

## RAPPORT

Prospective de la CRE

# L'insertion des petits réacteurs modulaires (SMR/AMR) dans les systèmes énergétiques

Septembre 2025

# **Rapport de la Prospective de la Commission de régulation de l'énergie (CRE) sur l'insertion des petits réacteurs modulaires (SMR/AMR) dans les systèmes énergétiques**

## **Rapport de la Prospective de la CRE**

Co-présidé par :

Anne-Marie CHOHO, Directrice Générale de SETEC

François LÉVÊQUE, Professeur d'économie à Mines Paris – PSL

Assistés de :

Pauline HODILLE, Conseillère référendaire à la Cour des comptes

### Avant-Propos

Fidèle à sa valeur d'ouverture, la CRE souhaite explorer les futurs, anticiper les ruptures technologiques ou d'usage du système énergétique et éclairer le débat. La Prospective de la CRE s'inscrit pleinement dans cette démarche. Elle a à cœur de regarder sans parti-pris ce que ces nouveaux usages, technologies et organisations ouvrent comme opportunités, mais également de ne pas occulter les risques qui pèsent sur leur développement.

Le présent rapport traite de l'insertion des petits réacteurs modulaires (SMR/AMR) dans les systèmes énergétiques. Le groupe de travail a été coprésidé par Anne-Marie CHOHO, Directrice Générale de SETEC, et François LÉVÊQUE, Professeur d'économie à Mines Paris-PSL, dont je salue le pilotage à la fois exigeant et bienveillant. Ils ont pu s'appuyer sur une équipe cœur et une rapporteure, Pauline HODILLE, Conseillère référendaire à la Cour des comptes, et bien entendu plus de quatre-vingts participants aux groupes de travail qui se sont succédé depuis son lancement en avril 2024. Je souhaite tout d'abord remercier tous ceux qui ont participé à ces échanges et y ont apporté leur vision et leur engagement. Le rapport, qui en est issu, couvre un large champ, des enjeux d'acceptation généraux, aux différents modèles économiques envisageables. L'étude et la comparaison de ces derniers sont indispensables au développement de cette filière et à son insertion dans les systèmes énergétiques.

À une époque charnière où des solutions diversifiées et complémentaires deviennent vitales pour satisfaire une demande en énergie en croissance à l'échelle mondiale, tout en réduisant notre empreinte carbone, ces réacteurs apparaissent comme une perspective à ne pas négliger. Les petits réacteurs SMR et AMR offrent des possibilités intéressantes en raison de leur souplesse d'usage et de leur modularité, des caractéristiques qui permettent des adaptations à des contextes variés, qu'il s'agisse de réseaux urbains ou de besoins industriels, dans le domaine de la chaleur plus particulièrement. Mais il faut avoir conscience que cette approche se pose en rupture par rapport aux approches classiques dans le domaine nucléaire civil où la recherche d'optimum économique passait par des réacteurs toujours plus puissants. Il ne s'agit pas uniquement d'une évolution technologique. C'est aussi et surtout un changement d'approche. Il peut paraître profond (s'agissant des méthodes de construction, de financement ou encore d'exploitation), mais finalement certains fondamentaux restent les mêmes que pour les autres technologies nucléaires, par exemple s'agissant des ressources humaines nécessaires ou du cycle du combustible.

Conscient des enjeux financiers, réglementaires et compétitifs associés à l'essor des SMR et AMR, le groupe de travail souligne dans son rapport l'importance d'une démarche concertée au niveau européen pour harmoniser les réglementations et maximiser les effets de série. C'est uniquement grâce à une coopération européenne accrue que nous parviendrons à rester dans la course vis-à-vis des avancées rapides observées en Chine, en Russie et aux États-Unis.

Le rapport met en évidence que les usages les plus prometteurs des SMR dans les pays européens dont l'électricité est déjà bas-carbone résident dans la production de chaleur, notamment pour les réseaux de chaleur urbains et la chaleur industrielle inférieure à 300 °C. Toutefois, il faut bien garder à l'esprit que pour que les SMR soient considérés comme des options concrètes, il faut en premier lieu avoir avancé sur un réacteur complet, prêt à l'emploi, mais également d'envisager dès à présent leur déploiement pour des infrastructures publiques ou des investissements de long terme. D'autres technologies qui permettront d'atteindre des températures plus élevées sont tributaires d'études et de développements significatifs pour le cycle du combustible, qu'il faut anticiper dès à présent.

J'espère que ce rapport incitera toutes les parties prenantes à considérer les petits réacteurs modulaires SMR et AMR comme un choix possible pour leur transformation énergétique et à en apprécier le potentiel de manière factuelle par rapport à leurs besoins. Il faut surtout dès à présent anticiper leur développement dans une course mondiale où notre capacité collective à positionner une filière industrielle européenne, dans laquelle s'inscrivent les atouts nationaux en tant qu'acteur de premier rang et compétitif, sera essentielle.

Emmanuelle WARGON

Présidente de la Commission de régulation de l'énergie

### Introduction par les co-Présidents du groupe de travail

Nous tenons à remercier Madame la Présidente de la CRE, Emmanuelle WARGON, qui nous a fait confiance en nous confiant cette mission de co-présidence du groupe de travail sur l'insertion des SMR/AMR dans les systèmes énergétiques. Nous souhaitons exprimer notre sincère gratitude à tous les membres du groupe de travail pour leur collaboration, leur engagement tout au long d'une saison riche en échanges et en débats. Leurs expertises, leurs idées, de même que leur écoute, leur soutien et respect mutuel ont été essentiels dans l'élaboration des éléments constitutifs de ce rapport, sur un sujet dont les enjeux sont essentiels, mais complexes et multifacettes.

Nos remerciements vont également aux agents de la CRE en charge de la prospective et de l'innovation, notamment Didier LAFFAILLE et Arnaud DIETRICH, assistés d'Alexandre REBIÈRE et Lucas PUGLISI, qui ont fourni un appui efficace pour structurer et organiser nos travaux. Nous remercions aussi pour son engagement et son appui Matthieu GARRIGUE-GUYONNAUD, rapporteur durant les premiers mois du groupe de travail.

Nous souhaitons remercier tous les acteurs et professionnels, motivés par ces petits réacteurs nucléaires, qui ont accepté d'être interviewés lors de nos séances de travail ou de fournir des notes d'expertise, dans le cadre de cette étude. Leurs apports variés et éclairants ont enrichi nos travaux, nous ont permis de nous questionner, d'acquérir une vision globale et d'orienter nos réflexions.

Merci également à Valérie FAUDON et Vincent BERGER, ainsi qu'au Collège de la CRE pour leur soutien continu et leurs apports précieux qui ont permis d'améliorer la qualité de nos travaux.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude et nos félicitations à la rapporteure, Pauline HODILLE, pour sa disponibilité, la qualité de son écoute et son excellent travail de rédaction. Sa capacité de synthèse a été remarquable, ainsi que l'articulation cohérente et claire qui en ressort. Son engagement et son attention à tous les échanges ont permis que cet ouvrage reflète les efforts de l'ensemble du groupe de travail, et les principales conclusions et recommandations qui en sont issues.

Grâce à toutes ces excellentes contributions, notre travail de co-présidents a été un véritable plaisir, au-delà de notre motivation pour cette opportunité de faire avancer la réflexion collective sur les enjeux et les choix publics possibles pour un développement réussi des SMR/AMR français et européens au cours de la décennie 2030.

Anne-Marie CHOHO

Directrice Générale de SETEC

François LÉVÊQUE

Professeur d'économie à Mines Paris – PSL

# Le résumé et les recommandations du rapport

## Le résumé du rapport

De nombreux pays du monde développent des projets de petits réacteurs modulaires (SMR) et de petits réacteurs modulaires avancés (AMR) comme solution de décarbonation de la production de chaleur et d'électricité, sur leur territoire ou à l'export. Il s'agit majoritairement des pays déjà dotés d'une industrie nucléaire et d'une flotte de réacteurs de forte puissance. D'autres pays, plus nombreux encore, sont prêts à s'équiper quand la technologie des réacteurs modulaires aura atteint le stade industriel.

L'atteinte de ce stade ne peut être précisément datée. Comme pour toutes les innovations d'envergure, la route avant la mise en marché est longue et jalonnée de défis. Le présent rapport s'interroge sur le chemin et les actions à suivre et entreprendre pour assister au déploiement des petits réacteurs d'ici les 25 prochaines années. Les SMR/AMR apporteraient en effet, dans un contexte de demande mondiale d'électricité et de chaleur croissantes, une solution complémentaire de décarbonation pour certains usages où les EnR et le nucléaire de grande puissance rencontrent des limites (priorisation des ressources de biomasse, lieux de consommation décentralisés, *etc.*).

Seuls les SMR ont le potentiel d'être déployés commercialement dans la décennie 2030. Ils sont technologiquement plus matures et leur combustible et sa matière première sont accessibles commercialement moyennant des modifications d'usines existantes. En revanche, les AMR, selon leur technologie, font appel soit à un combustible à plus fort enrichissement de l'uranium non encore produit industriellement, soit à du plutonium, une matière stratégique détenue par quelques États seulement et pour laquelle il n'existe pas de marché. Pour autant, les AMR ont une ambition d'usages plus large que les SMR, comme fournir de la chaleur à plus haute température ( $> 300\text{ °C}$ ) ou encore recycler davantage de matière que ne le font les réacteurs de grande puissance actuels ou les futurs SMR.

SMR comme AMR font reposer leur compétitivité sur leur possibilité de modularité, leur flexibilité d'usage et des effets de série massifs dans leur fabrication, pour amortir des coûts fixes élevés, y compris les dépenses de protections de sûreté-sécurité. L'échelle minimale, pour parvenir à ces effets de série, est l'Europe, non la France. Il est donc essentiel que les réglementations, de sûreté et de sécurité notamment, qui déterminent fortement les choix de conception, soient non seulement simplifiées autant que possible pour ces projets de plus petite puissance que les actuels réacteurs électrogènes, mais surtout qu'elles soient harmonisées à l'échelle européenne.

Le rapport souligne que les AMR sont prometteurs en termes d'innovations et de diversité d'usages, notamment pour ceux qui produisent de la chaleur à plus de  $300\text{ °C}$ . De plus, au sein même des AMR, on rencontre une grande diversité de maturités technologiques, à la fois pour le réacteur lui-même et pour la production du combustible. Le combustible est un élément crucial pour le succès des projets. Pour les AMR, la production de la matière première nécessitera de nouvelles usines (d'enrichissement ou de retraitement selon le type de réacteur) et de fabrication de combustible, soit des investissements de montants comparables ou supérieurs aux réacteurs eux-mêmes. En outre, pour certains AMR, la technologie même du combustible est encore immature.

Les usages les plus prometteurs des SMR en France et dans les pays dont l'électricité est déjà décarbonée sont les réseaux de chaleur urbaine et la chaleur industrielle inférieure à  $300\text{ °C}$ , même si une cogénération d'électricité reste pertinente, notamment pour faire face aux variations de consommation de chaleur. En effet, en France métropolitaine, le réseau électrique donne déjà accès à une électricité décarbonée sur tout le territoire. De plus, aucun projet n'est envisagé à ce stade dans les territoires insulaires. Par ailleurs, pour une même taille de réacteur, la quantité d'énergie produite sous forme de chaleur est deux à trois fois supérieure à celle produite sous forme d'électricité. La production de chaleur donnera donc un prix moindre au kWh et présente de bonnes chances d'atteindre la compétitivité. Enfin, la chaleur, contrairement à l'électricité, ne se transporte pas sur des distances

supérieures à 25 km, il faut donc la produire à proximité de la zone de consommation. Cette contrainte est propice aux petits systèmes de production locaux.

En revanche, les SMR sont pour le moment pénalisés par la transposition par la France de la directive européenne *Efficacité énergétique (2023/1791)* du 13 septembre 2023. La France a en effet retenu le taux d'énergie renouvelable et de récupération de chaleur fatale pour définir un réseau de chaleur « efficace », c'est-à-dire un réseau éligible aux subventions (octroi d'aides du fonds chaleur de l'Ademe, par exemple) et aux avantages fiscaux (TVA à taux réduit, par exemple). C'est ainsi que la FEDENE, qui est intervenue devant le groupe de travail, n'envisage pas l'emploi de SMR pour décarboner les réseaux de chaleur. Un changement réglementaire changerait la donne, surtout dans le contexte où la biomasse, sur laquelle les réseaux de chaleur comptent largement pour se décarboner, pourrait être priorisée en faveur d'autres usages (alimentation, construction, ameublement, etc.). Plusieurs pays européens ne s'y trompent pas et envisagent ou lancent des projets de SMR pour leurs réseaux de chaleur, à l'instar de deux villes finlandaises dont Helsinki.

Ce changement réglementaire en France ainsi qu'une prise de conscience pour les réseaux de chaleur sont urgents, car de nombreux investissements se préparent actuellement dans le domaine, tant pour des usages industriels que pour des usages dans des réseaux de chaleur urbaine.

L'Europe est en retard dans le développement et les premières réalisations de SMR/AMR par rapport à la Chine, la Russie et les États-Unis. Aucun pays n'ayant encore atteint l'effet de série, ce retard est rattrapable, à condition toutefois de déverrouiller l'obstacle actuel de financement de la phase de construction du prototype. Cette phase représente de l'ordre du milliard d'euros par projet et son retour sur investissement présente encore trop de risques pour que des investisseurs privés s'y lancent seuls : si des financements privés de capital-risque ont été obtenus par certains projets européens de SMR/AMR pour leur étape d'émergence, aucun fonds d'investissement prêt à financer l'étape, bien plus onéreuse et plus longue, d'industrialisation de ces réacteurs, n'a été identifié. En revanche, les pays les plus avancés dans le passage à l'échelle industrielle ont tous bénéficié d'investissements publics supérieurs au milliard d'euros par projet, avant que des investisseurs privés (aux États Unis uniquement) n'estiment les risques suffisamment maîtrisés pour s'engager à cette échelle.

Un financement significatif par pays, ou mieux en coopération au niveau européen, concentré sur les quelques SMR les plus prometteurs, comme l'ont fait les pays plus en avance, aurait un double effet gagnant pour l'Europe, en délai et en coût. En premier lieu, l'accélération du développement de ces quelques SMR européens les remettrait dans la course face aux concurrents russes, asiatiques et nord-américains. En second lieu, le nombre réduit de projets ainsi accélérés aurait plus de chances d'atteindre un effet de série suffisant sur le marché européen, pour devenir compétitif hors d'Europe.

Seuls les AMR offrent la possibilité de fournir de la chaleur à température supérieure à 300 °C nécessaire à une partie de l'industrie. Certains AMR, dont des technologies pour lesquelles la France dispose d'une bonne expérience pourraient, une fois la décarbonation des usages plus accessibles achevée, arriver à temps (horizon 2040-2050) pour contribuer à l'achèvement de la décarbonation de l'industrie européenne. Pour y parvenir, un accompagnement public à court terme des projets les plus prometteurs est nécessaire sur deux aspects principaux. D'une part, la finalisation technologique qui permettra la construction du prototype (avec les mêmes verrous de risques pour des investisseurs financiers que pour les SMR ci-dessus) et, d'autre part, le développement d'une chaîne industrielle du combustible, développement qui peut nécessiter des investissements extrêmement massifs. Un point critique clef est celui de l'évaluation des quantités disponibles et des délais réalistes d'accès à la matière première (Uranium HALEU, Plutonium séparé non réservé) et aux combustibles pour les projets européens dans les décennies à venir. La sélection des projets à accompagner ne pourra s'opérer qu'en tenant compte des ressources en matière première disponibles.

Les projets SMR/AMR ont besoin d'être identifiés suffisamment tôt par les collectivités et les industriels comme une solution potentielle afin que des sites pouvant les héberger soient sécurisés, ce qui

permettra d'anticiper la communication sur les projets tant à l'échelle nationale qu'à l'échelle locale, en facilitant l'acceptabilité et ainsi dérisquer les projets pour faciliter leur financement.

Le rapport souligne aussi le besoin de prévoir l'augmentation des besoins en compétences par la filière nucléaire en général et par le secteur des SMR/AMR en particulier. Enfin, le traitement des combustibles usés, le recyclage et la gestion des déchets doivent non seulement être pris en compte dans les modèles de compétitivité économique des projets (même s'ils sont techniquement surmontables et seront faibles en montant dans le coût de l'énergie produite), mais encore faire l'objet d'études d'anticipation des modalités et des capacités d'entreposage des déchets par les producteurs et de leur stockage dans les infrastructures gérées par l'ANDRA.

### Les recommandations du rapport

---

*À COURT TERME, ACCELERER ET INTENSIFIER LES EFFORTS PUBLICS POUR  
RENFORCER LES CHANCES DE REUSSITE DE L'INDUSTRIE FRANÇAISE ET EUROPEENNE  
FACE A SES GRANDS CONCURRENTS*

---

#### **1. Pour les SMR, atteindre rapidement le stade d'industrialisation et de compétitivité à un horizon proche de celui des concurrents internationaux et des autres solutions énergétiques (EnR)**

- ✓ Harmoniser rapidement les réglementations de sûreté et sécurité nucléaires au niveau européen, pour que les effets de série essentiels à la compétitivité économique des SMR soient atteints à temps pour décarboner notamment la chaleur urbaine et industrielle (< 300 °C) dans la décennie 2030.
- ✓ Adopter en France et dans les autres pays européens où ce n'est pas encore le cas la définition technologiquement neutre des réseaux de chaleur « efficaces » proposée par la directive européenne 2023/1791 afin de permettre aux SMR, au même titre que les énergies renouvelables, d'accéder aux régimes d'aides et de fiscalités.
- ✓ Pour les porteurs de projets, réduire les incertitudes sur les coûts et les délais, combustible et gestion des déchets compris, pour parvenir à des estimations plus resserrées et plus réalistes, afin de faciliter les décisions d'investissements privés et de soutien public.
- ✓ Si des gains de simplification et de délais peuvent être attendus par l'adaptation des règles et des processus d'examen des demandes d'autorisation par le régulateur (ASNR), les mettre en œuvre rapidement pour sécuriser les calendriers et les financements des projets.
- ✓ Accompagner par des financements publics significatifs, nationaux et européens, l'étape de construction du prototype d'un petit nombre de projets, pour réduire le risque financier à un niveau acceptable pour des investisseurs privés et permettre à quelques SMR européens d'atteindre le stade commercial à temps face aux concurrents nord-américains, chinois et russes.

#### **2. Pour les AMR les plus matures technologiquement, déverrouiller les incertitudes sur l'accès à la matière et à la fabrication des combustibles et accélérer le développement pour sécuriser une contribution aux décarbonations les plus difficiles (chaleur > 300 °C notamment) à horizon 2040-2050**

- ✓ Évaluer, avec les parties prenantes compétentes, publiques notamment, les quantités et délais réalistes de matière première (Uranium HALEU, Plutonium séparé non réservé) et de combustible atteignables pour les projets européens dans les décennies à venir ; sélectionner un nombre de projets à accompagner cohérent avec ces ressources disponibles.
- ✓ Attribuer des financements publics au développement d'AMR, y compris les solutions industrielles pour produire leurs combustibles, pour qu'ils atteignent le stade de dérisquage compatible avec des investissements privés importants.

---

*ANTICIPER LE DEBAT PUBLIC ET LA LOCALISATION POTENTIELLE DES UNITES*

---

### **3. Anticiper les enjeux d'acceptabilité locale**

- ✓ Accélérer la prise de conscience par les industriels et les collectivités locales que les SMR – et à terme les AMR – constituent une solution crédible de décarbonation, en particulier des usages de la chaleur.
- ✓ En lien avec les stratégies de décarbonation des territoires, identifier la localisation des sites industriels et péri-urbains devant accueillir les SMR/AMR, pour sécuriser un foncier adapté et anticiper les ressorts de l'acceptabilité spécifiques aux SMR : acteurs privés, implantations proches des activités humaines et dispersées, seuil éventuellement inférieur au cadre de la CNDP, etc.

---

*A MOYEN TERME, INTEGRER LES ENJEUX DE BOUCLAGE DU CYCLE ET PREPARER LES FORMATIONS ADAPTEES AUX PHASES DE CONSTRUCTION ET D'EXPLOITATION*

---

### **4. La mise en place de compétences et d'une chaîne de gestion des combustibles usés : un enjeu de moyen terme**

- ✓ Anticiper les besoins en matière de compétences pour l'ensemble de la filière nucléaire au regard des objectifs de production nucléaire affichés en France et en Europe par de nombreux pays.
- ✓ Mener un travail d'anticipation des modalités, des risques et des capacités d'entreposage des déchets par les producteurs et de leur stockage dans les infrastructures gérées par l'ANDRA.

## Sommaire

Avant-propos

Introduction par les co-Présidents du groupe de travail

Résumé et recommandations du rapport

Contexte et déroulement de la mission

Introduction

### **1. Les petits réacteurs nucléaires : un concept prometteur dans un contexte global de décarbonation de l'énergie, mais encore non éprouvé, notamment en France et en Europe..... 14**

#### **1.1. Les promesses de concepts innovants dans un contexte de renouveau du nucléaire ..... 14**

##### **1.1.1. Les besoins : la transition écologique et la recherche de souveraineté énergétique accroissent la demande mondiale d'énergie nucléaire ..... 14**

###### **1.1.1.1. Des besoins importants de décarbonation à l'échelle mondiale ..... 14**

###### **1.1.1.2. Au niveau français et européen, des besoins de souveraineté énergétique ..... 15**

##### **1.1.2. Les projets : des petits réacteurs innovants présentant des technologies diversifiées et des niveaux de maturité variables ..... 16**

###### **1.1.2.1. SMR et AMR : des réacteurs modulaires de faible puissance ..... 16**

###### **1.1.2.2. Des modèles économiques relativement nouveaux dans le domaine du nucléaire ..... 18**

##### **1.1.3. Les promesses des petits réacteurs nucléaires : diversification des usages et flexibilité à un coût potentiellement compétitif ..... 19**

###### **1.1.3.1. Des usages plus diversifiés : électricité décentralisée, chaleur, cogénération ..... 19**

###### **1.1.3.2. Une implantation plus flexible ..... 22**

###### **1.1.3.3. Une énergie à un prix potentiellement compétitif ..... 23**

#### **1.2. Dans le monde, aucun pays n'a encore industrialisé un modèle de petits réacteurs nucléaires, toutefois quelques pays se démarquent par une certaine avancée ..... 23**

##### **1.2.1. Aucun projet dans le monde n'a atteint le stade industriel ..... 23**

###### **1.2.1.1. Un degré d'avancement inégal des projets à l'échelle mondiale ..... 23**

###### **1.2.1.2. De très nombreux projets mais quelques-uns seulement ont atteint le stade de la construction ..... 24**

##### **1.2.2. Des États engagés dans la course aux petits réacteurs nucléaires dont l'issue n'est pas encore connue ..... 29**

###### **1.2.2.1. Les projets de petits réacteurs nucléaires bénéficient de soutiens publics partout dans le monde ..... 29**

### **2. Les perspectives pour les projets européens et français : une voie complexe mais encore possible pour atteindre le stade industriel..... 34**

<b>2.1. Quels chemins critiques pour les SMR/AMR européens et français ?</b> .....	<b>34</b>
2.1.1. Des scénarios de déploiement ambitieux d'ici 2050 .....	34
2.1.2. Les facteurs déterminants pour la réussite des projets français et européens .....	34
<b>2.2. Atteindre une maturité technologique à un horizon compétitif par rapport à nos concurrents</b> .....	<b>35</b>
2.2.1. Pour les SMR, atteindre le stade d'industrialisation à un horizon relativement proche .....	35
2.2.2. Pour les AMR, maîtriser la technologie est essentiel et sécuriser le cycle du combustible déterminant.....	37
<b>2.3. Garantir un modèle économique rentable</b> .....	<b>40</b>
2.3.1. S'assurer d'une profondeur du marché et de la sélection entre projets suffisantes pour assurer un effet de série.....	40
2.3.1.1. Le marché international sera sans doute important, mais seulement en partie accessible aux SMR/AMR français et européen.....	40
2.3.1.2. Les territoires isolés offrent peu d'opportunités en France .....	42
2.3.1.3. L'Europe est l'échelle pertinente du développement des SMR/AMR mais ce marché comporte encore des incertitudes.....	43
Le marché de la chaleur semble prometteur mais comporte des incertitudes. ....	45
Concernant la chaleur industrielle. ....	45
Concernant les réseaux de chaleur urbains.....	48
<b>2.4. Assurer la compétitivité économique des projets</b> .....	<b>50</b>
2.4.1. Une incertitude sur la compétitivité du coût de l'énergie produite .....	50
2.4.2. Une incertitude sur la capacité à financer les projets .....	52
<b>3. L'accompagnement et le soutien des pouvoirs publics.....</b>	<b>54</b>
3.1. Un enjeu dans la phase de maturation des projets : les soutiens publics aux projets français et européens .....	54
3.2. Un enjeu de plus long terme : l'accompagnement à la mise en place de compétences et d'une chaîne d'approvisionnement appropriées.....	55
3.3. Pour les pouvoirs publics et les porteurs de projets, l'anticipation de la gestion des déchets .....	55
3.4. Adapter l'environnement réglementaire aux spécificités des petits réacteurs nucléaires .....	56
3.4.1. Des pistes de simplification du droit proposées par les porteurs de projet et en cours d'analyse par les services de l'État.....	56
3.4.2. Mais la nécessaire prise en compte de risques nouveaux liés aux technologies, usages et modèles d'exploitation des SMR/AMR.....	58
<b>4. Préparer l'intégration des petits réacteurs nucléaires dans les territoires</b> .....	<b>60</b>
4.1. Anticiper les enjeux d'acceptabilité locale.....	60

<b>4.1.1. Un enjeu d'information et de transparence en amont du déploiement du projet sur un territoire.....</b>	<b>60</b>
<b>4.1.2. La prise en compte d'enjeux d'acceptabilité spécifiques aux SMR/AMR .....</b>	<b>61</b>
<b>4.2. Pré-identifier les premiers sites d'implantation .....</b>	<b>62</b>
<b>4.2.1. Des logiques d'implantation diverses selon les usages .....</b>	<b>62</b>
<b>4.2.2. Une identification peu évidente des premiers sites d'implantation .....</b>	<b>62</b>
<b>4.3. Préparer l'intégration des petits réacteurs nucléaires dans le réseau électrique .....</b>	<b>64</b>
<b>4.3.1. Un enjeu non prioritaire et qui <i>a priori</i> ne posera pas de difficulté insurmontable.....</b>	<b>64</b>
<b>4.3.2. Le cas particulier des petits réacteurs en autoconsommation.....</b>	<b>65</b>
<b>Annexe 1 – Cadrage de la mission</b>	
<b>Annexe 2 – Liste des travaux Prospectifs de la CRE</b>	
<b>Annexe 3 – Liste des participants et intervenants</b>	
<b>Annexe 4 – Contributions au rapport</b>	
<b>Glossaire</b>	

*Remarque* : ce rapport a été collectivement revu et commenté par tous les membres du groupe de travail. Sa rédaction a été confiée au rapporteur qu'il convient de remercier.

### Contexte et déroulement de la mission

Ce rapport conclut les travaux d'un groupe de travail prospectif sur les réacteurs nucléaires de faible puissance mis en place par la Commission de régulation de l'énergie (*cf.* note de cadrage en Annexe 1) à l'instar d'autres études prospectives menées à son initiative (*cf.* liste en Annexe 2). Dans le cadre de ce groupe de travail sur les SMR/AMR, des industriels, *start-ups*, acteurs publics, entreprises privées, académiques, associations, administrations, se sont réunis pour échanger sur le sujet (*cf.* liste des participants en Annexe 3). Le rapport s'est nourri de ces échanges et réflexions ainsi que de l'abondante documentation publiquement accessible existante sur le sujet, en particulier les études d'institutions internationales et de laboratoires d'idées.

Il est important de noter que le rapport ne vise pas à évaluer les projets individuellement ou à en comparer les atouts et avantages. Encore moins à les classer. Il vise seulement à établir un panorama général présent et prospectif, à approfondir certains aspects moins traités mais néanmoins cruciaux comme la production de chaleur par les SMR/AMR ou la question de l'approvisionnement en combustibles et d'établir des recommandations pour éclairer les pouvoirs publics.

Le lancement officiel du groupe de travail, le 29 avril 2024, a donné suite à une saison complète de travaux et de rencontres (à hauteur d'environ une session plénière par mois à la CRE et/ou en visioconférence), de septembre 2024 à juin 2025. Le projet de rapport a fait l'objet d'une présentation au Conseil scientifique de la CRE, le 8 juillet 2025, qui l'a approuvé.

## Introduction

Alors que les besoins en énergie décarbonée augmentent face au défi du changement climatique, les petits réacteurs nucléaires suscitent un intérêt croissant dans un contexte plus global de renouveau de l'énergie nucléaire, ainsi que de besoins d'électricité et chaleur en forte augmentation dans les pays hors OCDE. Ce nouveau modèle de centrale est basé sur des réacteurs plus petits que les centrales traditionnelles de forte puissance (entre 20 et 300 MWe). Cette taille réduite vise plusieurs avantages par rapport au modèle classique de centrale nucléaire : un coût d'investissement initial moindre, une production en usine qui peut être industrialisée, un caractère modulable des capacités à installer et des usages diversifiés couvrant à la fois les besoins en électricité et en chaleur (peu transportable, donc plus décentralisée). Outre une contribution à la production d'une électricité décarbonée, les petits réacteurs nucléaires pourraient ainsi participer en Europe à la décarbonation de certains équipements collectifs ou procédés industriels utilisant la chaleur (chauffage urbain, industrie), au renforcement de la souveraineté énergétique européenne, ainsi que de ses capacités d'exportation de hautes technologies.

Aucun projet de petit réacteur lancé dans le monde n'a cependant atteint le stade de l'industrialisation et n'a pu ainsi valider l'ensemble de ces promesses. Or, la rentabilité du concept tient à sa capacité à être produit en longues séries, ce qui permet de réduire les coûts unitaires et d'être compétitif face à d'autres solutions technologiques.

Avant d'atteindre le stade industriel et de proposer une électricité ou de la chaleur à un coût compétitif, les projets aujourd'hui lancés devront valider plusieurs prérequis : mettre au point un concept technologique validé par les autorités de sûreté et en capacité de fonctionner à l'échelle industrielle, en intégrant l'ensemble du cycle (combustible et gestion des déchets) ; lever les financements nécessaires pour la phase de maturation technologique (plus ou moins avancée déjà) du projet puis, dans un deuxième temps, la phase d'industrialisation ; trouver des marchés d'une profondeur suffisante pour produire en série ; insérer les petits réacteurs dans des territoires et un réseau électrique ou de chaleur.

Une course de vitesse à l'échelle mondiale s'est engagée pour mettre en service des petits réacteurs nucléaires à l'échelle industrielle. Les projets les plus avancés annoncent parvenir au stade industriel d'ici 2030-2035, notamment en Chine, en Russie et aux États-Unis. En France, le gouvernement a soutenu onze entreprises innovantes développant un concept de petits réacteurs nucléaires. EDF a de son côté déployé un projet de SMR, Nuward.

Il est impossible à ce stade d'identifier avec un degré de certitude raisonnable les gagnants de cette course mondiale, au regard des données disponibles, de la diversité et du caractère plus ou moins innovant des technologies proposées, ainsi que de l'état encore peu mature de l'ensemble des projets. Il est possible toutefois de définir les facteurs déterminants pour la réussite des projets, ainsi que les facteurs facilitants, en termes de technologie et de disponibilité du combustible, de modèle économique, de marchés et de financement, ainsi que d'acceptabilité sociale et d'intégration aux réseaux.

Le présent rapport est divisé en quatre parties portant successivement sur une présentation des petits réacteurs nucléaires et de leurs promesses (1), les perspectives pour les projets européens et français (2), l'accompagnement et le soutien des pouvoirs publics (3) et l'intégration des petits réacteurs dans les territoires (4).

# 1. Les petits réacteurs nucléaires : un concept prometteur dans un contexte global de décarbonation de l'énergie, mais encore non éprouvé, notamment en France et en Europe

## 1.1. Les promesses de concepts innovants dans un contexte de renouveau du nucléaire

### 1.1.1. Les besoins : la transition écologique et la recherche de souveraineté énergétique accroissent la demande mondiale d'énergie nucléaire

#### 1.1.1.1. Des besoins importants de décarbonation à l'échelle mondiale

Face aux enjeux de l'adaptation au changement climatique, l'énergie nucléaire apparaît comme un levier de décarbonation, en complément des énergies renouvelables. Lors de la COP 28 qui s'est tenue à Dubaï fin 2023, plus de 20 pays ont signé une déclaration commune<sup>1</sup> visant à tripler la production d'énergie nucléaire d'ici 2050, reconnaissant ainsi le rôle du nucléaire dans la lutte contre le changement climatique et plus particulièrement l'atteinte de l'objectif du « *net zéro* » à cet horizon<sup>2</sup>.

Le récent rapport de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) sur l'énergie nucléaire<sup>3</sup> atteste de ce renouveau de l'énergie nucléaire dans ce contexte global de décarbonation : en 2025, la production d'énergie nucléaire devrait atteindre un niveau historique, alors que de nouvelles capacités sont en construction. Plus de quarante pays, dont une dizaine ne sont pas encore nucléarisés, ont mis en place ou ont prévu, en effet, des programmes de développement de leur industrie nucléaire d'une ampleur sans précédent depuis les chocs pétroliers des années 1970. L'essentiel de la croissance de la production nucléaire provient de Chine, représentant un tiers de l'augmentation du parc, et des économies en développement.

Des décisions de prolongations de la durée de vie et de renforcement des parcs existants ont également été annoncées dans certains pays historiquement nucléarisés (France<sup>4</sup>, États-Unis<sup>5</sup>, Japon<sup>6</sup>). Depuis 5 ans, la durée vie de 64 réacteurs a été prolongée dans 13 pays, pour une capacité totale de 65 GW, soit 15 % du parc nucléaire actuel<sup>7</sup>. Alors que l'énergie nucléaire représente aujourd'hui 10 % de l'électricité mondiale, sa capacité de production devrait doubler d'ici 2050 d'après les projections de l'AIE pour se maintenir à cette proportion.

---

<sup>1</sup> Source : <https://www.elysee.fr/admin/upload/default/0001/15/608f14a2b311ec1db4a65da29049f39c68d2a883.pdf>

<sup>2</sup> Objectif énoncé dans l'Accord de Paris visant à limiter l'augmentation des températures à une moyenne de 1,5 degré au-dessus de l'ère préindustrielle. Le « *net zéro* » (zéro émission nette) nécessite que les émissions de gaz à effet de serre provoquées par les activités humaines soient compensées par les éliminations anthropiques (actions pour renforcer les puits naturels de carbone et les divers procédés qui permettent de capter et stocker le CO<sub>2</sub>), donc une accélération de la décarbonation de l'énergie.

<sup>3</sup> Source : <https://www.iea.org/reports/the-path-to-a-new-era-for-nuclear-energy>

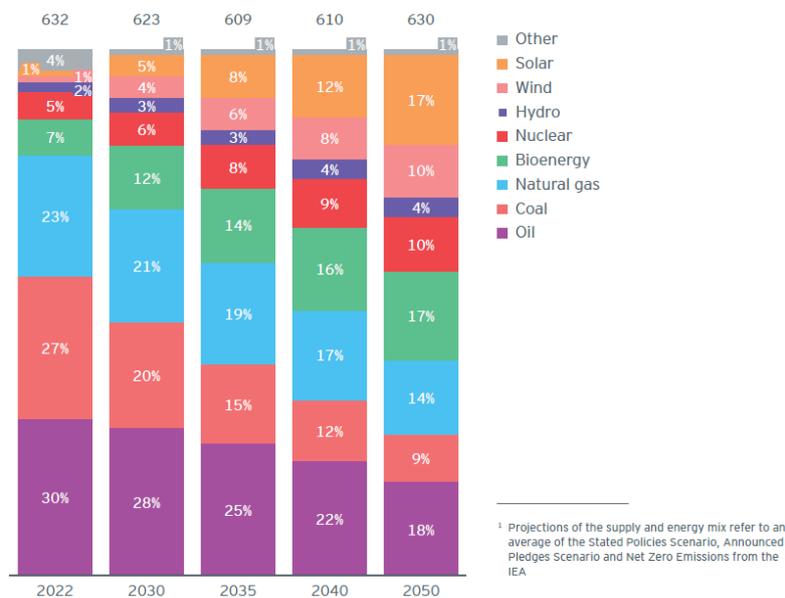
<sup>4</sup> Le projet d'investissement « *Grand Carénage* » d'EDF permet de prolonger l'exploitation des réacteurs de 1 300 MW, soit 20 réacteurs nucléaires au total.

<sup>5</sup> Tous les réacteurs exploités depuis au moins 30 ans en 2024 pourront être prolongés de 20 ans. En juin 2024, la secrétaire d'État à l'énergie américain, Jennifer GRANHOLM, a annoncé la capacité du parc nucléaire américain de tripler sa production pour passer d'une production actuelle de 100 à 300 GW d'ici 2050.

<sup>6</sup> Une loi de 2023 permet de prolonger la vie des réacteurs au-delà de 60 ans d'activité.

<sup>7</sup> Source : AIE, op. cit.

## Approvisionnement et mix énergétiques mondiaux, 2022-2050, en EJ (exajoule)



Source : Rapport EY-Parthenon, mars 2024, page 31

Bien que le parc nucléaire existant et programmé soit quasi exclusivement constitué de réacteurs de grande puissance, les petits réacteurs peuvent contribuer à répondre à cette demande croissante d'énergie nucléaire. L'ensemble des contributeurs au groupe de travail, et en premier lieu les porteurs de projets de petits réacteurs, ont insisté sur leur rôle dans ce contexte de renouveau du nucléaire lié à la croissance à venir de la demande d'électricité et de chaleur décarbonée dans le monde, tirée par la croissance économique et démographique mondiale, les politiques de décarbonation, l'électrification des usages (mobilité, chauffage, etc.) et de l'économie, en particulier des industries énérgo-intensive (pétrochimie, métallurgie, etc.) et du développement du numérique (*data centers*).

### 1.1.1.2. Au niveau français et européen, des besoins de souveraineté énergétique

Le nouveau contexte géopolitique accroît, par ailleurs, le besoin de souveraineté énergétique de l'Europe. Avant la guerre russe contre l'Ukraine, l'Union européenne importait plus de la moitié de son énergie, dont quasiment un quart depuis la Russie<sup>8</sup>. La feuille de route de la Commission européenne « *RePowerEU* » de mai 2022 a pour objectif de sortir de la dépendance aux hydrocarbures russes en diversifiant les sources d'approvisionnement, de réduire la consommation d'énergie de l'Union européenne et d'y développer les énergies renouvelables, sans y inclure l'énergie nucléaire. En 2023, la Commission européenne a toutefois créé une alliance industrielle dédiée aux petits réacteurs nucléaires afin d'accélérer le développement de ces technologies sur le sol européen. Dans le *Net-Zero Industry Act* approuvé par le Parlement européen en décembre 2023, les petits réacteurs nucléaires apparaissent comme une technologie stratégique pour atteindre cet objectif.

En France, la prochaine Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE-3<sup>9</sup>) en cours d'adoption prévoit la réduction de 50 % des émissions de Gaz à effet de serre (GES) brutes d'ici 2030 par rapport à 1990, une augmentation de la part de l'électricité dans le mix énergétique français (39 % en 2035 contre 25 % aujourd'hui) et dans ce cadre, un renforcement des capacités de production nucléaire. La PPE-3 prévoit ainsi, outre la prolongation des réacteurs existants, l'amélioration de leur performance et la construction de trois paires d'EPR2, le soutien aux réacteurs innovants de faible puissance. Les objectifs nationaux de réindustrialisation<sup>10</sup> dans un objectif de souveraineté et, parallèlement, de décarbonation de

<sup>8</sup> Source : [Chiffres Eurostat](#).

<sup>9</sup> Source : <https://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/consultation-du-public-sur-le-projet-de-troisieme-a3142.html>

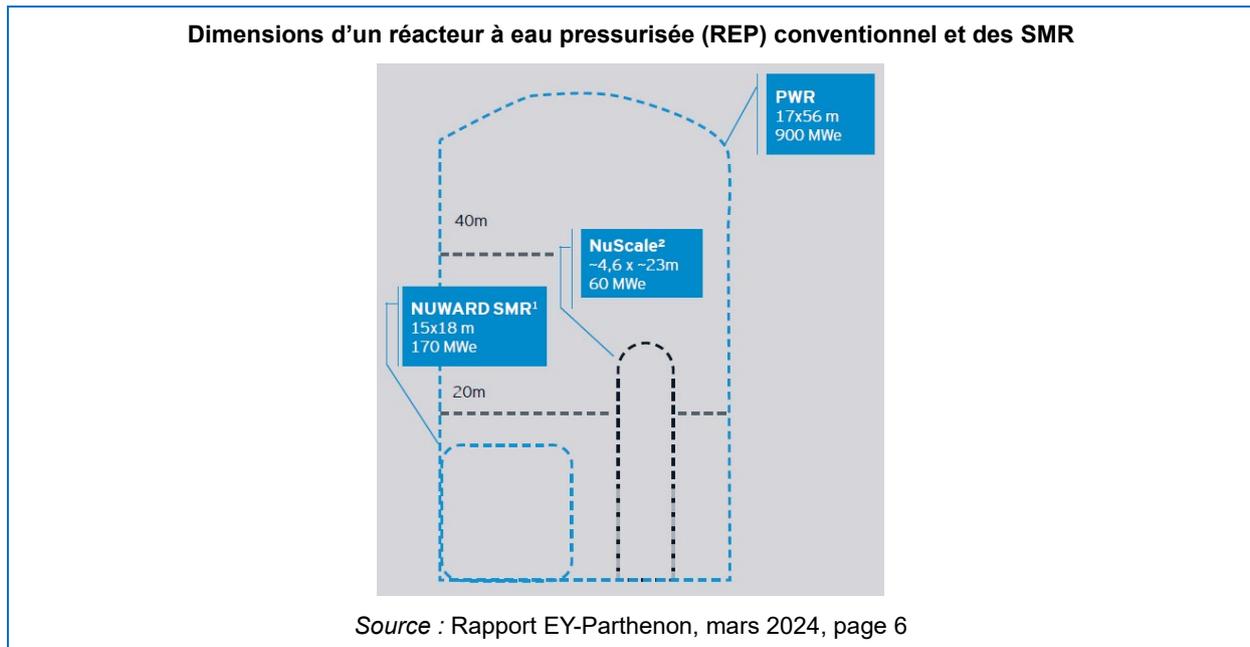
<sup>10</sup> Porté notamment par le programme *France 2030* doté de 54 Md€ de crédits.

l'industrie, avec l'identification de cinquante sites industriels « à décarboner »<sup>11</sup>, vont tirer à la hausse la demande d'énergie non émettrice de GES, dont le nucléaire.

### 1.1.2. Les projets : des petits réacteurs innovants présentant des technologies diversifiées et des niveaux de maturité variables

#### 1.1.2.1. SMR et AMR : des réacteurs modulaires de faible puissance

Les petits réacteurs nucléaires sont des réacteurs de faible puissance, dont la capacité de production d'électricité, d'après la norme prise par l'AIEA, est inférieure à 300 MWe, soit un tiers ou moins de la puissance des grands réacteurs. Ils ont des puissances variables, allant de quelques dizaines de MWe à 300 MWe.



Ces petits réacteurs visent à être modulaires : leurs composants peuvent être fabriqués, assemblés et testés dans une ou plusieurs usines, puis transportés d'un seul tenant sur le lieu d'implantation.

Il s'agit de réacteurs utilisant la fission nucléaire pour générer de la chaleur et produire de l'énergie. Toutefois leurs fluides caloporteurs et les combustibles utilisés varient selon les technologies retenues. Les petits réacteurs nucléaires se répartissent en deux grandes catégories de réacteurs : (i) les *Small modular reactors* (SMR) et (ii) les *Advanced modular reactors* (AMR). Ces deux catégories de petits réacteurs se distinguent par des niveaux d'innovation et de maturité technologiques différents.

#### Les SMR sont des petits réacteurs nucléaires « classiques » dont les prototypes devraient être prêts en premier.

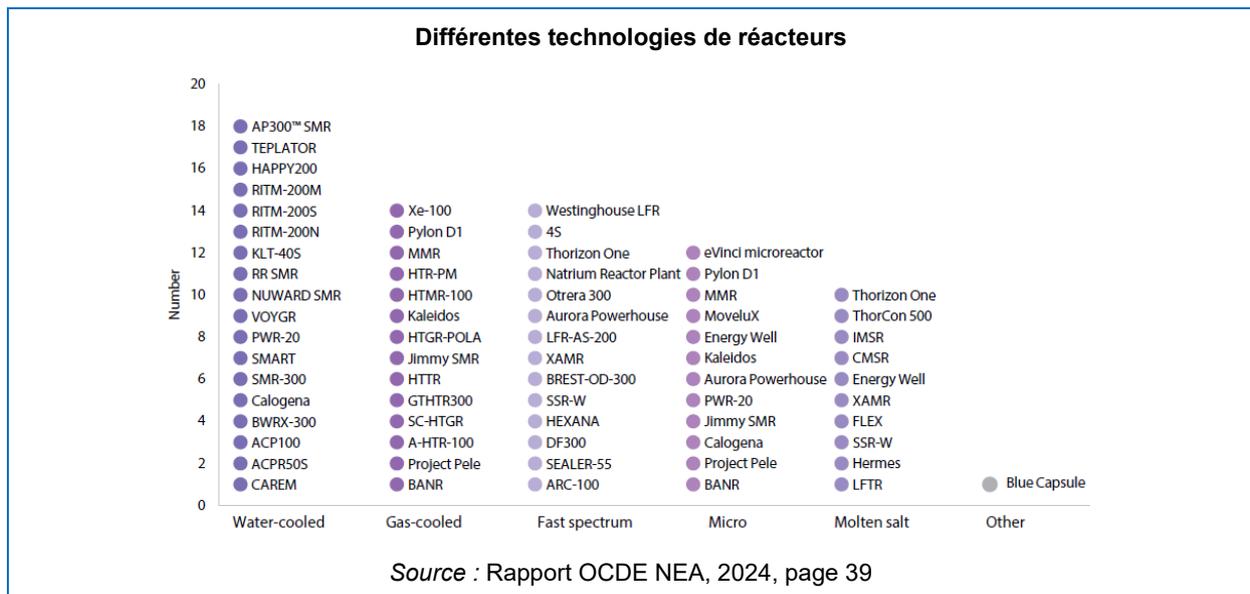
Les SMR sont des réacteurs à neutrons thermiques dont le caloporteur est l'eau (sous pression ou bouillante) utilisant une technologie identique à celle de la majorité des centrales nucléaires actuelles dotées de réacteurs de grande puissance. Ces réacteurs à eau traditionnels sont dits de génération III ou III+ lorsqu'ils sont dotés de dispositifs de sécurité renforcés. Ils utilisent un combustible solide enrichi à un niveau traditionnel (combustible *Low Enriched Uranium* (LEU ou LEU+), soit moins de 6 % d'enrichissement) et la température de l'eau en sortie peut atteindre jusqu'à 300 degrés celsius. Ils sont essentiellement destinés à une production mixte de chaleur (par prélèvement de vapeur dans le circuit secondaire à l'amont des turbines) et d'électricité (*via* une turbine), mais certains se spécialisent en chaleur seule, ou électricité seule. Ils présentent, selon les projets, des tailles et des gammes de puissance variées.

<sup>11</sup> En novembre 2022, le Président de la République a annoncé une division par deux des émissions de GES. liées à l'industrie d'ici 10 ans. Les 50 sites industriels « à décarboner » identifiés émettent 55 % des émissions industrielles, soit 12 % des émissions nationales totales. Cette décarbonation de l'industrie s'appuie sur l'électrification des procédés, la capture, le stockage et l'utilisation du carbone, l'hydrogène bas-carbone et la biomasse.

Version miniaturisée de centrales existantes qui ont déjà atteint leur maturité, la technologie des SMR est à un niveau relativement avancé. Les porteurs de projet français de cette technologie, comme le réacteur Nuward conçu par EDF, affichent des calendriers de commercialisation au cours de la décennie 2030.

## Les AMR sont des petits réacteurs nucléaires innovants mais à maturité technologique moins avancée.

Il s'agit de petits réacteurs de technologies plus innovantes, de génération IV. Ils utilisent un fluide caloporteur différent de l'eau : des sels fondus, du sodium<sup>12</sup>, du plomb ou du gaz. L'OCDE Nuclear Energy Agency (NEA)<sup>13</sup> recense, aux côtés des SMR à eau, quatre concepts d'AMR : les réacteurs à fluide caloporteur gazeux, les réacteurs à neutrons rapides à fluides caloporteurs métaux liquides (plomb, sodium), les réacteurs « micros » et les réacteurs à sels fondus, où le combustible est dissout dans un sel fondu caloporteur. Le projet Blue Capsule utilise un caloporteur sodium, le sodium étant ensuite refroidi par de l'air.



Les technologies innovantes des AMR visent, selon les cas, à atteindre des températures de sortie supérieures à 300 °C, à réutiliser davantage de matière des combustibles usés et à apporter des garanties renforcées en termes de sûreté, en incluant des dispositifs de sûreté passive (même si certaines technologies SMR incluent également de tels dispositifs). Le combustible utilisé pourrait également présenter un niveau d'enrichissement d'uranium élevé (combustible *High Assay Low Enriched Uranium* (HALEU), d'enrichissement entre 10 et 20 %) ou nécessiter du plutonium (Pu) en plus de l'uranium (combustible *Mixed Oxide* (MOX)). De manière plus globale, ces concepts présentent l'avantage d'explorer les pistes technologiques pour améliorer la fermeture du cycle nucléaire, qui constitue un objectif stratégique de la filière rappelé dans le Conseil de politique nucléaire (CPN) de mars 2025<sup>14</sup>.

<sup>12</sup> Technologie utilisée pour le réacteur Superphénix (SPX) en France, utilisé en Russie également.

<sup>13</sup> AEN : Agence pour l'énergie nucléaire, en français.

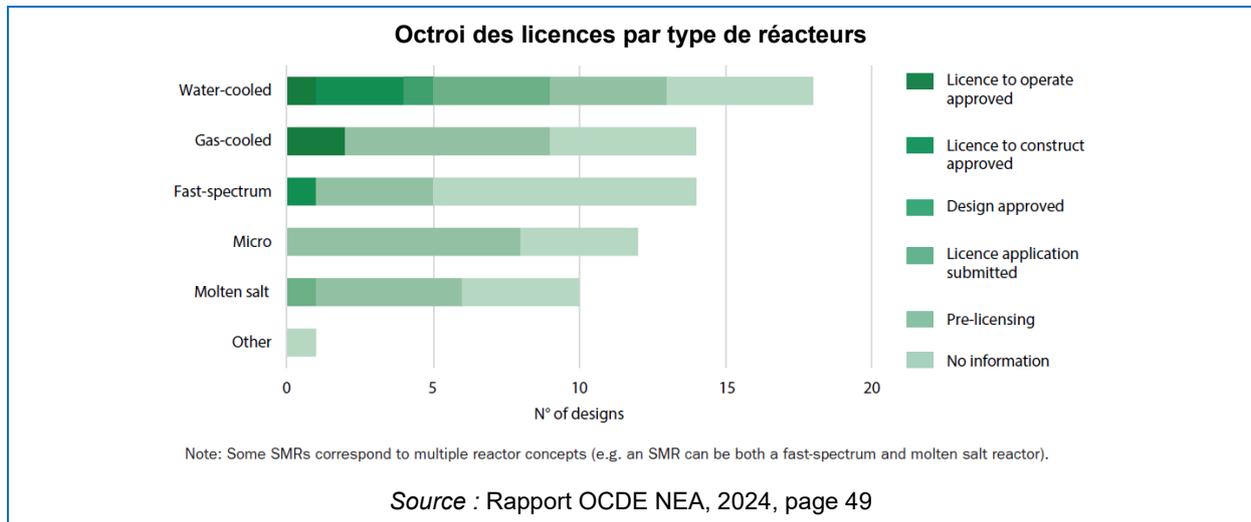
<sup>14</sup> [Conseil de politique nucléaire \(CPN\) du 17 mars 2025](#) : « Le Conseil de politique nucléaire demande que les industriels (EDF, Framatome, Orano), le CEA et l'ensemble des acteurs mobilisés sur les neutrons rapides, remettent à l'État un programme de travail et une proposition d'organisation industrielle pour la fin de l'année 2025, qui sera examiné lors d'un prochain CPN ».

**Tableau 1 : Différentes technologies des AMR**

HTR <i>High Temperature Reactor</i>	MSR <i>Molten Salt Reactor</i>		LMFR <i>Liquid Metal Fast Reactor</i>
Réacteur à (très) haute température (RHT)	Réacteur à sels fondus (RSF)		Réacteur rapide refroidi au métal liquide
Caloporteur Hélium/Sel fondu	Caloporteur sel fondu (fluorure)	Caloporteur sel fondu (chlorure)	Caloporteur Sodium liquide ou plomb liquide
<b>Neutrons Thermiques</b>	<b>Neutrons Thermiques</b>	<b>Neutrons Rapides</b>	<b>Neutrons Rapides</b>
~ 400-700 °C, jusqu'à 1 000 °C pour les Very High Temperature Reactors VHTR	~ 550-800 °C		~ 500-600 °C
Électricité et/ou <b>Chaleur haute température</b> (hydrogène, dessalement, chauffage urbain, industriel, etc.)	Électricité + <b>Chaleur haute température</b> + <b>Potentielle contribution</b> à la fermeture du cycle et transmutation des actinides mineurs en spectre rapide		Électricité + Chaleur + <b>Potentielle contribution</b> à la fermeture du cycle (fonction du mode de fonctionnement iso-générateur/sous-générateur)
Maturité technologique moyenne	Maturité technologique faible		Maturité technologique moyenne (sodium) ; faible (plomb)

Source : Présentation ASNR, point presse du 29 février 2024

Du fait de leur caractère innovant, ces technologies sont moyennement à faiblement matures et seront déployées après celles des SMR, même si les projets d'AMR représentent aujourd'hui la majorité des projets de petits réacteurs lancés et recensés par la NEA (38 sur 56<sup>15</sup>). Au niveau mondial, très peu de projets ont obtenu une autorisation de construction par les autorités de régulation, comme le montrent les travaux de la NEA (cf. *infra*). Les calendriers annoncés sont à ce stade à la fois flous et incertains. Pour les projets français, l'horizon de commercialisation d'un AMR n'est de manière générale pas prévu avant 2040 voire 2050.



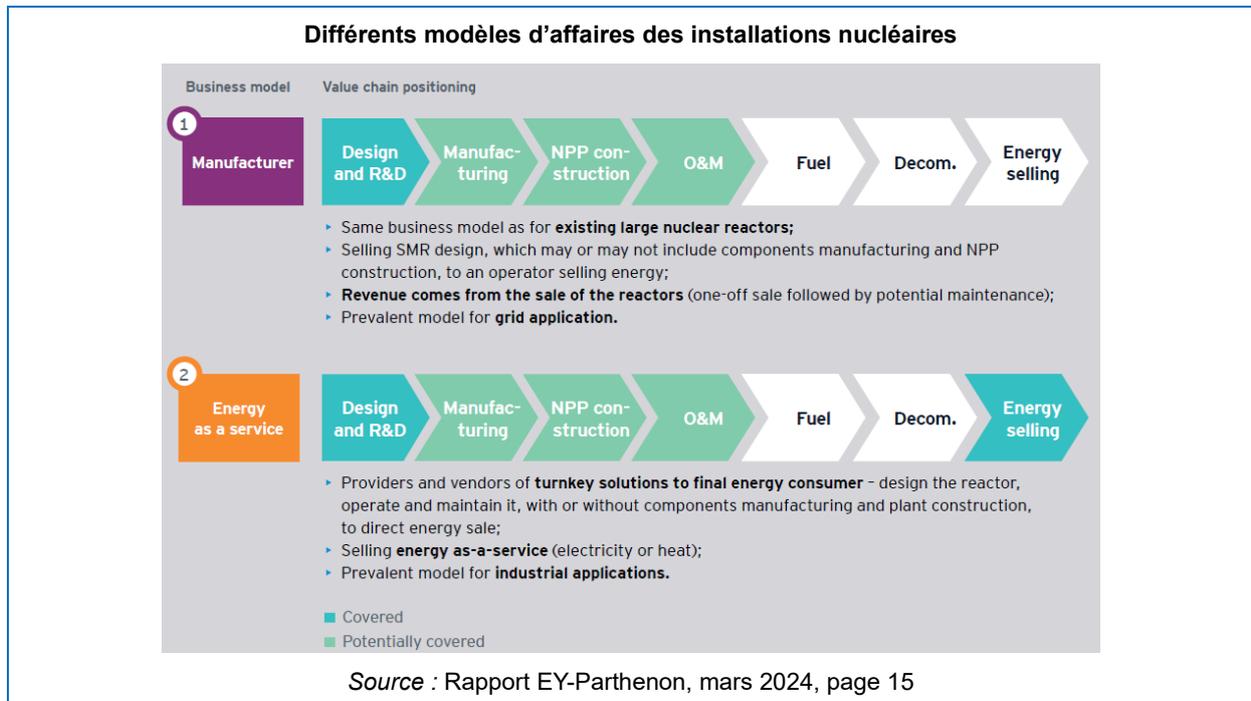
### 1.1.2.2. Des modèles économiques relativement nouveaux dans le domaine du nucléaire

Traditionnellement, quel que soit le pays, l'industrie nucléaire s'appuie le plus souvent sur des investissements d'origine publique du fait de sa forte intensité capitalistique et de la durée longue d'amortissement de ces investissements. Le modèle d'affaires d'un réacteur de grande puissance est

<sup>15</sup> Source : OCDE- NEA, op. cit.

fondé sur l'appel à un concepteur « *fabricant* » par l'opérateur et vendeur d'électricité (ou modèle de « *manufacturer* ») : le vendeur (concepteur/fabricant) du réacteur a la charge de la conception, de la construction et du support à l'opérateur pour obtenir sa licence d'exploitation. L'opérateur trouve le financement *via* des budgets étatiques et/ou des prêts bancaires, prend plus ou moins part à la construction auprès du vendeur selon les cas, puis exploite le réacteur et vend l'énergie directement ou indirectement à des particuliers et des entreprises *via* le réseau électrique (ou, moins fréquemment, de chaleur).

Les SMR/AMR, parce qu'ils sont de plus petites tailles et modulaires, nécessitent un montant d'investissements moins élevé qu'un réacteur de grande puissance, et dans la mesure où leurs usages peuvent être destinés directement à un industriel ou une collectivité (électricité ou chaleur, *cf. infra*), pourraient être construits et exploités dans le cadre de modèles d'affaires nouveaux. Il s'agirait, par exemple, de modèles d'« *Energy as a Service* » (EAAS), où c'est le vendeur de réacteur qui trouve le financement, qui non seulement construit, mais également exploite et démantèle le réacteur et qui vend l'énergie à un ou plusieurs clients : industriels, *data centers*, ou encore collectivités opérant un réseau de chaleur urbaine ou particuliers raccordés sur le réseau électrique étatique. Dans ce cadre, un industriel ou une collectivité qui utiliseraient une large partie, voire toute la production du réacteur pourraient contractualiser sur le long terme avec le fournisseur d'énergie en accueillant sur leur site le réacteur et en se garantissant ainsi un prix stable. Ce modèle d'affaires conduirait à réviser les relations économiques, et de responsabilité juridique, notamment en termes d'exploitation et de démantèlement, entre le propriétaire du site et client, d'une part, et le constructeur, exploitant et fournisseur de l'énergie produite, d'autre part.



### 1.1.3. Les promesses des petits réacteurs nucléaires : diversification des usages et flexibilité à un coût potentiellement compétitif

#### 1.1.3.1. Des usages plus diversifiés : électricité décentralisée, chaleur, cogénération

Les SMR/AMR sont tout d'abord **des potentiels vecteurs d'accroissement de production d'électricité décarbonée** pour alimenter les réseaux électriques, complémentaires de celles produites par les gros réacteurs et les énergies renouvelables. Ils seraient susceptibles, par le soutien décentralisé qu'ils apporteraient au réseau, de réduire les contraintes physiques des réseaux en réduisant le besoin de construire de nouvelles lignes à haute tension, voire améliorer la pilotabilité des systèmes énergétiques.

Outre en Europe, la technologie des SMR/AMR est par exemple envisagée dans certains pays comme la Chine ou les États-Unis pour **se substituer aux centrales thermiques à charbon**, le SMR pouvant être implanté sur le site même de la centrale préexistante. Rita BARANWAL, alors Vice-présidente senior des systèmes d'énergie de Westinghouse Electric Company et ancienne *US Assistant Secretary*

for Nuclear Energy, a confirmé lors de son intervention lors de la séance du groupe de travail du 7 octobre 2024, qu'un nombre notable de villes américaines considéraient l'option des SMR/AMR pour mettre hors service leurs centrales à charbon (modèle *coal to nuclear*). L'implantation du petit réacteur directement sur le site de la centrale préexistante permettrait d'économiser de la ressource foncière, de minimiser les coûts (réutilisation des utilités, des réseaux, etc.) et potentiellement de conserver une partie des emplois. Ce modèle *coal to nuclear* commence également à être développé en Chine<sup>16</sup>. Le monde compte aujourd'hui environ 2 400 centrales thermiques au charbon en opération. Un grand nombre devront être remplacées d'ici 2050.

Cette production d'énergie nucléaire décentralisée à des puissances comparables aux centrales à charbon est par ailleurs particulièrement avantageuse pour la production de chaleur. En effet, alors que l'électricité se transporte bien sur de longues distances (milliers de km), la chaleur se transporte difficilement au-delà de 25 kilomètres<sup>17</sup>. Ainsi, les SMR (qui produisent de la chaleur à < 300 °C) pourraient se substituer aux centrales à charbon alimentant des réseaux de chaleur urbaine ou fournissant de la vapeur à certaines industries. En effet, les réseaux de chaleur urbaine et certains usages industriels fonctionnent à basse et moyenne température (< 300 °C). La Chine, par exemple, utilise la chaleur produite par des réacteurs nucléaires à eau de forte puissance pour le chauffage domestique (la centrale de grande puissance de Haiyang permet de chauffer 1 million de personnes sur 50 km) et des usages industriels (centre pétrochimique)<sup>18</sup>. Son projet de petit réacteur NHR-200 est à l'étude pour des usages liés au chauffage urbain et au dessalement. D'autres exemples existent en Russie et en Suisse (centrales de grande puissance de Gosgen et de Beznau).

Au-delà de cette participation à la production d'électricité et de chaleur décarbonée, les petits réacteurs nucléaires AMR présentent pour leur part l'avantage de produire **de la chaleur à haute température** susceptible de répondre aux besoins de certaines industries, qu'elles soient traditionnelles en phase de décarbonation comme la pétrochimie ou la métallurgie<sup>19</sup> ou nouvelles avec potentiellement de forts horizons de croissance comme la production d'hydrogène<sup>20</sup>.

La chaleur représente en effet aujourd'hui presque la moitié de l'énergie finale consommée en France et est produite à 60 % avec des énergies fossiles<sup>21</sup>. Les petits réacteurs nucléaires producteurs de chaleur présenteraient l'avantage d'offrir à travers des contrats de long terme une énergie décarbonée à un prix stable sur une longue durée, et ainsi une visibilité pour l'utilisateur sur ses coûts.

---

<sup>16</sup> Intervention de Tony D'ALETTO, lors de la séance de travail du 4 novembre 2024.

<sup>17</sup> Source : Perspectives de marché pour les SMR/AMR en France, Étude E-Cube/SFEN, mai 2025.

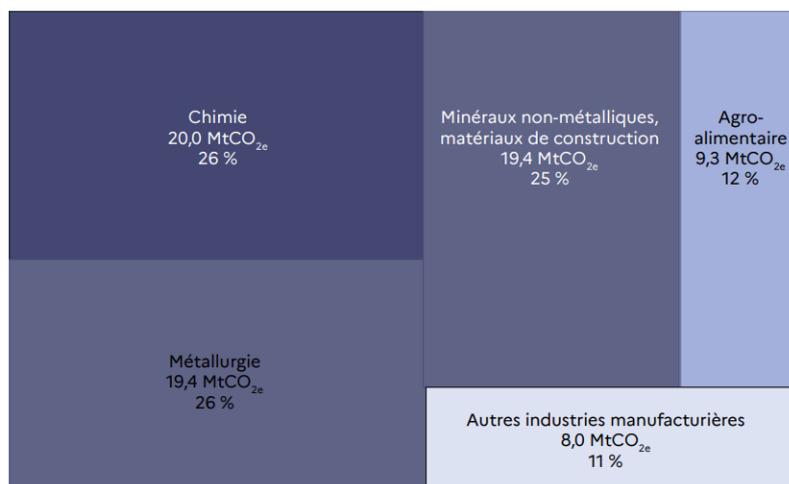
<sup>18</sup> Intervention de Tony D'ALETTO, lors de la séance de travail du 4 novembre 2024.

<sup>19</sup> Demande d'une chaleur allant jusqu'à 500 °C pour produire de l'acier.

<sup>20</sup> La production d'hydrogène par électrolyse haute température nécessite un apport de chaleur pour la vaporisation de l'eau.

<sup>21</sup> Source : L'énergie nucléaire : une nouvelle solution pour décarboner la chaleur, avis de la SFEN, juin 2024.

## Répartition des émissions de l'industrie manufacturière par filière en France<sup>22</sup>



Source : Thèmes de la DGE, mars 2023, page 2

De nombreux vendeurs de SMR/AMR prévoient de proposer une **cogénération** d'électricité et de chaleur, répondant ainsi aux besoins de différents usagers, notamment industriels, et permettant un usage partagé de l'énergie produite entre plusieurs « *clients* ». En effet, avec un rayon de fourniture et donc un nombre possible d'utilisateurs différents limités, un réacteur producteur de chaleur seule peut se confronter à des variations fortes de consommation (hiver/été pour le chauffage urbain, arrêts pour maintenance chez les industriels) qui affectent sa performance technique et financière. La cogénération (pratiquée déjà par les réacteurs de forte puissance générant de la chaleur) peut leur permettre d'écouler sur le réseau électrique l'énergie inutilisée sous forme de chaleur. Les SMR/AMR pourraient donc structurer des « *hubs énergétiques* » dans lesquels un petit réacteur pourrait fournir de l'électricité et de la chaleur pour plusieurs industriels, alimenter le réseau électrique ou les réseaux de chaleur urbains. À noter toutefois que les réseaux de chaleur urbains français étant déjà majoritairement décarbonés (64 %), cet usage spécifique pourrait présenter moins de potentiel en France<sup>23</sup>, sauf à substituer un SMR/AMR à une source actuelle d'énergie décarbonée qui deviendrait moins disponible (biomasse notamment), ou pour de futurs nouveaux réseaux de chaleur urbaine.

<sup>22</sup> *Données* : CITEPA, Rapport national d'inventaire format Secten, édition 2022. Pour la répartition des émissions nationales par secteur, la catégorie « *Autres* » correspond aux secteurs de la construction et des déchets. Pour la répartition des émissions industrielles par sous-secteur, la catégorie « *Autres industries manufacturières* » inclut la catégorie correspondante du rapport Secten, à laquelle sont rajoutés les sous-secteurs des biens d'équipement et matériels de transport et du papier/carton.

<sup>23</sup> *Source* : Perspectives de marché pour les SMR/AMR en France – Étude E-Cube/SFEN, mai 2025.

**Hubs énergétiques : polyvalent et intégration avec les énergies renouvelables (électricité, chaleur, hydrogène, dessalement, etc.)<sup>24</sup>**



Source : Alliance européenne pour les SMR/AMR

**1.1.3.2. Une implantation plus flexible**

Du fait de sa petite taille, le petit réacteur offre le potentiel d'une **implantation flexible** et au plus proche des besoins d'électricité et de chaleur : certains sites inappropriés pour un réacteur de forte puissance (apport insuffisant en eau de refroidissement, densité d'habitations trop élevée pour être compatible avec les périmètres d'évacuation notamment) peuvent potentiellement accueillir un SMR/AMR.

Ces derniers pourraient ainsi s'implanter au sein des zones industrielles, voire à proximité de zones d'habitation. Par exemple, **la ville de Vineyard City dans l'Utah**, dont la maire Julie FULLMER a été auditionnée dans le cadre du groupe de travail<sup>25</sup>, projette d'implanter des SMR/AMR sur un site industriel en construction au sein de la ville et destiné à accueillir des industries fortement consommatrices d'énergie.

**Le projet de la ville de Vineyard City dans l'Utah**

L'État de l'Utah est un producteur excédentaire d'énergie dont les principales sources sont le charbon et le gaz. Or, pour décarboner sa consommation, la ville de Vineyard City recherche des sources d'énergie fiables sans émission de GES et à un prix proche de celui des énergies fossiles, bien qu'ils utilisent aujourd'hui des énergies renouvelables comme l'éolien ou le solaire. C'est dans ce cadre que la collectivité s'est intéressée depuis quelques années à la technologie des SMR/AMR et s'est engagée dans un dialogue avec l'État de l'Utah pour envisager une éventuelle implantation sur leur territoire. L'État soutient les entreprises développant les concepts de SMR/AMR : il a notamment créé un centre de recherche qui travaille en synergie avec les universités, le laboratoire national de l'Idaho (*Idaho National Laboratory*) et le ministère en charge de l'énergie pour que les entreprises puissent tester leurs technologies.

La ville a engagé une campagne de sensibilisation de la population à l'éventuelle implantation de SMR/AMR à proximité des lieux d'habitation. Elle étudie en effet l'installation de petits réacteurs sur un technopôle en construction au cœur de l'agglomération, *The Utah Innovation Center*, devant accueillir des universités, des institutions de recherche ainsi que des activités consommatrices d'énergie.

<sup>24</sup> Note : Infographie Tractebel avec l'illustration de leur vision, janvier 2021.

<sup>25</sup> Séance de travail du 7 octobre 2024.

La capacité des SMR/AMR à s'implanter à proximité des besoins en énergie peut leur permettre de satisfaire des besoins spécifiques et localisés. Ainsi, l'alimentation en électricité des **data centers** a été identifiée comme un potentiel marché spécifique pour les petits réacteurs : l'AIE estime que 25 GW de l'électricité produite par des SMR seraient spécifiquement dédiées aux *datas centers*, principalement aux États-Unis<sup>26</sup>.

La flexibilité d'implantation des petits réacteurs permet enfin d'envisager l'usage de l'énergie nucléaire dans **les espaces isolés**, non raccordés aux réseaux électriques : les territoires insulaires, les territoires isolés des lieux d'implantation humaine (Grand Nord canadien, *etc.*). Les petits réacteurs peuvent également répondre aux besoins de petits pays pour lesquels les réacteurs de grande puissance présentent moins d'intérêt en raison de la taille du marché national et des capacités d'investissement de l'État dans la technologie nucléaire.

### 1.1.3.3. Une énergie à un prix potentiellement compétitif

Même si le coût final de l'énergie qui serait produite et commercialisée par des SMR/AMR n'est pas encore connu, les porteurs de projet annoncent un coût potentiellement compétitif lié au caractère modulaire du réacteur, dont les équipements ou les systèmes seront conçus, fabriqués, assemblés et testés en usine et produits en série. **L'effet de série** pourrait assurer ainsi la rentabilité du modèle économique des petits réacteurs (*cf.* annexe 4.1). En effet, la part très élevée du coût fixe de l'infrastructure de sûreté et sécurité dans le coût total d'un réacteur quel qu'il soit (coût total du réacteur qui compte pour environ 70 % du coût de l'énergie produite) a conduit jusqu'à présent l'industrie nucléaire à maximiser la puissance par unité pour bénéficier de l'effet d'échelle sur le coût de l'énergie produite. Les SMR/AMR devront donc compenser la faiblesse de l'effet d'échelle par des économies très significatives *via* la modularité, la fabrication en usine, la standardisation et l'effet de série.

Cet effet de série n'est toutefois garanti que par la **profondeur du marché**. Cette dernière devrait être générée par les besoins croissants au niveau mondial en énergie, en particulier décarbonée, ainsi que par l'apparition de nouveaux débouchés spécifiques pour ces réacteurs nucléaires d'un nouveau type – usages industriels avec une implantation de la production d'énergie au plus près du site de transformation, réseaux de chauffage urbain, territoires isolés et marchés de petite taille – moins accessibles, *etc.*

Toutefois, à ce stade, aucun projet n'a apporté la preuve de sa rentabilité économique. En effet, la majorité des projets actuels cherchent à mettre au point un démonstrateur à partir d'une technologie plus ou moins mature. Une fois la technologie éprouvée et autorisée par les autorités de sûreté, un réacteur « *premier de série* » pourra être mis au point puis exploité, avant d'industrialiser la production des réacteurs, phase qui permettra d'atteindre les effets de série et la rentabilité économique.

## 1.2. Dans le monde, aucun pays n'a encore industrialisé un modèle de petits réacteurs nucléaires, toutefois quelques pays se démarquent par une certaine avancée

### 1.2.1. Aucun projet dans le monde n'a atteint le stade industriel

#### 1.2.1.1. Un degré d'avancement inégal des projets à l'échelle mondiale

La connaissance de l'état d'avancement des projets de SMR/AMR déployés à l'échelle mondiale a fait l'objet de nombreuses discussions au sein du groupe de travail : en effet, il existe indéniablement une compétition internationale, notamment entre les pays déjà nucléarisés, dans le domaine des petits réacteurs nucléaires. Toutefois, il est difficile de déterminer exactement le niveau d'avancement de chaque pays – et de chacun des projets – car peu d'États ont affiché publiquement leur stratégie nationale en la matière. Seuls le Canada et la République Tchèque ont publié une feuille de route fixant les principes du cadre réglementaire d'autorisation des petits réacteurs, les concepts à l'étude et pré-identifiés des sites adaptés à leur implantation<sup>27</sup>. Par ailleurs, les différents projets de SMR/AMR étant développés pour une part non négligeable par des acteurs privés, notamment des *start-ups*, ce qui est le cas en France, excepté le projet Nuward d'EDF, l'état de maturité technologique des différents concepts (ou *design*) n'est pas précisément connu.

<sup>26</sup> Par exemple en 2023, Standard Power a annoncé son intention de collaborer avec NuScale pour déployer des SMR dans deux *data centers* dans l'Ohio et en Pennsylvanie.

<sup>27</sup> Source : [https://mpo.gov.cz/assets/en/guidepost/for-the-media/press-releases/2023/11/Czech-SMR-Roadmap\\_EN.pdf](https://mpo.gov.cz/assets/en/guidepost/for-the-media/press-releases/2023/11/Czech-SMR-Roadmap_EN.pdf)

L'OCDE, via la NEA, publie annuellement un *Dashboard* recensant les projets de SMR/AMR lancés à l'échelle mondiale et évaluant leur degré d'avancement en fonction de 6 critères dont l'appréciation se fonde sur des déclarations publiques. Dans son rapport de février 2024, la NEA a recensé et évalué 56 projets, dont 41 ont été répertoriés par l'AIEA<sup>28</sup> : tous les projets existants n'ont donc pas été évalués. Ce classement constitue toutefois le travail existant le plus abouti pour évaluer les projets en cours de petits réacteurs nucléaires à l'échelle mondiale.

### La méthode d'évaluation des projets de SMR/AMR par la NEA

Le classement de la NEA est fondé sur l'analyse de six critères : l'aptitude à solliciter une autorisation de construction et d'exploitation (*licensing readiness*), la sécurisation d'un site d'implantation (*siting*), la maturité technique et la disponibilité industrielle du combustible (*fuel*), le degré d'interaction avec les parties prenantes, indicateur de l'acceptabilité du projet par le public (*engagement*), la maturité de la chaîne d'approvisionnement (*supply chain*) et l'avancement du financement (*financing*). Les projets sont évalués sur la base d'informations publiques. La NEA transmet aux porteurs de projet une évaluation provisoire sous forme écrite qu'ils peuvent commenter, sans pour autant en valider le contenu. Chaque projet reçoit une note allant de 1 à 6 en fonction de son niveau de maturité par critère (cf. annexe 4.2).

Lors de son intervention à la séance de travail du 16 septembre 2024, le représentant de l'OCDE/NEA avait fait remarquer que le niveau d'avancement d'un projet est tributaire d'un cadre politique, juridique et réglementaire adapté, le développement d'un cycle du combustible complet, la mise en place d'une chaîne d'approvisionnement et des infrastructures supports, un vivier de compétences adaptées, ainsi qu'un soutien public fort et un modèle économique viable et concurrentiel.

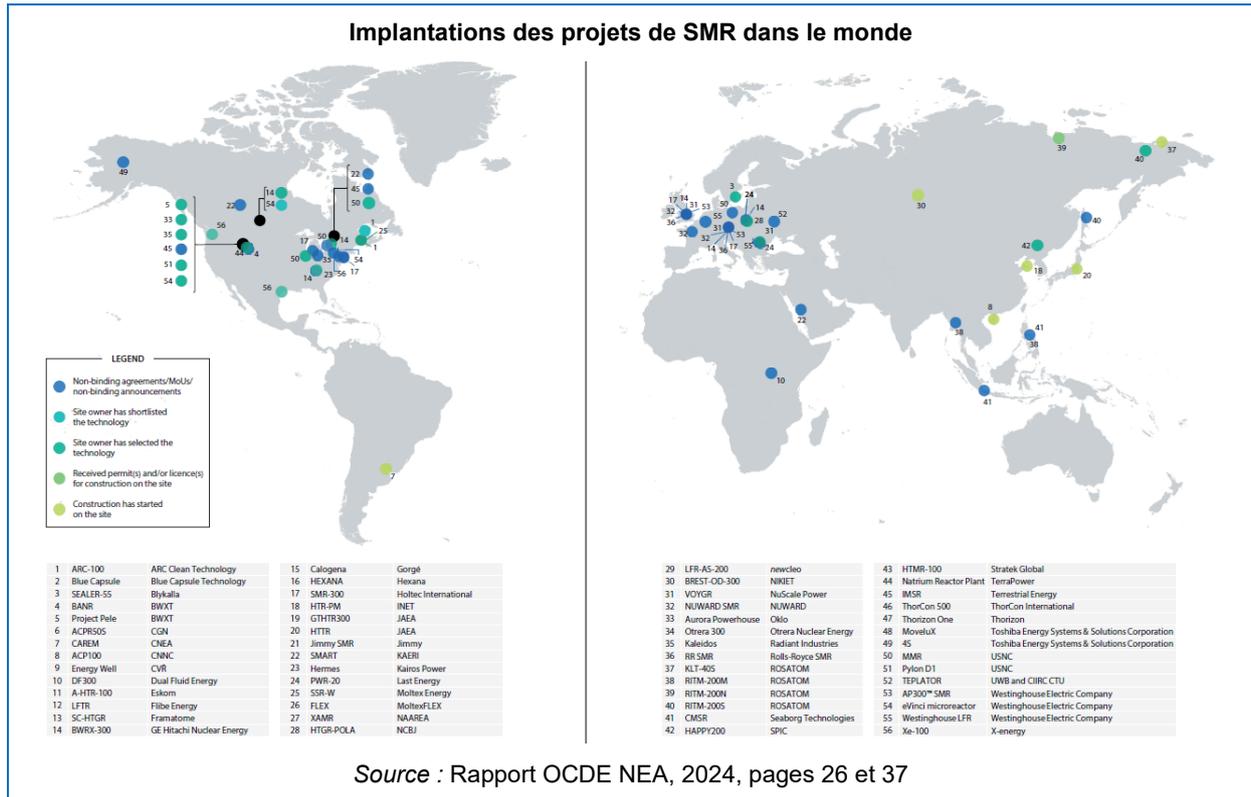
#### 1.2.1.2. De très nombreux projets mais quelques-uns seulement ont atteint le stade de la construction

**Les projets de petits réacteurs sont concentrés dans un nombre restreint de pays.**

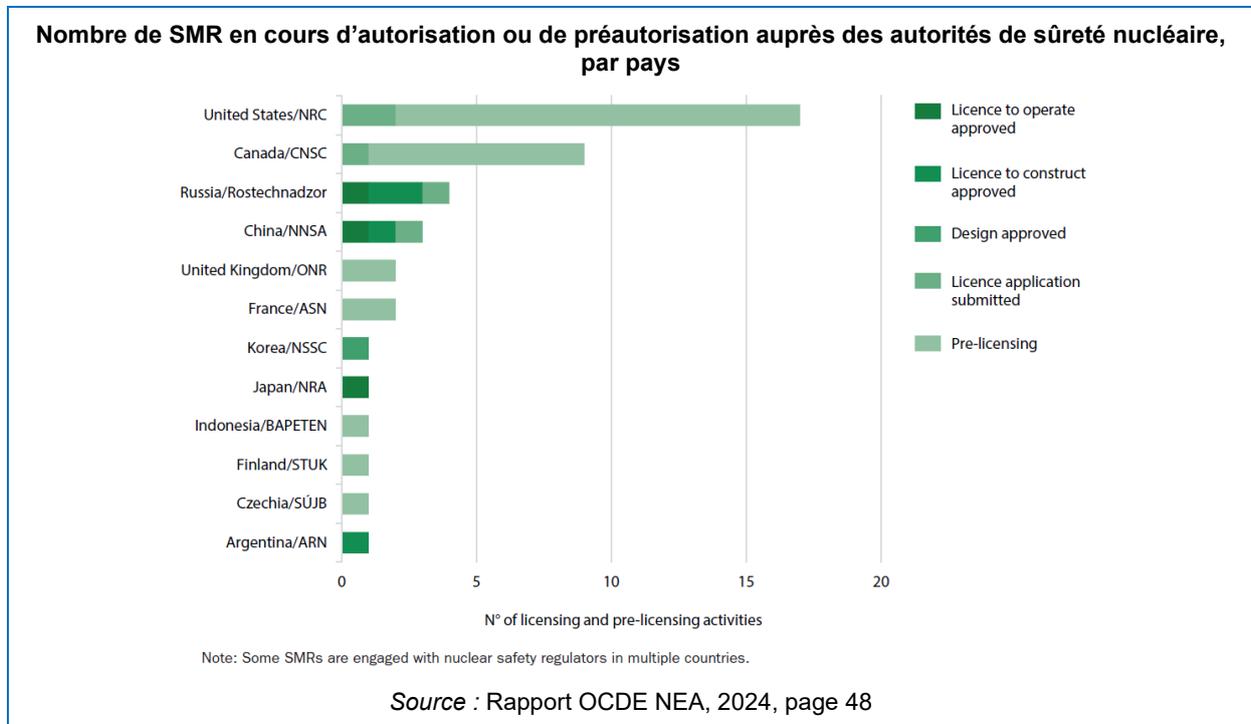
Si on considère le nombre de projets lancés, l'Amérique du Nord est en tête de la course aux SMR/AMR, suivie de près par la Russie et la Chine, puis par l'Europe et plus particulièrement la France qui comptabilise 11 projets. Le Royaume-Uni, la Pologne, la République tchèque et l'Ukraine ont également lancé des projets, soit comme concepteur de réacteur, soit comme utilisateur.

---

<sup>28</sup> L'AIEA recense de son côté 68 designs de SMR/AMR.



Toutefois, sur l'ensemble des projets recensés, la NEA ne compte que 20 projets en phase de pré-autorisation, 5 pour lesquels la demande d'autorisation a été soumise, 1 pour lequel le design du projet a été approuvé, 4 projets ayant obtenu l'autorisation de construction et seulement 3 l'autorisation de fonctionnement. Dans leur grande majorité, les projets de SMR/AMR lancés dans le monde n'ont donc pas encore débuté le processus d'autorisation auprès de leur régulateur national.



Seuls 11 projets sur les 56 évalués par la NEA ont fait l'objet d'au moins une annonce publique d'investissement financier, qui est un signe du sérieux et de la crédibilité du déploiement du projet jusqu'à son terme. Ces projets sont implantés en Chine, en Russie, au Japon, aux États-Unis et au Canada.

Parmi ces projets, seuls 3 réacteurs sont d'ores et déjà en fonctionnement :

- le réacteur HTR-PM au gaz en Chine ;
- le réacteur KL-40S, réacteur flottant en Russie ;
- le réacteur HTRR, démonstrateur au Japon, qui ne devrait pas cependant déboucher sur une industrialisation en série.

4 autres réacteurs sont en construction :

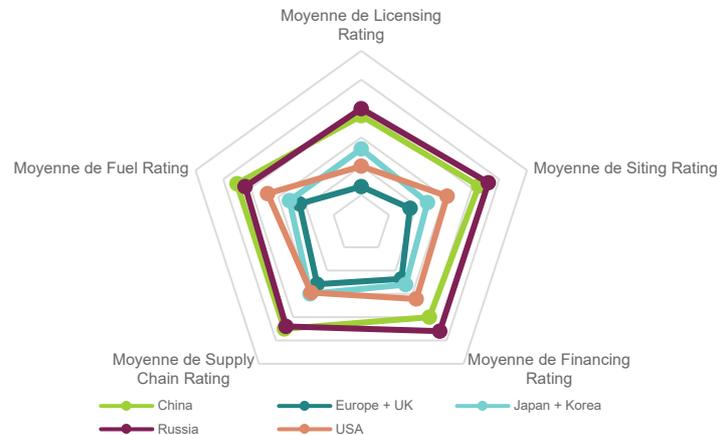
- le réacteur ACP 100, réacteur à eau en Chine ;
- le réacteur BRESTO D 300, au plomb en Russie, projet expérimental qui n'est pas appelé, *a priori*, à se déployer en série ;
- le réacteur RITM-200 N, à eau pressurisée terrestre en Russie, issu des brise-glaces ;
- le réacteur CAREM, argentin, qui est un *small reactor* plus qu'un SMR modulaire à proprement parler, c'est-à-dire recherchant des effets de série.

Parmi les 4 autres réacteurs de cette liste de 11 têtes de série financées, on compte un réacteur flottant développé en Chine dans le cadre d'un grand plan d'investissement chinois (ACPR50S), et 3 autres réacteurs dont l'un de taille très réduite, mobile et refroidi au gaz (Project Pele, projet militaire développé aux États-Unis, porté par BWS Technology) ; et le projet de démonstrateur à haute température à sel fondu Hermès développé aux États-Unis, dans le Tennessee, dont l'autorisation de construction a été donnée en septembre 2024, *post* édition du rapport NEA, par le régulateur, ce qui en fait la première autorisation de construction d'un réacteur de Génération IV octroyée aux États-Unis.

Parmi ces 11 têtes de séries financées ne figure donc qu'un seul réacteur commercial : le réacteur BWRX-300 porté par General Electric au Canada (à Darlington, Ontario), qui vient d'obtenir son autorisation de construction, *post* édition du rapport NEA (les travaux de terrassement sont en cours).

Aussi, le classement du *Dashboard* de la NEA montre **une nette avance de la Chine et de la Russie** en matière de SMR et AMR, en particulier avec des réacteurs déjà en activité et en construction.

### Détail de la notation NEA par critère pour chaque zone géographique



Source : Groupe de travail à partir des données de la NEA<sup>29</sup>

L'avance technologique de la Chine, dont l'information publique sur l'avancement de ses projets est parfois lacunaire, a été confirmée par l'intervention de Tony D'ALETTO, attaché nucléaire à l'ambassade de France à Beijing, lors de la séance du 7 octobre 2024. Ce dernier a mis en avant les atouts de la Chine pour déployer dans un horizon proche des petits réacteurs : une *supply chain* nucléaire implantée et active (pour les réacteurs de grande puissance) depuis 20 ans dans le pays, une forte capacité de R&D et une recherche engagée dans l'ensemble des technologies (eau, gaz, sodium, sels fondus), des

<sup>29</sup> Pour établir le graphique, 4 projets chinois, 13 projets russes, 17 projets américains, 9 projets japonais et coréens, et 18 projets européens et britanniques ont été analysés selon leur état de maturité.

capacités de financement, des autorisations déjà délivrées pour plusieurs designs ainsi que la taille et la dynamique du marché chinois.

### La nette avance de la Chine dans le secteur des SMR/AMR<sup>30</sup>

La Chine est confrontée à un enjeu de décarbonation de taille : 48 % des émissions de CO<sub>2</sub> en Chine sont issus de la production d'énergie (vs 10 % en France) et 1/3 de l'industrie (vs 18 % en France) ; le mix énergétique chinois repose pour une grande part sur des énergies carbonées (82 %) et la production d'électricité est à 63 % carbonée. Dans ce cadre, les SMR/AMR apparaissent comme un vecteur de décarbonation de l'énergie aux côtés du déploiement des réacteurs de grande puissance et des EnR.

La Chine peut appuyer le déploiement des petits réacteurs nucléaires sur certains atouts : (i) une *supply chain* nucléaire au meilleur niveau mondial, implantée dans le pays depuis 20 ans avec un réseau de sous-traitants intégrés, des montages industriels simplifiés et utilisant déjà la modularité ainsi que des techniques très innovantes (soudages automatisés, etc.) et des compétences ; (ii) une grande capacité de R&D avec des recherches lancées dans l'ensemble des *designs* de SMR/AMR (eau, gaz, sodium, sels fondus) ; (iii) des capacités de financement mobilisables rapidement ; (iv) une autorité de régulation aguerrie aux projets de SMR/AMR puisqu'elle a déjà accordé des autorisations, donc des délais réglementaires maîtrisés ; (v) l'existence de sites pouvant potentiellement accueillir ces réacteurs, notamment pour des usages qui utilisent d'ores et déjà l'énergie nucléaire (usages industriels – dessalement, hydrogène, etc., chauffage urbain, *coal to nuclear* : substitution d'une centrale au charbon par un SMR installé sur site) ; (vi) la maîtrise du combustible (approvisionnement en matière première, enrichissement et fabrication, même si le (re)traitement et le recyclage ne seront maîtrisés que d'ici 2050). L'enjeu du combustible n'apparaît pas discriminant pour les projets chinois (accès à la matière première *via* les mines nationales et en Afrique et achat à des compagnies minières comme Orano ; maîtrise de l'enrichissement de l'uranium, capacités de (re)traitement prévues).

Outre les premiers de série déjà en fonctionnement (*cf. supra*), plusieurs projets de petits réacteurs chinois vont très prochainement entrer en construction ou en production : 2 réacteurs HTR-PM (refroidis à l'hélium) ont démarré en septembre-novembre 2021 et auront pour fonction première de fournir de la chaleur pour l'industrie : le *design* inclut le couplage de deux réacteurs à une turbine unique<sup>31</sup> ; le réacteur ACP-100 (à eau) est en construction sur un site de l'île de Hainan, sur lequel il y a déjà des PWR en fonctionnement (hydrogène, dessalement, chauffage) : la fin des travaux était prévue pour mai 2025, le réacteur aura été construit en 70 mois ; le réacteur TMSR (sels fondus), petit réacteur de 2 MW, a reçu l'autorisation d'exploitation de l'autorité de sûreté : le réacteur a démarré au deuxième trimestre 2024. De nombreux autres modèles sont en phase d'étude.

Pour autant, le pays semble miser sur les réacteurs de grande puissance pour assurer la majorité de ses objectifs nationaux de décarbonation.

**Les États-Unis et le Canada** se démarquent également par une avance certaine sur l'Europe, avec un premier de série en construction : le réacteur BWRX-300 conçu par General Electric Hitachi a obtenu une autorisation de construction sur le site de Darlington d'Ontario Power au Canada en avril 2025. Le producteur d'électricité américain *Tennessee Valley Authority* a déposé en mai 2025 une demande d'autorisation de construction pour ce réacteur sur le site de Clinch River dans le Tennessee. Ce réacteur fait aussi l'objet d'un processus de pré-autorisation en Pologne. Certains projets américains ont été lancés depuis très longtemps (2006 pour le projet Terra Power lancé par Bill GATES).

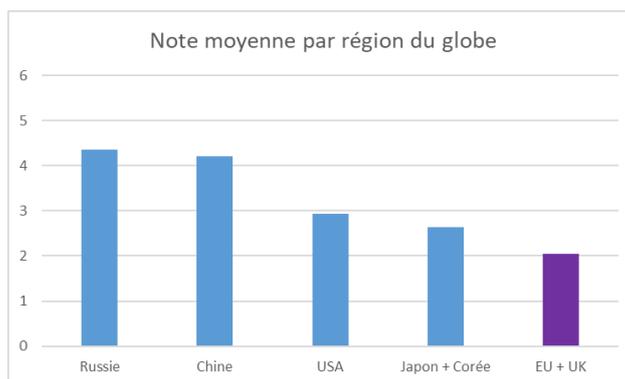
### En Europe, les projets sont à un stade moins avancé.

Pour qualifier le degré d'avancement des projets européens et plus spécifiquement français, le groupe de travail s'est fondé sur l'évaluation du *Dashboard* de la NEA, en excluant toutefois le critère relatif à l'*engagement*, (indicateur de l'acceptabilité du projet) qui pourrait fausser les comparaisons entre projets peu avancés n'ayant pas encore choisi leur site. **L'Union européenne et le Royaume-Uni** sont significativement en retard sur leurs concurrents, notamment la Russie, la Chine, les États-Unis et le couple Japon/Corée du Sud.

<sup>30</sup> Éléments recueillis lors de l'intervention de Tony D'ALETTO, lors de la séance de travail du 7 octobre 2024.

<sup>31</sup> Le réacteur HTR-PM se constitue de 2 cœurs de 210 MW couplé à une seule turbine. La prochaine étape est de constituer 3 paires de 2 réacteurs.

## Note moyenne du classement NEA par zones géographiques

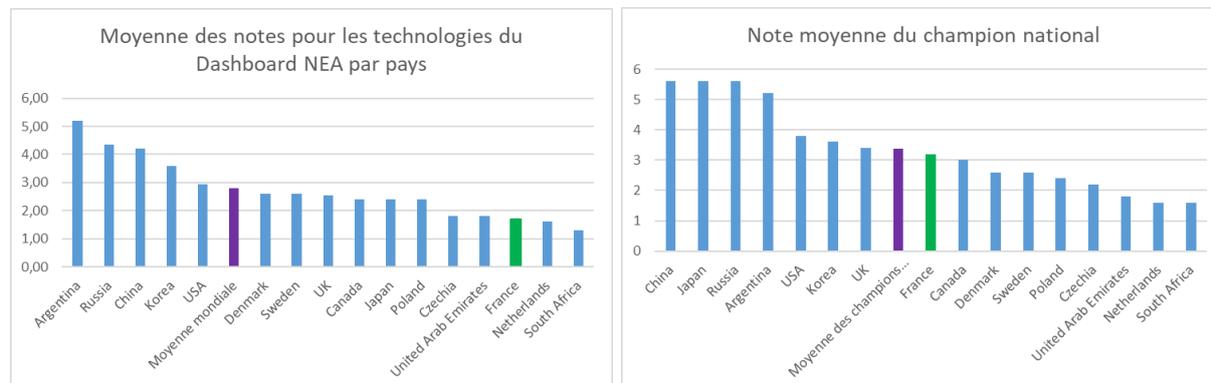


Source : Groupe de travail à partir des données de la NEA<sup>32</sup>

Prise isolément, **la France** se situe dans le groupe des pays dont les projets sont les moins avancés. Les projets français en cours n'en sont, en effet, qu'au stade de la conception du *design*. Toutefois, en ne considérant que le champion national de chaque pays, la France remonte dans le classement grâce au projet Nuward, bien noté dans le *Dashboard*.

Il faut toutefois rappeler, comme le représentant de la NEA l'a indiqué au Groupe de Travail, qu'il manque à ce classement un critère essentiel, qui est celui de la modularisation et de la chaîne industrielle qui permettront l'effet de série, incontournable pour que ces projets espèrent atteindre la viabilité économique. Selon ce critère, aucun projet ne se détache, le retard de la France et de l'Europe est dès lors parfaitement rattrapable.

## Note moyenne du classement NEA par pays



Source : Groupe de travail à partir des données de la NEA<sup>33</sup>

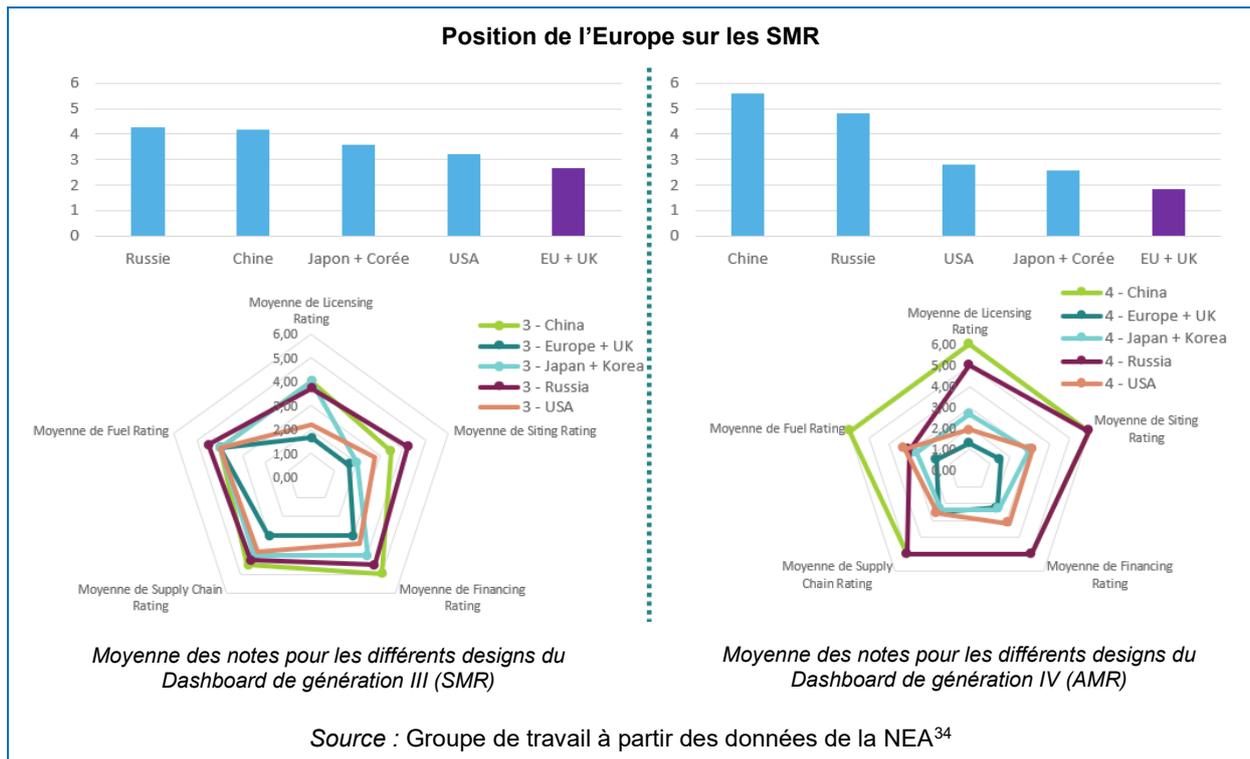
Il est important de rappeler que la France présente un **atout** dans la course aux SMR/AMR : son expertise nucléaire, relevée dans le classement de la NEA qui note que ce sont principalement les pays déjà nucléarisés qui développent des technologies de SMR/AMR, alors que des pays non nucléarisés envisagent l'implantation de petits réacteurs sur leur territoire (Pologne, Danemark, Arabie Saoudite, Indonésie). La France avait par ailleurs, dans ce domaine, développé pendant une dizaine d'années le projet Astrid, après l'arrêt de Superphénix en 2002, qui lui a permis de recueillir des données essentielles pour l'avancement des *designs* de réacteurs rapides au sodium français (technologie parmi les AMR les plus matures). Elle a, également, doté ses sous-marins de petits réacteurs, toutefois non véritablement modulaires (projets de Technicatome, de Naval Group et du CEA).

<sup>32</sup> Pour établir le graphique, 4 projets chinois, 13 projets russes, 17 projets américains, 9 projets japonais et coréens, et 18 projets européens et britanniques ont été analysés selon leur état de maturité.

<sup>33</sup> Pour établir le graphique, 4 projets chinois, 13 projets russes, 17 projets américains, 9 projets japonais et coréens, et 18 projets européens et britanniques ont été analysés selon leur état de maturité.

Une analyse de l'avancement des projets par critère (*Licensing, Fuel, Siting, Supply chain et Financing*) montre qu'il est nécessaire de **distinguer les SMR et les AMR** dans les classements internationaux car les notes sur le combustible et la *supply chain* peuvent être sensiblement différentes. Sur les SMR, l'Europe est légèrement en retard par rapport à ses concurrents sur la plupart des critères, mais rivalise encore avec ses concurrents. En revanche, le retard de l'Europe est notable sur les AMR par rapport aux modèles chinois et russes. La Chine et la Russie disposent en effet chacune d'un projet d'AMR à un niveau de maturité très avancé.

Il faut toutefois nuancer ce constat, en rappelant que sur la technologie AMR des réacteurs rapides refroidis au sodium, la France a une expérience industrielle (Phénix et Superphénix, non pris en compte par la NEA, car les réacteurs sont arrêtés et non modulaires), dispose de site et maîtrise l'ensemble de la chaîne de la valeur sur le cycle du combustible (de l'amont à l'aval).



## Aucun projet au niveau mondial n'a encore validé les effets de série et de production modulaire.

Les projets les plus avancés en sont au stade de la mise en production d'un réacteur tête de série. Or, la concrétisation finale de ces projets est la commercialisation de réacteurs qui ont atteint un niveau de rentabilité économique par les effets de modularité et de série. Seul le réacteur russe et flottant RITM-200S, pour lequel la NEA dispose de sources montrant que la Russie est en train de déployer des infrastructures permettant d'accueillir plusieurs équipements du même type, commence à être produit en plusieurs exemplaires. Cet aspect est globalement absent du *Dashboard* de la NEA, faute de données.

### 1.2.2. Des États engagés dans la course aux petits réacteurs nucléaires dont l'issue n'est pas encore connue

#### 1.2.2.1. Les projets de petits réacteurs nucléaires bénéficient de soutiens publics partout dans le monde

Lors de son intervention, le représentant de l'OCDE/NEA a reconnu que la construction de têtes de série s'accompagne d'un haut niveau de risques, que le marché et les financeurs privés ne peuvent assumer, rendant fondamental le **soutien public** dans le déploiement des SMR/AMR.

<sup>34</sup> Pour établir le graphique, 4 projets chinois, 13 projets russes, 17 projets américains, 9 projets japonais et coréens, et 18 projets européens et britanniques ont été analysés selon leur état de maturité.

Les pays concurrents des pays européens accordent des soutiens aux projets de petits réacteurs, qu'il est souvent difficile de quantifier faute d'informations publiques disponibles, notamment pour certains pays (Russie, Chine). Il est encore plus délicat d'estimer le volume **d'investissements privés**.

D'après les personnes auditionnées, des soutiens financiers publics relativement importants (à l'échelle du milliard d'euros) ont été déployés dans les pays où les projets sont les plus matures, comme aux États-Unis et en Chine. Par ailleurs, les électriciens nationaux des pays nucléarisés ont globalement tous développé un projet de petit réacteur nucléaire et dans l'ensemble des pays comptabilisant des porteurs de projets, les plus grandes institutions de recherche dans le nucléaire sont impliquées.

### Les soutiens publics aux petits réacteurs aux États-Unis et en Chine<sup>35</sup>

**Aux États-Unis**, il existe un programme d'aides soutenant les réacteurs avancés, dont les SMR/AMR, doté de 3 Md\$ (*Advanced Reactor Demonstration Program*) : ceux de X-Energy et de Terra Power ont reçu chacun plus d'1 Md\$. General Electric Hitachi a fait une demande de subvention de 800 M\$ pour son projet de SMR dans le Tennessee. Au niveau local, les États accordent également des aides publiques pour soutenir les projets de production d'énergie décarbonée, parfois en centaines de M\$. Il existe également des appels à projets permettant à des projets innovants de travailler en lien étroit avec les instituts de recherche nationaux pour accélérer leur développement technologique.

**En Chine**, l'ensemble des entreprises du secteur nucléaire sont des entreprises d'État (dont les comptes ne sont pas publiés). La Chine a la capacité de mobiliser des fonds massifs pour déployer sa stratégie nucléaire. Elle ouvre depuis peu le capital des entreprises nucléaires à des entreprises publiques hors de ce secteur pour consolider leur assise financière.

### Dans l'Union européenne, une alliance industrielle a été créée.

En 2021, la Commission a mandaté la SNETP<sup>36</sup>, Nuclear Europe<sup>37</sup> et ENSRE (association des régulateurs de sûreté nucléaire européens) pour travailler sur l'identification des différents facteurs de développement des SMR/AMR dans l'Union européenne. En 2023, une consultation de l'ensemble des parties prenantes sur les facteurs identifiés (marchés potentiels, sûreté et *licensing*, *supply chain*, R&D, financements) a été organisée. Cette réflexion a permis d'introduire les SMR/AMR dans la liste des technologies stratégiques dans l'atteinte du *Net-Zero Industry Act* de décembre 2023 approuvé par le Parlement européen. La première réunion de l'assemblée générale de **l'Alliance industrielle** s'est tenue en mai 2024 à Bruxelles.

L'Alliance industrielle européenne pour les SMR a été créée à l'instar de celles mises en place pour les batteries et l'aviation zéro émission. Cet instrument de politique industrielle encourage la collaboration transfrontalière et les économies d'échelle en R&D, exploite plus efficacement l'investissement privé, réduit la concurrence nationale contre-productive et renforce l'ensemble des écosystèmes d'innovation. Ne distribuant pas d'argent public cet instrument évite l'écueil de la capture des financements par les entreprises qui disposent du plus grand pouvoir de lobbying et dont la technologie n'est pas forcément la plus performante. En revanche, les projets sélectionnés par les alliances industrielles ont plus de chances de bénéficier par la suite de financement au titre de Projet Important d'Intérêt Européen Commun (PIIEC).

L'alliance industrielle pour les SMR est composée de 298 membres, comprenant à la fois des porteurs de projets, des sociétés d'ingénierie, des organismes publics, des fabricants (d'équipements et de combustible) et des clients (acteurs énérgo-intensifs, associations industrielles, *etc.*) ainsi que des organisations de la société civile intéressées par les sujets nucléaires. Les autorités de sûreté sont conviées aux réunions de travail. Les travaux de l'Alliance sont organisés autour de « *groupes projets* » qui réfléchissent aux facteurs permettant la réussite de projets de SMR/AMR en Europe. Leurs thématiques recoupent largement les critères utilisés pour le classement du *Dashboard* NEA. Au terme d'un appel à projets, 9 projets sur 22 ont été sélectionnés, dont un projet américain, un projet britannique et 5 projets français (au moins partiellement). 5 projets sont de technologie PWR, un de technologie BWR, 2 réacteurs rapides refroidis au plomb et un réacteur à sel fondu. Les applications incluent la production électrique, le chauffage urbain et les usages industriels.

<sup>35</sup> Sur la base des auditions de Rita BARANWAL, lors de la séance de travail du 7 octobre 2024 et des données du rapport AIE de janvier 2025 pour les États-Unis et de l'intervention de Tony D'ALETTO, lors de la séance de travail du 4 novembre 2024.

<sup>36</sup> *Sustainable Nuclear Energy Technology Platform*.

<sup>37</sup> ex-FORATOM : Nuclear Europe fédère des associations d'acteurs nucléaires en Europe.

### Groupes de travail de l'Alliance industrielle européenne<sup>38</sup>

Les travaux de l'Alliance industrielle européenne sont organisés en 8 groupes :

1/ Groupe consacré aux applications industrielles que peuvent viser les SMR/AMR, c'est-à-dire les **marchés envisageables**. Le groupe a pour objectif de recenser les besoins de l'industrie en matière de SMR/AMR.

2/ Groupe portant sur la **R&D**. Il vise à fédérer la recherche et les besoins de recherches susceptibles d'être mutualisés ainsi qu'à organiser les échanges avec les porteurs de projet dans l'idée d'obtenir des synergies économiques et techniques.

3/ Groupe relatif à la **supply chain** pour fédérer les initiatives, recenser les demandes des porteurs de projets, établir la liste des technologies et besoins que la chaîne d'approvisionnement doit développer en commun (par exemple en matière de standards et normes dans le développement des composants).

4/ Groupe consacré aux **compétences**, s'attachant à déterminer si les compétences nécessaires sont présentes en nombre suffisant et sur les moyens de les développer.

5/ Groupe portant sur l'**engagement du public**, faisant la synthèse des questions que le public pose en matière de développement du nucléaire et des SMR/AMR en particulier.

6/ Groupe travaillant sur les **principes communs à promouvoir et à développer en Europe en termes de sûreté** et sur l'homogénéisation des normes prescrites par les régulateurs nationaux pour permettre des productions en série (la démarche d'EDF Nuward a par exemple associé six régulateurs européens).

7/ Groupe concernant le **combustible et la gestion des déchets**, avec la question de la mutualisation du cycle du combustible et la manière de gérer les déchets.

8/ Groupe traitant des **enjeux de financement**, notamment les mécanismes de financement communs, soit au niveau européen, soit au niveau des projets.

### En France, 12 projets ont été soutenus dans le cadre du programme « France 2030 ».

En France, 12 projets de SMR/AMR sont à l'étude. Outre le projet Nuward développé par EDF, ces projets sont portés par des start-ups. L'ensemble des technologies de petits réacteurs y est représenté, qu'il s'agisse du design du réacteur comme du combustible utilisé, y compris les combustibles au plutonium, ce qui distingue la France des États-Unis.

<sup>38</sup> Données recueillies au cours de l'intervention de l'Alliance européenne, lors de la séance de travail du 16 septembre 2024.

## Projets de petits réacteurs français déployés par des *start-ups* (y compris deux réacteurs à fusion, hors sujet pour ce document)



Source : France 2030

Les projets français ont été soutenus dans le cadre du programme « *France 2030* » lancé en 2021 qui comporte explicitement un axe visant à « *Faire émerger en France d'ici 2030 des réacteurs nucléaires de petite taille, innovants et avec une meilleure gestion des déchets* ». Ainsi, environ **900 M€ de financements publics** ont été mobilisés pour accompagner les porteurs de projets dans la mise au point d'un prototype de réacteur, dont une partie notable pour le projet Nuward. Au 31 décembre 2024, 630 M€ de crédits publics avaient déjà été engagés<sup>39</sup>.

Le choix français a en effet été, à travers un appel à projets largement ouvert dans sa première phase, de soutenir financièrement un nombre important d'acteurs en amont de la phase de conception des prototypes pour faire émerger de nombreux projets et des technologies variées, notamment les plus innovantes<sup>40</sup>. En mai 2025, le Secrétariat général pour l'investissement (SGPI) a annoncé un **resserrement** de l'aide publique sur les projets les plus prometteurs et l'inclusion du concept du CEA Archéos, basé sur un concept à l'eau, dans la liste des candidats examinés pour le second temps du programme de réacteurs nucléaires innovants.

### Une compétition internationale s'est lancée, dont l'issue reste incertaine.

Les éléments de classement mondiaux des pays dans la course aux petits réacteurs ne permettent pas toutefois de déterminer dès à présent quels seront les gagnants et les perdants de cette compétition internationale. Certes l'Europe n'a pas encore débuté la construction d'un démonstrateur, alors que plusieurs pays ont atteint cette phase et que certains ont construit et exploité une tête de série.

Toutefois, aucun projet n'a atteint le stade de la production en série et de la commercialisation et n'a donc mis au point un modèle de petits réacteurs à la compétitivité économique assurée. La diversité des technologies des projets lancés, y compris le combustible utilisé, et des marchés potentiels ne permet pas encore de déterminer le projet qui parviendra à valider les effets de série et atteindre un équilibre économique. Les experts auditionnés dans le cadre du groupe de travail se sont accordés sur le fait que le nombre de projets lancés à ce stade était important, plus de 80 projets étant recensés dans le secteur au niveau mondial, appelant nécessairement à des regroupements futurs et à une sélection au fur et à mesure de l'avancement des projets dans la maturité technologique<sup>41</sup>. Une forte sélection est nécessaire, car l'exploitation des effets de série et de la standardisation impliquent que seuls un petit nombre de réacteurs soient présents sur le marché.

<sup>39</sup> Source : Cour des comptes, Rapport sur l'exécution du budget 2024, 2025.

<sup>40</sup> Le cahier des charges de l'appel à projets prévoit 3 phases de maturation du projet, la troisième devant aboutir à la mise au point d'un démonstrateur.

<sup>41</sup> Point de vue notamment exprimé par Rita BARANWAL, lors de la séance de travail du 7 octobre 2024 et par Elisabeth RIZZOTTI, fondatrice de Newcleo, lors de la séance de travail du 4 novembre 2024.

Si le retard européen est indéniable, les dépassements de délais de certains projets, comme ceux de NuScale et Terra Power aux États-Unis, ont pu refroidir l'enthousiasme de certains porteurs de projets quant à l'horizon de sortie de leur démonstrateur. Le délai de disponibilité d'installations industrielles pour fabriquer le combustible et la disponibilité de la matière première (uranium enrichi et *a fortiori* plutonium, une matière sensible détenue uniquement par la puissance publique de quelques pays), sont également un élément déterminant pour garantir l'aboutissement du projet (*cf.* partie 2).

L'Europe, dont la France, développe une grande diversité de projets couvrant l'ensemble des technologies, y compris les plus innovantes. L'enjeu est de déterminer, dans cette course aux SMR/AMR, quels sont les atouts et les faiblesses de projets européens et français s'agissant de l'ensemble des facteurs nécessaires à l'atteinte de la phase commerciale pour un projet (technologie et combustible ; modèle économique et financements ; insertion dans les territoires en termes de risques, d'acceptabilité et de proximité des utilisateurs) ainsi que les actions à mettre en place pour garantir la réussite des projets les plus prometteurs.

**Une compétition mondiale s'est ouverte en matière de petits réacteurs nucléaires : de nombreux projets ont été lancés, les technologies étant principalement développées dans les pays déjà nucléarisés. L'enjeu est d'atteindre le stade industriel. L'Europe et la France sont en retard par rapport à leurs principaux concurrents, la Chine, la Russie et les États-Unis.**

**Les projets de SMR sont naturellement plus matures que les projets d'AMR, plus innovants et en même temps plus prometteurs en matière de fermeture du cycle du combustible et de diversification des usages (chaleur haute température). L'Europe est davantage en retard sur les projets d'AMR par rapport à ses concurrents.**

**Ce retard est toutefois rattrapable. Aucun pays n'a, en effet, encore réussi à industrialiser un projet de SMR/AMR. L'enjeu est d'opérer rapidement une sélection entre les projets concurrents, de favoriser ceux qui présentent une dimension européenne forte et d'accélérer sur les facteurs déterminants et facilitant leur réussite.**

## 2. Les perspectives pour les projets européens et français : une voie complexe mais encore possible pour atteindre le stade industriel

### 2.1. Quels chemins critiques pour les SMR/AMR européens et français ?

#### 2.1.1. Des scénarios de déploiement ambitieux d'ici 2050

Les prévisions de déploiement de SMR/AMR à l'échelle mondiale sont encore incertaines mais celles disponibles prévoient une forte demande de petits réacteurs nucléaires d'ici 2050. Un travail prospectif réalisé par le cabinet EY-Parthenon<sup>42</sup> estime que seront déployés à cet horizon **400 à 700 SMR/AMR**, principalement pour l'électricité et plus marginalement pour la production d'hydrogène, d'acier et d'aluminium, ainsi que pour le chauffage urbain. Les applications liées à l'utilisation de chaleur à haute température (ciment, verre, céramique) permises grâce à l'entrée sur le marché d'AMR de génération IV, ne verront le jour qu'après 2040. L'Asie représenterait 50 % de ce déploiement estimé de SMR/AMR, principalement la Chine, l'Europe 17 % et l'Amérique du Nord 16 %. L'AIE estime quant à elle que 1 000 petits réacteurs pourraient être déployés dans le monde d'ici 2050.

En considérant la fourchette basse de la prévision d'EY-Parthenon, soit le déploiement de 400 petits réacteurs dans le monde d'ici 2050 et la répartition géographique de la production établie dans cette étude, **68 SMR/AMR** pourraient être déployés en Europe d'ici 2050<sup>43</sup>. Sur cette base se pose la question des facteurs déterminants pour faciliter ce déploiement et des actions que les pouvoirs publics pourraient mettre en place afin de favoriser l'émergence de projets compétitifs en France et en Europe pour capter ce marché d'ici une trentaine d'années.

#### 2.1.2. Les facteurs déterminants pour la réussite des projets français et européens

Les contributions des porteurs de projets français au groupe de travail ont permis d'identifier certains **facteurs facilitant** le développement des projets jusqu'à l'étape industrielle. Ont notamment été identifiés de manière quasi-consensuelle : (i) l'adaptation du cadre juridique existant des installations nucléaires aux caractéristiques des SMR/AMR : petite taille et potentiellement portage par des acteurs privés ; (ii) la simplification, le raccourcissement et l'homogénéisation des procédures à l'échelle européenne afin de garantir les effets de série ; (iii) le désinquage des financements, spécifiquement la participation de la puissance publique à l'effort d'investissement.

#### La synthèse des contributions des porteurs de projet

Les porteurs de projet ont chacun produit une contribution écrite au groupe de travail. Dans ce cadre, ils ont mis en avant les points suivants, classés du plus fréquemment cité dans les contributions au moins fréquemment citées :

- les SMR/AMR offrent une valeur ajoutée certaine pour les systèmes énergétiques contemporains et futurs ;
- le cadre juridique doit être adapté aux spécificités des SMR/AMR, simplifié, standardisé et les procédures accélérées à l'échelle européenne ;
- l'engagement des pouvoirs publics est nécessaire en soutien aux projets de SMR/AMR, notamment en matière de financement, y compris au niveau européen ;
- les SMR/AMR ont besoin d'une filière industrielle structurée différemment de l'actuelle filière nucléaire ;
- l'accès aux combustibles (et aux matières), la gestion du cycle et des déchets ultimes sont des enjeux clés ;
- le modèle économique n'est pas encore stabilisé ;
- l'acceptabilité sociale d'une implantation de SMR/AMR proche des activités humaines est un enjeu fort des projets ;
- les compétences et la main d'œuvre sont à développer à la hauteur des besoins et à fiabiliser sur le long terme.

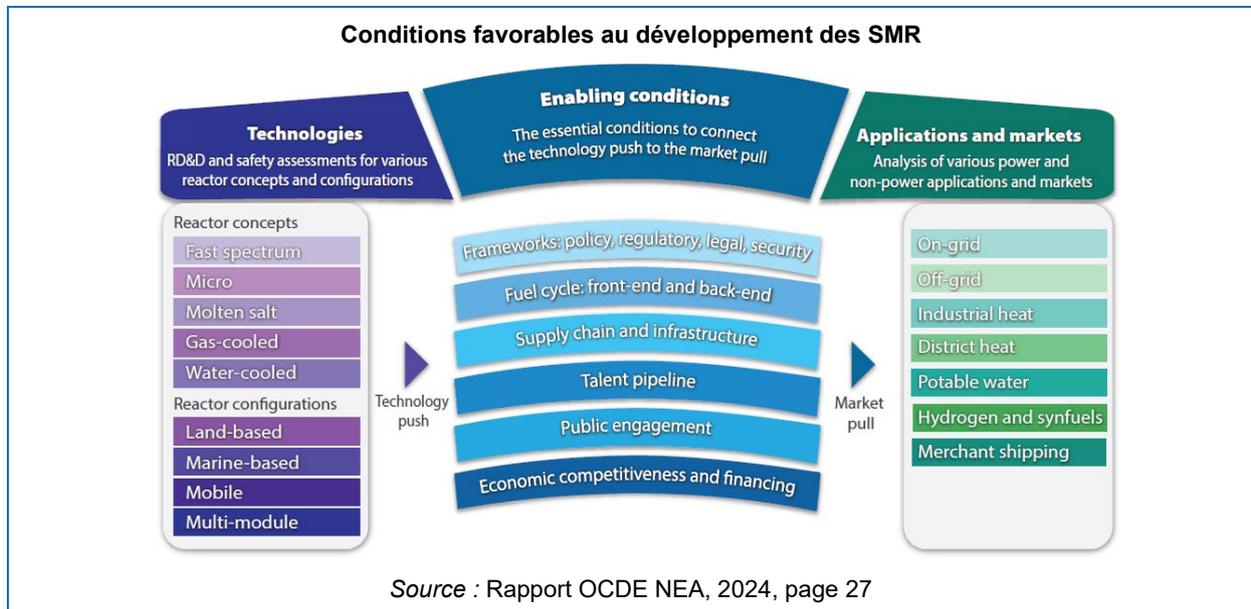
Lors de son intervention, le représentant de l'OCDE/NEA a également identifié les facteurs déterminants du développement des SMR/AMR, mettant en avant **deux conditions majeures** : l'existence d'une avancée technologique (*technology push*) et une demande du marché (*market pull*). D'autres conditions sont facilitantes comme la création d'un cadre politique, juridique et réglementaire adapté, le

<sup>42</sup> Source: *The true power of small modular reactors on the road to a sustainable energy future – Unveiling key opportunities and challenges*, EY Parthenon, mars 2024.

<sup>43</sup> En faisant l'hypothèse que leur puissance générique serait de 150 MWe.

développement d'une filière de fabrication du combustible et de gestion du cycle et des déchets, la mise en place d'une chaîne d'approvisionnement et des infrastructures supports, un vivier de compétences adaptées ainsi qu'un soutien public fort et un modèle économique viable et concurrentiel.

Au niveau français, la DGEC pilote un plan d'action pour le développement de SMR/AMR en France. En particulier, elle a lancé un travail d'identification des dispositions législatives et réglementaires susceptibles de freiner le développement des SMR et AMR en liaison avec les porteurs de projet et les autres administrations.



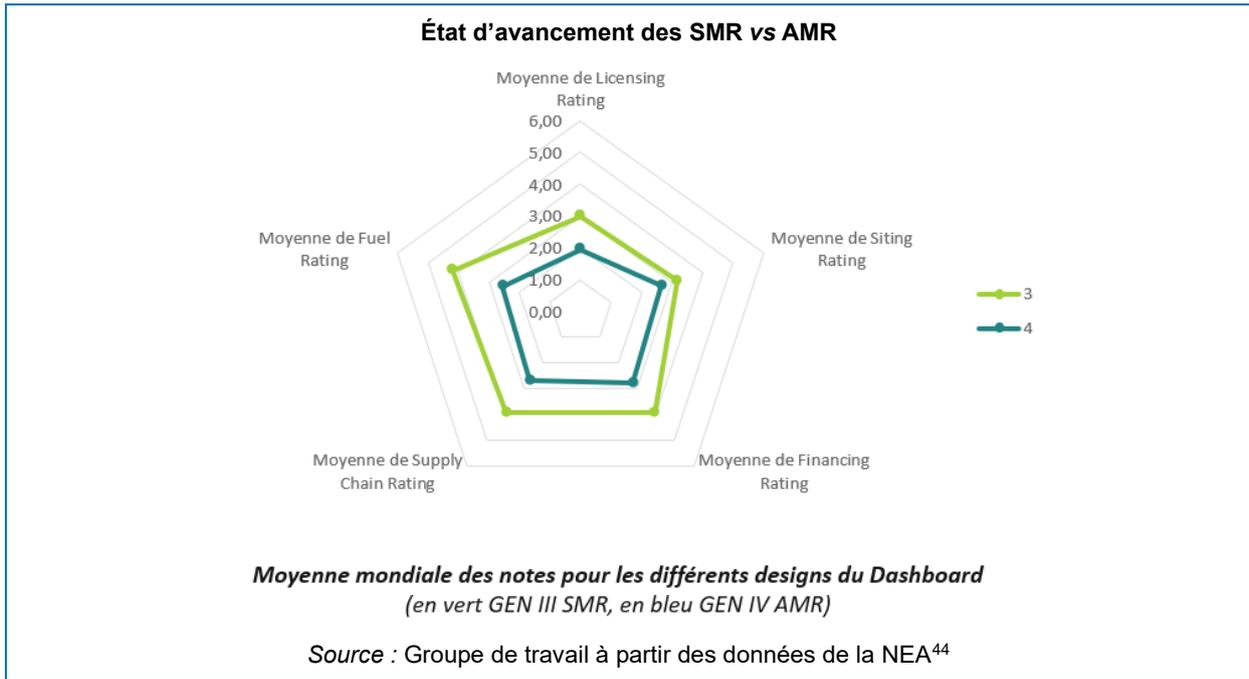
Il convient dès lors de déterminer les atouts et les faiblesses de l'Europe et de la France sur les facteurs déterminants (avancée technologique et demande du marché), pouvant être potentiellement limitants pour l'atteinte du stade commercial pour un projet. En parallèle, les conditions facilitantes doivent également être réunies pour maximiser les chances de réussite des projets.

## 2.2. Atteindre une maturité technologique à un horizon compétitif par rapport à nos concurrents

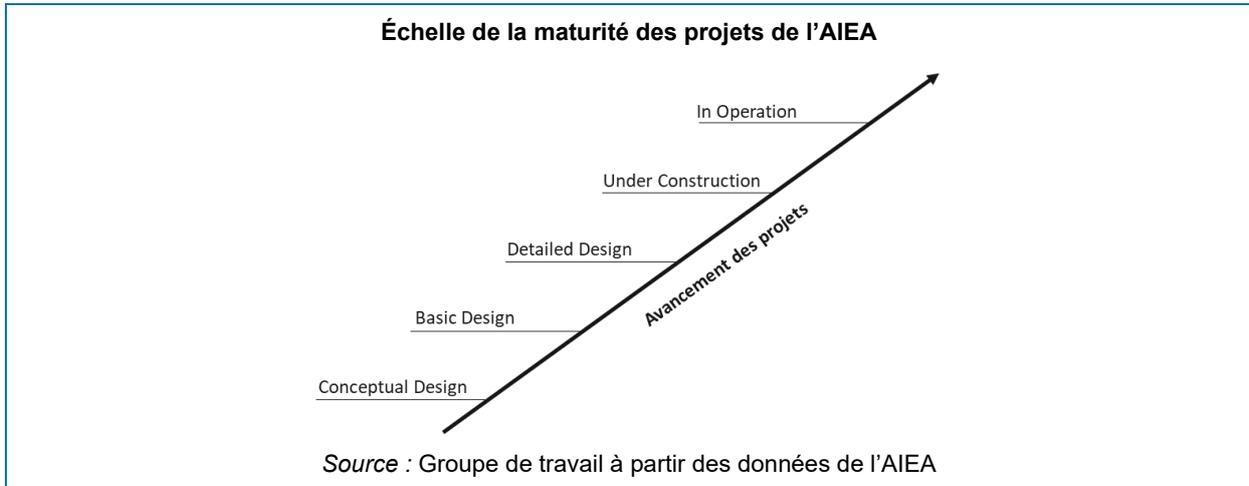
### 2.2.1. Pour les SMR, atteindre le stade d'industrialisation à un horizon relativement proche

La technologie des SMR, réacteurs refroidis à l'eau (bouillante ou pressurisée) a été considérée par la NEA, dans son classement, comme déjà maîtrisée, notamment s'agissant de l'*operating fuel fabrication facility*. Elle ne pose pas en effet de problème particulier s'agissant de l'approvisionnement en combustible. Ces réacteurs à technologie classique utilisent du combustible *Low Enrichment Uranium* (LEU ou LEU+) à uranium faiblement enrichi (moins de 6 %), utilisé aujourd'hui dans la majorité des centrales nucléaires. La NEA note que 16 réacteurs SMR à eau ont accès à des usines de fabrication de combustible existantes, alors qu'aucun AMR ne dispose d'installation industrielle pouvant fournir son combustible.

Aussi, les projets de SMR (réacteurs de Génération III et III+) ont atteint un niveau de maturité plus avancé que les projets d'AMR (réacteurs de Génération IV), notamment parce que leur cycle du combustible est davantage maîtrisé et qu'ils s'appuient sur la technologie de nombreux réacteurs en service depuis des décennies dans le monde. Il s'agit des projets Nuward (réacteur à eau pressurisée, d'une puissance électrique de 2 x 170 MWe initialement, 400 MWe dont 100 MWth aujourd'hui, visant également la cogénération) et de Calogena (réacteur « piscine », essentiellement calogène, de 30 MWth).



Aussi, le principal enjeu pour les projets de SMR/AMR européens est la construction rapide d'un démonstrateur pour ensuite construire une tête de série de façon reproductible et à un coût compétitif pour atteindre l'échelle industrielle dans un horizon de temps le plus proche possible des concurrents asiatiques, russes et américains qui ont déjà mis en fonctionnement quelques démonstrateurs, au regard du retard relatif pris par les projets français et européens dans la mise au point des *designs*.



Le groupe de travail n'a recueilli aucun élément permettant de se prononcer sur le réalisme des calendriers affichés par les porteurs de projet qui semblent relativement optimistes.

**Il n'est à ce stade pas possible d'assurer que les projets européens de SMR atteindront le stade industriel dans la décennie 2030.**

**L'enjeu est d'accompagner la maturation technologique d'un petit nombre de concepts pour qu'ils parviennent à la mise en fonctionnement d'un démonstrateur dans un horizon temporel proche de celui de leurs concurrents internationaux pour garantir la compétitivité des projets dans la compétition internationale.**

<sup>44</sup> Pour établir le graphique, 4 projets chinois, 13 projets russes, 17 projets américains, 9 projets japonais et coréens, et 18 projets européens et britanniques ont été analysés selon leur état de maturité.

## 2.2.2. Pour les AMR, maîtriser la technologie est essentiel et sécuriser le cycle du combustible déterminant

Les projets d'AMR présentent des technologies plus diversifiées et recourent à des combustibles plus fortement enrichis (combustibles *High Assay Low Enrichment Uranium* (HALEU) ou combustibles avec un mélange d'Oxyde de plutonium et d'Oxyde d'uranium (MOX)). Ces combustibles sont sous forme solide ou dissouts dans des sels fondus.

**Tableau 2 : Technologies et combustible employés par les projets d'AMR français**

HTR	MSR		LMFR	
Réacteur à (très) haute température (RHT)	Réacteur à sels fondus (RSF)		Réacteur rapide refroidi au sodium ou au plomb	
Caloporteur Hélium/ Sel fondu <sup>(2)</sup>	Caloporteur Sel fondu (fluorure)	Caloporteur Sel fondu (chlorure)	Caloporteur Sodium liquide ou plomb liquide	
<b>Combustible TRISO HALEU</b>	<b>Combustible Sels U (HALEU)</b>	<b>Combustible Sels U et/ou Pu</b>	<b>Combustible HALEU</b>	<b>Combustible MOX (U/Pu)</b>
Maturité Moyenne	Maturité Faible		Maturité moyenne (sodium) ; faible (plomb)	
Blue Capsule Jimmy Energy	Thorizon Stellaria Naarea		Otrera Hexana Newcleo	

### Les technologies des AMR sont prometteuses, mais moins éprouvées que celles des SMR.

Les réacteurs rapides au sodium sont les technologies les plus matures, car ils ont été les plus abondamment expérimentées, y compris en France (Phénix, Superphénix).

Les réacteurs rapides au plomb, moins éprouvés industriellement, sont comparables à ceux au sodium, sans le risque de la réactivité du sodium, mais avec l'inconvénient de la corrosion par le plomb des aciers, entre autres.

L'ensemble des réacteurs rapides portent la promesse de la fermeture du cycle du combustible et présentent donc un avantage important en termes de gestion des déchets.

Les sels fondus sont très prometteurs, bien que la technologie soit moins éprouvée jusqu'à présent avec essentiellement une production de 18 mois dans un réacteur aux États-Unis dans les années 1950. La technologie retenue pour les réacteurs à sels fondus développés par les porteurs de projets français est fondée sur les sels chlorure avec des combustibles Pu (spectre rapide), qui est différente des solutions fondées sur des sels fluorure (spectre thermique) qui sont étudiées dans d'autres pays.

### Outre la mise au point de la technologie, le point déterminant pour la réussite de ces projets est le cycle du combustible.

D'une part, tous les combustibles envisagés par les projets d'AMR ne sont pas qualifiés par les autorités de régulation et de contrôle.

#### La qualification d'un combustible

La qualification d'un combustible correspond à la qualification du comportement en réacteur d'un « produit » combustible : elle doit se faire sur le *design* des assemblages mais aussi sur les installations de fabrication (pilotes et industrielles, fabrication et matières).

Le processus de qualification d'un combustible prévoit un programme d'irradiation en réacteur, ce qui pose la question de la disponibilité de réacteurs ou de la disponibilité de moyens pour faire ces essais, et/ou un programme de surveillance spécifique en réacteur tête de série. L'exploitation éventuelle de travaux antérieurs suffisamment représentatifs permet d'adapter l'effort restant à mener.

Les designs des combustibles pour les réacteurs à très haute température – **HTR** (États-Unis, Allemagne, Chine, Japon) et les réacteurs rapides **RNR MOX** (France, Japon, Russie) existent et ont

été qualifiés. Leur qualification pour l'utilisation dans les AMR devrait être fortement simplifiée. Certains combustibles ont déjà fait l'objet d'études et d'essais de traitement-recyclage des combustibles usés dans le passé (**25 tonnes RNR-MOX traitées**).

En revanche, les combustibles **Triso** et ceux utilisés en solution dans les réacteurs à **sels fondus** n'ont pas été qualifiés en France, mais en Allemagne, aux États-Unis, au Japon et en Chine, dans le cadre de programmes différents. Aujourd'hui, seule la Chine opère un réacteur à gaz fonctionnant avec du combustible Triso mais ne semble pas ouverte à l'exporter en dehors de ses frontières<sup>45</sup>. Pour les porteurs de projets utilisant le combustible Triso se pose donc la question des exigences des autorités de régulation françaises et européennes pour qualifier ces combustibles et de l'industrialisation de sa fabrication.

D'autre part, la disponibilité du combustible n'est pas garantie, qu'il s'agisse de l'accès à la matière première comme des capacités de production industrielle. En outre, elle ne dépend pas du développeur de projet d'AMR.

L'approvisionnement en **uranium hautement enrichi (HALEU)** dépend des capacités d'enrichissement à des teneurs élevées (entre 10 et 20 %) et des accords de non-prolifération qui limitent ces capacités. Aujourd'hui, des capacités de production industrielles d'uranium **HALEU** n'existent qu'en Russie<sup>46</sup>, même si des programmes industriels avec le soutien des États sont en cours aux États-Unis, notamment menés par Orano (pour tous les concepts d'AMR) et au Royaume-Uni (pour les réacteurs HTR). Il n'existe pas de projet de ce type en **France** alors que certains designs sont fondés sur la technologie HTR fonctionnant avec du combustible Triso-HALEU. Pour les autres projets d'AMR français, l'alternative du **Plutonium (MOX)** est possible (voir ci-dessous). Il n'existe donc pas à ce jour, pour un certain nombre de projets d'AMR français, de capacité de production du combustible utilisé, même à l'échelle d'un pilote industriel et quand bien même les procédés de fabrication sont connus et le combustible qualifié par certaines autorités réglementaires.

**Les réacteurs qui utilisent le combustible MOX**, à base de plutonium (réacteurs rapides au caloporteur sodium ou plomb), devront également faire face à la question de la disponibilité du combustible. Il n'existe en effet pas de marché du plutonium en raison des règles de non-prolifération. Il est donc difficile de s'en procurer sur les marchés étrangers (Royaume-Uni par exemple) et son coût de production est très élevé. Le plutonium séparé, à usage civil, appartient aujourd'hui aux producteurs d'électricité qui ont brûlé du combustible qui a ensuite été retraité et le plutonium séparé, notamment en France où la ressource est déjà utilisée par le parc nucléaire actuel. Ce sont essentiellement des électriciens détenus par des États.

La question se pose donc de l'allocation par l'État, éventuellement dans le cadre de la révision du plan de gestion des matières utilisées pour le combustible et des déchets<sup>47</sup>, de la ressource de plutonium existante entre les différentes filières de réacteurs, et notamment de celle qui sera disponible pour les petits réacteurs. La disponibilité en quantité suffisante de plutonium sera un facteur déterminant pour les réacteurs utilisant le combustible MOX : elle devra permettre de construire un nombre de réacteurs suffisant pour atteindre les effets de série. À ce stade, aucune évaluation de la quantité de matière nécessaire pour garantir la viabilité de ces projets et de son adéquation avec la ressource en plutonium disponible n'a été publiée par les porteurs de projets. Ces derniers devront également intégrer dans leur modèle économique le calendrier et le coût de construction des unités de retraitement du combustible usé des réacteurs<sup>48</sup>. En effet, leur technologie repose sur un retraitement du combustible usé pour séparer le plutonium, afin que ce dernier puisse alimenter à nouveau le réacteur.

---

<sup>45</sup> Intervention de Tony d'ALETTO, lors de la séance de travail du 4 novembre 2024.

<sup>46</sup> Intervention de Tony D'ALETTO. Le dernier rapport de l'AIE sur l'état du nucléaire dans le monde insistait sur la nécessité de diversifier les chaînes d'approvisionnement de l'uranium et plus spécifiquement l'enrichissement de l'uranium. Aujourd'hui, en effet, environ 40 % de l'enrichissement de l'uranium se fait en Russie.

<sup>47</sup> Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR). Un nouveau plan doit être élaboré pour la période 2027-2031.

<sup>48</sup> À titre d'exemple, l'usine de retraitement de La Hague a nécessité 4 ans de construction et 35 Md€ d'investissements.

### Le combustible MOX

Le combustible MOX est un combustible à base de plutonium. Les projets français de petits réacteurs qui se fondent sur l'utilisation de MOX (Newcleo, Otrera, Hexana) prévoient à ce stade une contribution à la fermeture plus complète du cycle du combustible (c'est-à-dire une diminution de la proportion de déchets ultimes), ce qui constitue l'un de leurs avantages différenciants.

Or, la ressource plutonium est rare et peu accessible. Le plutonium n'existe pas dans la nature, c'est l'un des produits de la consommation de l'uranium dans un réacteur, qui reste mélangé à l'uranium dans les combustibles usés. Si le combustible usé est traité pour recyclage des matières (cycle dit fermé, mis en œuvre en France), le plutonium est isolé et peut être utilisé dans un combustible MOX. Cependant, du fait des règles de non-prolifération, le plutonium n'est pas commercialisé. Son contrôle est sous la responsabilité de l'État qui l'a produit et qui le recycle pour ses propres besoins, *via* des électriciens nationaux<sup>49</sup>. Il n'est donc pas possible pour un exploitant nouveau de se procurer sur un marché cette ressource pour fabriquer ce combustible. D'autre part, le plutonium séparé, à usage civil, est détenu aujourd'hui par un nombre limité de pays : il s'agit de la France, de la Russie, de la Grande-Bretagne et du Japon. Seules la France, la Russie, la Grande-Bretagne et les États-Unis savent séparer du plutonium, mais il n'existe des usines civiles en service retraitant les combustibles usés et séparant le plutonium qu'en France et en Russie. En France, la ressource en plutonium est déjà utilisée pour la fabrication du MOX REP pour les réacteurs du parc actuel.

L'utilisation du combustible MOX RNR pour les petits réacteurs en France dépend donc de la quantité de ressource disponible et de la priorisation de cette dernière pour le fonctionnement du parc nucléaire actuel et l'augmentation de ses capacités prévues dans la PPE.

Par ailleurs, dans l'hypothèse où le combustible est qualifié et la matière disponible, se posera également la problématique de **l'augmentation des capacités** pour les filières de combustible existantes voire la création de nouvelles capacités (pour l'enrichissement d'uranium et pour la fabrication du combustible) ce qui représentera des **investissements massifs**. Or, ces investissements ne semblent pas encore pris en compte dans les modèles économiques des AMR, qui sont par ailleurs encore peu documentés.

La question de la disponibilité du combustible peut être déterminante pour l'aboutissement d'un projet d'AMR. Par exemple, le programme **Terra Power** aux États-Unis (réacteur nommé Natrium, refroidi au sodium) envisageait de retarder l'échéance de son déploiement par manque de combustible à l'uranium enrichi au niveau nécessaire.

La question de la capacité des acteurs français (**Orano, Framatome**) à fournir le combustible adapté aux technologies des projets sera un facteur clé pour industrialiser les projets en France et dans l'Union européenne. La question des modèles d'affaires entre ces industriels et les futurs exploitants d'AMR se pose également.

**Orano et Framatome**, auditionnés par le groupe de travail, ont indiqué travailler avec les porteurs de projet sur la question du combustible. **Orano**, en charge de l'aval du cycle du combustible (traitement des combustibles usés et recyclage du plutonium en combustibles MOX), a lancé des études pour construire une nouvelle usine de fabrication de **combustible MOX** à La Hague d'ici 2040. L'industriel a toutefois indiqué que les défis technologiques à relever concernant le traitement des combustibles étaient importants (installations de capacités de traitement/recyclage des combustibles, emballages de transport) et leur résolution attendue à un horizon lointain. Pour les réacteurs RNR, si le retraitement des combustibles a été démontré expérimentalement dans le passé avec Phénix, à Marcoule et à La Hague, à l'échelle d'un seul réacteur, les défis technologiques à relever pour passer à une échelle industrielle pour le retraitement des combustibles d'un parc de réacteur sont importants.

**Framatome** travaille plus particulièrement avec les porteurs de réacteurs HTR utilisant du combustible Triso-HALEU. L'industriel projette de lancer une ligne pilote dans son usine de Romans en collaboration avec Blue Capsule. L'objectif est d'obtenir la qualification du combustible. Il travaille également avec des projets d'AMR au Royaume-Uni et aux États-Unis.

Les **porteurs de projets**, s'ils ont bien identifié ce facteur déterminant pour leur réussite, en soulignant la nécessité d'avoir accès à un approvisionnement stable et sûr, ne semblent pas à ce stade avoir totalement intégré dans leurs coûts et leurs délais la question de la disponibilité du combustible choisi.

<sup>49</sup> Une grande partie du plutonium n'est aujourd'hui pas « *séparée* » et se trouve dans des combustibles usés. Les États souhaitent bien souvent qu'il reste « *mélangé* », car c'est une manière de se conformer aux règles de non-prolifération.

Certains posent la question d'une gestion nationale de l'accès aux combustibles, voire supranationale, à l'échelle au moins européenne, pour s'assurer de la cohérence des choix et des besoins.

Au regard de l'ensemble de ces facteurs déterminant la réussite des projets AMR, dont le coût est significatif, il paraît nécessaire de rapidement sélectionner les projets les plus prometteurs et de concentrer les soutiens publics sur ces derniers.

**La mise au point de la technologie de combustible retenue paraît accessible pour l'ensemble des projets AMR dans la mesure où les technologies déployées sont connues : elles sont ou ont été utilisées en France à un moment de son histoire nucléaire, ou dans d'autres pays (pour le TRISO-HALEU et les Sels Fondus). La mise au point d'un démonstrateur doit toutefois intervenir dans un calendrier relativement proche de celui des concurrents internationaux, pour les AMR comme pour les SMR.**

**Le combustible (*design*, accès à la ressource, capacité de fabrication en quantité suffisante, retraitement) est un élément déterminant pour la réussite des projets, notamment AMR, et l'atteinte de la phase industrielle. Or, il est à ce stade peu documenté dans les projets développés en France. Il est susceptible d'allonger les délais de mise au point des premiers de série et d'impacter les coûts des projets.**

**En particulier, pour les petits réacteurs utilisant du combustible MOX, la disponibilité en quantité suffisante de plutonium, qui peut être limitée par les accords internationaux, son coût et les choix nationaux d'allocation de la matière aux réacteurs de grande puissance, sera un facteur déterminant pour atteindre l'effet de série. Les délais et le coût des processus de retraitement du combustible (séparation du plutonium) devront être intégrés au modèle économique de ces projets.**

**Aussi, il convient de :**

- anticiper dès à présent la conception et la disponibilité (ressource et production en quantité suffisante) de combustible ;
- évaluer, pour chacun des projets, si le sujet du combustible est sur un chemin critique sur un de ces aspects : conception, qualification, accès à la ressource, capacité de production ;
- identifier les atouts dont dispose la France pour accompagner le développement des filières pour fournir des combustibles ;
- pour les pouvoirs publics, concentrer les efforts sur les projets dont les conditions de réussite sur ce point sont réunies.

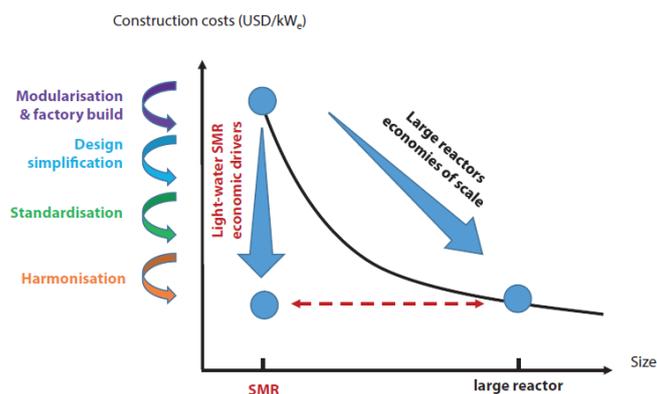
### 2.3. Garantir un modèle économique rentable

#### 2.3.1. S'assurer d'une profondeur du marché et de la sélection entre projets suffisantes pour assurer un effet de série

##### 2.3.1.1. Le marché international sera sans doute important, mais seulement en partie accessible aux SMR/AMR français et européen

Pour garantir la rentabilité de leur modèle économique, les petits réacteurs nucléaires se fondent sur des effets de série et la standardisation. En effet, alors que les réacteurs de grande puissance reposent sur un effet de taille qui permet de porter et amortir des investissements massifs, le modèle des SMR/AMR repose sur une industrialisation du processus de fabrication : les réacteurs sont modulaires (constitués de pièces identiques et reproductibles) et ainsi peuvent être construits et assemblés en nombre, dans une ou plusieurs usines (modèle Airbus). Par ailleurs, le déploiement mondial de réacteurs nucléaires (environ 400 en opération) a pâti d'un trop grand nombre de modèles différents, limitant la standardisation et la baisse des coûts. L'industrialisation de la production pour un nombre raisonnablement limité de modèles permettra de faire baisser les coûts de fabrication par effet de série et *in fine* de produire de l'électricité et de la chaleur à un prix compétitif.

## Principaux moteurs économiques pour compenser les dés-économies d'échelle



Source : Rapport OCDE NEA, 2024, page 23

Or, cet effet de série ne sera possible que si le marché des SMR/AMR est assez profond pour produire et vendre les petits réacteurs en nombre. L'ensemble des membres du groupe de travail, dont les développeurs de projets, se sont accordés sur le fait que pour cela, il ne fallait pas raisonner à l'échelle nationale mais que les projets français, pour être rentables, devaient conquérir des marchés d'envergure internationale. Par ailleurs, les projets industriels franco-français sont à exclure. D'une part, car l'industrialisation réclame des investissements risqués très élevés. D'autre part, car les pays acheteurs sont soucieux du contenu local. Plus forte sera la dimension européenne des projets entrant en phase d'industrialisation, plus grande sera leur chance de réussite de déploiement en Europe et à l'international.

À ce stade, les prévisions de marché sont complexes et leurs résultats marqués d'une forte incertitude : il n'est pas possible de prévoir à un horizon de 10 ans et *a fortiori* de 20 ans l'évolution de la concurrence internationale et les perspectives de débouchés pour ces machines. D'autant qu'au-delà de la concurrence entre SMR/AMR, ils feront face à la concurrence d'autres moyens de production d'énergie et de chaleur en particulier décarbonée ou faiblement carbonée. Des observations sur les évolutions et tendances actuelles peuvent toutefois être formulées.

### Le marché mondial visé par les SMR/AMR semble prometteur.

L'ensemble des acteurs interrogés sur ces perspectives ont mis en avant les besoins de décarbonation futurs, notamment dans des pays de grande taille et fortement carbonés, comme la Chine et les États-Unis. Pour les connaisseurs de ces marchés, les besoins en énergie nucléaire dans les années à venir seront tels que les SMR/AMR pourront y trouver des débouchés sans entrer en concurrence avec l'énergie produite par les réacteurs de grande puissance. Même si la Chine priorise ce type de centrales, elle paraît capable de mener de front le chantier du renforcement de son parc existant et le développement des petits réacteurs<sup>50</sup>.

### Toutefois, l'accès du marché mondial aux SMR/AMR européens sera difficile pour trois types de raisons.

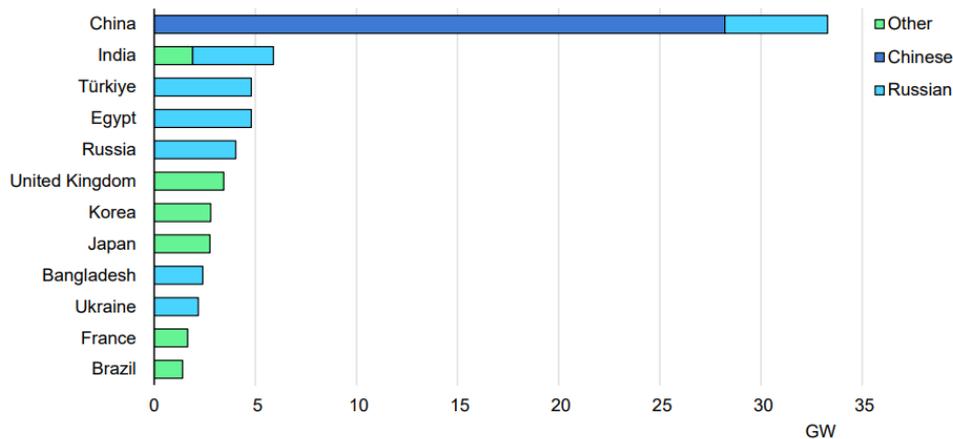
Tout d'abord, et cela vaut pour tout projet de petits réacteurs quel que soit son pays de conception, l'accès au marché mondial dépend d'une harmonisation minimale *ex ante* des obligations réglementaires voire de certains segments de la *supply chain* pour permettre une production en série de réacteurs identiques.

Surtout, l'accès pour les produits français aux marchés extra-européens n'est pas garanti. En effet, les projets français risquent d'accuser un certain retard par rapport à leurs concurrents, notamment chinois, sur les marchés mondiaux. Il semble en effet que les premiers petits réacteurs chinois soient susceptibles d'être exportés d'ici 5 à 10 ans, le temps que les premiers de série déployés actuellement, notamment les petits réacteurs à eau peu innovants (ACP-100), aient démontré leur rentabilité. Ces derniers seront très compétitifs par rapport aux SMR qui ne bénéficieront pas du même retour d'expérience.

<sup>50</sup> Intervention de Tony D'ALETTO, lors de la séance de travail du 4 novembre 2024.

Par ailleurs, sur les marchés les plus dynamiques, notamment ceux des pays ne maîtrisant pas la technologie nucléaire mais présentant des besoins de décarbonation et d'énergie, les projets européens risquent d'être confrontés à des concurrents déjà implantés. Il s'agit notamment des pays d'Asie du Sud/Est, qui devraient absorber l'essentiel des besoins nucléaires à venir, d'Afrique (Kenya et Ghana notamment) ou du Moyen-Orient. La Chine et la Russie sont en effet très présentes dans ces pays, ainsi qu'en Amérique latine (Argentine notamment pour la Chine). L'Inde a toutefois annoncé en 2024 son intention de développer des SMR/AMR en coopération avec l'Union européenne<sup>51</sup>. Les réacteurs conçus aux États-Unis et au Canada devraient dominer les marchés d'Amérique du Nord. Rita Baranwal a en effet pointé dans son intervention que les porteurs de projet qui ont déjà une implantation sur un marché national et ont déjà eu l'occasion de travailler avec l'autorité de régulation du pays concerné auront un avantage compétitif sur leurs concurrents<sup>52</sup>.

## Capacité nucléaire en construction par région et origine nationale de la technologie (décembre 2024)



Source : Rapport AIE, janvier 2025, page 21

Les projets européens restés dans la course devraient avoir accès à un marché international pour partie réduit. De nombreux marchés nationaux leur seront en effet fermés (Chine, Russie, voire États-Unis). Sur les marchés ouverts, la concurrence devrait être forte. L'Europe pourra toutefois faire valoir auprès de certains États clients son non-alignement et son indépendance.

### 2.3.1.2. Les territoires isolés offrent peu d'opportunités en France

Un marché potentiel identifié pour les SMR est celui des territoires isolés, notamment les espaces insulaires. Le groupe de travail a donc auditionné un représentant d'EDF SEI (Systèmes énergétiques insulaires), direction de l'électricien dédiée aux Zones non interconnectées (ZNI). Il s'agit de la Corse, de la Guadeloupe, ainsi que de Saint-Martin et de Saint-Barthélemy, de la Martinique, de la Guyane, de La Réunion, des Îles du Ponant et de Saint-Pierre et Miquelon). Ces zones par construction non connectées à d'autres réseaux de grande taille doivent se doter de capacités énergétiques locales, adaptées à leur taille et à leur environnement.

#### Les zones non interconnectées

Les zones non interconnectées (ZNI) française représentent 1,2 million de clients et 4 420 MWe de production installée au total (dont 1 156 MW en Corse). Les systèmes électriques locaux sont restreints et fragiles : ils se caractérisent par de fortes variabilités (arrêts fréquents) car les réseaux sont petits, peu foisonnants et soumis à des aléas climatiques intenses.

Il n'y a pas de marché de l'électricité dans les ZNI. Il est possible pour un exploitant de conclure des contrats de gré à gré avec EDF SEI (ou ses équivalents en Nouvelle Calédonie, à Mayotte, en Polynésie Française et à Wallis et Futuna). Les contrats d'EDF SEI comportent une rémunération sur une part fixe qui couvre les investissements et une part variable payant le service rendu, associé à un bonus/malus si ce dernier ne l'est pas au niveau des disponibilités de l'exploitant.

<sup>51</sup> Lettre d'intention pour la coopération franco-indienne sur les SMR et AMR signée en 9 février 2024.

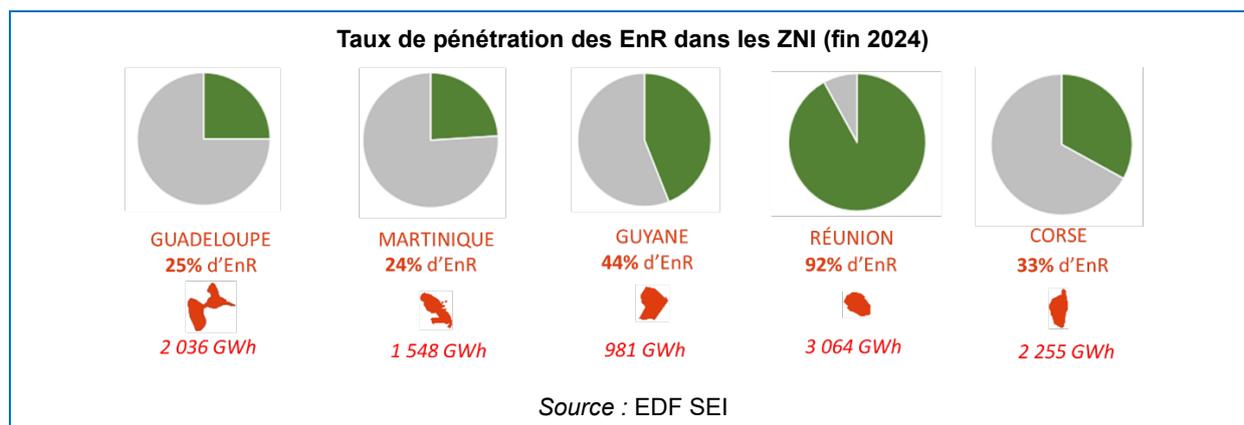
<sup>52</sup> C'est notamment la stratégie que suit Westinghouse en Grande Bretagne, cf. séance de travail du 7 octobre 2024.

La question de l'autonomie énergétique est majeure pour les ZNI. Ces territoires ont initié leur trajectoire de décarbonation. Ce sont les territoires qui valident leur propre Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE).

Les petits réacteurs nucléaires pourraient sembler *a priori* répondre à certains besoins spécifiques des ZNI. Ce sont en effet des producteurs d'énergie pilotables, capables de répondre à la forte variabilité des réseaux locaux, fournisseurs d'une énergie décarbonée et de petite puissance, pouvant donc s'insérer sur des territoires restreints.

Les ZNI présentent toutefois des contraintes spécifiques auxquelles les SMR/AMR devront s'adapter s'ils veulent gagner ces marchés. D'une part, ils devront avoir la capacité de s'adapter à des arrêts fréquents, ainsi qu'à faire face à des *black-out* sur perte de site qui leur demanderont de pouvoir redémarrer sans apport d'énergie du réseau, ce qui suppose de disposer de moyens de réserve et de capacité à démarrer et à se stabiliser sans source électrique externe. D'autre part, ils devront faire preuve d'une résilience particulière face aux risques climatiques spécifiques à ces territoires (cycloniques, tempêtes tropicales, submersion) et au risque sismique, et être adaptés à des niveaux de température et d'humidité élevés.

Outre ces enjeux techniques, les perspectives de marché dans les ZNI sont limitées pour les petits réacteurs. D'une part leur taille devra être adaptée à celle des territoires, soit une production de 20 à 60 MWe qui est la taille du plus gros groupe actuellement implanté dans les ZNI. Cette restriction élimine d'emblée les SMR les plus puissants comme le projet Nuward d'EDF qui produit 400 MWe. Par ailleurs, les EnR affichent d'ores et déjà une part importante de la production. Les EnR représentent un quart de la production d'électricité en Guadeloupe et en Martinique, quasiment la moitié en Guyane et de plus de 90 % à La Réunion. Les perspectives de croissance sont en outre rapide, ces territoires ayant clairement opté pour les EnR afin de mettre en œuvre leur stratégie de décarbonation. Seule la Nouvelle-Calédonie pourrait présenter un intérêt pour le développement de petits réacteurs pour des usages industriels.



Il apparaît enfin que les populations locales sont réticentes à l'installation de réacteurs nucléaires sur leurs territoires. Pour rappel, chaque territoire des ZNI valide sa propre PPE.

Aussi, au regard de ces éléments, le groupe de travail a conclu que les opportunités de marché pour les SMR dans les ZNI étaient infimes, sauf cas particulier de besoins insuffisamment satisfaits par les EnR, de type industrie très énergo-intensives.

### 2.3.1.3. L'Europe est l'échelle pertinente du développement des SMR/AMR mais ce marché comporte encore des incertitudes

**Les SMR/AMR seront mis en concurrence avec d'autres sources d'énergie pour l'accès au marché européen de l'électricité.**

Pour accéder aux effets de séries, les projets de SMR/AMR développés en Europe, doivent avoir accès au marché européen. Ce n'est qu'à cette échelle que les projets seront rentables.

Les besoins européens en électricité décarbonée sont importants voire massifs dans les années à venir (cf. partie 1). Ils sont notamment tirés par la décarbonation de l'industrie<sup>53</sup> qui, dans l'ensemble des

<sup>53</sup> Liée à la fois à la décarbonation de l'énergie utilisée et à l'électrification des usages.

pays de l'Union européenne, a débuté sa transformation pour réduire ses émissions en GES, entre autres en électrifiant les procédés : les industriels les plus émetteurs se dotent actuellement de feuilles de route pour réaliser la décarbonation de leur activité d'ici 2030-2035. Ils peuvent être soutenus, dans cette entreprise, par des dispositifs publics (cf. en France les fonds publics mobilisés dans le cadre de France 2030<sup>54</sup>, notamment les appels à projets de l'Ademe, par exemple ZIBac<sup>55</sup> pour favoriser le développement de zones d'activité bas carbone).

Le groupe de travail a auditionné le Président de la communauté de communes du Gard Rhodanien qui étudie les vecteurs de décarbonation des activités industrielles présentes sur son territoire en leur fournissant une énergie décarbonée à un prix compétitif<sup>56</sup>. La collectivité étudie dans ce cadre la possibilité d'implanter un petit réacteur nucléaire à proximité de son bassin industriel. Fournir de l'énergie décarbonée à ses industriels est aussi un moyen pour elle d'attirer de nouvelles industries sur son territoire : la collectivité a en effet investi dans un site industriel « *clé en main* » de 50 hectares dans le cadre du programme France 2030 pour accueillir de nouveaux projets industriels et « *réindustrialiser* » le territoire.

Cette recherche d'énergie décarbonée en quantité significative pour des besoins industriels a été confirmée par les échanges que le groupe de travail a pu avoir avec les représentants du pôle de compétitivité Capénergies de la plateforme industrielle de Fos-sur-Mer/Étang de Berre<sup>57</sup>. Cette dernière accueille des industries énérgo-intensives à forts besoins de décarbonation comme la chimie et la pétrochimie. Elle mise également sur l'hydrogène fabriqué par électrolyse, très consommateur d'énergie, pour se décarboner. Une étude co-financée par les industriels présents sur le site et l'Ademe a estimé que les besoins en électricité décarbonée allaient au moins doubler d'ici 2030, du fait notamment de l'électrification des processus industriels, soit un besoin supplémentaire en électricité « *équivalent à la production de 2 EPR* »<sup>58</sup>.

Or, en France et dans les pays au système électrique déjà très décarboné, les projets de SMR seront mis en compétition avec les autres sources d'électricité décarbonées ; celle produite par les réacteurs de grande puissance et les EnR qui alimentent le réseau électrique.

Par exemple sur le marché français, les industriels sont aujourd'hui en grande majorité raccordés à ce réseau, excepté quelques sites très spécifiques (par exemple, certaines industries du bassin de Lacq utilisant le gaz local). L'électricité leur sera accessible sur le réseau grâce au renforcement des capacités de production nucléaire actuelles et à l'ouverture de 6 nouveaux EPR au cours des deux prochaines décennies, ainsi que la montée en charge des EnR dans la prochaine PPE<sup>59</sup>.

Les SMR européens pourraient ainsi avoir des débouchés limités sur le marché national de l'électricité. Le site de Fos-sur-Mer par exemple projette de répondre à ses nouveaux besoins en électricité par le raccordement du site à une nouvelle ligne à haute tension, et n'envisage pas de recourir aux SMR dont la taille ne paraît pas proportionnée à la hauteur de ses besoins.

Il paraît donc essentiel, pour les usages électriques, que les projets de SMR initiés en France aient accès au marché européen, notamment dans les États-membres les plus importants et dont l'électricité est peu décarbonée, afin de disposer d'un marché suffisant. Cela suppose toutefois que dans leur phase avancée de développement et surtout dans leur phase d'industrialisation, des coopérations et *joint-ventures* avec des institutions et des partenaires industriels et financiers d'autres États-membres soient établies. Par ailleurs, l'ouverture de certains grands marchés, traditionnellement peu favorables au nucléaire à cette nouvelle technologie serait un avantage. En effet aujourd'hui seuls douze États-membres de l'Union sur vingt-sept accueillent des centrales nucléaires sur leur territoire (Belgique, Bulgarie, Espagne, Finlande, France, Hongrie, Pays-Bas, République tchèque, Roumanie, Slovaquie,

---

<sup>54</sup> 5 Md€ des aides publiques de France 2030 sont ciblées sur la décarbonation de sites industriels.

<sup>55</sup> Source : <https://agir.ademe.fr/aides-financieres/aap/favoriser-le-developpement-de-zones-industrielles-bas-carbone-zibac>

<sup>56</sup> Les industries de la communauté de commune émettent 650 000 tonnes de CO<sub>2</sub>/an. La collectivité vise la neutralité carbone d'ici 2050 (cf. séance de travail du 10 février 2025).

<sup>57</sup> Séance de travail du 10 février 2025.

<sup>58</sup> L'étude se fonde sur les besoins en énergie exprimés par les industriels présents sur le site, sans que ces derniers ne soient encore associés à des investissements tangibles dans leurs *business plan*.

<sup>59</sup> Le scénario central du projet de PPE-3 propose une révision à la hausse de l'électricité photovoltaïque, une accélération du rythme d'attribution des capacités d'éolien *offshore* (cible de 18 GW en 2035), maintien du rythme actuel pour l'éolien terrestre, Projet de PPE-3, mars 2025, p. 61.

Slovénie et Suède), même si d'autres pays, dont la Pologne et plus récemment l'Italie, se sont montrés ouverts et motivés pour se doter de l'énergie nucléaire.

### Le marché de la chaleur semble prometteur mais comporte des incertitudes.

Au vu des exigences de décarbonation pesant sur les usages de chaleur industrielle et domestique (réseaux de chaleur urbaine notamment), les SMR et AMR pourraient trouver des débouchés potentiels massifs. Une étude d'E-Cube et de la SFEN a estimé qu'ils pourraient répondre à un besoin théorique de chaleur décarbonée de l'ordre de 80 TWh/an si on considère la consommation actuelle et de 100 TWh/an d'ici 2050 (70 TWh<sub>th</sub>/an pour l'industrie, 12 TWh<sub>th</sub>/an pour les réseaux de chaleur et 10 TWh<sub>th</sub>/an pour les nouveaux besoins comme la production d'hydrogène et le captage de CO<sub>2</sub>), soit 250 modules de SMR/AMR de 50 TWh. Cette estimation du marché techniquement adressable ne prend pas en compte les éléments de coût, de prix, de calendrier de décarbonation et d'acceptabilité<sup>60</sup>.

#### La décarbonation de la chaleur en France<sup>61</sup>

Les besoins de chaleur, qui représentent aujourd'hui 43 % de la consommation d'énergie en France, sont encore majoritairement couverts par des énergies fossiles, carbonées et importées (gaz, fioul, charbon). La part de chaleur renouvelable et de récupération en France métropolitaine augmente (24 % en 2021, 27,2 % en 2022 et 29,6 % en 2023) pour un objectif fixé par la loi de 38 % d'énergies renouvelables (EnR) dans la consommation finale de chaleur en 2030.

Le Fonds Chaleur de l'Ademe attribue des aides aux entreprises et aux collectivités pour construire des installations produisant de la chaleur renouvelable et de récupération (en 2024, 1 350 nouvelles installations qui produiront 3,6 TWh par an de chaleur). C'est la **biomasse énergie** qui contribue le plus à cette production de chaleur (68 %), suivie par la **géothermie** (16 %), puis par la **récupération de chaleur fatale** (8 %), la **méthanisation** (8 %) et le **solaire** (0,3 %).

Les réseaux de distribution de chaleur représentent l'un des premiers postes du budget du Fonds Chaleur (218,7 M€), ayant permis de financer 384 km de réseaux en 2024. Les **chaufferies biomasse** ont représenté 328,2 M€ d'aides, les **géothermies** (surface et profonde) 110,9 M€, les **équipements de récupération de chaleur fatale** 13,4 M€ et le **solaire thermique et les équipements de valorisation du biogaz par injection au réseau** respectivement 9,4 M€ et 20,8 M€.

Le programme France 2030, ainsi que les aides à la planification écologique de l'Ademe, ont également accompagné des projets de production de chaleur à partir de biomasse pour des usages industriels.

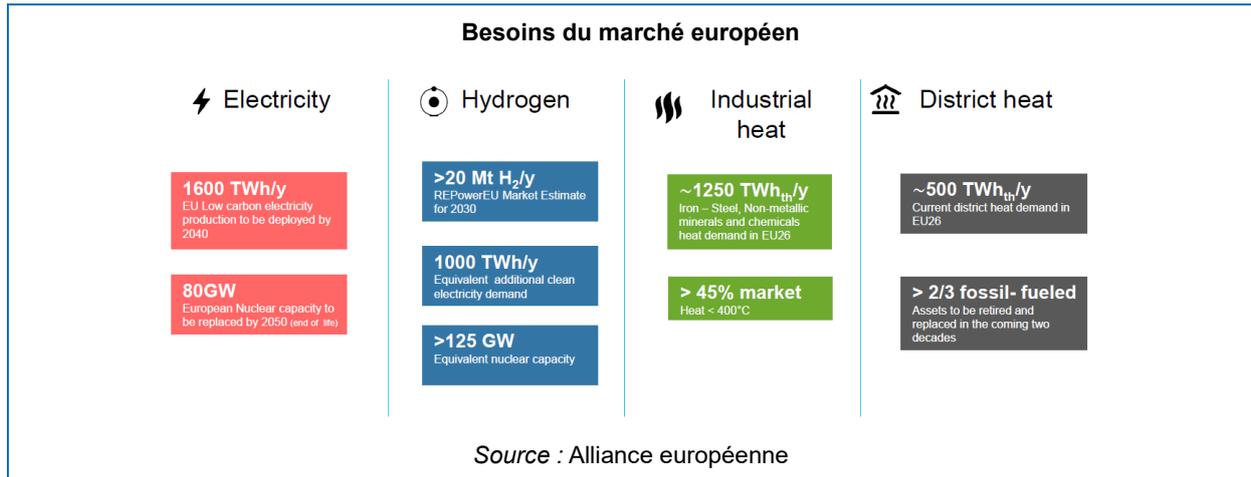
### Concernant la chaleur industrielle.

Le marché européen de la chaleur décarbonée à destination des industriels semble porter pour les AMR et même pour les SMR. L'ensemble des projections montrent une forte croissance des besoins en la matière d'ici 2030-2040, poussée par les objectifs de décarbonation ambitieux adoptés par l'Union européenne et la perspective de la mise en œuvre du mécanisme d'ajustement carbone aux frontières<sup>62</sup>. L'Alliance européenne a partagé une étude avec le groupe de travail estimant le besoin à 1 250 TWh/an en 2024.

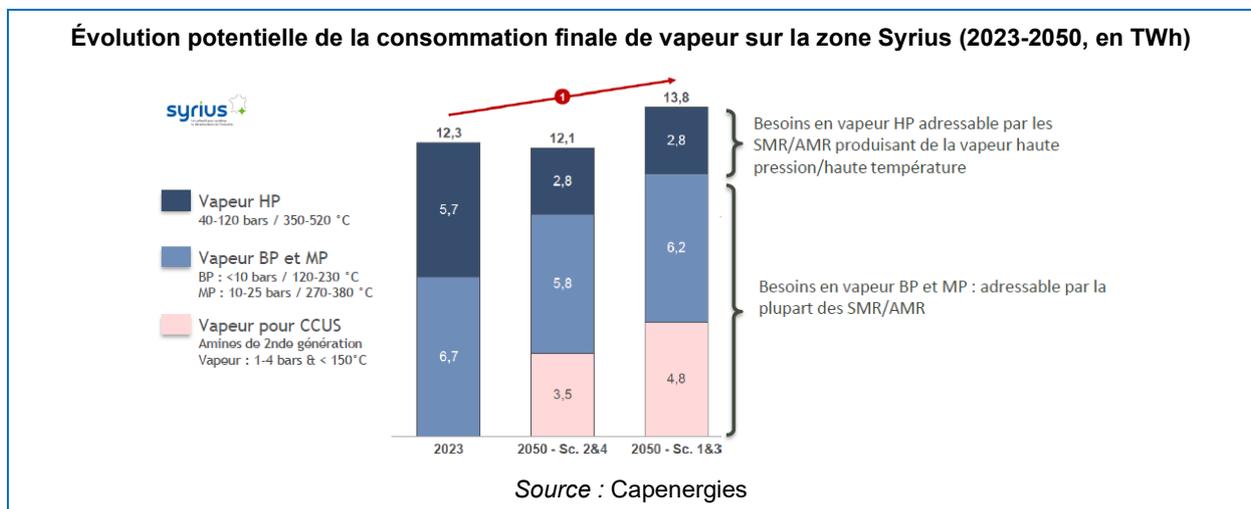
<sup>60</sup> Source : Perspectives de marché pour les SMR/AMR en France – Étude E-Cube/SFEN, mai 2025. L'étude quantifie les marchés « *techniquement adressables* » par les SMR/AMR, c'est-à-dire auxquels les SMR/AMR pourraient techniquement répondre (en termes de température de chaleur, taille minimale du site, caractère remplaçable ou non des technologies déjà en place) et pour lesquels il n'existe pas de marchés captifs pour des solutions concurrentes. L'étude ne quantifie pas le marché économiquement et commercialement adressable qui dépend des caractéristiques de prix, calendrier de décarbonation et d'acceptabilité.

<sup>61</sup> Source : [Bilan du fonds chaleur de l'Ademe, 2024](#).

<sup>62</sup> Selon la dernière révision de l'EU ETS, le plafond d'émission pour les industries concernées devrait atteindre zéro autour de 2040, conformément à la trajectoire de réduction progressive des *quotas* alloués.



À titre d'illustration, dans le cas de Fos-sur-Mer, l'étude réalisée sur les futurs besoins en chaleur industrielle du site a fait ressortir une croissance des besoins en chaleur d'ici 2050, malgré l'électrification des usages, tirée notamment par les projets de capture du carbone. À terme, le site aura un besoin de 13,8 TWh/an, soit la production de 3 à 4 SMR/AMR.



L'audition de l'Union des industries utilisatrices d'énergie (UNIDEN)<sup>63</sup> par le groupe de travail a fait ressortir que ces besoins relevaient plus particulièrement des industries de l'acier, de la chimie, du papier, du ciment, de l'automobile, de l'industrie agroalimentaire, qui pourraient être couverts par des petits réacteurs nucléaires (cf. annexe 4.4)<sup>64</sup>. Ces industries sont à la recherche de sources de chaleur décarbonée à un prix compétitif et stable après la crise de l'énergie intervenue à la suite de la guerre en Ukraine. Plus spécifiquement, l'industrie agroalimentaire étant implantée sur des sites géographiquement dispersés et présentant des besoins de chaleur d'assez basse température, autour de 150 °C (pour les laiteries, amidonneries, sucreries pour une partie, transformation de la pomme de terre), il est apparu que les SMR pourraient répondre avantageusement à ce besoin.

Le groupe de travail a également auditionné l'industriel français Cristal Union, qui étudie le potentiel de l'AMR Jimmy Energy pour compléter les dispositifs actuels de décarbonation de la chaleur utilisée par ses sites de production de sucre, d'alcool et de bioéthanol de Bazancourt et Cristanol.

**Toutefois, l'accès massif au marché de la chaleur industrielle pourrait être limité pour les SMR/AMR pour les raisons suivantes.**

<sup>63</sup> Séance de travail du 16 septembre 2024.

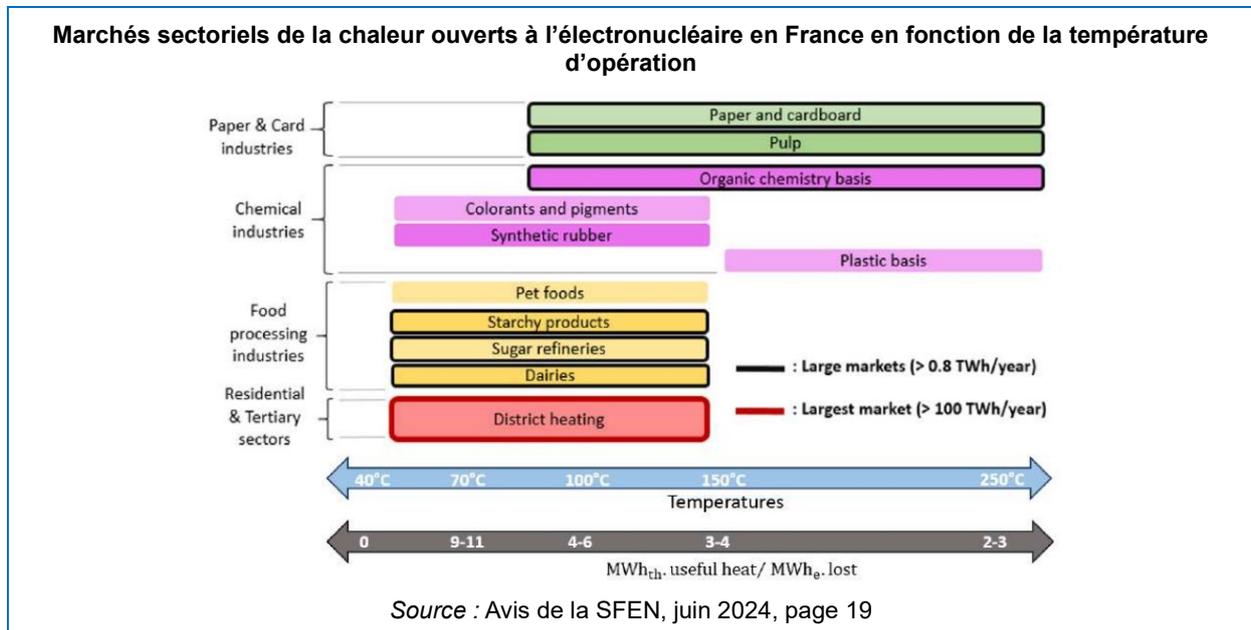
<sup>64</sup> Chaque type de petits réacteurs est conçu pour fournir de la chaleur dans une plage de température spécifique. Les réacteurs à eau pressurisée (PWR) et à eau bouillante (BWR) peuvent répondre à des besoins thermiques jusqu'à 250-300 °C, tandis que les réacteurs à haute température (HTR) ou à neutrons rapides (FNR) peuvent atteindre des températures autour de 700 °C.

a) Enjeu de concurrence avec des énergies alternatives : comme pour l'électricité, d'autres sources de chaleur décarbonée peuvent rivaliser avec les SMR/AMR. Il s'agit notamment des chaudières biomasse ou électriques, pour remplacer des chaudières au gaz ou au charbon, ou de l'énergie produite à partir de résidus fatals comme c'est le cas sur le site de Fos-sur-Mer à partir de gaz et fioul issus des activités pétrochimiques et de raffinerie. Ces projets avec des énergies alternatives peuvent obtenir des financements de l'Ademe et de France 2030<sup>65</sup>. Le représentant de Cristal Union a clairement indiqué que l'adoption d'une solution AMR pour une partie de ses besoins de chaleur décarbonée ne se ferait que si cette solution était compétitive.

b) Enjeu de calendrier : les industriels construisent actuellement leurs feuilles de route pour décarboner leurs processus de production d'ici 5 à 10 ans. Ils étudient donc des technologies éprouvées et sécurisées, qui leur offrent une énergie à un prix stable et compétitif (*cf. supra*). Or, les éléments relatifs au délai de mise sur le marché et au prix de l'électricité produite par les AMR restent encore incertains. Même les SMR, pourtant plus avancés, pourraient avoir des difficultés à garantir des solutions stables à prix compétitifs sécurisés dans ces délais très courts. Il existe donc un *hiatus* entre le calendrier des AMR, dont le développement est envisageable d'ici 2040-2045 et même des SMR, et les besoins de projections des industriels et de lancement de leurs investissements qui sont à plus court terme.

Les SMR/AMR pourront éventuellement entrer sur le marché de la chaleur industrielle au moment du renouvellement des premiers contrats passés entre les entreprises et leurs fournisseurs de chaleur décarbonée, par exemple après 2040. Toutefois, une fois qu'une technologie de décarbonation sera intégrée dans les processus industriels, les acteurs pourraient avoir peu d'intérêt à en changer (effet cliquet). Aussi, le temps nécessaire à la technologie pour être mise sur le marché (*time to market*) risque de ne pas correspondre au calendrier des industriels. C'est notamment le cas des projets AMR pour lesquels les délais de production du combustible dans des quantités suffisantes seront longs.

c) Enjeu d'adéquation de la chaleur produite aux besoins des industriels : l'étude plus fine des besoins des industriels fait ressortir une demande en chaleur variée, s'étendant sur une gamme de température qui dépend de l'activité spécifique de l'industriel. L'industrie agroalimentaire n'a, par exemple, généralement pas besoin d'une chaleur à un niveau aussi élevé que l'industrie du papier. Les gammes de températures demandées peuvent aussi varier au sein d'une filière industrielle (*cf. annexe 4.5*).



Cette diversité des besoins suppose une forte capacité d'adaptation des SMR/AMR qui seraient intégrés dans un bassin industriel et qui fourniraient de la chaleur à plusieurs clients. Cela demande également d'identifier, usage par usage, quels efforts supplémentaires en termes de niveau de chaleur à fournir resteraient à la charge des industriels.

<sup>65</sup> 245 projets ont été financés entre 2009 et 2022 pour une production de 16 TWh<sub>th</sub>/an. L'Ademe prévoit entre 25 et 45 TWh<sub>th</sub>/an de production de chaleur issue de la biomasse pour l'industrie d'ici 2050.

Enfin, l'UNIDEN a rappelé les fragilités de certains tissus industriels, soumis à une forte concurrence internationale, et la difficulté potentielle pour une infrastructure énergétique lourde et nécessitant des investissements de long terme à fonder son modèle économique sur des besoins d'activités industrielles dont la composition et la localisation sont susceptibles d'évoluer à court ou moyen terme. Il est en effet difficile de savoir ce que les industries produiront en 2050 et, par voie de conséquence, leurs besoins spécifiques de chaleur.

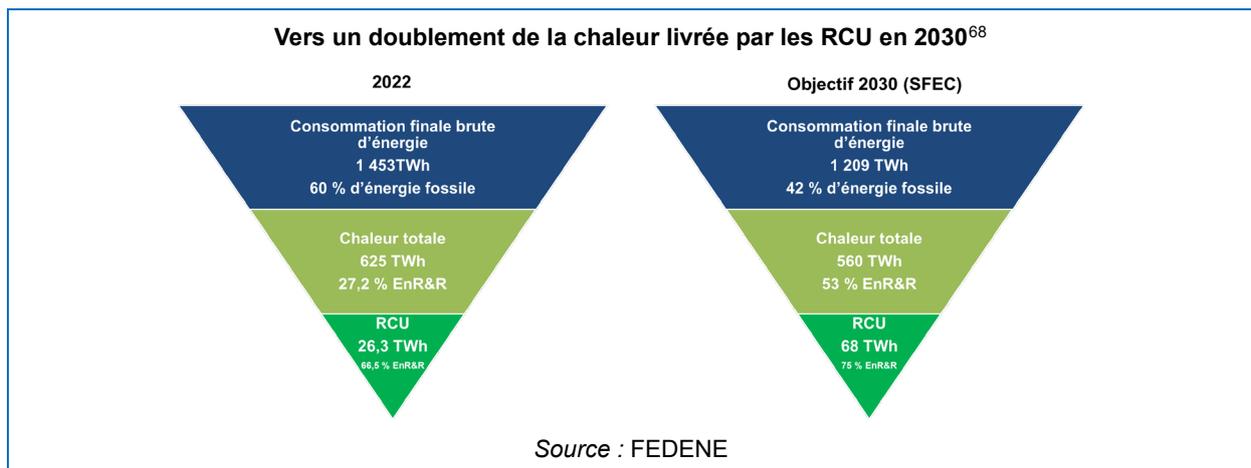
L'ensemble de ces points, notamment le *time to market*, pourrait limiter l'accès des SMR/AMR au marché européen de la chaleur industrielle.

## Concernant les réseaux de chaleur urbains.

Le marché des réseaux de chaleur urbains en Europe paraît également un débouché potentiel pour les SMR. On en compte aujourd'hui 3 500, représentant 60 millions de clients. 75 % d'entre eux fonctionnent avec une chaleur produite à partir d'énergies fossiles d'après la Fédération des services Énergie Environnement (FEDENE)<sup>66</sup>. Il existe dans le monde de nombreux exemples de réacteurs de grande puissance en cogénération, produisant de l'électricité pour le réseau tout en alimentant un réseau de chaleur urbain (en Chine, en Suisse, un projet en Finlande, etc.)<sup>67</sup>.

En France, on comptabilise en 2023, 1 000 réseaux de chaleur, livrant près de 30 TWh de chaleur à un peu moins de 50 000 bâtiments raccordés. Cette chaleur est à température inférieure à 300 °C.

Les réseaux de chaleur français sont déjà relativement bien décarbonés en fonctionnant à 66,5 % avec de l'énergie EnR. Il est toutefois prévu de verdir davantage leurs sources d'énergie dans un horizon relativement proche, tout en triplant leur capacité d'ici 2035 (soit 90 TWh). Le projet de PPE identifie en effet les réseaux de chaleur comme l'infrastructure clé pour décarboner le chauffage urbain, constituant ainsi un marché potentiel pour les petits réacteurs. Ce dernier pourrait être renforcé par les besoins européens, la Commission prévoyant un doublement des réseaux de chaleur d'ici 2050.



L'audition de la FEDENE par le groupe de travail montre toutefois que l'apport de chaleur par un petit réacteur nucléaire n'a pas été étudié par les acteurs des réseaux de chaleur français, qui ont misé jusqu'à présent principalement sur les EnR pour leur décarbonation. L'éventuelle inflexion de cette préférence pour les technologies EnR, y compris dans les projections de décarbonation, dépend de quatre principaux éléments :

a) Un obstacle réglementaire : pour transposer la directive européenne *Efficacité énergétique (2023/1791)* du 13 septembre 2023, la France a retenu le taux d'énergie renouvelable et de récupération de chaleur fatale pour définir un réseau de chaleur « efficace ». Seuls les réseaux « efficaces » peuvent bénéficier de subventions (octroi d'aides du fonds chaleur de l'Ademe par exemple) et d'avantages fiscaux (TVA à taux réduit par exemple).

<sup>66</sup> Séance de travail du 16 septembre 2024.

<sup>67</sup> Source : L'énergie nucléaire : une nouvelle solution pour décarboner la chaleur, avis de la SFEN, juin 2024.

<sup>68</sup> Données : Ministère de la Transition écologique, Datalab, Chiffres clés de l'énergie, août 2024.

La réglementation européenne permet pourtant de définir les réseaux « *efficaces* » en se fondant sur un autre critère : la quantité de CO<sub>2</sub>/kWh émis. Retenir ce critère permettrait d'inclure le nucléaire dans les alternatives bas carbone éligibles aux aides publiques en France. Par ailleurs, l'extension de la notion de « *chaleur fatale* » à la chaleur « *partiellement fatale* » permettrait d'y inclure la chaleur nucléaire prélevée non pas en fin de processus industriel mais au cours de ce processus<sup>69</sup>.

Il conviendrait donc, pour ouvrir le marché des réseaux de chaleur aux SMR, de garantir une neutralité technologique dans l'appréhension de la chaleur décarbonée et de modifier la définition de « *réseaux efficaces* » dans la transposition de la Directive européenne dans le droit français.

b) La forte pénétration de la chaleur produite à partir de biomasse dans les réseaux de chaleur risque d'être limitée par la disponibilité du combustible (énergie-bois) liée à la gestion durable des ressources forestières, ainsi que par la concurrence d'autres usages (alimentation humaine et animale, rénovation énergétique notamment)<sup>70</sup>. La ville d'Helsinki en Finlande, par exemple, a décidé de ne plus recourir à la combustion, y compris du bois, pour son chauffage, considérant le nucléaire comme la seule solution décarbonée à grande échelle.

c) L'absence de solution de chaleur nucléaire dans un calendrier correspondant à la demande de chaleur décarbonée limite l'appétence des gestionnaires à s'orienter vers les SMR/AMR. L'offre de chaleur nucléaire « *de série* » n'étant pas, à l'heure actuelle, disponible avec certitude avant la deuxième moitié de la décennie 2030, il leur est difficile de bâtir leurs projets sur cette technologie. Toutefois les nouveaux contrats ou les contrats de renouvellement de chaleur arrivant à terme à cette date pourront être un marché potentiel pour les petits réacteurs. Le système des délégations de service public, permettant une contractualisation sur un temps long, pourrait constituer le cadre adéquat pour qu'une collectivité adopte la solution nucléaire pour alimenter son réseau de chaleur : l'exploitant pourrait alors amortir ses investissements sur une durée relativement longue, sans doute supérieure aux contrats que les industriels pourront conclure. En contrepartie, les collectivités bénéficieront d'une chaleur à un prix stable.

d) L'audition de la FEDENE a également permis d'identifier certains obstacles à lever en termes d'acceptabilité par la population de l'implantation d'un petit réacteur à proximité des habitations et l'adaptation à une activité saisonnière, concentrée pendant la période hivernale. Cela exigerait des SMR/AMR fournisseurs de chaleur qu'ils basculent leur production d'énergie vers le réseau électrique pendant les saisons de faible consommation de chaleur.

Les perspectives de fourniture de chaleur urbaine en France par les SMR sont donc conditionnées à la levée d'obstacles non négligeables en termes de calendrier, ainsi que de concurrence des énergies alternatives déjà implantées dans ces réseaux et d'acceptabilité.

Le marché européen, pour sa part, ne sera réellement accessible qu'à condition d'une harmonisation des procédures d'autorisation et des standards de production à l'échelle européenne pour permettre les effets de série. Aujourd'hui, par exemple, Nuward a engagé une démarche avec six régulateurs européens et Thorizon avec deux régulateurs. Cette harmonisation est un gage de la compétitivité du modèle économique des petits réacteurs.

**Penser les projets à l'échelle européenne et a *minima* à l'échelle de plusieurs pays de l'Union européenne est essentiel pour permettre les effets de série nécessaires à leur viabilité économique.**

**Le marché européen de l'électricité et de la chaleur est globalement intéressant pour les SMR/AMR. Ces derniers devront toutefois faire la preuve de leur compétitivité par rapport aux autres technologies produisant une énergie décarbonée, en termes de délais et de prix.**

**Les réglementations nationales, notamment en France, et européennes devront être adaptées pour considérer la chaleur nucléaire comme chaleur décarbonée, au même titre que les EnR, et aligner leurs régimes d'aides.**

<sup>69</sup> Source : L'énergie nucléaire : une nouvelle solution pour décarboner la chaleur, avis de la SFEN, juin 2024.

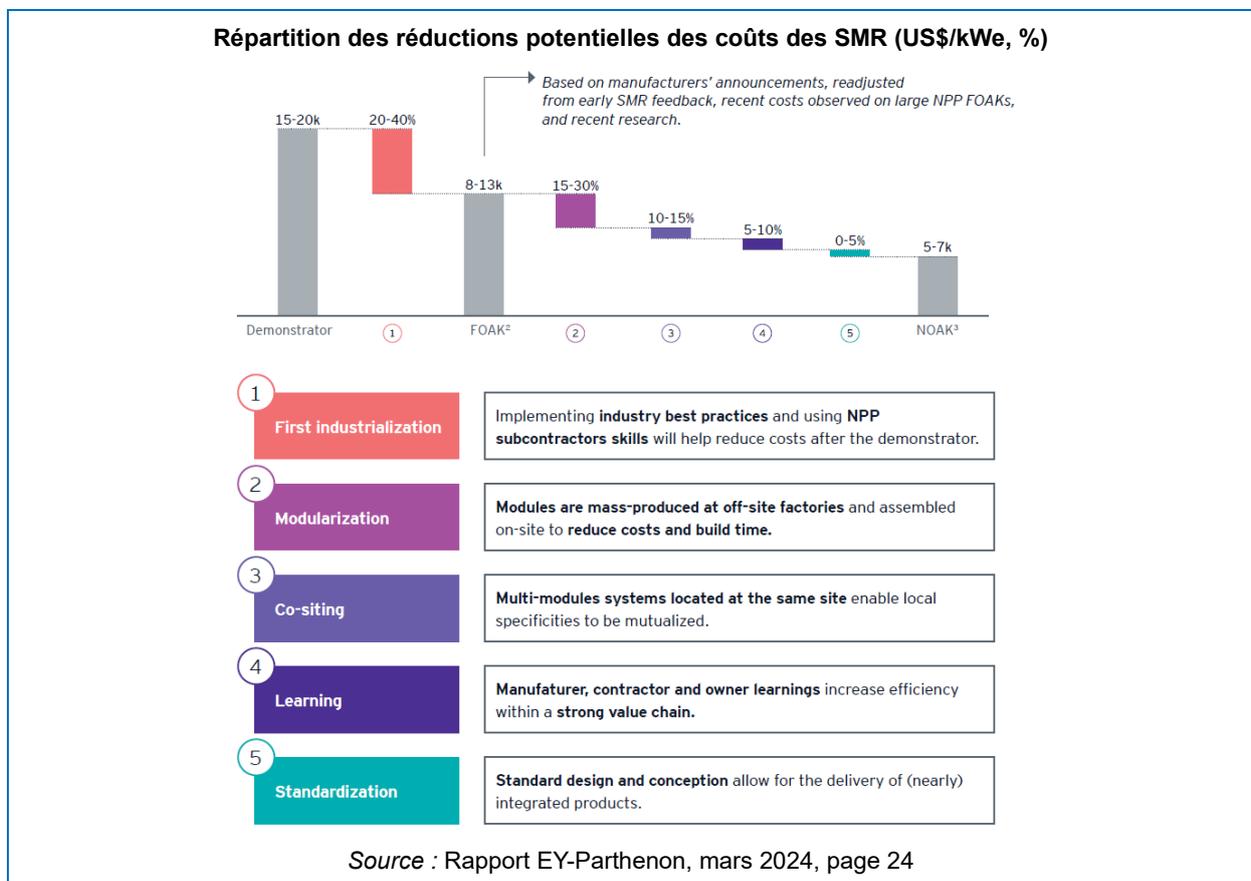
<sup>70</sup> Source : Rapport de la Prospective de la CRE, [La biomasse et la neutralité carbone, mars 2023](#).

## 2.4. Assurer la compétitivité économique des projets

### 2.4.1. Une incertitude sur la compétitivité du coût de l'énergie produite

Les récents grands projets menés dans le nucléaire montrent qu'il est difficile d'anticiper les coûts de production de l'énergie (dépassements de budgets et de calendrier de l'EPR de Flamanville en France ou des projets Vogtle 3 et 4 aux États-Unis). Concernant les coûts de production des SMR/AMR, peu d'études étayées sont disponibles faute de données sur le montant des investissements initiaux nécessaires, ainsi que sur les gains apportés par les effets de série.

Le cabinet EY-Parthenon a tenté d'estimer les gains liés aux effets de série dans son étude publiée en 2024. Cette étude estime que les coûts d'un petit réacteur peuvent être réduits de 20 à 40 % entre la mise au point du démonstrateur et la mise en service du premier de série (ou FOAK : *first of a kind*). Cette réduction est liée à la mise au point de meilleurs processus industriels de fabrication et construction. Les coûts sont à nouveau abaissés de 30 à 50 % entre le FOAK et le réacteur industrialisé (ou NOAK : *Nth of a kind*). Cette réduction des coûts est liée à la modularité qui permet une production en série, à l'implantation de plusieurs réacteurs sur un même site (*co-siting*), aux effets d'apprentissage et, de manière moins significative, à l'homogénéisation des processus.



Par ailleurs, d'autres études ont essayé d'estimer le coût complet de l'énergie produite par les SMR/AMR (LCOE) en prenant en compte ces différents facteurs de réduction des coûts au fur et à mesure du processus d'industrialisation de la production des SMR/AMR. Le *Levelized cost of electricity* (LCOE) obtenu pour les premiers de série (FOAK), de la décennie 2030, est compris entre environ 80 et 160 €<sub>2024</sub>/MWh selon les sources (qui diffèrent sur les hypothèses retenues, notamment le niveau de coût du capital). Le LCOE pour les SMR industrialisés (NOAK)<sup>71</sup>, à l'approche de 2050 est compris entre 50 et 130 €<sub>2024</sub>/MWh. L'effet de série et d'apprentissage permettrait un gain moyen de 23 % entre les premiers de série (FOAK) et les nièmes de série (NOAK).

<sup>71</sup> Pour N relativement grand.

## Synthèse des estimations de LCOE

€/MWh 2024	FOAK* (~2030)	NOAK* (~2050)	Reduction FOAK to NOAK	Hypothèse principale
Etude EY 2016 (UK) - moyenne	158,00 €	113,00 €	28%	Moyenne des 2 scénarios envisagés (learning seul et learning + autres paramètres 20% capex)
Etude EY 2016 (UK) – apprentissage uniquement	158,00 €	122,00 €	23%	Seul l'effet d'apprentissage est pris en compte
Borne basse	158,00 €	113,00 €	28%	Learning rate 10%
Borne haute	158,00 €	131,00 €	17%	Learning rate 5%
Etude EY 2016 (UK) – Apprentissage + 20% réduction des coûts CAPEX	158,00 €	104,00 €	34%	Effet d'apprentissage + 20% de gains capex sur d'autres facteurs
Etude EY Parthenon 2024 (inflation 2%)	102,09 €	86,38 €	15%	150MWe / 20 ans / inflation 2%
Etude NuScale Power's Spring 2022 - Moyenne	102,15 €	89,38 €	12%	30 ans
Borne basse – Municipalities owned (WACC 4%)	82,69 €	74,18 €	10%	WACC 4%
Borne haute – Investor owned utilities (WACC 7%)	121,60 €	104,58 €	14%	WACC 7%
Energy Stratégies 2019+ Etude UAMPS Nuscale 2018	-	65,60 €	-	185 MWe / 20 ans / inflation 2%
Borne basse	-	53,54 €	-	
Borne haute	-	77,66 €	-	
Pacificorp's 2019	-	112,58 €	-	
<b>Moyenne</b>	<b>120,75 €</b>	<b>93,38 €</b>	<b>23%</b>	

Source : CRE, à partir des données d'études (publiées)

Ces estimations sont soumises à de nombreuses incertitudes et sont encore peu fiables. Elles peuvent être comparées, avec beaucoup de prudence, avec le coût complet de l'énergie produite par les réacteurs de grande puissance, qui s'élèverait en moyenne à 115 €/MWh<sup>72</sup>. Certains acteurs auditionnés par le groupe de travail estiment par ailleurs que le coût du MW produit par un petit réacteur sera plus élevé que celui produit par un réacteur de grande puissance : c'est ce qu'a avancé Rita Baranwal<sup>73</sup> en se fondant sur un récent rapport du MIT estimant les coûts du prochain réacteur de grande puissance AP-1000<sup>74</sup>.

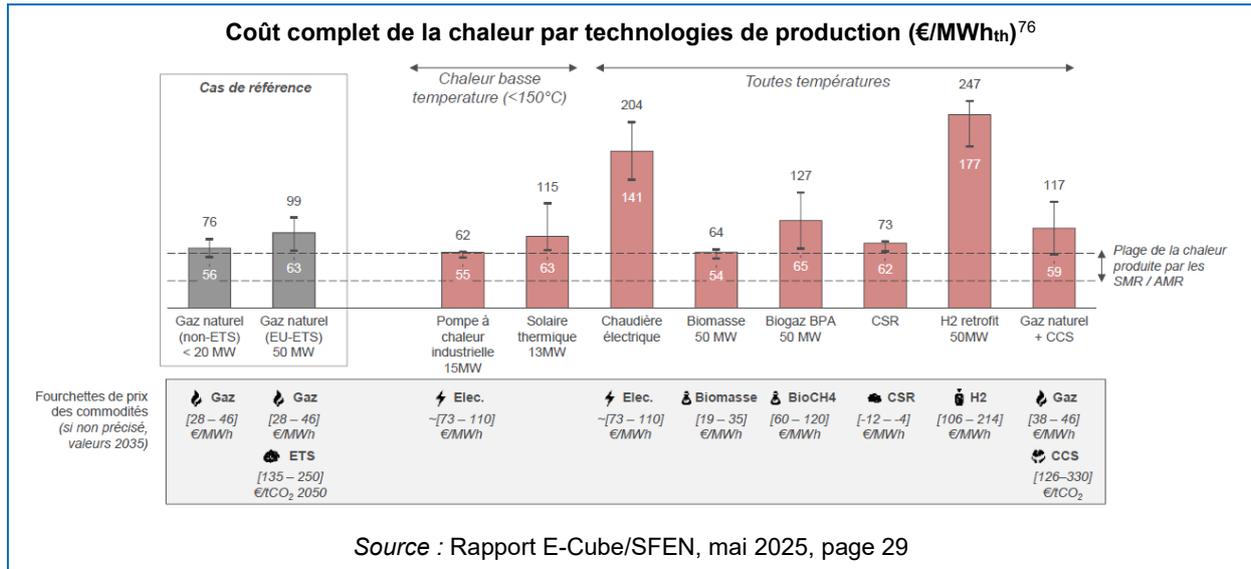
À titre de comparaison également, le LCOE des EnR publié par l'Ademe est compris entre environ 60 €/MWh (éolien terrestre) et environ 180 €/MWh (petit PV sur toiture) pour la France en 2022, hors coût de raccordement des installations au réseau<sup>75</sup>. Les SMR/AMR offriront toutefois l'avantage de pouvoir produire de l'énergie en continu (hors période de maintenance), de manière pilotable et à un prix stable (car la part des coûts d'exploitation dans le coût de production est mineure comparée à l'investissement initial), ce qui constitue un avantage déterminant pour certains industriels.

<sup>72</sup> Source : SFEN / DGEC.

<sup>73</sup> Séance de travail du 7 octobre 2024.

<sup>74</sup> Source : <https://web.mit.edu/kshirvan/www/research/ANP201%20TR%20CANES.pdf>

<sup>75</sup> Source : Ademe. Un récent papier, tentant d'estimer les coûts de production de l'électricité de 15 réacteurs de type SMR à partir des données disponibles, conclut qu'aucun des concepts testés n'est en capacité de rivaliser avec le modèle économique des EnR, même si les coûts varient sensiblement en fonction des spécificités technologiques et de l'environnement réglementaire. Source : *Uncertainties in estimating production costs of future nuclear technologies : A model-based analysis of small modular reactors*, B. Steigerwald et al., Elsevier, 2023.



Il est difficile d'avancer à ce stade une estimation solide du LCOE des SMR et encore moins des AMR producteur de chaleur, et donc d'évaluer leur compétitivité par rapport aux autres technologies de production de chaleur décarbonée. On peut tout de même noter que le rendement des turbines qui convertissent la chaleur produite par les réacteurs en électricité étant de l'ordre du tiers, la production de chaleur pourrait être plus favorable à l'atteinte de la compétitivité que la production d'électricité, ce qui est cohérent avec les estimations de l'étude E-Cube (cf. figure ci-dessus). Ce qui ressort avant tout des auditions menées par le groupe de travail est que pour l'ensemble des utilisateurs potentiels des SMR/AMR, la compétitivité de l'énergie produite sera déterminante dans le choix de la technologie décarbonée retenue.

#### 2.4.2. Une incertitude sur la capacité à financer les projets

Les petits réacteurs nucléaires, par le montant plus réduit que les réacteurs de forte puissance de capital nécessaire au démarrage, de l'ordre du Md€ selon l'étude EY-Parthenon<sup>77</sup>, et par leur taille qui réduit les délais<sup>78</sup> et les risques en termes de sûreté, devient une technologie qui peut être financée par des capitaux privés. L'industrie nucléaire était jusqu'à présent intensément financée par la puissance publique au vu des risques et montants d'investissement requis pour la construction de réacteurs de grande puissance. À titre d'exemple, le projet de petit réacteur commercial le plus avancé dans le monde, le projet BWRX-300 porté par General Electric et Hitachi au Canada, est financé par des fonds privés (en dette et en capital) et des subventions de l'agence de l'énergie canadienne.

Aussi, des fonds d'investissement privés, spécialisés dans le financement de technologies innovantes, ont financé des *start-ups* portant des projets de SMR/AMR. En France, c'est notamment le cas d'Eren et Blast Club, qui financent les *start-ups* Hexana, Jimmy Energy et Naarea, ainsi que d'Exergon, qui est entré au capital des *start-ups* Stellaria, Blue Capsule et Otrera. Newcleo de son côté a réussi à lever 535 M€ en Europe, même si l'entreprise fait état d'un besoin de 3 Md€ pour financer ses projets.

Ce modèle de financement privé en est à son début et les porteurs de projet semblent peiner à lever les fonds nécessaires à leur développement. Les fonds privés levés par les *start-ups*, en dizaines et, rarement en Europe, en centaines de M€, ne couvrent pas les besoins importants en capital de cette

<sup>76</sup> Calculs E-Cube fondés sur une revue de littérature des hypothèses de CAPEX/OPEX avec un taux d'actualisation de 10 % (hypothèse d'un financement *via* tiers financement), 2 %/an d'inflation, durée de vie des actifs de 20 ans et début de projet en 2035. Coût complet calculés hors allocation de quotas ETS gratuits. Estimation CCS incluant le transport et stockage de CO<sub>2</sub>. Coût complet en sortie d'unité de production, n'incluant pas de coût de livraison. Coût complet estimé sans solution de stockage d'électricité, ni de chaleur pour les pompes à chaleur et les chaudières électriques.

<sup>77</sup> EY-Parthenon estime que le coût d'un SMR de 150 MWe en 2050 sera de 0,75 Md\$ et celui des services de 45 M€/an (sans prise en compte de l'inflation). Source : Étude EY-Parthenon sur les SMR/AMR, mars 2024. À noter que les contributions des porteurs de projet n'ont pas pu établir d'éléments sur les coûts des différents projets, qui, par ailleurs, peuvent dériver du fait des décalages de calendrier.

<sup>78</sup> Notamment par rapport à l'atteinte du seuil de rentabilité qui peut être de 20 à 30 ans pour les nouveaux réacteurs de grande puissance.

industrie, notamment dans sa phase de pré-industrialisation pour construire un prototype et mettre au point un premier de série. Ils sont par ailleurs dans des ordres de grandeur bien inférieurs aux investissements réalisés aux États-Unis et en Chine (cf. partie 1). Plusieurs points ont été soulevés dans le cadre du groupe de travail :

a) Les investisseurs privés susceptibles de financer les innovations de rupture manquent en Europe<sup>79</sup>. Peu de fonds d'investissements se sont risqués à financer une technologie nucléaire, encore mal connue. Il n'y a par ailleurs que très peu d'acteurs de financement privé (banque de financement et d'investissement, fonds, etc.) qui siègent dans le groupe de travail de l'Alliance européenne pour les SMR/AMR.

b) Les projets à la recherche de fonds paraissent encore très risqués aux yeux des financeurs. Ils comportent en effet des risques liés à la multiplication des projets et des technologies envisagées, ainsi qu'à la concurrence internationale, sans que les effets de consolidation du marché soient encore connus, ce qui peut freiner à ce stade la prise de risque. D'après le témoignage du représentant d'Exergon auditionné par le groupe de travail, les fonds qui ont investi dans certains projets misent sur la valorisation de la *start-up* pour rentabiliser leur investissement mais ne comptent pas accompagner l'entreprise jusqu'à l'étape d'industrialisation. Les financeurs de cette étape suivante d'industrialisation ne sont pas encore identifiés sur les marchés financiers européens.

### En conclusion :

- **des perspectives de marché, à ce stade, peu sécurisées, car des enjeux de débouchés, de compétitivité économique et de freins réglementaires où règnent encore de nombreuses incertitudes ;**

- **un chemin critique passant par le financement des projets pour l'étape du passage à l'échelle ;**

- **dans ce monde comprenant autant de promesses que d'incertitudes, les porteurs de projets pourraient gagner à diffuser dès que possible des estimations les plus resserrées et réalistes possibles sur les coûts et les délais ;**

- **des soutiens financiers publics européens, à côté d'investisseurs privés, paraissent incontournables pour déverrouiller l'étape de construction du prototype.**

<sup>79</sup> Source : The future of European competitiveness, Mario DRAGHI, septembre 2024

### 3. L'accompagnement et le soutien des pouvoirs publics

#### 3.1. Un enjeu dans la phase de maturation des projets : les soutiens publics aux projets français et européens

Les pays concurrents des pays européens accordent aux projets de petits réacteurs des soutiens dont le quantum n'est pas entièrement connu, mais dépasse les soutiens connus en Europe à date de plusieurs ordres de grandeur (cf. partie 1.).

Au sein de l'Union européenne, chaque État poursuit sa stratégie propre en matière d'aides aux SMR/AMR et au secteur du nucléaire en général. En France, les *start-ups* portant ces projets ont reçu des financements publics dans le cadre de la première phase de France 2030 (900 M€ au total). La seconde phase qui doit poursuivre ce soutien financier sur un nombre de bénéficiaires plus restreints est en cours d'élaboration.

Globalement toutefois, la stratégie de chaque États-membre n'est pas rendue publique. Au niveau européen, la réussite de l'Alliance industrielle européenne pour les SMR/AMR est cruciale. Elle devra déboucher sur le financement d'un petit nombre de projets d'avenir en particulier dans le cadre de PIEECs (Projet important d'intérêt européen commun). Des débats sur une éventuelle « *préférence européenne* » des projets de SMR/AMR soutenus dans les États-membres sont par ailleurs en cours dans le débat public européen<sup>80</sup>.

Dans ce cadre, les porteurs de projets ont fait remonter auprès du groupe de travail leurs attentes à l'égard des pouvoirs publics, qui ont été formulées assez précisément et tenaient aux points suivants :

- la formalisation explicite dans les stratégies nationales (PPE en France) des SMR/AMR et la clarification de leur apport attendu aux objectifs de décarbonation ;
- une visibilité sur les dispositifs de soutien financier et réglementaire qui pourront être mobilisés pour accompagner le développement du marché à tous les stade (R&D, développement, industrialisation, construction) ;
- une visibilité sur l'adaptation du cadre réglementaire, notamment la reconnaissance du nucléaire comme énergie décarbonée par l'Union européenne, et de la neutralité technologique en France pour les usages Chaleur (réseaux de chaleur urbaine, chaleur industrielle, production d'hydrogène par électrolyse haute température, etc.) ;
- une demande d'accès aux études, calculs scientifiques, aux installations de tests que détiennent certaines institutions publiques de recherche afin de permettre les procédures de validation des *designs* le plus rapidement possible ;
- une demande d'accompagnement dans le choix des premiers sites d'implantation.

Toute aide publique aux petits réacteurs nucléaires doit s'articuler avec l'ensemble des moyens soutenant la filière, notamment les réacteurs de grande puissance (renforcement de la capacité du réseau électrique et la construction de nouveaux EPR)<sup>81</sup>.

Par ailleurs, au-delà d'une aide financière, l'État peut intervenir pour mettre en place un environnement favorable au déploiement des petits réacteurs, notamment en termes réglementaires, en encourageant l'innovation et l'accélération de la maturation technologique. Le conseil de politique nucléaire de mars 2025 a en outre demandé au CEA de mettre à la disposition des porteurs de projets les données de site de ses centres de Marcoule et de Cadarache pour que certains projets puissent s'y implanter.

**Au regard des montants apparemment mobilisés par les pays concurrents de l'Union Européenne, il paraît nécessaire de concevoir des soutiens publics à l'échelle européenne ou dans le cadre de coopérations réunissant des pays de l'Union européenne.**

**Le soutien public à des *start-ups* en amont du développement des projets a permis de faire émerger de nombreuses technologies et de favoriser une émulation entre les projets. Toutefois,**

<sup>80</sup> À titre d'exemple, la feuille de route de la République tchèque mentionne les projets britannique Rolls-Royce et américain GE-Hitachi.

<sup>81</sup> L'AIE estime que les investissements (publics et privés) dans le nucléaire vont doubler d'ici 25 ans et qu'un quart sera capté par les SMR/AMR.

au regard de l'avance de certains projets de pays concurrents et de la nécessaire consolidation du marché pour favoriser l'effet de série, il paraît pertinent de soutenir la maturation technologique des projets, le cas échéant avec l'accompagnement des instituts de recherche et de cibler les soutiens publics sur les seuls projets susceptibles d'atteindre le stade de l'industrialisation dans un calendrier compatible avec les objectifs de décarbonation des utilisateurs potentiels de SMR/AMR (au regard des facteurs déterminants de réussite exprimés *supra*, notamment l'accès au combustible, et de la maturité des technologies concurrentes de décarbonation). Dans cette sélection, le caractère innovant des AMR devrait être pris en compte, malgré le retard relatif de ces projets par rapport aux technologies SMR.

Faute de visibilité sur la rentabilité des projets, il n'est pas possible de s'engager sur des quantum de déploiement dans les documents stratégiques nationaux.

### 3.2. Un enjeu de plus long terme : l'accompagnement à la mise en place de compétences et d'une chaîne d'approvisionnement appropriées

Le groupe de travail a soulevé la question de la disponibilité de compétences et d'une chaîne d'approvisionnement mobilisable pour industrialiser les SMR/AMR une fois les concepts arrivés à la maturité technologique. La modularité des petits réacteurs suppose en effet une construction industrialisée reposant sur une chaîne d'approvisionnement (de fournisseurs) organisée sur un modèle similaire à la filière aéronautique. Or, il paraît nécessaire en amont de la phase d'industrialisation de définir les processus et normes techniques des différents projets applicables à l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement pour permettre d'anticiper une capacité de production à l'échelle européenne qui permette aux industriels de développer leurs séries. Et des profils combinant des compétences en exigences nucléaires et en chaîne d'approvisionnement selon ce nouveau modèle devront être formés.

Par ailleurs, les porteurs de projets ont pointé l'enjeu du volume des compétences de l'ensemble de la filière nucléaire, qui pourrait être un facteur limitant les capacités de développement des SMR en Europe. Si les projets arrivent au stade de l'industrialisation, ils auront besoin d'un vivier de main d'œuvre qualifiée dans le domaine. Une des forces de la Chine est en effet de disposer d'une importante main d'œuvre formée dans le secteur du nucléaire, mobilisable rapidement. La Chine a déjà développé une certaine forme de modularité pour la construction de ses gros réacteurs<sup>82</sup>.

**Anticiper les besoins en matière de compétences pour l'ensemble de la filière nucléaire au regard des objectifs de production nucléaire de la prochaine PPE.**

### 3.3. Pour les pouvoirs publics et les porteurs de projets, l'anticipation de la gestion des déchets

La gestion des déchets radioactifs en France repose sur le principe pollueur-payeur qui demande aux producteurs d'assurer l'ensemble des étapes avant le stockage des déchets ultimes. Ce dernier est assuré par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra), établissement public indépendant des producteurs de déchets qui développe et exploite les centres de stockage. Ces derniers sont adaptés à la dangerosité et à la durée de vie des déchets radioactifs. Le projet Cigeo vise à stocker les déchets nucléaires français de haute et moyenne activité à vie longue.

#### Cadre de la gestion des déchets radioactifs en France

Le cadre juridique de la gestion des déchets radioactifs en France est déterminé par la loi du 28 juin 2006 qui prévoit des mécanismes d'évaluation du coût de gestion des déchets et de sécurisation de leur financement par le producteur (principe de pollueur-payeur). Ces derniers doivent assurer l'ensemble des étapes avant le stockage (production, tri, traitement, colisage, entreposage), qui sont examinées par l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR).

L'Andra se charge de dresser un inventaire des matières et déchets radioactifs sur la base des déclarations annuelles des producteurs ainsi que de développer et d'exploiter les centres de stockage. Un Plan national de

<sup>82</sup> Intervention de Tony D'ALETTO, lors de la séance de travail du 4 novembre 2024.

gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) détermine la stratégie de stockage en fonction de la dangerosité des substances (matières et déchets radioactifs)<sup>83</sup>.

Les implications de gestion des matières et déchets radioactifs sont différentes selon les designs et les combustibles des projets de petits réacteurs mais les nécessités d'anticipation sont quasiment identiques à celles tenant au combustible. La gestion des déchets et matières radioactives a en effet des implications en termes de coût, de délais pour la validation par le régulateur des étapes précédant le stockage ainsi que de capacité d'entreposage pour le producteur et de stockage pour l'Andra, notamment s'agissant de déchets de composition et forme inédites par rapport à ceux du parc français actuel.

L'Andra a débuté un travail avec certains porteurs de projets sur la gestion des déchets<sup>84</sup>. Elle identifie différents enjeux :

- des solutions d'entreposage en cas d'aléa et de besoin de retrait des combustibles d'un réacteur ;
- le respect des critères d'acceptation pour le stockage des matières nouvelles utilisées par les nouvelles technologies (AMR), présentant des risques spécifiques (sodium, sels fondus, plomb) ;
- concernant le combustible, la compatibilité de retraitement de nouveaux combustibles potentiellement utilisés par les AMR comme le combustible Triso-HALEU avec les capacités de retraitement de l'usine de La Hague et les caractéristiques des déchets issus de combustibles hautement enrichis, non utilisés en France à l'heure actuelle, dont la stratégie de stockage, avec ou sans retraitement, n'est pas encore connue.

Des études doivent également être menées par l'Andra pour évaluer la capacité de stockage des déchets issus des nouveaux concepts nucléaires et leurs coûts de gestion.

Certains porteurs de projet ont formulé des demandes d'allègement des obligations en matière de gestion des déchets pour les exploitants<sup>85</sup>, jusqu'à l'évolution de la responsabilité illimitée des exploitants d'Installations nucléaires de base (INB) en matière de déchets, via l'instauration d'une possibilité de transfert de la gestion des déchets radioactifs à l'Andra en contrepartie d'une soulte.

**La gestion des déchets et matières radioactives doit être anticipée dès la phase de conception des projets et les coûts associés intégrés aux coûts globaux des projets.**

**Un travail d'anticipation des modalités, des risques et des capacités d'entreposage des déchets et matières par les producteurs et de leur stockage dans les infrastructures gérées par l'Andra doit être mené.**

### 3.4. Adapter l'environnement réglementaire aux spécificités des petits réacteurs nucléaires

#### 3.4.1. Des pistes de simplification du droit proposées par les porteurs de projet et en cours d'analyse par les services de l'État

Les contributions des porteurs de projet au groupe de travail ont beaucoup insisté sur les adaptations réglementaires possibles et nécessaires au déploiement industriel des SMR/AMR. L'enjeu est de proportionner le cadre réglementaire existant à la taille et aux risques réduits des SMR/AMR, qui peut avoir une incidence non négligeable sur l'accès aux financements et l'atteinte des effets de série attendus.

<sup>83</sup> Les matières radioactives sont des substances pour lesquelles une utilisation ultérieure est prévue ou envisagée. Les déchets radioactifs sont des substances pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est envisagée.

<sup>84</sup> Un accord cadre a été signé avec Jimmy Energy, Naarea et Newcleo pour réaliser des études, encore non débutées.

<sup>85</sup> Possibilité d'une plus large optimisation des déchets classés « *très faiblement radioactifs* », avec une évolution des seuils de libération et adaptation des obligations relatives à la constitution d'actifs pesant sur les exploitants d'installations nucléaires pour gérer le démantèlement, la gestion des combustibles usés et celle des déchets radioactifs. La demande porte sur un étalement de la constitution de ces actifs sur la durée de vie de l'installation.

S'agissant des demandes d'évolution réglementaire et législative, la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) a lancé des travaux en 2024 pour identifier les verrous juridiques et législatifs, ainsi que les possibilités de simplification des procédures d'autorisation administratives pour les SMR/AMR, en liaison avec les autres administrations.

La première demande des porteurs de projet **est d'adapter et de standardiser les règles, ainsi que les processus en matière de sûreté et d'autorisations environnementales pour l'implantation des SMR/AMR en France**. Le cadre légal actuel régissant les installations nucléaires comporte des obligations génériques qu'ils jugent non proportionnées aux enjeux propres aux installations de moindre taille que seront les petits réacteurs nucléaires. Les demandes des porteurs de projets portent sur les règles de sécurité et d'autorisation des activités associées à des matières nucléaires, définies dans l'arrêté du 13 avril 2023<sup>86</sup>, qui s'appliquent aujourd'hui de façon indistincte à toutes les Installations nucléaires de base (INB)<sup>87</sup>. Elles portent également sur des règles d'exploitation, notamment s'agissant de la réglementation en matière de prélèvements d'eau, de rejets de l'installation et de surveillance des effets sur l'environnement<sup>88</sup>. Ces règles devraient, selon les porteurs de projets, être proportionnées à l'ampleur de leurs impacts plus réduits sur l'environnement. Cette prise en compte permettrait d'accélérer les démarches préalables d'implantation des petits réacteurs.

Des travaux ont été engagés par la DGEC pour adapter le cadre législatif et réglementaire aux spécificités des SMR et AMR en suivant cette logique de proportionnalité.

La seconde requête des porteurs de projet porte **sur les délais réglementaires d'autorisation**. Un porteur de projet a soulevé dans sa contribution la longueur de l'ensemble des procédures aujourd'hui prévues pour toute installation nucléaire comportant l'examen par l'ASNR de la demande d'autorisation de création, délivrée par le Premier ministre, qui peut durer de 3 à 5 ans, de l'autorisation de mise en service après construction de l'installation, soit 1 an prorogeable une fois, en notant que les éventuels contentieux, dont les délais ne sont pas connus peuvent potentiellement s'étendre sur plusieurs années. Parallèlement, il faut y ajouter les autorisations environnementales (installations classées pour la protection de l'environnement : ICPE, etc.). Les porteurs de projet souhaiteraient que les procédures accélérées prévues par la loi<sup>89</sup> pour le nouveau nucléaire électrogène soient applicables aux petits réacteurs et que les projets de SMR/AMR puissent prétendre au statut de projets d'intérêt public majeur (loi industrie verte), afin de bénéficier de procédures simplifiées. Ils formulent également le souhait d'une simplification des voies de recours allant jusqu'à une réduction du nombre de juridictions compétentes.

Une accélération des délais de procédures pour les SMR/AMR pourrait être facilitée dès lors que le modèle de réacteur examiné par l'autorité de sûreté présente la même technologie qu'un réacteur de grande puissance déjà autorisé. Aux États-Unis, par exemple, l'entreprise Westinghouse a déposé une demande d'autorisation pour son SMR AP-300, dont la technologie est identique à celle du réacteur AP-1000 déjà en exploitation : le délai d'examen du dossier par la *Nuclear Regulatory Commission* (NRC) devrait être de 2 ans, ce qui est relativement bref pour une installation nucléaire. Notons que peu de petits réacteurs français sont dans cette configuration.

La troisième demande des porteurs de projet porte sur **l'adaptation du régime de responsabilité civile pour dommage nucléaire** aux spécificités des installations SMR/AMR, notamment aux risques encourus. En effet, le régime actuel des installations nucléaires est lourd et les porteurs de projets souhaiteraient avoir l'assurance de bénéficier du régime de responsabilité pour « *risque réduit* », qui limite la responsabilité de l'exploitant à assurer des dommages de l'ordre de 70 M€, comparé à 700 M€ pour le régime général.

### Le régime de responsabilité civile pour dommage nucléaire

Le code de l'environnement prévoit, dans son régime juridique général, la responsabilité exclusive et sans faute de l'exploitant, limitée aujourd'hui en montant à 700 M€.

<sup>86</sup> Source : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000047495905>

<sup>87</sup> INB détenant des matières soumises à autorisation.

<sup>88</sup> Une décision de l'ASN permet des dérogations en la matière, mais selon des règles non explicites (décision 2013 0360).

<sup>89</sup> Procédures accélérées prévues pour les EPR-2 par la loi du 22 juin 2023, qui ne mentionne pas les SMR non électrogènes et ne vise que les réacteurs implantés à proximité d'installations préexistantes. ii. Procédures accélérées pour la révision des documents d'urbanisme.

Il prévoit également un régime spécifique, pour « *risque réduit* », fixé à 70 M€. L'éligibilité d'un exploitant au régime réduit est déterminée par deux critères :

- la nécessité ou pas de prendre en compte des mesures de protection de la population, selon un seuil de radioactivité ;
- la démonstration que l'installation ne pourra pas provoquer plus de 70 M€ de dommages.

Le critère d'éligibilité au régime du « *risque réduit* » demandant à l'exploitant de démontrer que les dommages causés ne pourront dépasser 70 M€ pourra être difficile à démontrer pour des SMR/AMR implantés à proximité de sites industriels comportant eux-mêmes des risques importants. C'est pourquoi les porteurs de projet formulent la demande de moduler davantage les seuils de responsabilité aujourd'hui applicables pour sortir de la dichotomie actuelle (700 M€ vs 70 M€) voire de généraliser le régime de la responsabilité pour « *risque réduit* » pour les SMR/AMR.

En effet, le régime de responsabilité civile aura un impact majeur sur le montant des primes d'assurance et donc sur l'accès aux financements privés des projets de SMR/AMR. Certains porteurs de projet sollicitent également une concertation avec les acteurs de l'assurance pour créer les conditions favorables à la couverture des futures installations.

### 3.4.2. Mais la nécessaire prise en compte de risques nouveaux liés aux technologies, usages et modèles d'exploitation des SMR/AMR

Ces gains de simplification et d'accélération des procédures pourront toutefois être en partie atténués par la nécessité que la réglementation prenne en compte la spécificité des SMR/AMR, ce qui pourra prendre du temps. C'est pourquoi il est ressorti du groupe de travail qu'il était nécessaire d'anticiper les points suivants.

a) La plupart des **technologies** utilisées dans les designs des porteurs de projet présentent des degrés de maturité moins avancés que les réacteurs classiques à eau. C'est notamment le cas des technologies utilisées par les AMR. Leur examen par le régulateur sera donc susceptible d'être plus long que celui des SMR<sup>90</sup>. L'ASNR a engagé les travaux sur un projet d'AMR qui l'a saisi d'une Demande d'autorisation de création (DAC)<sup>91</sup>.

b) Les démarches d'autorisation devront également prendre en compte **les risques liés à l'éventuelle colocalisation des SMR/AMR avec d'autres activités**, notamment industrielles, présentant des risques importants. Les industries énérgo-intensives qui pourront potentiellement recourir aux SMR/AMR (chimie, hydrogène, etc.) sont en effet soumises à des régimes particuliers d'autorisation et de prévention des risques (Seveso, PPRT, etc.). L'articulation des différentes contraintes réglementaires sur un site partagé doit donc être pensée en amont du déploiement du projet. C'est notamment un point de vigilance relevé par le pôle de compétitivité de la plate-forme industrielle de Fos-sur-Mer dans son étude d'opportunité d'implantation de petits réacteurs sur son site<sup>92</sup>.

c) La réglementation devra également être adaptée **aux nouveaux usages des petits réacteurs nucléaires**. Comme détaillé précédemment, la chaleur nucléaire doit être reconnue comme « *décarbonée* » pour les réseaux de chaleur pour que cet usage puisse pleinement se développer. En effet, les réseaux de chaleur sont soumis actuellement à des obligations en matière de décarbonation qui se traduisent par des exigences en matière d'utilisation d'énergie renouvelable ou récupérable. Pour promouvoir l'énergie nucléaire comme énergie de chauffage, il faudrait substituer ce critère à un critère portant sur les émissions de gaz à effet de serre, comme c'est actuellement le cas pour les réseaux de froid<sup>93</sup>.

d) **Les règles régissant la responsabilité de l'exploitant** doivent enfin être adaptées au nouveau modèle d'exploitation des SMR/AMR. L'exploitant est en effet au cœur de la réglementation actuelle. C'est celui qui aujourd'hui développe, construit, exploite et démantèle le SMR/AMR, produit et vend l'électricité à un client qui n'est pas à proximité, ni sur le terrain de la centrale et qui est encore moins propriétaire du terrain. Dans les schémas d'exploitation des SMR/AMR, le réacteur peut être implanté sur le terrain de l'industriel, donc du client, voire être la propriété de l'industriel. Il faut donc envisager

<sup>90</sup> Séance de travail du 10 mars 2025.

<sup>91</sup> Projet de réacteur HTR Jimmy Energy.

<sup>92</sup> Séance de travail du 10 février 2025.

<sup>93</sup> Intervention de la FEDENE, lors de la séance de travail du 16 septembre 2024.

un régime de responsabilité qui prenne en compte ce nouvel acteur qui est le « *client* » de l'énergie produite et détermine d'éventuels transferts de responsabilité à des tiers.

Le code de l'environnement prévoit aujourd'hui un transfert de responsabilité de l'exploitant au propriétaire de l'installation ou du terrain s'il est distinct de l'exploitant et si celui-ci est défaillant. Les porteurs de projet ont émis le souhait que le régime de responsabilité prévoie une exonération totale ou *a minima* partielle des clients et des propriétaires de terrain afin que cet enjeu de la responsabilité ne dissuade pas l'industriel de recourir à un SMR/AMR. En effet, les industriels interrogés dans le cadre du groupe de travail ont manifesté une faible appétence à devenir exploitant d'un petit réacteur nucléaire. Ils envisagent le recours à ce type de vecteur d'énergie comme client d'un fournisseur qui endosse la totalité de la responsabilité liée à l'implantation, à l'exploitation et au démantèlement du réacteur.

**A priori, aucun obstacle majeur n'a été identifié par le groupe de travail pour adapter la réglementation et ou les processus d'autorisation aux spécificités des SMR/AMR. Même si des gains de simplification et de délais peuvent être attendus, l'adaptation des règles et les examens des demandes d'autorisation par le régulateur pourront avoir un impact sur les calendriers des projets. Une priorisation, voire un renforcement au cours du temps, des moyens humains de l'ASNR sur l'examen des demandes d'autorisation d'installation des SMR/AMR pourrait accélérer les délais.**

**En outre, comme exprimé *supra*, leur harmonisation au niveau européen, nécessaire pour permettre les effets de série essentiels à la compétitivité économique des SMR/AMR, sera un facteur d'accélération. Elle dépendra de la capacité à impliquer les autres États-membres dans ces démarches. L'application du principe de reconnaissance mutuelle est également une voie à explorer.**

## 4. Préparer l'intégration des petits réacteurs nucléaires dans les territoires

### 4.1. Anticiper les enjeux d'acceptabilité locale

#### 4.1.1. Un enjeu d'information et de transparence en amont du déploiement du projet sur un territoire

L'enjeu de l'acceptabilité des SMR/AMR a été identifié par l'ensemble des membres du groupe de travail comme un élément déterminant pour leur déploiement. Il a pu notamment se fonder sur une première expérience : celle de l'annonce de l'étude d'implantation du réacteur développé par Jimmy Energy sur le site de l'entreprise Cristal Union, spécialisée dans la production d'éthanol, à Bazancourt dans la Marne. L'entreprise avait en effet déposé une Demande d'autorisation de création (DAC) auprès de l'ASNR en avril 2024. L'annonce de cette DAC dans la presse avait suscité dans un premier temps des retours plutôt défavorables auprès des élus locaux et des riverains.

La maîtrise des éléments d'acceptabilité est d'autant plus importante pour les développeurs de SMR/AMR que leurs projets, vu leurs tailles et le montant de l'investissement, ne nécessiteront pas toujours (en l'état des seuils réglementaires) l'activation de la Commission nationale du débat public (CNDP). Le retour de l'ensemble des acteurs, au vu de cette première expérience, est une nécessité de transparence vis-à-vis du public (élus locaux, riverains, presse locale) et de communication en amont de la mise en œuvre de chaque étape du projet. Les porteurs de projet doivent donc concilier plusieurs calendriers : celui du développement technologique de leur projet, de leur développement économique, leur dialogue avec le régulateur ainsi que la communication et la concertation avec le public.

Lors de leur audition par le groupe de travail, les représentants de l'Association nationale des comités et commissions locales d'information (ANCCLI), ont indiqué que les porteurs de projet pourront s'appuyer sur les Commissions locales d'information (CLI) pour les aider à structurer leur démarche de dialogue avec les populations locales. Les CLI sont en effet chargées de recueillir de l'information sur les projets nucléaires prévus ou en exploitation sur leur territoire et de transmettre cette information aux citoyens, *via* des réunions publiques, des bulletins d'information ou d'autres vecteurs de communication. Une CLI peut être créée dès lors qu'un porteur de projet a déposé une demande d'autorisation de création auprès du régulateur.

#### Le rôle des Commissions locales d'information (CLI)

La France compte 35 Commissions locales d'information (CLI), rattachées chacune à un site nucléaire (centrales nucléaires, centres de gestion des déchets hormis celui du CIREC – centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage –, centres de recherche, sites d'Orano et Framatome de retraitement et fabrication du combustible). Une CLI peut être créée dès lors qu'un porteur de projet a déposé une demande d'autorisation de création auprès du régulateur.

Leurs missions, qui relèvent de la sûreté nucléaire et sont inscrites dans le code de l'environnement, sont de : (i) recueillir de l'information (auprès de l'exploitant, de l'autorité de sûreté nucléaire, d'experts, *etc.*) ; (ii) transmettre aux citoyens de l'information *via* des réunions publiques annuelles qui sont obligatoires, ou d'autres vecteurs (site internet, conférences de presse, bulletins d'information).

Leurs membres sont issus d'acteurs locaux, avec au moins 40 % d'élus, au moins 10 % de représentants d'organisations syndicales, au moins 10% de représentants d'associations et au moins 10 % de personnes qualifiées (SFEN, ARS, ordre des médecins, *etc.*). Elles sont financées par l'État, *via* la taxe due par les INB et par les collectivités territoriales.

Les 35 CLI sont fédérées au niveau national dans l'ANCCLI qui peut produire des avis, notamment sur les projets de décision de l'ASN (par exemple la phase pilote du projet Cigéo, avec des visites d'installation à l'appui).

Les éléments de communication publics apportés par les premiers projets arrivés à maturité seront essentiels pour bâtir un cadre de confiance global pour l'ensemble des projets de SMR/AMR. Ils serviront en effet de cadre à l'acceptabilité de ces nouvelles technologies et de leurs nouvelles modalités d'implantation dans l'ensemble de la population. À cet égard, certaines personnes auditionnées ont mis en avant l'écart qui pouvait parfois exister entre un discours des porteurs de projet fondé sur les promesses des SMR/AMR (en termes de délais, de sécurité, de déchets), notamment à l'égard des investisseurs, et le besoin de transparence qu'implique l'acceptabilité d'une technologie encore non connue du grand public.

### 4.1.2. La prise en compte d'enjeux d'acceptabilité spécifiques aux SMR/AMR

Les personnes auditionnées par le groupe de travail ont relevé un renouveau de la confiance accordée au nucléaire depuis quelques années. Pour autant, toutes ont souligné qu'ils ne présupposaient pas une acceptabilité *a priori* des SMR/AMR. En effet, leurs spécificités en matière de lieux d'implantation et d'usage impliquent de penser les ressorts d'une acceptabilité propre aux petits réacteurs nucléaires.

D'après la SFEN auditionnée dans le cadre du groupe de travail<sup>94</sup>, **les principaux éléments d'inquiétudes** exprimés par le public sur les SMR/AMR sont les suivants :

a) La dissémination des petits réacteurs, la crainte d'un développement « *anarchique* » sur le territoire : l'enquête relève qu'il s'agit également d'éléments de langage portés par les opposants aux projets éoliens. L'implantation de réacteurs nucléaires à proximité des lieux d'habitation est aussi un frein à l'acceptabilité locale<sup>95</sup>.

b) La privatisation du nucléaire et le portage de projets par des *start-ups* : le nucléaire est en effet souvent associé à l'État. Il est considéré comme un bien commun dont la sécurité est assurée par la puissance publique. Dans ce cadre, l'ASNR est bien identifiée par le public.

c) Les risques liés à la co-activité (sujet qui se retrouve dans le débat public de Gravelines qui comporte un certain nombre d'installations Seveso dans son voisinage). Le public n'envisage pas en effet qu'un réacteur soit installé sur un site privé et dans une zone industrielle. Il s'inquiète également des éventuelles souplesses en termes de règles de sureté dont le projet pourrait bénéficier du fait de sa petite taille.

Selon les *focus groups* interrogées dans l'étude de la SFEN, la mise en avant des **retombées positives locales** pourrait faciliter l'acceptabilité des projets, notamment :

- l'organisation de débats sur le mix énergétique global, car il est apparu que la population connaissait mal la consommation fossile des sites industriels implantés à proximité de leur lieu de résidence ;
- les bénéfices économiques et en termes d'attractivité pour le territoire, notamment sur l'activité économique grâce à l'apport d'une source d'énergie locale, permettant la sécurisation des approvisionnements (image du « *château d'eau* »).

Les différentes auditions du groupe de travail ont ainsi fait apparaître l'importance de développer une acceptabilité à l'échelle locale, en lien étroit avec les territoires (élus, habitants, potentiels usages locaux des SMR/AMR) et en mettant en avant les bénéfices que ces derniers pourraient en tirer.

La communication de la ville de Vineyard City en Utah qui étudie l'opportunité d'installer sur son territoire des petits réacteurs, notamment pour ses besoins industriels, fait ressortir les mêmes éléments. La ville a anticipé une campagne de communication auprès de ses habitants pour promouvoir les avantages économiques des SMR/AMR et de leur impact sur l'environnement local et les émissions de GES, notamment par rapport à l'utilisation du gaz et du charbon.

Il est enfin apparu que l'acceptabilité du projet serait facilitée par l'histoire industrielle, et plus particulièrement nucléaire, du territoire d'implantation : le fait que des industries à risques (Seveso) ou qu'une centrale nucléaire soient déjà présentes sur le territoire auraient vocation à favoriser localement l'acceptabilité d'un projet de SMR/AMR<sup>96</sup>. Par exemple, la communauté de communes du Gard Rhodanien a voté à l'unanimité une délibération favorable à l'implantation d'un petit réacteur nucléaire sur son territoire : son Président, auditionné par le groupe de travail, a mis en avant, pour expliquer ce consensus, l'histoire industrielle et nucléaire du territoire, proche de sites nucléaires (Marcoule, Le Tricastin) et accueillant des sous-traitants de la filière nucléaire.

<sup>94</sup> Séance de travail du 9 décembre 2024.

<sup>95</sup> Relevé par Julie FULLMER, Maire de Vineyard City en Utah, lors de la séance de travail du 7 octobre 2024.

<sup>96</sup> Cf. intervention de Jean-Christophe REY, Président de la communauté de communes du Gard Rhodanien, lors de la séance de travail du 10 février 2025.

**Anticiper la communication sur les projets à l'échelle locale (dès la phase amont) et penser les ressorts de l'acceptabilité spécifiquement pour les SMR, car de nouveaux critères sont à prendre en compte (acteurs privés, implantations proches des activités humaines et dispersées, seuil inférieur au cadre de la Commission nationale du débat public (CNDP), etc.).**

### 4.2. Pré-identifier les premiers sites d'implantation

#### 4.2.1. Des logiques d'implantation diverses selon les usages

En fonction des usages des petits réacteurs nucléaires, deux logiques d'implantation des SMR/AMR ont été dégagées par le groupe de travail.

a) Pour les SMR/AMR fournissant de la chaleur, l'implantation sera guidée par la localisation du client de l'installation (industriel ou collectivité pour le chauffage urbain). Ces SMR/AMR s'implanteront donc sur des sites *ex nihilo*, potentiellement sans histoire nucléaire ni installation nucléaire à proximité. C'est notamment le cas du projet porté par Jimmy Energy qui envisage de s'implanter sur le site de Cristal Union à Bazancourt dans la Marne.

#### L'étude d'une implantation de petit réacteur sur le site de Cristal Union à Bazancourt

Cristal Union est une coopérative agricole, premier fournisseur de sucre pour l'industrie agroalimentaire française. Elle produit également de l'alcool, de la parfumerie, des cosmétiques, du bioéthanol, et de l'alimentation animale à partir de betteraves. Elle est implantée sur 13 sites de production en France et emploie 2 000 salariés.

Cristal Union a une trajectoire de réduction de 24 % des émissions de CO<sub>2</sub> entre 2019 et 2030, qui se traduit notamment par la décarbonation de ses processus industriels. L'entreprise a le projet d'acquiescer une autonomie énergétique dans ses processus industriels d'ici 2050. Elle utilise aujourd'hui le gaz naturel (8 TW/h/an) et étudie le projet de se doter d'une chaudière biomasse alimentée par la pulpe de betterave sur son site de Bazancourt.

Pour compléter la décarbonation de ce site, qui fait partie des 50 sites les plus émetteurs de CO<sub>2</sub> en France (émission de 250 000 tonnes de CO<sub>2</sub>/an), Cristal Union étudie l'ensemble des solutions innovantes, dont les petits réacteurs nucléaires, pour décarboner ce site industriel. Elle a initié il y a 4 ans une étude avec Jimmy Energy (signature d'un protocole d'étude) qui a déposé un dossier auprès de l'ASNR.

Un petit réacteur ne pourrait produire que 15 à 20 % de la demande du site en énergie. Cristal Union ne souhaite pas être dépendante d'une seule source d'énergie et continuera à utiliser la biomasse. L'implantation d'un petit réacteur est considérée comme une voie d'appoint et cette technologie est, à ce stade, une solution étudiée parmi d'autres.

Il s'agit de sites industriels implantés en zone rurale sans installation nucléaire à proximité.

Ces implantations *ex nihilo* devront donc prendre en compte l'intégration du réacteur dans un écosystème local potentiellement déjà soumis à des règles de sureté (sites Seveso pour les zones industrielles) et acquiescer une acceptabilité locale. Outre-les SMR/AMR fournisseurs de chaleur, ce cas inclut les SMR électrogènes alimentant des *data centers* souhaitant être autonomes par rapport au réseau électrique, qui obéiraient à leur logique propre d'implantation.

b) Pour les petits réacteurs producteurs d'électricité pour le réseau, notamment les SMR, le lieu d'implantation n'est pas déterminé par la localisation du client. D'autres facteurs favorables à l'implantation contribueront toutefois au choix du site. La proximité d'installations nucléaires a été relevée comme un de ces facteurs, car elle « *dérisque* » les projets neufs, facilite le raccordement au réseau<sup>97</sup> et favorise l'acceptabilité. D'autres facteurs seront à prendre en considération : la disponibilité du foncier, l'accès à une source d'eau froide pour certains réacteurs, une connexion facilitée au réseau électrique et l'acceptabilité de la population.

#### 4.2.2. Une identification peu évidente des premiers sites d'implantation

Les porteurs de projet ont formulé la demande d'un accompagnement dans le choix des premiers sites d'implantation. Le groupe de travail a auditionné plusieurs acteurs industriels et plusieurs collectivités locales : aucun site n'est ressorti comme particulièrement évident pour l'installation de premiers SMR/AMR. L'audition de RTE n'a pas permis de concevoir une cartographie des potentiels sites d'accueil des petits réacteurs, le Schéma décennal de développement du réseau (SDDR 2025-2040)

<sup>97</sup> Cf. intervention d'EDF, lors de la séance de travail du 13 janvier 2025.

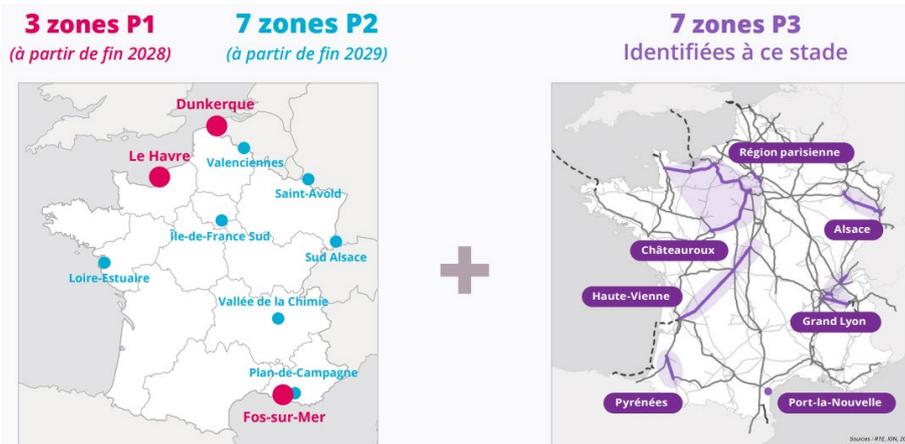
publié en janvier 2025<sup>98</sup> ne précisant pas la localisation des futures capacités d'accueil des installations nucléaires, comme c'est le cas pour les EnR. Ces dernières bénéficient en effet de « capacités réservées », définies dans les schémas régionaux de raccordement au réseau des EnR (non publics). L'État réserve par exemple des capacités réseau sur les façades maritimes préalablement auxancements des appels d'offres relatifs à l'éolien en mer.

Par ailleurs, pour l'ensemble des potentiels clients de SMR/AMR auditionnés, il est ressorti que les petits réacteurs présentent des avantages prometteurs, mais qu'ils sont étudiés comme des solutions parmi d'autres pour avoir accès à une énergie décarbonée et que la compétitivité du coût de l'énergie fournie par rapport aux autres vecteurs énergétiques (biomasse, EnR, etc.) et les enjeux de sureté seront déterminants dans leur adoption.

Il est toutefois possible d'identifier une typologie de territoires dont les caractéristiques seraient susceptibles de favoriser l'implantation d'un SMR/AMR. Il s'agit des régions françaises les plus industrielles, les régions accueillant déjà des installations nucléaires, ou d'anciens sites de production d'énergie thermique. Pour les réacteurs purement électrogènes, les capacités d'accueil sont plus limitées dans les vallées où sont déjà implantées des installations hydrauliques et les zones de forte production d'énergie solaire<sup>99</sup>. Il existe par ailleurs un déséquilibre entre un grand Sud-Ouest excédentaire en production d'électricité, grâce au solaire<sup>100</sup>, et un grand Nord-Est déficitaire.

Le récent SDDR de RTE cartographie les principales zones industrielles reconnues comme « prioritaires » au raccordement électrique.

## Zones d'accélération de la stratégie réseau THT pour l'accueil de la consommation industrielle<sup>101</sup>



Source : Synthèse SDDR de RTE, mars 2025, page 19

Par ailleurs, la carte des sites industriels les plus émetteurs de GES, et plus spécifiquement celle des 50 sites à décarboner, permet également d'identifier les sites industriels où les besoins de décarbonation sont les plus importants. Le site de Fos-sur-Mer émet par exemple 2 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an et représente 15 % des émissions industrielles nationales. La plate-forme industrielle estime à 4 Md€ d'investissements prévus dans la décarbonation d'ici 2030.

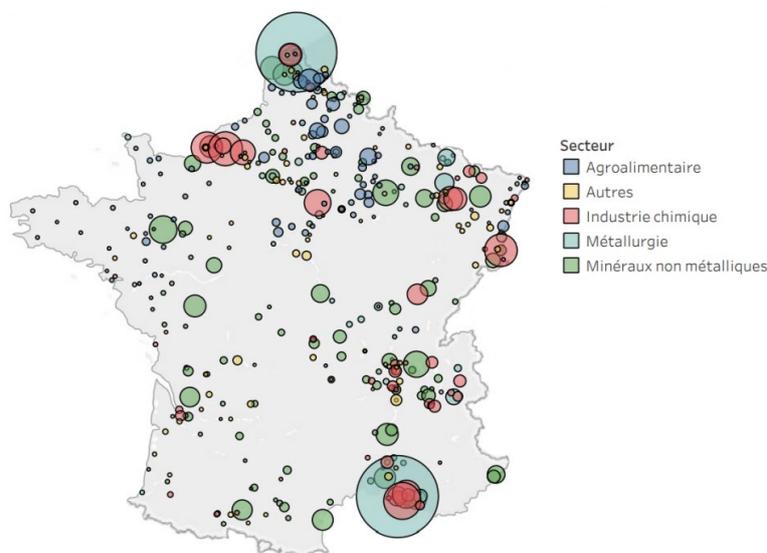
<sup>98</sup> Source : <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/le-schema-decennal-de-developpement-du-reseau#DocumentsSDDR2025>

<sup>99</sup> Intervention de RTE, lors de la séance de travail du 13 janvier 2025.

<sup>100</sup> 25 % des capacités d'accueil supplémentaires des EnR sont situées en Nouvelle-Aquitaine et 15 % en Bourgogne-Franche-Comté, Auvergne-Rhône-Alpes et Occitanie (cf. SDDR 2025-2040 de RTE).

<sup>101</sup> Note : P1 : Investissements déclenchés dès l'obtention de l'autorisation administrative. P2 : Travaux lancés si le niveau d'engagement des industriels est confirmé. P3 : Possibilité de création d'infrastructures communes à plusieurs industriels et application du régime P2.

## Cartographie des principaux sites émetteurs de l'industrie manufacturière<sup>102</sup>



Source : Thémas de la DGE, mars 2023, page 3

La récente étude d'E-Cube et de la SFEN a tenté d'établir une carte des sites favorables à l'implantation des SMR/AMR (cf. annexe 4.6). Cette dernière recoupe largement les clusters industriels dont les activités sont fortement consommatrices d'énergie (ports du Havre et de Dunkerque, Fos-sur-Mer, vallée de la chimie à Lyon, etc.) ainsi que les principales zones métropolitaines françaises.

En ce qui concerne le cas de SMR alimentant des réseaux de chaleur urbaine, une cartographie serait à établir des réseaux aux besoins de capacité décarbonée les plus importants, manquant de solution locale à l'échelle nécessaire (géothermie, etc.) et offrant un foncier propice (zone à moindre densité urbaine).

**L'identification de la localisation des sites devant accueillir les SMR/AMR est un enjeu de moyen terme, mais non négligeable pour assurer l'acceptabilité et la compétitivité des projets.**

### 4.3. Préparer l'intégration des petits réacteurs nucléaires dans le réseau électrique

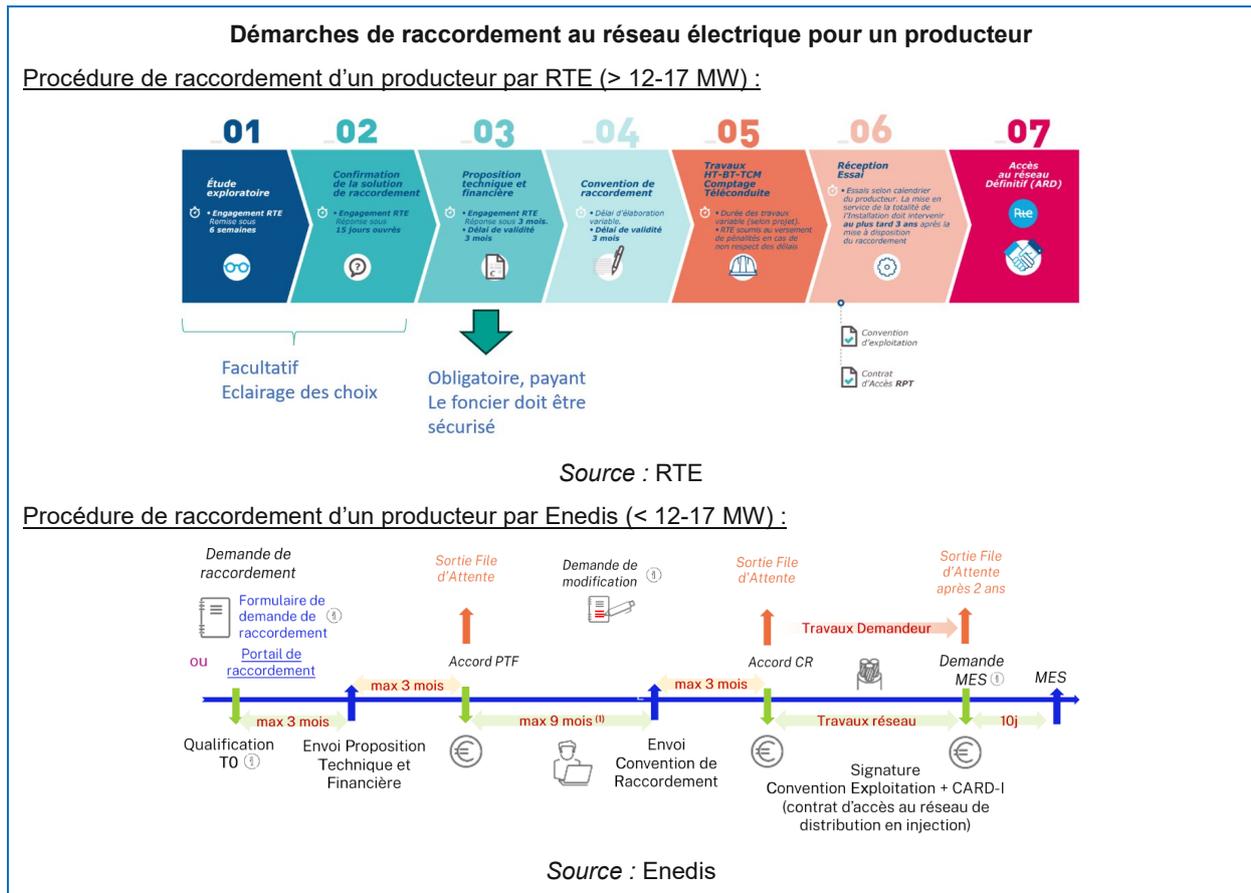
#### 4.3.1. Un enjeu non prioritaire et qui *a priori* ne posera pas de difficulté insurmontable

Le raccordement au réseau électrique est un droit pour tout producteur d'électricité, garanti par le droit européen et français. Il est effectué par RTE pour les installations produisant plus de 12 MW, avec une dérogation possible jusqu'à 17 MW. En-deçà de cette puissance, le producteur d'électricité est raccordé au réseau par Enedis.

L'audition de RTE et d'Enedis n'ont pas fait ressortir d'obstacle particulier au raccordement futur des SMR/AMR au réseau électrique. Ils sont considérés comme des producteurs « classiques ». RTE raccorde communément des producteurs de taille intermédiaire comme des centrales à gaz. La cogénération ne semble pas poser de difficulté particulière, des installations similaires étant déjà raccordées (gaz qui fournit de la chaleur). Le producteur peut par ailleurs, en cas d'activité saisonnière, alimenter le réseau de manière variable pendant l'année, valoriser cette flexibilité et offrir ce service à RTE.

Il convient toutefois de considérer les coûts de raccordement au réseau, qui sont à la charge du producteur d'électricité, ainsi que les délais de raccordement incluant les études préalables.

<sup>102</sup> Données : EUTL4. La taille des cercles est proportionnelle aux émissions vérifiées pour l'année 2019. Seules les installations ayant émis plus de 0,01 MtCO<sub>2e</sub> en 2019 sont représentées. Les deux plus gros cercles bleus correspondent aux sites métallurgiques d'ArcelorMittal de Dunkerque et de Fos-sur-Mer équipés de hauts fourneaux alimentés par du charbon.



Les installations raccordées doivent également respecter les règles *Requirements for Generators* (RfG) spécifiées par la réglementation européenne<sup>103</sup>, leur demandant de se conformer à des contraintes spécifiques tenant à : (i) la stabilité de fréquence ; (ii) la stabilité de tension ; la robustesse des installations ; (iii) la restauration du système ; (iv) la notification opérationnelle aux gestionnaires de réseau ; (v) des exigences techniques spécifiques selon le type d'installation.

#### 4.3.2. Le cas particulier des petits réacteurs en autoconsommation

Dans le cas où le petit réacteur est utilisé en autoconsommation par un client, notamment un industriel, plusieurs questions peuvent se poser.

D'une part, celle de la rétribution de l'électricité éventuellement injectée sur le réseau par le réacteur en cas de surcapacités (liées à une saisonnalité de l'activité industrielle du client, par exemple). Il faudrait prévoir dans ce cas les modalités de valorisation de cette énergie.

D'autre part, la question du coût de la consommation temporaire d'un SMR/AMR autonome, pour des besoins de maintenance, par exemple, se pose.

Les porteurs de projet ont formulé le souhait d'être impliqués dans les travaux prospectifs tenant à l'insertion des SMR/AMR « *autonomes* » dans le réseau électrique.

**L'insertion technique dans le réseau électrique des SMR/AMR, et leurs conditions de raccordement, sont un sujet de long terme qui ne posera vraisemblablement pas de difficulté.**

<sup>103</sup> Règlement européen « *Requirements for Generators* » du 27 avril 2016.

### Annexe 1 – Cadrage de la mission

#### Le contexte lors du lancement du groupe de travail (note de cadrage de la CRE)

Le groupe de travail avait vocation à contribuer aux réflexions sur les petits réacteurs modulaires (*Small modular reactor* – SMR) et les réacteurs modulaires avancés (*Advanced modular reactor* – AMR). Ces deux technologies désignent de nouveaux modèles de développement pour les réacteurs nucléaires, de puissance plus faible, *a priori* moins coûteux à fabriquer, avec des technologies différentes et aux usages élargis, au-delà de la fourniture d'électricité, comme la production de chaleur bas-carbone.

Aujourd'hui, les petits réacteurs modulaires sont encore en cours de développement et ne sont pas encore déployés à grande échelle.

Lors du lancement du groupe de travail, l'hypothèse d'un retard de la France et de l'Europe par rapport à d'autres pays pouvait se poser et questionner par voie de conséquence la façon et les moyens de le résorber pour permettre aux acteurs nationaux et européens de s'imposer parmi leurs concurrents. Dans ce contexte, un soutien politique et financier des gouvernements aux acteurs est nécessaire pour stimuler le développement et le déploiement des SMR/AMR et assurer la viabilité économique des premiers projets. Les SMR/AMR devront, à cet égard, prouver leur capacité à être compétitifs à terme par rapport à d'autres sources d'énergie et à produire de l'électricité et/ou de la chaleur à un coût raisonnable.

Outre les nécessaires améliorations techniques et réductions de coût, un déploiement des SMR/AMR n'est envisageable qu'en tenant compte des impératifs suivants :

- les SMR et AMR devront répondre à des normes de sûreté et de sécurité nucléaire rigoureuses pour protéger la population et l'environnement contre les risques associés à la production d'énergie nucléaire ;
- ils devront franchir les différentes étapes des procédures d'autorisation relevant des autorités réglementaires nucléaires de chaque pays, avant de pouvoir être déployés ;
- une infrastructure adéquate à l'échelle européenne devra être en place pour soutenir le déploiement des SMR/AMR. Cela inclut des installations pour la construction, la maintenance et le démantèlement des réacteurs ;
- le personnel travaillant avec/dans les SMR/AMR devra être correctement formé et qualifié pour opérer et entretenir ces réacteurs en toute sécurité ;
- un approvisionnement stable et sûr en combustible nucléaire, éventuellement adapté, sera nécessaire pour garantir le fonctionnement continu des SMR/AMR ;
- un plan de gestion des déchets radioactifs devra être établi pour s'assurer que les déchets produits par les SMR/AMR soient stockés, traités ou éliminés de manière sûre ;
- il sera crucial d'obtenir le soutien et l'acceptation du public et des parties prenantes locales pour le déploiement des SMR/AMR. Cela pourra impliquer des consultations publiques et des programmes d'information ;
- une évaluation approfondie de l'impact environnemental des SMR/AMR devra être effectuée pour s'assurer qu'ils contribueront de manière positive à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la lutte contre le changement climatique.

#### Les enjeux du groupe de travail

Le développement des SMR/AMR soulève de nombreuses questions que l'on peut regrouper en trois familles : i) les opportunités que représentent les SMR/AMR, ii) les risques qui y sont associés et iii) les aspects opérationnels de leur développement.

Le groupe de travail n'avait pas pour objectif d'analyser les solutions technologiques développées pour les SMR/AMR, ni leurs futurs lieux d'implantation.

### Les opportunités que représentent les SMR/AMR

Les SMR/AMR pourraient participer à la transition écologique, à la souveraineté énergétique, à la réduction des risques de pénurie d'électricité et au développement d'une filière économique.

#### *Répondre à la demande de diversification et de décarbonation de la production d'énergie*

Dans le cadre de la transition énergétique, les SMR/AMR peuvent permettre une diversification du mix énergétique et une réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.

Le groupe de travail devait s'intéresser à la manière de cibler les usages prioritaires. Contrairement aux réacteurs classiques, les projets de SMR/AMR en développement présentent tous des caractéristiques différentes. Du côté des SMR/AMR, il faut regarder : i) le niveau de puissance électrique et thermique, la température de la vapeur en sortie ; ii) le calendrier prévisionnel et la date de mise en service et disponibilité. Pour les usages, il faut également regarder : i) les courbes de demande par usage ; ii) les objectifs et le planning de décarbonation.

Par exemple, comme présenté dans l'étude de Compass Lexecon sur les opportunités et enjeux socio-économiques et environnementaux du projet Nuward du groupe EDF<sup>104</sup>, certains secteurs ont besoin d'atteindre des niveaux et rythmes de décarbonation incompatibles avec les plannings actuels de développement de certains projets de SMR/AMR. On peut citer également des besoins en température spécifiques pour la chaleur industrielle, la chaleur urbaine, l'hydrogène produit par électrolyse à basse ou à haute température et le dessalement.

#### *Réduire les risques de pénurie*

Le développement des SMR/AMR comme nouveaux moyens de production pilotables permet de réduire des risques de pénurie d'électricité sur les réseaux assurant une puissance trop limitée pour connecter de nombreuses sources de grande puissance. Le remplacement de grands réacteurs nucléaires par un ensemble de plusieurs SMR/AMR permet une pilotabilité à l'échelle du système en activant individuellement ou pas chacun des petits réacteurs qui le constituent. Mais la question du pilotage plus fin d'un réacteur se pose également. Le groupe de travail devait ainsi s'intéresser à la variabilité de la cogénération. En effet, les changements de demande en électricité ou en chaleur peuvent dans ce cas-là être absorbés *via* la modification du ratio électricité/chaleur. La question de la valorisation de la chaleur hors période de chauffe se pose également. En étant intégré et connecté à un réseau de chaleur local, il faut donc activer des synergies avec les autres consommateurs. Cela pose la question des infrastructures et de la régulation adéquates.

L'amélioration de la sécurité de l'approvisionnement passerait aussi par une réponse aux besoins locaux en électricité et en chaleur. Cette production décentralisée d'électricité, couplée à de la chaleur, permet de livrer une solution clé en main à des industriels, sans la nécessité d'entretenir deux approvisionnements différents. La cogénération permet également de penser à des usages utilisant spécifiquement les deux, comme la production d'hydrogène et la désalinisation. Ainsi, les SMR/AMR offrent la possibilité d'être installés directement proche des consommateurs.

Les SMR/AMR, par leur petite taille et donc leurs risques associés plus faibles, peuvent être pertinents pour alimenter des centres de consommation ou des bassins industriels éloignés des grands centres de production et éviter des coûts de renforcement du réseau électrique conséquent.

#### *Faire émerger une nouvelle filière économique*

Le développement des SMR/AMR pose la question du développement d'une nouvelle filière et des synergies potentielles avec la filière nucléaire actuelle. Les volumes de construction projetés et les spécificités de ces réacteurs interrogent l'impact sur les qualifications et les compétences nécessaires, ainsi que l'impact sur la formation. Le développement des SMR/AMR peut permettre d'entretenir le savoir-faire dans le nucléaire civil.

---

<sup>104</sup> Voir l'étude d'opportunité de juin 2023 réalisée par Compass Lexecon pour EDF et Nuward, à l'adresse suivante : [https://www.nuward.com/sites/nuward/files/2023-06/Etude\\_version\\_publicue.pdf](https://www.nuward.com/sites/nuward/files/2023-06/Etude_version_publicue.pdf)

### Les risques associés aux SMR/AMR

Toutefois, les SMR/AMR présentent des risques et posent la question de leur intégration au modèle nucléaire actuel, de leur impact environnemental, de la soutenabilité de leur modèle et de leur développement technologique.

#### *Quelle intégration au modèle nucléaire actuel ?*

Il faut s'intéresser à la manière dont un projet de SMR/AMR s'inscrit dans la chaîne nucléaire actuelle. L'approvisionnement du combustible utilisé par les SMR et notamment les AMR est-il stable et sûr ? Quelle forme de packaging ? Quel niveau d'enrichissement ? Certains projets travaillent à accentuer la fermeture du cycle combustible actuel, avec l'utilisation de Mox multi recyclage, d'autres font appel à d'autres combustibles. Pour l'aval, il est nécessaire de comprendre son intégration au modèle actuel de démantèlement et de gestion des déchets. Le long de la chaîne du transport, stockage, traitement, élimination, quelles sont les spécificités liées aux SMR/AMR ? Est-ce que les acteurs actuels peuvent s'y adapter ?

#### *Un (ou des) modèle(s) soutenable(s) dans le moyen et long terme ?*

Il est nécessaire de comprendre, d'un côté, la soutenabilité organisationnelle des projets de SMR/AMR et, de l'autre côté, leur soutenabilité économique. La soutenabilité du modèle de développement des SMR/AMR tient à la fois de la répartition des responsabilités et de la gouvernance, et du *business model* adopté.

Dans le cadre de ces réacteurs, la chaîne est vouée à être très fragmentée. En particulier, les cas spécifiques du développement par une *start-up* et par un consortium interrogent la gouvernance, les responsabilités et la répartition des risques connues jusqu'ici en France dans le nucléaire. Pour les projets menés par des consortiums, la soutenabilité d'augmentations des coûts et des délais de mise en service pourrait affecter différemment les différents membres du consortium.

Du point de vue du *business model*, se posent les questions du modèle de financement, du niveau d'intégration verticale, du modèle de l'export et de la capacité de l'effet de série à compenser l'économie d'échelle. Nous n'en sommes qu'au début du cycle des SMR/AMR et pour l'instant le modèle économique n'est pas encore bien défini, différentes propositions existent.

Deux modèles semblent coexister pour l'instant pour le développement des SMR/AMR : d'une part, des acteurs historiques du nucléaire, parfois regroupés en consortium et, d'autre part, des *start-ups* visant des usages ou des technologies spécifiques. Ces *start-ups* sont issues du monde académique (par exemple, Stellaria, Naarea) ou bien développées *ex nihilo* (par exemple, Newcleo, Blue Capsule). Dans les deux cas, cela requiert un financement par capital-risque (*Venture capital* – VC), un modèle encore en développement pour les innovations et les *start-ups* industrielles. Le développement en capital-risque cristallise les questions sur la compatibilité entre les cycles habituels aux activités de capital-risque et les cycles propres à l'activité nucléaire, à la fois en termes de rendement et de durée associés. De plus, se pose la question de la capacité des acteurs du financement à comprendre les enjeux et à modéliser les risques financiers des SMR/AMR.

Chaque projet et *start-up* sont présents à différents endroits dans la chaîne de valeur. Certains veulent uniquement concevoir des SMR/AMR et une fois validé par les autorités nucléaires compétentes, vendre le concept à des « *fabricants* » (par exemple, Transmutex). D'autres souhaitent amener une solution tout-en-un en se positionnant de la conception jusqu'au démantèlement (par exemple, Jimmy Energy). Enfin, d'autres n'ont pas communiqué sur leurs ambitions. Le marché se définira en fonction des enjeux économiques respectifs des trois grands types d'acteurs que sont les producteurs historiques (par exemple, Nuward, filiale du groupe EDF), les *start-ups* et les gros consommateurs. On peut en effet imaginer que la production de chaleur et la possibilité de raccorder directement la consommation à de la production attirent des acteurs ayant de gros volumes à décarboner en voyant que des nouveaux venus comme des *start-ups* s'y lancent (avec succès).

La diversité des débouchés des SMR/AMR et le fait que la production électrique en France est déjà largement décarbonée placent l'export des réacteurs au cœur du *business model* pour les acteurs français. En effet, la taille des SMR/AMR et leur utilisation pour l'industrie et la désalinisation poussent à considérer leur installation dans des pays à forte intensité carbone ou des sites éloignés du réseau électrique actuel. L'export représente des contraintes à la fois pour les procédures de validation et certification nucléaire, pour la gestion de projet et la maîtrise d'ouvrage à distance, et le transport des éléments des SMR/AMR produits de manière centralisée. Ces contraintes sont d'autant plus

problématiques pour les *start-ups* mais elles peuvent ouvrir des opportunités pour les acteurs plus importants.

Enfin, les SMR/AMR vont à rebours de la tendance qu'a connue le nucléaire civil depuis ses débuts, qui consistait à lancer des réacteurs toujours plus puissants, avec une course à la taille (1 650 MW pour l'EPR de Flamanville). Les SMR/AMR font le pari que leur puissance plus petite permettra une modularité, une production en série, une simplification du *design* et une standardisation, qui compenseraient les économies d'échelles des réacteurs actuels. De plus, cette industrialisation de la construction et de l'assemblage permet d'éviter les écueils connus avec les premiers EPR. La mise en service et la maintenance échelonnée permet une intégration plus douce au réseau électrique, mais également plus rapide (détection de défauts et lancement de la première unité plus rapide) et donc une rentabilisation qui commencerait plus tôt.

### Les aspects opérationnels du développement

Le développement de cette filière pose des questions opérationnelles sur la manière de lancer les SMR/AMR, la sécurité nucléaire et le déploiement des infrastructures adéquates sur la durée de vie des réacteurs.

Premièrement, se pose la question de la conception, construction, assemblage, mise en service, maintenance et démantèlement des réacteurs. Il faut comprendre l'étendue des besoins pour chaque phase pour les différents projets de SMR/AMR et comprendre les différences avec la filière actuelle.

Deuxièmement, il faut séparer ces besoins et ces adaptations nécessaires entre temps court et long, entre tête de série, construction et opérations en série.

Troisièmement, plus spécifiquement au développement de centrales avec plusieurs SMR/AMR à la place d'un réacteur classique ou d'une centrale thermique existante, cette multiplicité permet une mise en service échelonnée et au plus rapide, ainsi qu'une maintenance échelonnée.

### Le périmètre de la mission du groupe de travail

Les SMR/AMR présentent donc une variété d'approches et de questions, ainsi le groupe de travail devait se concentrer sur les modalités de l'intégration des SMR/AMR dans les systèmes énergétiques actuels et les facteurs clés de succès, suivant plusieurs axes : i) l'innovation ; ii) les modèles économiques ; iii) les défis industriels ; iv) l'intégration aux systèmes énergétiques et v) la participation à la décarbonation.

Afin d'approfondir l'analyse, le groupe de travail pouvait formuler des recommandations, afin de développer une vision intégrée des SMR/AMR dans notre futur énergétique.

Concernant les modèles économiques, il devait se pencher sur le *business model* et la gouvernance des différents projets, leur efficacité et leur rentabilité. Les défis industriels incluent le partage des responsabilités, les spécificités du prototypage *versus* la montée à l'échelle, ainsi que les processus de certification et la mise en service.

L'intégration aux systèmes énergétiques aborde, d'une part, l'intégration à la filière nucléaire existante et, d'autre part, la contribution au mix de production.

Le groupe de travail devait apporter une attention particulière à l'intégration aux écosystèmes énergétiques locaux français, y compris dans les zones non-interconnectées au réseau électrique métropolitain français<sup>105</sup>, ainsi qu'en Nouvelle-Calédonie.

Enfin, l'enjeu clef de l'acceptabilité du public et des parties prenantes nécessitait d'objectiver la contribution des SMR/AMR aux objectifs de décarbonation et de prévoir des réponses aux interrogations concernant les déchets et la sûreté, notamment dans les territoires qui ne sont pas aujourd'hui concernés par l'énergie nucléaire.

---

<sup>105</sup> Parfois appelées « système électriques insulaires » ou « petits systèmes isolés ».

### Les objectifs du groupe de travail

Ces réflexions donnent lieu à un rapport public dont l'ambition première est de faire preuve de pédagogie sur les enjeux associés au développement des SMR/AMR. Ce rapport a été présenté au Collège de la CRE qui a formulé ses commentaires à son sujet dans sa délibération portant communication du rapport.

Les rapports de la Prospective de la CRE ont vocation à « éclairer » le débat public sur les grands enjeux énergétiques, à destination des décideurs politiques et économiques, mais également des citoyens qui s'y intéressent, des acteurs du monde académique et de la recherche, etc.

À ce titre, le groupe de travail formule un certain nombre de recommandations relatives aux SMR/AMR et leur intégration dans le système énergétique français et européen. En revanche, le groupe de travail n'avait pas pour priorité de développer de nouvelles réflexions sur les scénarios de mix énergétique à long terme, qui font déjà l'objet de nombreux rapports prospectifs, ni d'aborder les enjeux de politique publique qui relèvent du gouvernement.

### La gouvernance et le cadre général des travaux

Chaque groupe de travail mené par la Prospective de la CRE est gouverné par une co-présidence paritaire, composée de deux personnalités qualifiées, externes à la CRE, gages d'indépendance, comme ce qui a été fait et salué lors des précédentes saisons du Comité de prospective. Le rapport final est à la signature des co-présidents qui se sont efforcés de considérer la diversité des approches et des sensibilités au sein du groupe de travail.

C'est dans ce contexte, que la Présidente de la Commission de régulation de l'énergie (CRE) **Madame Emmanuelle WARGON** a demandé au premier semestre 2024 à **Madame Anne-Marie CHOHO**, Directrice Générale de SETEC, et à **Monsieur François LÉVÊQUE**, Professeur d'économie à Mines Paris – PSL, de co-présider ce groupe de travail sur « *l'insertion des petits réacteurs modulaires (SMR/AMR) dans les systèmes énergétiques* ».

Aux côtés des deux co-présidents, des personnalités particulièrement investies sur les sujets des SMR/AMR, représentatifs de l'ensemble de la chaîne de valeur, **Madame Valérie FAUDON**, Déléguée Générale de la Société française d'énergie nucléaire (SFEN), **Monsieur Vincent BERGER**, Haut-Commissaire à l'Énergie Atomique (HCEA), ont été chargées de contribuer au pilotage du groupe de travail : elles ont été consultées pour l'organisation des travaux et ont contribué de façon privilégiée aux réflexions et arbitrages importants sur les orientations générales du rapport.

Les deux co-présidents étaient accompagnés d'une rapporteure indépendante de la Cour des comptes qui assurait une fonction de Secrétaire générale, responsable de la rédaction des comptes-rendus des séances et des différents rapports (intermédiaire et final). **Madame Pauline HODILLE**, Conseillère référendaire à la Cour des comptes, a assuré cette fonction au sein du groupe de travail sur les SMR/AMR.

Les membres du Collège, les services de la CRE et une centaine de membres provenant du secteur de l'énergie et de la filière concernée ont participé aux travaux de la Prospective de la CRE. Dans le cadre de ce groupe de travail sur le SMR/AMR, des industriels, *start-ups*, acteurs publics, entreprises privées, académiques, associations, administrations, se sont réunis pour échanger sur le sujet (*cf.* liste des participants, voir ci-dessous).

Le lancement officiel du groupe de travail, le 29 avril 2024, a donné suite à une saison complète de travaux et de rencontres (à hauteur d'environ une session plénière par mois à la CRE et/ou en visioconférence), de septembre 2024 à juin 2025. Le projet de rapport a fait l'objet d'une présentation au Conseil scientifique de la CRE, le 8 juillet 2025, qui l'a approuvé.

## Annexe 2 – Liste des travaux Prospectifs de la CRE

Thème du groupe de travail	Co-Présidents	Date de publication
L'impact de la mobilité propre sur le mix énergétique	Olivier APPERT (Délégué général de l'Académie des technologies) Olivier PEROT (Président de France Énergie Éolienne)	Juillet 2018
La flexibilité et le stockage sur les réseaux d'énergie d'ici les années 2030	Frédéric GONAND (Professeur d'économie à l'Université Paris-Dauphine) Ghislain LESCUYER (Membre du Comité de Direction générale du Gimélec)	Juillet 2018
Les consommateurs d'énergie et la transformation numérique	Cécile MAISONNEUVE (Présidente de La Fabrique de la Cité) Jean BERGOUGNOUX (Président d'Équilibre des énergies)	Juillet 2018
Le verdissement du gaz	Olivier APPERT (Membre de l'Académie des technologies) Philippe MAUGUIN (Président Directeur général de l'Institut national de la recherche agronomique)	Juillet 2019
La transition énergétique dans les territoires : nouveaux rôles, nouveaux modèles	Frédéric GONAND (Professeur d'économie à l'Université Paris-Dauphine) Bernard BOUCAULT (Préfet de région honoraire)	Octobre 2019
Donner du sens aux données du consommateur	Cécile MAISONNEUVE (Présidente de La Fabrique de la Cité) Fabien CHONÉ (Co-fondateur de Direct Énergie)	Décembre 2019
Les énergies marines	Hugh BAILEY (Directeur général de General Electric France) Marc LAFOSSE (Président d'Énergie de la Lune et Président de la Commission Énergie Marine du Syndicat des énergies renouvelables)	Juin 2021
Transition énergétique dans les territoires : nouvelles villes, nouveaux réseaux	Bernard BOUCAULT (Préfet honoraire de région) Claude ARNAUD (Président de l'Institut de Recherche & Développement Efficacity)	Juin 2021
L'aval compteur : pour un développement des services de pilotage au profit des consommateurs et de la performance du système électrique	Cécile MAISONNEUVE (Présidente de La Fabrique de la Cité) Fabien CHONÉ (Co-fondateur de Direct Énergie et Président de Fabelsi)	Juin 2021

## Rapport de la Prospective de la CRE sur les SMR/AMR

Septembre 2025

Le vecteur hydrogène	Olivier APPERT (Membre de l'Académie des technologies) Patrice GEOFFRON (Professeur de Sciences économiques à Paris-Dauphine et Directeur du Centre de géopolitique de l'énergie et des matières premières)	Juin 2021
La biomasse et la neutralité carbone	Monique AXELOS (Directrice scientifique à l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) Patrice GEOFFRON (Professeur d'économie à l'Université Paris Dauphine-PSL)	Mars 2023
L'électrification des usages	Jean-Michel GLACHANT (Directeur de la <i>Florence School of Regulation</i> ) Hélène MACELA-GOUIN (Vice-Présidente <i>Secure Power</i> de Schneider Electric France)	Mars 2023
La confiance dans les nouveaux services énergétiques	Céline JULLIEN (Économiste, spécialiste de l'engagement citoyen) Philippe MONLOUBOU (ancien Président du Directoire d'Enedis)	Mars 2023
Le pilotage des bâtiments tertiaires	Laurent BATAILLE (Président de Schneider Electric France) Emmanuelle WARGON (Présidente de la Commission de régulation de l'énergie)	Septembre 2023
Le captage et la chaîne de valeur du dioxyde de carbone (CCUS)	Manoelle LEPOUTRE SAINT M'LEUX (Vice-Présidente de l'Académie des technologies) Jean-Michel GLACHANT (Président de l'Association internationale des économistes de l'énergie (AIEE) et ancien Directeur de la <i>Florence School of Regulation</i> )	Septembre 2024

## Travaux de la Prospective de la CRE en cours

La mise en œuvre territoriale de la transition énergétique	Joël GIRAUD (ancien Ministre de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales et ancien Député) Olivier LOIZEAU (Directeur Général de Vendée Énergie et Président d'Atlansun)
La gestion dynamique des nouveaux équilibres entre l'offre et la demande dans les systèmes d'énergie bas-carbone	Frédéric GONAND (Professeur d'économie à l'Université Paris Dauphine-PSL) Anne-Sophie PERRISSIN-FABERT (Déléguée Générale d'Ignes)

## Annexe 3 – Liste des participants et intervenants

Plusieurs participants ont pu changer de fonctions ou d'entités entre le lancement des travaux et la restitution publique du rapport<sup>106</sup>.

### Liste des participants de la gouvernance<sup>107</sup>

Vincent	<b>BERGER</b>	HCEA	Didier	<b>LAFFAILLE</b>	CRE
Anne-Marie	<b>CHOHO</b>	SETEC	François	<b>LÉVÊQUE</b>	Mines Paris – PSL
Arnaud	<b>DIETRICH</b>	CRE	Adrien	<b>MANCHON</b>	CRE
Valérie	<b>FAUDON</b>	SFEN	Guillaume	<b>MOINE</b>	CRE
Pauline	<b>HODILLE</b>	Cour des comptes	Anne-Lise	<b>TEANI</b>	CRE

Les membres du Collège de la CRE (Anthony CELLIER, Ivan FAUCHEUX et Lova RINEL) ont assisté également aux travaux de la gouvernance.

### Liste des membres invités à participer au groupe de travail

Jean-Luc	<b>ALEXANDRE</b>	Naarea	Julien	<b>GARREL</b>	Nuward
Claude	<b>ARNAUD</b>	Efficacity	Guillaume	<b>GAU</b>	Hexana
Morgane	<b>AUGE</b>	Orano	Pierre	<b>GAVOILLE</b>	CEA
Xavier	<b>AVERTY</b>	DGEC	Bénédicte	<b>GENTHON</b>	Ademe
Hélène	<b>BADIA</b>	UMN	Pierre-Étienne	<b>GIRARDOT</b>	Orano
Olivier	<b>BARD</b>	GIFEN	Jean-Michel	<b>GLACHANT</b>	AIEE
Jean-Philippe	<b>BONNET</b>	RTE	Maëlle	<b>GOAPPER</b>	Naarea
Guillaume	<b>BOUYT</b>	DGEC	Edoardo	<b>GOLDSTEIN</b>	Newcleo
Nicolas	<b>BREYTON</b>	Stellaria	Jean-Philippe	<b>GOUY</b>	SGAE
David	<b>BRIGGS</b>	Naarea	Mathilde	<b>GRIVET</b>	Jimmy Energy
Patrice	<b>BRUEL</b>	EDF	Christophe	<b>GROS</b>	Enedis
Patrice	<b>BUESO</b>	ASNR	Rafael Mariano	<b>GROSSI</b>	AIEA

<sup>106</sup> Par convention, c'est l'entité en début des travaux de la Prospective qui est retenue.

<sup>107</sup> Deux stagiaires ont également participé à l'animation et au fonctionnement du groupe de travail de la Prospective de la CRE : **Alexandre REBIÈRE**, élève ingénieur à l'école des Mines Paris – PSL (septembre 2024 – janvier 2025) et **Lucas PUGLISI**, élève ingénieur à l'école Centrale de Lyon (janvier 2025 – mai 2025).

**Matthieu GARRIGUE-GUYONNAUD**, Conseiller référendaire à la Cour des comptes a également accompagné les deux co-présidents lors du lancement du groupe de travail, qu'il convient de remercier.

## Rapport de la Prospective de la CRE sur les SMR/AMR

Septembre 2025

Stefano	<b>BUONO</b>	Newcleo	Frédéric	<b>HOFMANN</b>	EDF
Benoît	<b>CALATAYUD</b>	Fondation Jean-Jaurès	Édouard	<b>HOUCADE</b>	Blue Capsule Technology
Stéphane	<b>CALPENA</b>	Newcleo	Frédéric	<b>JOBERT</b>	SGPE
Guillaume	<b>CAMPIONI</b>	Stellaria	Laurent	<b>KUENY</b>	DGEC
Laure	<b>CARREL-BILLIARD</b>	Naarea	Daniel	<b>LEBRET</b>	Otrera Nuclear Energy
Benjamin	<b>CHAMBERLIN</b>	DGE	Marion	<b>LETRY</b>	FEDENE
Bertrand	<b>CHARMAISON</b>	CEA	Clément	<b>LIÉGEARD</b>	Archeos
Grégory	<b>CHERBUIIS</b>	Otrera Nuclear Energy	Marie-Delphine	<b>LOUVEAU</b>	GIFEN
Laure	<b>CLAQUIN</b>	Thorizon	Thibault	<b>LOUVET</b>	Orano
Julien	<b>COLLET</b>	ASNR	Nicolas	<b>MACHTOU</b>	EDF
David	<b>COLON</b>	Naarea	Sophie	<b>MARTINÉ</b>	FES
Andy	<b>CONTESSO</b>	ASNR	Aurélien	<b>MOUREAUX</b>	Stellaria
Maxence	<b>CORDIEZ</b>	Hexana	Sylvain	<b>NIZOU</b>	Hexana
Céline	<b>COTTON</b>	Newcleo	Aurélie	<b>PICART</b>	CSF
Sébastien	<b>CROMBEZ</b>	ANDRA	Laurence	<b>PIKETTY</b>	CEA
Inès	<b>DANELUZZO</b>	IREFI	David	<b>PROULT</b>	CEA
Godefroy	<b>DAUBIN</b>	Jimmy Energy	Antonin	<b>RAT</b>	Thorizon
Gaspard	<b>de VEYRAC</b>	Otrera Nuclear Energy	Sophie	<b>ROUZAUD</b>	Nuclear Valley
Nicolas	<b>de WARREN</b>	UNIDEN	Anne-Sophie	<b>SCHMITT</b>	Nuward
Maxime	<b>DELBART</b>	Naarea	Franklin	<b>SERVAN-SCHREIBER</b>	Transmutex
Franck	<b>DELMAIRE-SIZES</b>	CTE	Damien	<b>SIESS</b>	EDF
Marie-Christine	<b>DEMIZIEUX</b>	EY-Parthenon	Philippe	<b>STOHR</b>	CEA
Maximilien	<b>DENIS</b>	DGE	Issam	<b>TALEB</b>	EY-Parthenon
Michel	<b>DERDEVET</b>	Naarea	Corinne	<b>THEVENIAU</b>	Enedis
Quentin	<b>DESLOT</b>	DGEC	Ludovic	<b>VANDENDRIESCHE</b>	Newcleo
César	<b>DULAC</b>	Calogena	Frédéric	<b>VARAINE</b>	Otrera Nuclear Energy
Ludovic	<b>DUPIN</b>	SFEN	Anne	<b>VARET</b>	Ademe
Philippe	<b>DUPUY</b>	ASNR	Eugénie	<b>VIAL</b>	CTE
Nadia	<b>FAURE</b>	Thorizon	Cécile	<b>VIAUD</b>	Enedis
Jean-Luc	<b>FUGIT</b>	OPECST	Hubert	<b>VIRLET</b>	DGE

## Rapport de la Prospective de la CRE sur les SMR/AMR

Septembre 2025

Emmanuelle	<b>GALICHET</b>	CNAM	Henri	<b>WALLARD</b>	NewCovalence
Jean-Claude	<b>GARNIER</b>	CEA	Anthony	<b>WOAYE-HUNE</b>	Newcleo

### Liste des intervenants

Xavier	<b>ASTOLFI</b>	Cristal Union	Marion	<b>LETTRY</b>	FEDENE
Rita	<b>BARANWAL</b>	Westinghouse Electric Compagny (USA)	Thibault	<b>LOUVET</b>	Orano
Jean-Philippe	<b>BONNET</b>	RTE	Coralie	<b>PINEAU</b>	ANCCLI
Pascal	<b>COLOMBANI</b>	ex. CEA	Lucas	<b>MIR</b>	NEA/OECD (Int.)
Sébastien	<b>CROMBEZ</b>	ANDRA	Véronique	<b>REBEYROLLE</b>	Framatome
Tony	<b>d'ALETTO</b>	Ambassade de France (Chine)	Jean-Christian	<b>REY</b>	Agglomération du Gard Rhodanien
Cécile	<b>EVANS</b>	SFEN	Elisabeth	<b>RIZZOTTI</b>	Newcleo (FR/IT)
Valérie	<b>FAUDON</b>	SFEN	Bernard	<b>SALHA</b>	SNETP (UE)
Julie	<b>FULLMER</b>	Vineyard City (USA)	Guiseppe	<b>SANGIOVANNI</b>	Exergon (UE)
Jean-Marie	<b>HAMY</b>	Framatome	Issam	<b>TALEB</b>	EY-Parthenon
Vincent	<b>HANNETON</b>	EDF SEI	Cécile	<b>VIAUD</b>	Enedis
Frédéric	<b>HOFMANN</b>	EDF	Henri	<b>WALLARD</b>	NewCovalence
Sylvestre	<b>HUET</b>	Journaliste indépendant	Bertrand	<b>WALLE</b>	UNIDEN
Annaïk	<b>JUHUETTE-JOUE</b>	Capenergies	Virginie	<b>WASSELIN</b>	ANDRA

## Annexe 4 – Contributions au rapport

### Annexe 4.1 – Critères d'évaluation de la NEA (détails de la notation des projets par critère)

Licensing	No information	Pre-licensing	Licence/construction/design certification application submitted	Design approved	Licence to construct approved	Licence to operate approved
	* Bonus for multiple jurisdictions					
Siting	No information	Non-binding agreements/MOUs/non-binding announcements	Site owner has shortlisted the technology	Site owner has selected the technology	Received permit(s) and or licence(s) for construction on the site	Construction has started on the site
	* Bonus for multiple sites					
Financing <sup>(1)</sup>	No information	At least one announcement	Five or more announcements or USD 100 million	Ten or more announcements or USD 500 million	FOAK is fully financed	FOAK financed + progress for NOAK finance
Supply chain <sup>(2)</sup>	No information	Supplier days/events/workshops/trade shows/non-binding agreements/MOUs/non-binding announcements	Binding contracts for services & materials	Partnerships/joint ventures/consortia - all with EPCs	FOAK construction ongoing/complete	NOAK construction ongoing
Engagement <sup>(3, 4)</sup>	No information	One or more engagements	Three or more engagements	Five or more engagements	Seven or more engagements	Ten or more engagements
Fuel	No information	Non-binding agreements & studies with national labs for RDD/Lab-scale production of fuel	Contracts/agreements with fuel supply chain (uranium/conversion/enrichment/fabrication)	Operating fabrication facility producing fuel, or uses same fuel as existing/generation-III commercial reactors	Contracts for fuel for FOAK	Fuel loading has begun

(1) **Types of financing announcements in scope:** Funding from private investors; government grants; loans; loan guarantees; cost sharing agreements; public-private partnerships; equity partnerships; announcements of becoming publicly traded; announcements of sizeable investments; power purchase agreements; financing approval from rate payers; export credit financing; bank financing; multilateral development bank financing.

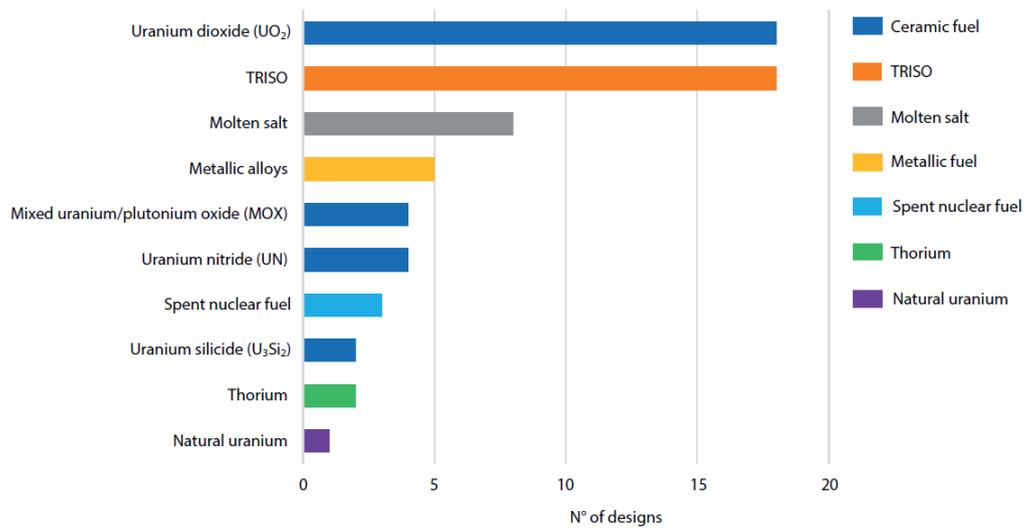
(2) **Types of suppliers of interest in scope:** Engineering, procurement and construction organisations; universities, labs and research institutions when they are supplying research and development services to an SMR project.

(3) **Types of stakeholders for 'Engagement' in scope:** Subnational governments; Indigenous governments; labour unions; non-governmental organisations; civil society organisations; community organisations; universities; end users and customers; advisory boards.

(4) **Types of announcements for 'Engagement' in scope:** Memorandums of understanding; endorsements; town hall meetings; benefit-sharing agreements.

Source : Rapport OCDE NEA, 2023, page 28

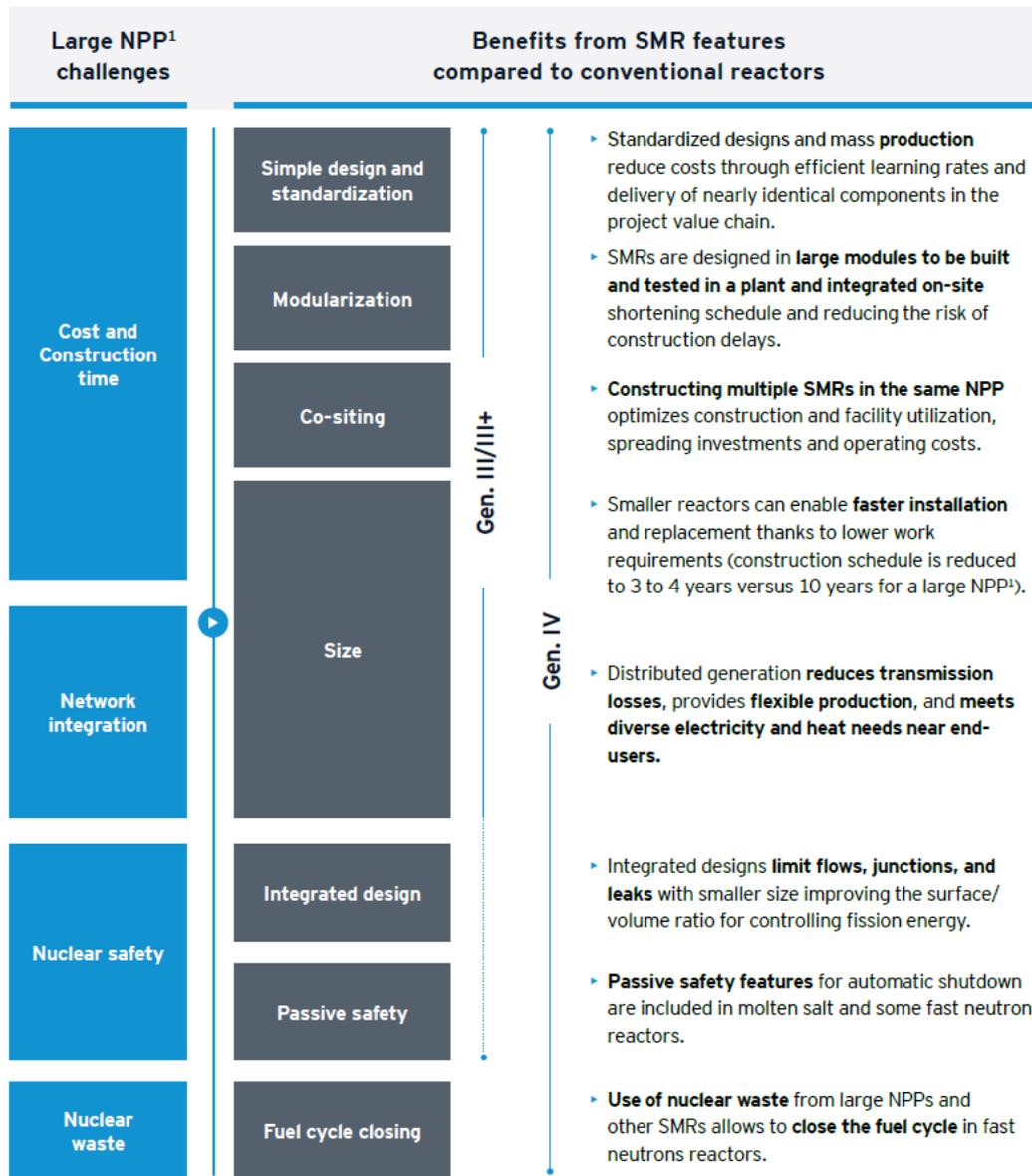
### Annexe 4.2 – Diversité des types de combustibles des projets SMR/AMR



Note: Note: TRISO=tri-structural isotropic particle fuel; some designs can use different types of ceramic fuels (UO<sub>2</sub>, MOX, UN, and U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>).

Source : Rapport OCDE NEA, 2024, page 61

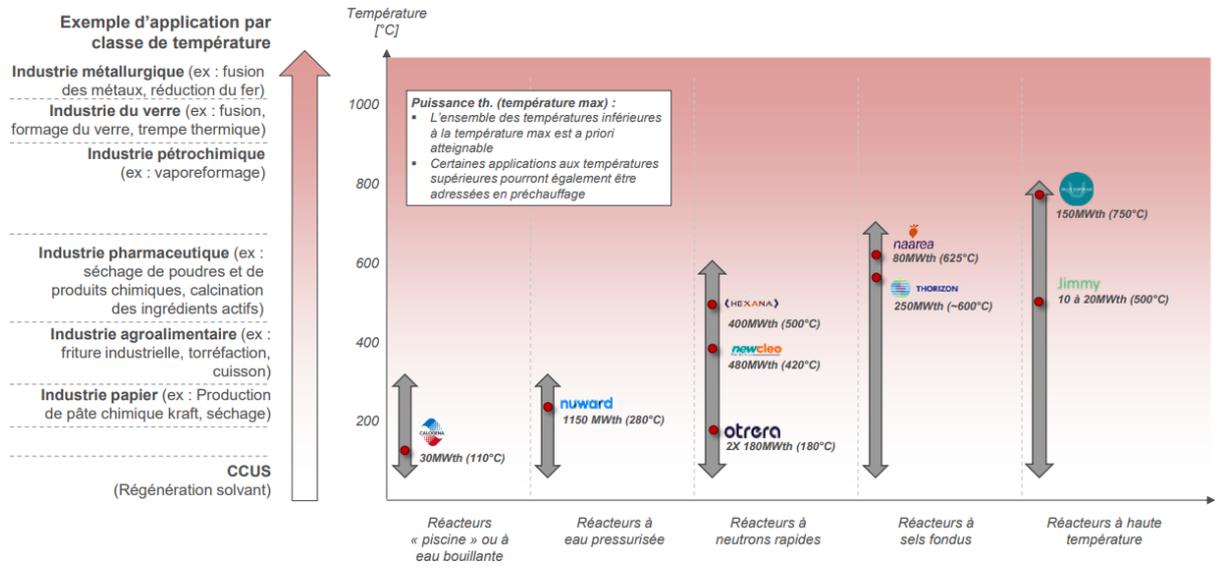
Annexe 4.3 – Bénéfices attendus des SMR/AMR par rapport aux réacteurs de grande puissance<sup>108</sup>



Source : Rapport EY-Parthénon, page 10

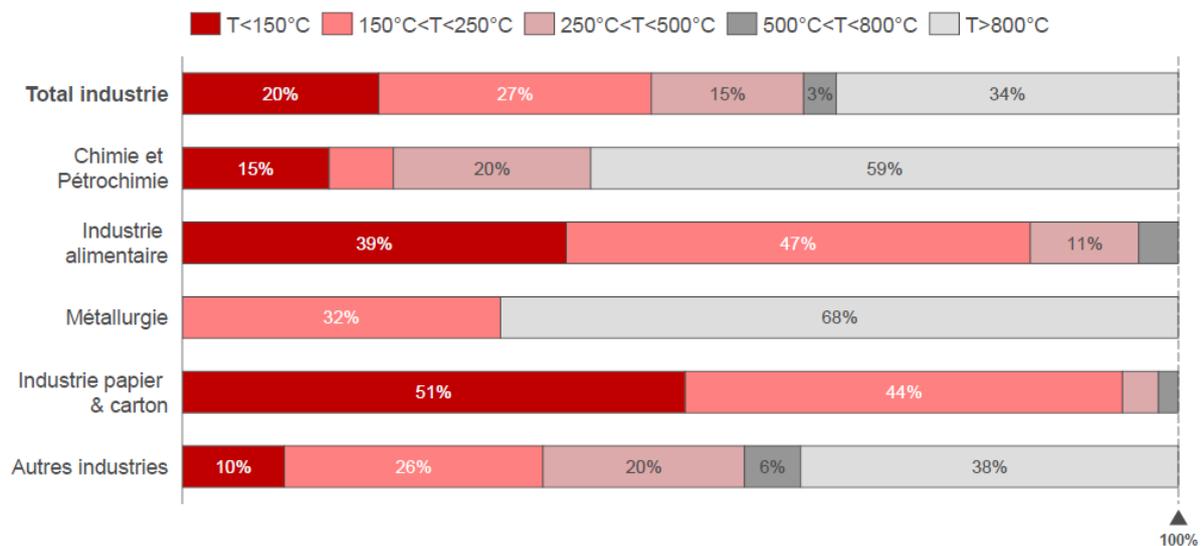
<sup>108</sup> Source : IAEA, *Advances in SMR Technology Developments*, 2022, NEA, *The NEA SMR Dashboard*, 2023 et interviews d'experts.

Annexe 4.4 – Exemple d’application de chaleur industrielle par classe de température



Source : Étude E-Cube-SFEN, mai 2025, page 19

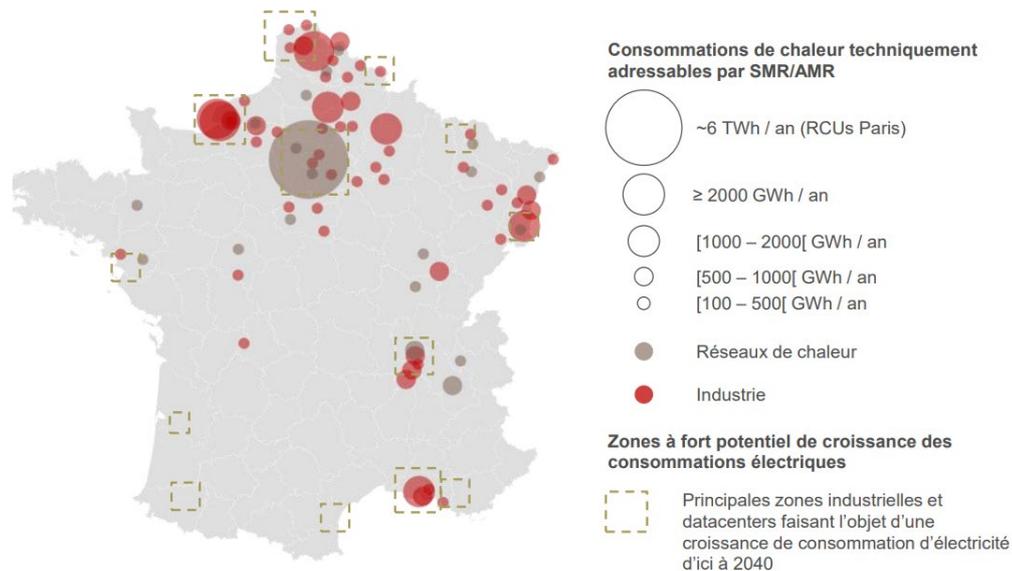
## Annexe 4.5 – Estimation de la consommation industrielle de chaleur en France par température de procédé (% de la consommation d'énergie sous forme de chaleur, par segment)<sup>109</sup>



Source : Étude E-Cube-SFEN, mai 2025, page 24

<sup>109</sup> Estimations basées sur les répartitions de consommation chaleur par classe de températures par industrie de l'ARENA (*Renewable energy options for industrial process heat*, 2019), de l'IEA (*IEA Decarbonizing industrial process heat: the role of biomass*) et *The European Heat Pump Association*.

Annexe 4.6 – Cartographie des consommations de chaleur techniquement adressables par SMR/AMR



Source : Étude E-Cube-SFEN, mai 2025, page 54

## Glossaire, abréviations et acronymes

AIE	Agence internationale de l'énergie
AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique
AMR	<i>Advanced Modular Reactor</i> (Génération IV)
ANCCLI	Association nationale des comités et commissions locales d'information
ANDRA	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs
ANSR	Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CLI	Commissions locales d'information
CNDP	Commission nationale du débat public
CPN	Conseil de politique nucléaire
CRE	Commission de régulation de l'énergie
DAC	Demande d'autorisation de création
DGE	Direction générale des entreprises
DGEC	Direction générale de l'énergie et du climat
EDF	Électricité de France
EnR	Énergie de source renouvelable
EPR	<i>European Pressurized Reactor</i> (Réacteur pressurisé européen)
FEDENE	Fédération des services énergie environnement
FOAK	<i>First of a kind</i> (premier du genre)
GES	Gaz à effet de serre
HALEU	<i>High Assay Low Enriched Uranium</i> (Combustible avec un niveau d'uranium élevé)
HCEA	Haut-Commissaire à l'énergie atomique
HTR	<i>High Temperature Reactor</i> (Réacteur à haute température)
INB	Installations nucléaires de base
LCOE	<i>Levelized Cost of Electricity</i> (coût actualisé de l'énergie)
LEU+	<i>Low Enriched Uranium</i> (Combustible solide enrichi en uranium)
LMFR	<i>Liquid Metal Fast Reactor</i> (Réacteur rapide refroidi au métal liquide)
MOX	<i>Mixed Oxide</i> (Combustible avec un mélange de plutonium et d'uranium)
MSR	<i>Molten Salt Reactor</i> (Réacteur à sels fondus)
NEA	<i>Nuclear Energy Agency</i> (Agence pour l'énergie nucléaire)
NOAK	<i>N<sup>th</sup> of a kind</i> (nième du genre)
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
PEPR	Programme et équipements prioritaires de recherche
PIIEC	Projet important d'intérêt européen commun
PNGMDR	Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs
PPE	Programmation pluriannuelle de l'énergie

PPRT	Plan de prévention des risques technologiques
R&D	Recherche et développement
REP	Réacteur à eau pressurisée
RfG	<i>Requirements for Generators</i> (Code réseau sur les exigences relatives aux générateurs)
RNR	Réacteur à neutrons rapides
RTE	Réseau de Transport d'Électricité
SDDR	Schéma décennal de développement du réseau
SEI	Systèmes énergétiques insulaires
SFEN	Société française d'énergie nucléaire
SGPI	Secrétariat général pour l'investissement
SMR	<i>Small Modular Reactor</i> (Génération III et III+)
SNBC	Stratégie nationale bas-carbone
SNETP	<i>Sustainable Nuclear Energy Technology Platform</i>
THT	Très Haute Tension
UNIDEN	Union des industries utilisatrices d'énergie
ZIBaC	Zone industrielle bas-carbone
ZNI	Zone non interconnectée

