

LES SMR : RELANCER L'EXPORT, DÉCARBONER LE MONDE

LES TECHNOLOGIES D'AVENIR N°2

mars 2024

ASTERès
études, recherche & conseil économique

+33 6 52 89 81 68

<https://asteres.fr>

81 Rue Réaumur, 75002 Paris

Synthèse

Les SMR, « *small modular reactors* », sont des réacteurs nucléaires de petite taille (<300 MW) conçus pour être produits en série, dans l'objectif de surmonter les frustrations engendrées par les projets nucléaires conventionnels (allongement du temps de construction, hausse des coûts). On dénombre aujourd'hui plus de 80 modèles différents dans le monde, dont l'immense majorité sont des concepts en cours de développement. Sur le papier, les SMR présentent de nombreux avantages : taille adaptée à la substitution aux centrales thermiques, coût de construction moins élevé, temps de construction moins long... Les SMR sont donc particulièrement adaptés à la situation des pays encore très dépendants des énergies fossiles pour leur production d'électricité et/ou trop petits pour être financièrement en mesure d'investir dans la construction d'un EPR. En ce qui concerne le marché français, les débouchés sont limités, le mix électrique étant déjà en grande partie décarboné et les EPR étant mieux adaptés au renouvellement du parc nucléaire historique. Les fabricants français visent donc principalement l'export. D'importants défis doivent toutefois encore être relevés avant que les SMR ne contribuent à redynamiser les exportations françaises. Le coût de l'électricité qui sera offerte par les SMR est encore difficile à anticiper. D'après les sources compilées par Asterès, le coût médian serait compris entre 94€/MWh et 3 535€/MWh selon les concepts et la méthode d'estimation, avec un fort degré d'incertitude. De même, la technologie étant encore peu mature, la possibilité de construire les SMR en série doit encore être démontrée par les fabricants. Les SMR constituent donc une réelle innovation, dont l'avenir est encore incertain. Notons que les SMR pourront également jouer un rôle dans la décarbonation de la chaleur et que cette thématique sera abordée dans une note ultérieure.

Présentation : industrialiser la construction des réacteurs nucléaires

Les petits réacteurs modulaires, ou « SMR » pour « *small modular reactors* », sont des réacteurs nucléaires conçus pour être produits en série. Les SMR sont des réacteurs qui se distinguent des réacteurs conventionnels, comme leur nom l'indique, par leur petite taille et leur modularité. Par définition, la puissance d'un SMR est inférieure à 300 MW. Cette taille leur permet de se substituer aux centrales thermiques. Pour les réacteurs d'une puissance inférieure à 20 MW on parle de « *micro modular reactor* ». En comparaison, l'EPR dispose d'une puissance de 1 600 MW. Contrairement aux réacteurs conventionnels, les SMR sont conçus pour être fabriqués par modules en usine, puis transportés en train ou en camions et assemblés sur place. Les SMR ne sont pas définis par un type de réacteur en particulier et englobent donc une grande diversité de réacteurs de génération III et IV : réacteur à haute température (HTR), réacteur à eau bouillante (BWR), réacteur à eau

pressurisée (PWR), réacteurs rapides refroidis au sodium (SFR)... Au total, plus de 80 projets SMR sont en développement à travers le monde, d'après l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA)¹.

Les SMR sont développés par les entreprises pour surmonter les frustrations engendrées par les projets nucléaires conventionnels, notamment l'allongement du temps de construction, la hausse des coûts et plus généralement l'incertitude et le manque de prévisibilité quant à ces deux variables². La logique économique derrière cette innovation est radicalement opposée à celle des réacteurs conventionnels : au lieu de miser sur l'augmentation de la taille des réacteurs pour réaliser des économies d'échelles, les entreprises développant des SMR misent sur la simplification du *design*, la standardisation du produit et l'industrialisation de la production³. Le temps de construction des centrales nucléaires s'en trouve réduit : les fabricants promettent des temps de construction allant de 1 an et demi à 3 ans selon les modèles. Les SMR se posent comme une alternative à l'EPR pour fournir une énergie de base décarbonée. Certains SMR sont aussi conçus pour co-générer de la chaleur, voire dédiés à la

¹ « Advances in Small Modular Reactor Technology Developments ».

² Steigerwald et al., « Uncertainties in Estimating Production Costs of Future Nuclear Technologies ».

³ « The NEA Small Modular Reactor Dashboard ».

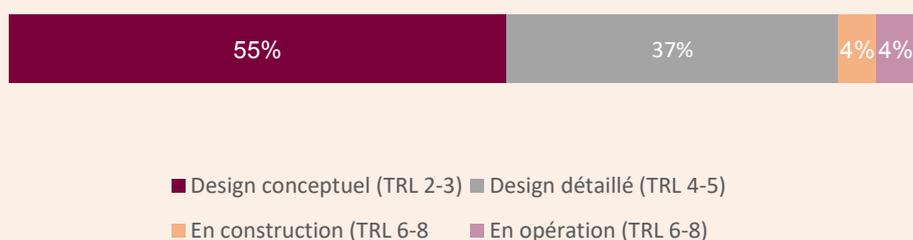
production de chaleur. Cette note se limite à l'analyse du rôle des SMR dans le mix électrique futur.

Maturité : une technologie en cours de développement

La majorité des SMR sont en phase de conception et les quelques centrales en opération le sont depuis peu, limitant les retours d'expérience. L'AIE a défini quatre statuts pour évaluer l'avancement des différents projets SMR : « design conceptuel », « design basique et détaillé », « en construction », « en opération ». D'après les données de l'AIE, plus de 90% des projets SMR en cours dans le monde sont à l'état de concept ou de prototype, 4% sont en construction et 4% en opération. Si l'on compare cette classification

à l'échelle TRL de l'Agence internationale de l'énergie (voir encadré ci-dessous), on peut considérer que, pour la majorité, la maturité des SMR est comprise entre les TRL 2 et 5. Concernant les quelques projets en construction ou en opération, Asterès considère qu'il s'agit de prototypes, de réacteurs de démonstration ou de premières centrales commerciales dont le TRL peut être évalué entre 6 et 9. Le premier SMR à avoir été connecté au réseau électrique est celui de la centrale de Shidao Bay, en Chine, en décembre 2021⁴. Étant donné le nombre encore réduit de réacteurs en service le faible recul et le manque de retours d'expérience, la technologie ne peut pas être considérée comme mature. Notons que les SMR regroupent une diversité de technologies (réacteurs de génération III ou IV et de taille qui varie de 0,5 à 300 MW). Tous ne progressent pas au même rythme et n'arriveront pas à maturité au même moment.

Graphique. Répartition des projets de petits réacteurs modulaires dans le monde par état d'avancement, 2022



Source : AIE

La France est dans la course pour livrer les premiers SMR commerciaux dans la prochaine décennie. Le projet NUWARD, un réacteur de 170 MW développé par la filiale d'EDF, est encore à l'état de concept selon les données de l'AIEA et la construction d'un réacteur de démonstration est prévue pour débuter en 2030⁵. D'après le Président de la filiale d'EDF, il reste à « démontrer que la construction en série des SMR est

possible ». ⁶ La première mise en service n'est donc pas attendue avant 2035 – NUWARD estime le temps de construction de sa centrale à un peu plus de 3 ans. D'autres start-ups françaises misent sur de plus petits réacteurs, comme Naarea qui développe un réacteur modulaire de 40 MW et prévoit une première mise en service en 2030. Tous ces projets n'existent encore que sous la forme de simulations informatiques.

⁴ « We Were Promised Smaller Nuclear Reactors. Where Are They? ». Notons que le réacteur indien à eau lourde pressurisée de 220 MW (IPHWR-220), un réacteur de 2^{ème} génération dont la production a débuté dans les années 1970, est exclu de l'analyse. Ce SMR est compté dans les statistiques car il en a la taille, mais il n'est pas considéré

dans la littérature comme un « véritable » SMR car il n'est pas modulaire.

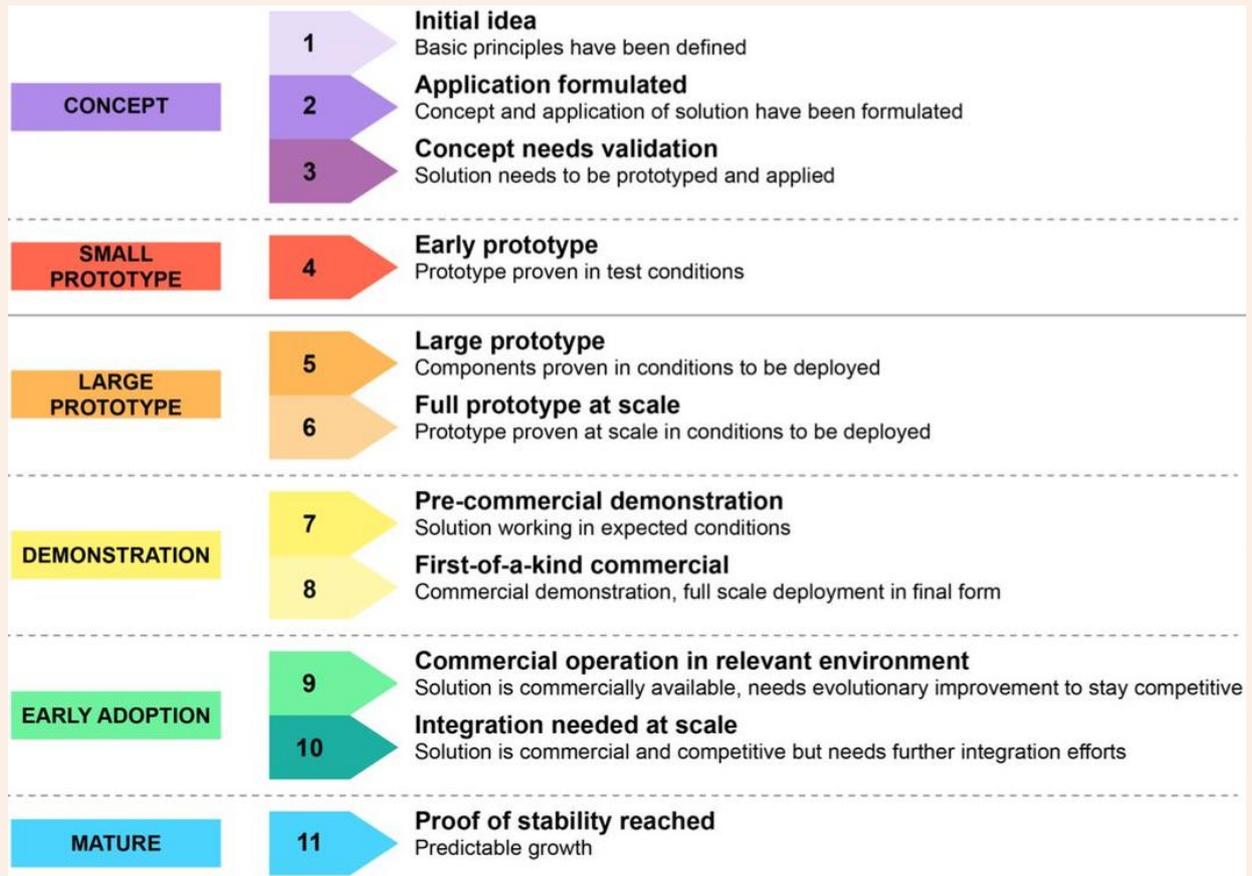
⁵ Belgium, « Nuward / French SMR Developer Plans To Start Demonstrator Construction 'As Early As 2030' ».

⁶ Belgium.

Encadré. L'indicateur du *technology readiness level*

Originellement développé par la NASA, le TRL (« *technology readiness level* »), qui peut être traduit comme « niveau de maturité technologique », est une échelle visant à mesurer la maturité d'une technologie, de la formulation des principes fondamentaux à sa commercialisation. L'échelle utilisée par la Commission européenne, qui évalue le degré de maturité des technologies sur une échelle de 1 à 9, diffère de celle utilisée par l'AIE, qui évalue le degré de maturité des technologies sur une échelle de 1 à 11 (voir tableau ci-dessous). Après analyse, Asterès considère que l'AIE décompose le dernier niveau (TRL 9) en trois niveaux (TRL 9, 10 ou 11). Dans cette étude, Asterès préférera l'échelle de l'AIE pour sa précision accrue, permettant notamment de capturer la maturité économique avec l'introduction de la notion de compétitivité. Les TRLs estimés selon l'échelle de la Commission européenne seront convertis par Asterès le cas échéant.

Figure. L'échelle TRL utilisée par l'AIE.



Source : AIE

Coût : des incertitudes subsistent quant à la compétitivité des SMR

Asterès s'est appuyé sur les données des fabricants et la littérature pour estimer le coût futur des SMR. Estimer le coût d'une technologie qui n'a pas encore été déployée commercialement est une tâche complexe. Les estimations des fabricants ne sont pas toujours fiables. Du point de vue marketing, les entreprises qui

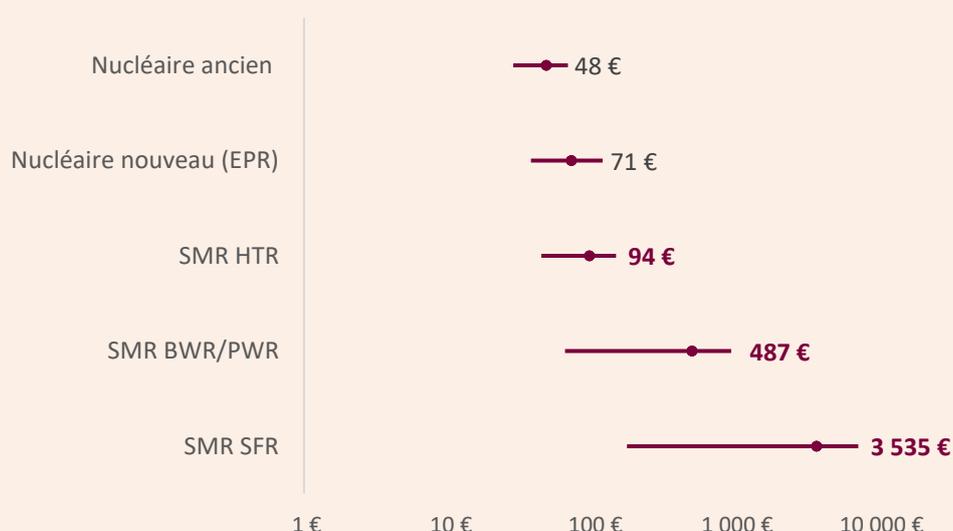
développent une nouvelle technologie ont tout intérêt à annoncer un coût de production compétitif avec les énergies alternatives – sinon aucun investisseur ne souhaiterait les financer. Du point de vue technique, les entreprises se heurtent souvent au cours du développement d'une technologie à des imprévus qui en renchérissent le coût. En janvier 2023, la start-up NuScale a par exemple été contrainte de réévaluer le coût de l'électricité produite par son SMR de 53% par rapport à son estimation de 2021 et de 62% par rapport

à son estimation de 2016⁷. Pour intégrer ces incertitudes à l'analyse, Asterès s'appuie sur les modélisations réalisées par des chercheurs dans une étude récente portant sur une quinzaine de projets SMR⁸. Asterès a construit, pour quatre types de SMR, un coût médian comprenant le coût annoncé par les fabricants en borne inférieure et le coût théorique estimé par Steigerwald *et al.* (2023) en borne supérieure. Les résultats sont ensuite comparés aux coûts du nucléaire en France (ancien et nouveau)⁹ – la comparaison avec les ENR n'a pas été jugée pertinente ici¹⁰. L'indicateur utilisé est le « *levelized cost of electricity* » (LCOE) ou « coût moyen de l'électricité ». Les résultats sont présentés dans le graphique ci-dessous.

À l'état des connaissances actuelles, il semblerait que les SMR fourniraient de l'électricité à un coût

compétitif avec celui de l'EPR seulement dans les scénarios les plus optimistes. L'incertitude est particulièrement élevée concernant les SMR BWR/PWR (LCOE qui varie de 64€/MWh à 909€/MWh selon les concepts et la méthode de calcul) et SFR (172 €/MWh à 6 898€/MWh). Concernant les SMR HTR, l'incertitude est moins importante (44€/MWh à 145€/MWh) mais le coût médian (94€/MWh) reste supérieur au coût médian de l'EPR (71€/MWh). Dans l'ensemble, il existe des scénarios dans lesquels les SMR sont compétitifs face à l'EPR mais ces scénarios reposent sur des hypothèses optimistes pour les SMR (un coût plus proche du coût annoncé par les fabricants que du coût théorique modélisé) et/ou pessimistes pour l'EPR (un coût plus proche de la borne haute que de la médiane).

Graphique. LCOE médians estimés pour différents types de SMR, comparés aux LCOE du nucléaire « conventionnel », par MWh



Sources : Steigerwald *et al.* 2023 (SMR), ADEME (ENR), AIE/Cour des Comptes (nucléaire ancien) et AIE (nucléaire nouveau).
Notes : L'axe des abscisses est à l'échelle logarithmique (base 10). Les points correspondent au coût médian. Les barres d'erreur reflètent les différences de coût entre les différents projets SMR de même type, les différentes estimations ou les différents types d'actualisation. Le coût théorique des concepts SFR n'est pas affiché car très élevé.

⁷ « Eye-Popping New Cost Estimates Released for NuScale Small Modular Reactor ».

⁸ Steigerwald *et al.*, « Uncertainties in Estimating Production Costs of Future Nuclear Technologies ».

⁹ Source : OCDE

¹⁰ Les ENR sont des énergies intermittentes et leur présence dans le mix implique un coût de stockage supplémentaire qui dépend de la composition globale du mix. Nous considérons ici que les SMR sont uniquement en concurrence avec le nucléaire et non les ENR.

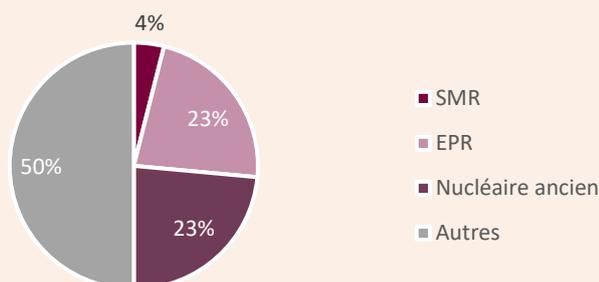
Marché à horizon 2050 : une opportunité pour l'export, une part marginale du mix français

À l'international, les SMR sont adaptés à la situation du nombreux pays et pourraient donc constituer un nouveau levier d'export pour la France. De nombreux pays en Europe et dans le monde comptent encore sur leurs centrales à charbon ou à gaz pour produire la majorité de leur électricité – dans les pays ouverts au nucléaire, on compte encore plus de 3 300 tranches de centrales à charbon¹¹. Ces centrales thermiques pourraient être directement converties en centrales SMR. L'avantage par rapport à l'EPR est qu'il n'est pas nécessaire de trouver et d'acheter du foncier industriel. En outre, les plus petits pays n'ont pas les moyens d'assumer le coût d'investissement colossal que représente la construction d'un EPR – près de 20

Mds€ pour l'EPR de Flamanville. Les SMR pourraient donc contribuer à améliorer la balance commerciale de la France.

En France, les débouchés pour les SMR sont plus limités – en ce qui concerne la production d'électricité en tout cas. Premièrement, le mix électrique français est déjà largement décarboné, les centrales thermiques ne représentant que 10% du parc, soit 14,0 GW¹². En outre, l'EPR est plus mature et sera donc dans un premier temps préféré aux SMR pour renouveler le parc nucléaire français. Ainsi, dans le scénario le plus nucléarisé de RTE, « N03 », les SMR ne représentent 4% de l'électricité produite en 2050 (ce qui correspond à une capacité de 4,0 GW), contre 23% pour l'EPR (voir graphique ci-dessous)¹³. D'après les calculs d'Asterès, ce scénario correspond peu ou prou au lancement de la construction d'un SMR type NUWARD (2x170 MW) par an à partir de 2035, dans l'hypothèse d'une durée de construction de 40 mois.

Graphique. Répartition de la production d'électricité en 2050, dans le scénario N03 de RTE.



Source : RTE (Futurs énergétiques 2050), scénario N03

Impact environnemental : un puissant levier de décarbonation de l'économie mondiale

Chaque MWh d'électricité produit par un SMR permet d'éviter l'émission de 437 à 954 kg de CO₂, en se substituant aux centrales à gaz ou à charbon. En effet, selon l'ADEME, le nucléaire en moyenne 6 kg de CO₂ par MWh d'électricité produit, contre 443 kg pour le gaz et 954 kg pour le charbon. En France, dans

l'hypothèse d'une substitution au gaz, les SMR permettraient donc d'éviter l'émission de 11 Mt de CO₂ en 2050. Le potentiel de décarbonation est plus important à l'étranger mais n'a pu être calculé en raison du manque de données sur le marché potentiel à l'export.

¹¹ « SMR / Mini réacteurs un atout pour le nucléaire ».

¹² Bilan électrique 2022 - RTE

¹³ « Bilan prévisionnel long terme "Futurs énergétiques 2050" ».

Références

- « Advances in Small Modular Reactor Technology Developments ». Agence internationale de l'énergie atomique, 2022. https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf.
- Belgium, Central Office, NucNet a s b l , Brussels. « Nuward / French SMR Developer Plans To Start Demonstrator Construction 'As Early As 2030' :: NucNet | The Independent Nuclear News Agency ». The Independent Global Nuclear News Agency, 19 juin 2023. <https://www.nucnet.org/news/french-smr-developer-plans-to-start-demonstrator-construction-as-early-as-2030-10-1-2023>.
- « Bilan prévisionnel long terme "Futurs énergétiques 2050" ». RTE, janvier 2021. <https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-01/Bilan%20Previsionnel%202050-consultation-complet.pdf>.
- « Eye-Popping New Cost Estimates Released for NuScale Small Modular Reactor ». Consulté le 19 janvier 2024. <https://ieefa.org/resources/eye-popping-new-cost-estimates-released-nuscale-small-modular-reactor>.
- MIT Technology Review. « We Were Promised Smaller Nuclear Reactors. Where Are They? » Consulté le 19 janvier 2024. <https://www.technologyreview.com/2023/02/08/1067992/smaller-nuclear-reactors/>.
- orano.group. « SMR / Mini réacteurs un atout pour le nucléaire ». Consulté le 22 février 2024. <https://www.orano.group/fr/decodage/smr-mini-reacteurs-un-atout-pour-le-nucleaire>.
- Steigerwald, Björn, Jens Weibezahn, Martin Slowik, et Christian von Hirschhausen. « Uncertainties in Estimating Production Costs of Future Nuclear Technologies: A Model-Based Analysis of Small Modular Reactors ». *Energy* 281 (octobre 2023): 128204. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128204>.
- « The NEA Small Modular Reactor Dashboard ». Nuclear Energy Agency, OECD, 2023. https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_78743/the-nea-small-modular-reactor-dashboard?details=true.

CONTACTS

Guillaume MOUKALA SAME | gmoukalasame@asteres.fr

Asterès est un cabinet d'études économiques et de conseil.

Nous proposons aux entreprises et au secteur public des outils de réflexion pour orienter l'action. Notre mission est de mettre l'expertise économique au service du développement de nos clients. Ainsi, nous donnons à l'analyse économique son rôle opérationnel.

NOUS CONTACTER

contact@asteres.fr

A S T E R È S
études, recherche & conseil économique