonation de l'économie mondiale, plusieurs initiatives internationales se font jour. 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 notamment des pré-instructions conjointes d'un même modèle de réacteur par plusieurs autorités de sûreté, ou pour permettre à un pays de tirer bénéfice des évaluations déjà réalisées par d'autres pays en vue d'éventuellement alléger sa propre charge d'instruction.

En outre, l'ASNR est à l'initiative d'une [revue anticipée conjointe](#) (*Joint Early Review - JER*) du réacteur Nuward. La seconde phase de cette revue a impliqué les autorités de sûreté nucléaire finlandaise

(STUK), tchèque (SUJB), néerlandaise (ANVS), polonaise (PAA) et suédoise (SSM). Les conclusions de cette deuxième phase ont été publiées dans un [rapport commun en décembre 2025](#) (**voir focus n°1**). Au regard de l'intérêt et du succès de cette coopération, une troisième phase a été initiée avec la participation additionnelle de l'autorité de sûreté belge (AFCN), ainsi que de l'autorité de sûreté italienne (ISIN) en tant qu'observatrice.

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 des exigences de sûreté plus élevées sont à considérer, notamment lorsqu'on envisage le potentiel de ces technologies modernes pour apporter des améliorations significatives en matière de sûreté nucléaire.

Sur la base de ce constat, WENRA a 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 présentée 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, un consensus n'a pas pu être trouvé au niveau européen sur la révision éventuelle des objectifs de sûreté.

FOCUS N°1

Conclusions et enseignements de la phase 2 de la *Joint Early Review* du PRM (SMR) Nuward

En décembre 2025, l'ASNR a publié les enseignements tirés de la phase 2 de la revue menée conjointement avec ses homologues néerlandaise (ANVS), polonaise (PAA), suédoise (SSM), finlandaise (STUK) et tchèque (SUJB) sur les options de sûreté du projet de réacteur Nuward SMR, développé par une filiale d'EDF. Cette évaluation conjointe, réalisée à l'initiative de l'ASNR, a été menée dans le cadre de la deuxième phase de la *Joint Early Review* (JER) et dont les [premières conclusions avaient été publiées en septembre 2023](#).

Cette seconde phase s'est appuyée sur les réussites de la phase pilote – en particulier le travail de revue d'un projet précis et l'établissement

d'un dialogue direct avec le concepteur – tout en évoluant pour répondre à de nouveaux défis, notamment une participation plus large. Lors de cette nouvelle phase, le périmètre de l'évaluation a été étendu à de nouvelles thématiques techniques, notamment sur les barrières de confinement, l'évaluation des conséquences radiologiques d'un accident et l'architecture des systèmes électriques et de contrôle-commande.

Le rapport final de cette coopération multilatérale présente le programme mené, la méthode de travail mise en œuvre, ainsi que les principaux enseignements tirés.

Cette initiative confirme l'intérêt de développer des coopérations multilatérales pour l'évaluation de projets de réacteurs arrivés à un degré de maturité suffisant, dans un contexte international marqué par la standardisation.

Fortes de ce bilan positif, les parties prenantes de la JER ont convenu d'engager une troisième phase afin d'approfondir certains sujets à enjeux sur le nouveau design du SMR Nuward. Le groupe s'est par ailleurs élargi avec l'arrivée de l'autorité belge (AFCN) en tant que membre et de l'autorité italienne (ISIN) comme observateur.



Lancement de la seconde phase de la *Joint Early Review* dans les locaux de l'ASN le 14 novembre 2023.