



INSTITUT DE FRANCE  
Académie des sciences

# LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES MODULAIRES DE FAIBLE PUISSANCE (SMR): ÉTAT DES LIEUX ET PERSPECTIVES

Octobre 2022

*Avis et Rapport du Comité de Prospective en  
Énergie de l'Académie des sciences*



# Sommaire

Le Comité de Prospective en Énergie de l'Académie des sciences (CPE) .....	p. 3
<b>Avis</b> : Quelle place pour les réacteurs nucléaires modulaires de faible puissance .....	p. 4
– SMR –dans le futur du nucléaire mondial ?	
Recommandations du CPE .....	p. 7
<b>Rapport</b> : SMR, réacteurs nucléaires aux multiples usages .....	p. 9
Introduction .....	p. 9
1 - Classement des SMR .....	p. 10
2 - Maturité des projets dans le monde (hors France) .....	p. 11
3 - Avantages des SMR .....	p. 12
4 - Problèmes scientifiques et technologiques restant à résoudre .....	p. 13
5 - Cas de la France et des études en cours .....	p. 13
Conclusion .....	p. 18
Remerciements .....	p. 18
Rédacteurs et composition du CPE .....	p. 19
Experts auditionnés dans le cadre de cette étude .....	p. 20
Pour aller plus loin : quelques ressources scientifiques sur les SMR .....	p. 20
Lexique .....	p. 21
Secrétariat éditorial .....	p. 23

# Le Comité de Prospective en Énergie

En juillet 2021, le Comité de Prospective en Énergie (CPE) de l'Académie des sciences a publié un avis intitulé *Apport de l'énergie nucléaire dans la transition énergétique, aujourd'hui et demain*<sup>1</sup>, soutenu par un rapport *Considérations sur l'électronucléaire actuel et futur*<sup>2</sup>. Ces documents analysaient les caractéristiques des réacteurs électrogènes de puissance autour du gigawatt électrique (GWe) adossés, ou pouvant être adossés, aux réseaux électriques des pays électronucléaires. Cette analyse était conduite au regard de l'utilisation du combustible nucléaire, solide ou liquide.

Alors que la Commission Européenne a confirmé cet été la place de l'énergie nucléaire dans la taxonomie verte en tant qu'énergie de transition, le présent avis complète le précédent en examinant les caractéristiques d'une nouvelle catégorie de réacteurs, dont l'avenir est encore incertain, mais qui annoncent un changement de paradigme dans l'utilisation mondiale de cette énergie. Il s'agit des SMR, pour *Small Modular Reactors*, c'est-à-dire des réacteurs nucléaires modulaires de faible puissance [puissances inférieures à 300 mégawatts électriques (MWe) ou 300 mégawatts thermiques (MWth)], destinés à produire de l'électricité et/ou de la chaleur, pour de multiples services. Cet avis est soutenu par un nouveau rapport intitulé *SMR, réacteurs nucléaires aux multiples usages*.

Le développement des SMR est prometteur mais leur commercialisation nécessite encore de lever de nombreux verrous et l'analyse menée par le CPE de l'Académie des sciences a considéré ceux de nature scientifique et technologique.

---

<sup>1</sup> : [https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/20210614\\_avis\\_nucleaire.pdf](https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/20210614_avis_nucleaire.pdf)

<sup>2</sup> : [https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/210614\\_rapport\\_nucleaire.pdf](https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/210614_rapport_nucleaire.pdf);

## Quelle place pour les réacteurs nucléaires modulaires de faible puissance – SMR – dans le futur du nucléaire mondial ?

Les réacteurs nucléaires modulaires de faible puissance, ou SMR, visent à délocaliser l'utilisation de l'énergie nucléaire en dehors des centrales nucléaires et à en faciliter et accélérer l'utilisation par l'industrie. Ce sont des sources d'énergie bas-carbone qui contribuent à répondre aux mêmes enjeux que les réacteurs de puissance, mais avec plus de souplesse et un investissement financier moindre, pouvant être d'origine publique et privée.

L'avantage premier des SMR, par rapport aux réacteurs de puissance, provient du fait que, quelle que soit leur puissance, ils peuvent être construits sur site à partir de composants standards préfabriqués en usine. Leur taille réduite rend leur construction plus rapide et leur emprise au sol plus faible. De plus, étant modulaires, ils peuvent fournir, par couplage, une gamme variée d'énergies en fonction des besoins, au plus près des usages et permettent d'envisager d'alimenter des sites isolés. Aussi, leur sûreté intrinsèque, car entièrement passive, présente un avantage certain. Ceci laisse entrevoir des gains considérables sur le plan économique et un retour sur investissement comparable à celui d'une installation non nucléaire de production d'énergie équivalente. Ainsi, les SMR pourraient ouvrir le marché aux investissements privés, à la concurrence et aux pays en développement. Enfin, leur faible puissance pourrait les rendre « socialement acceptables » car, en cas d'accident, l'impact environnemental se limiterait à l'environnement immédiat, un SMR de 200 MWe contenant évidemment moins de matières radioactives qu'un réacteur à eau pressurisée (REP) de 1 gigawatt électrique (GWe). Notons aussi que certains SMR sont conçus pour être semi-enterrés ou même souterrains.

Le concept de SMR s'inspire des réacteurs compacts et de faible puissance de la propulsion navale. L'industrie nucléaire s'est périodiquement intéressée depuis 1960 à de petits réacteurs civils et, depuis une vingtaine d'années, elle élabore des concepts de SMR dans plusieurs gammes de puissances.

Aujourd'hui, 70 projets de SMR sont proposés dans le monde, déclinant nombre de combinaisons possibles entre combustibles nucléaires, modérateurs et caloporteurs. Ces projets sont portés par l'industrie nucléaire mais aussi par des start-ups et l'ensemble de cette dynamique est très significative dans plusieurs pays, comme les Etats-Unis, le Canada, la Russie et la Chine. A l'échelle mondiale, il n'existe actuellement que trois réacteurs en activité répondant aux critères des SMR : deux sont raccordés à un réseau électrique en Russie et un vient de démarrer en Chine. Tous les autres projets sont à des stades divers d'avancement, avant la construction d'un prototype (concept, avant-projets plus ou moins détaillés, choix de site, certification par les autorités de sûreté, qualification des composants et des combustibles, transport sur site et prospection des marchés potentiels, etc.). La course est lancée.

L'étude réalisée dans le rapport présenté ci-après souligne que le passage des réacteurs de puissance aux SMR ne correspond pas à une simple réduction d'échelle : les caractéristiques

recherchées sont très différentes d'un projet à l'autre et les problèmes à résoudre doivent être traités au cas par cas, avant que des filières de SMR émergent. En parallèle des spécificités à traiter pour chaque projet, des problèmes communs de méthodologie doivent être considérés et concernent, par exemple, les démonstrations de sûreté et la gestion des nouveaux déchets qu'ils engendreront, thèmes encore très insuffisamment pris en compte pour cette nouvelle classe de réacteurs. Aussi, des domaines communs de recherche générique se dégagent, concernant les matériaux métalliques pour les composants, les céramiques pour les combustibles solides et la physico-chimie en milieux de sels fondus pour les SMR à combustibles liquides. Ces derniers réacteurs sont les plus innovants de tous et en rupture d'avec le concept classique appliqué dans tous les réacteurs exploités jusqu'à aujourd'hui qui consiste à isoler le combustible nucléaire dans des assemblages facilement manipulables. En exploitation, ils nécessitent un traitement chimique en ligne des sels fondus très radioactifs contenant matière fissile et produits de fission. De nombreuses publications dans la littérature scientifique ouverte<sup>3</sup> attestent de leur innovation indéniable.

En France, les industriels du nucléaire et le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies (CEA) viennent de se lancer dans la course à la commercialisation avec un SMR, Nuward (pour *Nuclear Forward*), qui conserve le concept des réacteurs de puissance actuels (combustible à oxyde d'uranium peu enrichi, modération des neutrons et refroidissement par de l'eau). La recherche de la compacité de Nuward appelle encore des ajustements technologiques conséquents mais ce projet semble bien à même d'aboutir dans les prochaines années, en raison du grand retour d'expérience des réacteurs déjà utilisés pour la propulsion navale. Un prototype est prévu vers 2035. L'industrie nucléaire examine également la possibilité d'utiliser des SMR calogènes ou électro-calogènes, par exemple pour la cogénération<sup>4</sup>, la production d'hydrogène, la désalinisation ou comme outil de décarbonation de procédés industriels aujourd'hui émetteurs de gaz à effet de serre (par la capture et la valorisation du CO<sub>2</sub>). Enfin, le CEA étudie des concepts de SMR à neutrons rapides refroidis au sodium liquide (RNR-Na) dont l'un, très innovant, intègre les avancées des recherches conduites dans le cadre du projet Astrid, arrêté en 2019. Ces différents projets apparaissent aujourd'hui comme la seule voie permettant de maintenir jusqu'à la fin du siècle les connaissances sur les RNR et donc de préparer l'avenir. En effet, la nouvelle stratégie électronucléaire de la France repousse au siècle prochain le déploiement potentiel des RNR refroidis au sodium liquide de puissance.

Côté start-ups, plusieurs projets ambitieux de SMR ont vu le jour. Par exemple, la start-up Naaera vise aujourd'hui un SMR électrogène à neutrons rapides de l'ordre de la dizaine de MWe alimenté avec de la matière fissile non conventionnelle (uranium très enrichi, plutonium civil voire transplutoniens) diluée dans des chlorures fondus. Orano<sup>5</sup> et le CNRS veulent décliner ce type de SMR en convertisseur d'actinides sous forme de chlorures fondus en visant la fission du plutonium et des transplutoniens que l'on trouve dans les déchets nucléaires à vie longue. De son côté, la start-up Jimmy Energie développe un projet de SMR calogène à haute température à neutrons thermiques qui serait alimenté avec un combustible spécifique à uranium peu enrichi, modéré au graphite et refroidi avec de l'hélium sous pression. Le transport de chaleur se ferait par du CO<sub>2</sub>.

---

<sup>3</sup> : Cf. Les références bibliographiques et sitographiques renseignées en fin de rapport.

<sup>4</sup> : Cogénération : production simultanée de deux formes d'énergie différentes dans la même centrale.

<sup>5</sup> : Multinationale française spécialisée dans les métiers du combustible nucléaire.

Que ce soit en France ou à l'étranger, les start-ups et autres acteurs du nucléaire qui développent des projets de SMR se sont peu intéressés au cycle de vie du combustible et aux modalités de fonctionnement des réacteurs bien qu'il soit envisagé qu'ils puissent fonctionner dans des pays où l'énergie nucléaire n'est pas encore présente. Au mieux, certains projets prévoient une forme de leasing dans lequel le réacteur scellé serait mis en fonctionnement par les industriels qui l'auront livré, puis repris, toujours scellé, par ces industriels quelques années plus tard lorsque le combustible serait épuisé.

En pratique, au stade actuel des recherches et développements, les modalités de fonctionnement et de contrôle du réacteur et le devenir des déchets nucléaires produits restent à étudier. Ceci doit être réalisé en tenant compte des lois du pays producteur du SMR, de celles du pays acheteur du SMR et des règles de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA), notamment dans le cadre du traité de non-prolifération. En bref, la gouvernance mondiale des SMR reste à établir.

# Recommandations du Comité de Prospective en Énergie de l'Académie des sciences

Dans son avis de 2021 consacré au futur de l'électronucléaire, plusieurs des recommandations du CPE concernaient le soutien de la R&D et le maintien des compétences pour le nucléaire du futur.

- Le CPE considère que ces recommandations restent valables pour le développement des SMR et sont d'autant plus d'actualité qu'il s'agit de nouveaux réacteurs à mettre au point rapidement. En effet, bien que différents par leur puissance des réacteurs nucléaires du réseau électrique actuel, les SMR relèvent des mêmes domaines de recherche.
- Le CPE constate que l'intérêt mondial porté aux SMR est le signe d'un changement profond et global de l'utilisation de l'énergie nucléaire, qui se justifie en particulier par sa faible empreinte carbone. A côté des grands réacteurs de puissance (types EPR) alimentant les grands réseaux électriques, un écosystème du nucléaire adapté aux usages délocalisés de son énergie se met en place et pourrait prendre de l'ampleur sans toutefois se substituer aux premiers.
- Le CPE considère que les SMR ouvrent, pour la France, des perspectives intéressantes pour la décarbonation de l'énergie : ils représenteraient des sources d'énergie dans les gammes des puissances nécessaires à l'industrie qui utilise encore les énergies fossiles.
- Le CPE souhaite l'aboutissement rapide du projet Nuward, issu d'une technologie ayant fait ses preuves dans la propulsion navale française. Cependant, il faudra veiller à ce que l'introduction de plusieurs innovations ne retarde pas la bonne marche du projet. La puissance électrique de Nuward est dans la gamme des besoins de nombreux pays, y compris la France, souhaitant sortir des énergies fossiles pour produire de l'électricité.
- Le CPE affirme que la R&D sur les SMR à neutrons rapides doit être soutenue et que les moyens financiers alloués à ce domaine doivent être revus à la hausse afin de pouvoir espérer lever les difficultés scientifiques et technologiques associées aux projets actuels. Il recommande que les domaines spécifiques de R&D, notamment ceux de la physique des réacteurs à combustibles variés, de la science des matériaux nucléaires à isotopie variable et de la physico chimie des actinides en conditions non usuelles, soient réactivés. Force est de constater que l'expertise dans ces domaines s'est considérablement réduite en absence de construction de nouveaux réacteurs en France.
- Le CPE souligne l'intérêt de tout projet de SMR à sels fondus, à même de conduire à une meilleure utilisation de l'uranium naturel en fissionnant quasiment complètement ses deux isotopes. Ces projets nécessitent une R&D et des innovations technologiques conséquentes.
- Le CPE encourage tous les efforts entrepris au niveau européen pour développer les synergies appropriées sur la filière SMR, notamment pour aboutir à un modèle commun.
- D'une façon générale, le CPE considère que l'aboutissement des projets de SMR à l'échelle

mondiale représente une aide précieuse aux pays qui n'utilisent pas encore l'énergie nucléaire, et tout particulièrement aux pays en développement.

- Enfin, le CPE insiste sur la nécessité d'accompagner le développement des SMR au niveau mondial. Il s'agira, pour cela, de mener une étude rigoureuse des modalités de contrôle de fonctionnement de ces réacteurs et des modalités de gestion des déchets nucléaires produits dans les pays où l'énergie nucléaire n'est pas encore présente, ainsi que des mécanismes de gouvernance internationale des SMR, notamment à travers de nouvelles règles de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA), tenant compte en particulier du traité de non-prolifération.

## SMR, réacteurs nucléaires aux multiples usages

### Introduction

Une fois la décision prise de construire un réacteur nucléaire de puissance, le temps nécessaire avant le début des travaux est variable selon les pays, mais se compte généralement en années. Ensuite, la construction et la mise en exploitation d'un réacteur nucléaire de puissance (0,6 à 1,6 GWe), demande, dans les meilleures conditions, au moins 5 à 6 ans du premier béton à sa mise en service. En additionnant ces délais, on retrouve la constante de temps caractéristique de toute opération de l'industrie électronucléaire, de l'ordre de 10 à 15 ans. L'investissement financier est très lourd, le retour sur investissement est très long et c'est ainsi que seules les grandes industries des pays nucléaires sont capables de construire des réacteurs de puissance.

Aussi, l'implantation des réacteurs de puissance est soumise à deux impératifs techniques : d'une part, l'existence d'un réseau électrique capable d'absorber leur puissance et, de l'autre, la disponibilité d'une source en eau abondante et régulière garantissant, en toutes circonstances, le refroidissement du réacteur. Depuis 2011, seuls des réacteurs de troisième génération, dits Gen III, sont construits et leur sûreté est telle qu'en cas d'accident seul le périmètre immédiat du réacteur serait impacté. Cinq pays en sont aujourd'hui capables : France-EPR, USA-AP1000, Russie-VVER-V320, Chine-HPR-1000 et Corée-APR-1400.

Ces diverses et lourdes contraintes ont encouragé, depuis les années 2000 et, notamment, aux Etats-Unis, des études sur la possibilité de commercialiser des réacteurs nucléaires de plus faible puissance (en dessous de 300 MWe), a priori plus simples à implanter, plus rapides et moins chers à construire et plus faciles à exploiter pour couvrir des besoins domestiques ou industriels, en électricité ou en chaleur. Imaginés sur le modèle des réacteurs nucléaires de propulsion navale en service depuis les années soixante, ces réacteurs ont été rapidement désignés sous le nom de *Small Modular Reactors* (SMR ou réacteurs nucléaires modulaires de faible puissance en français) car conçus comme pouvant être construits sur site à partir d'éléments fabriqués en usine, permettant rapidement de bénéficier d'un effet de série.

Les caractéristiques recherchées pour ces réacteurs ouvrent le marché à des start-ups et laissent envisager leur exportation vers les pays en développement.

Aujourd'hui, 15 ans plus tard, les projets de SMR se multiplient et présentent des caractéristiques diverses, que ce soit dans la gamme de puissance (du MWe à 300 MWe), le type de réacteurs (à neutrons thermiques (RNT) ou rapides (RNR)) ou le type de combustibles (solides ou liquides)). Ces projets sont portés par de nombreux pays (Etats-Unis, Canada, Grande Bretagne, Russie, Corée, Chine et Japon) et bénéficient de soutiens politiques, institutionnels et privés.

Parmi les nombreux documents existant sur les SMR, la dernière synthèse de mai 2022 de la *World Nuclear Association*<sup>6</sup> présente les caractéristiques globales des projets de ces réacteurs dans le monde et les soutiens apportés à leur réalisation par chaque pays promoteur. De son côté, l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) a répertorié en 2020, dans un document très complet<sup>7</sup>, les caractéristiques techniques de 70 projets de SMR et en dresse des comparaisons sous la forme de tableaux. Parmi ces projets, beaucoup n'aboutiront pas à la réalisation d'un prototype, condition indispensable pour aller vers la commercialisation ; certains ne tiendront pas les délais annoncés (2035 à 2040) et, enfin, d'autres seront même probablement abandonnés.

Aujourd'hui, seuls quelques projets ont dépassé le stade de réacteur-papier. Il existe deux SMR connectés à un réseau électrique en Russie et un autre SMR calogène vient de démarrer en Chine.

Ce changement de vision dans le développement de l'énergie nucléaire, offrant quasiment des réacteurs à portée de main, soulève de nombreuses questions propres aux SMR car le passage des réacteurs de puissance à ces derniers ne peut pas se résumer à une simple réduction d'échelle. Ces questions concernent la sûreté, la sécurité, la prolifération, la faisabilité technologique, la gestion du combustible, la production et la gestion des déchets radioactifs, problème particulièrement important dans le domaine nucléaire<sup>8</sup>.

La France vient de se lancer dans la compétition des SMR tout en visant la construction immédiate de plusieurs EPR pour rénover son parc. Le présent rapport du CPE examine ici (i) les verrous scientifiques et technologiques déjà identifiés pour construire des SMR et qu'il faudrait lever en France et (ii) l'insertion des SMR dans la stratégie électronucléaire définie par la Programmation pluriannuelle de l'énergie 2019-2028 (PPE) avant de livrer des recommandations concernant la R&D à conduire dans notre pays.

## 1 - Classement des SMR

Les projets de SMR peuvent être classés selon divers critères. Le type de combustible est ici retenu pour élaborer cette classification, en bonne cohérence avec les précédents rapports produits par le CPE sur l'électronucléaire<sup>9</sup>.

Les projets de SMR utilisant le combustible classique des réacteurs à neutrons thermiques (RNT) à eau pressurisée ou bouillante dit UOX (U enrichi à 5% sous forme d'oxyde d'uranium  $UO_2$ ) ne demandent pas de ruptures technologiques majeures mais des innovations. Ils sont nécessairement à neutrons thermiques. La démonstration de sûreté de ces réacteurs repose sur le retour d'expérience des réacteurs de puissance utilisant ce combustible.

En revanche, tous les autres, à neutrons thermiques ou rapides (RNR), appellent des innovations majeures de conception et de technologie : combustibles solides spécifiques, (UOX) très enrichis en  $^{235}U$ , soit plus denses que UOX, soit incorporant du plutonium, soit encore des

---

<sup>6</sup> : <https://world-nuclear.org/nuclear-essentials.aspx>

<sup>7</sup> : [https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_Book\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf)

<sup>8</sup> : Cf. Nuclear waste from small modular reactors I. Krall, A. Macfarlane, R. Ewing Proceedings of National Academy of Sciences, 2022, Vol 119, N°23, <https://doi.org/10.1073/pnas.2111833119>

<sup>9</sup> : Cf. Nuclear waste from small modular reactors I. Krall, A. Macfarlane, R. Ewing Proceedings of National Academy of Sciences, 2022, Vol 119, N°23, <https://doi.org/10.1073/pnas.2111833119>

combustibles liquides à uranium et plutonium. Ils visent à respecter les caractéristiques des réacteurs dits Gen IV (prochaine génération de réacteurs) et sont appelés *Advanced Modular Reactors* (AMR). Dans le cas des combustibles liquides, ce sont des mélanges de sels fondus qui sont utilisés et les AMR correspondants sont appelés *Molten Salt Reactors* (MSR). Enfin, on désigne les SMR d'une très faible puissance (de l'ordre du MWe) comme étant des *Modular Microreactors* (MMR). La démonstration de sûreté des AMR et MMR se fait au cas par cas.

Les cycles du combustible associés aux projets sont rarement décrits et, par conséquent, la nature des déchets radioactifs générés par les SMR reste très incertaine. Ceci est un point faible des projets d'AMR et de MMR dont le succès dépendra de la disponibilité sur le marché de nouveaux combustibles. Aucune industrie ne s'est encore emparée des problèmes liés à l'enrichissement de l'uranium et à l'utilisation de matériaux à haute teneur en plutonium. Par ailleurs, le concept de réacteurs scellés est introduit : il s'agit de SMR contenant, au moment de la construction suffisamment de matière fissile pour délivrer une quantité d'énergie donnée pendant des années sans recharge périodique de combustible. Cette option, qui offre une souplesse de fonctionnement et de récupération du combustible usé, ne dispense évidemment pas d'étudier le devenir des déchets produits, et soulève des problèmes juridiques à traiter au niveau international.

## 2 - Maturité des projets dans le monde (hors France)

L'indice de maturité technologique des projets<sup>10</sup> est très variable. Par exemple, parmi les plus avancés, citons :

- En Russie, deux AMR (KLM40S) de 35 MWe (UO<sub>2</sub>, Uenrichi à 18 %, modérateur et caloporteur à eau sous pression) sur barge sont en exploitation (TRL 9).
- En Chine, un SMR à haute température (HTR-PM-calogène/électrique) de 200 MWe (UO<sub>2</sub>/Triso-boulet, Uenrichi à 8 %, modérateur graphite, caloporteur hélium) vient de démarrer (TRL 8), un deuxième le sera sous peu.
- En Argentine, un SMR (Carem) de 30 MWe (UO<sub>2</sub>, Uenrichi à 3 %, modérateur et caloporteur à eau sous pression) est en construction (TRL 6-7).

En revanche, aux Etats-Unis, où des sites d'implantation ont été choisis, les projets Nuscale-60 MWe (Idaho Falls, USA) et BWRX-300 MWe (Darlington, Canada) ne sont qu'à divers stades de pré-construction et de certification (TRL 4-5), alors même qu'il s'agit de concepts à combustibles classique à UO<sub>2</sub> (U enrichi à moins de 5%) et à eau sous pression ou bouillante. Il en est de même en Corée pour le projet SMART de 100 MWe.

Un autre réacteur, Xe-100, un SMR à haute température étudié aux Etats-Unis, de même type que celui de la Chine, mais à oxycarbure d'uranium Triso-prisme enrichi à 15 %, en est à l'étape de certification (TRL 4-5). Tous les autres réacteurs SMR/AMR à neutrons thermiques sont à l'état plus ou moins avancé d'avant-projet selon les pays.

Les projets de SMR à neutrons rapides comme BREST-OD-300 de 300 MWe en Russie (nitrure d'uranium appauvri et de plutonium à 15%, caloporteur en plomb) ou SVBR-100 de 100 MWe (UO<sub>2</sub> à Uenrichi à 20 %, caloporteur en plomb) ou encore le MMR Aurora aux Etats-Unis (1,5 MWe, alliage uranium enrichi à 20 %/zirconium, caloporteur métal liquide), parmi les plus avancés au monde, sont au stade d'avant-projet plus ou moins certifiés (TRL 5-6). Tous

---

<sup>10</sup>: Selon l'échelle dite TRL pour « *Technology Readiness Level* » qui dispose de 9 niveaux, notés TRL 1 à 9.

utilisent de l'uranium enrichi entre 13 et 20%. Pour le projet Natrium aux Etats-Unis, 345 MWe, qui se rapproche le plus d'un RNR refroidi au sodium (RNR-Na), le site d'implantation vient d'être choisi (Kemmerer, Wyoming, USA).

Tous les projets de MSR (Angleterre, Etats-Unis, Canada) sont au stade du concept (TRL 2). En Chine un MSR expérimental de 2 MWt (TMSR-LF1) vient de démarrer pour des études sur le cycle uranium-thorium.

Bien que la commercialisation des SMR ne soit pas prévue avant au moins une dizaine d'années, le marché potentiel est important à la fois vers les pays déjà ouverts au nucléaire et les autres en raison de leur simplicité, de leur sûreté et de leur compétitivité supposée.

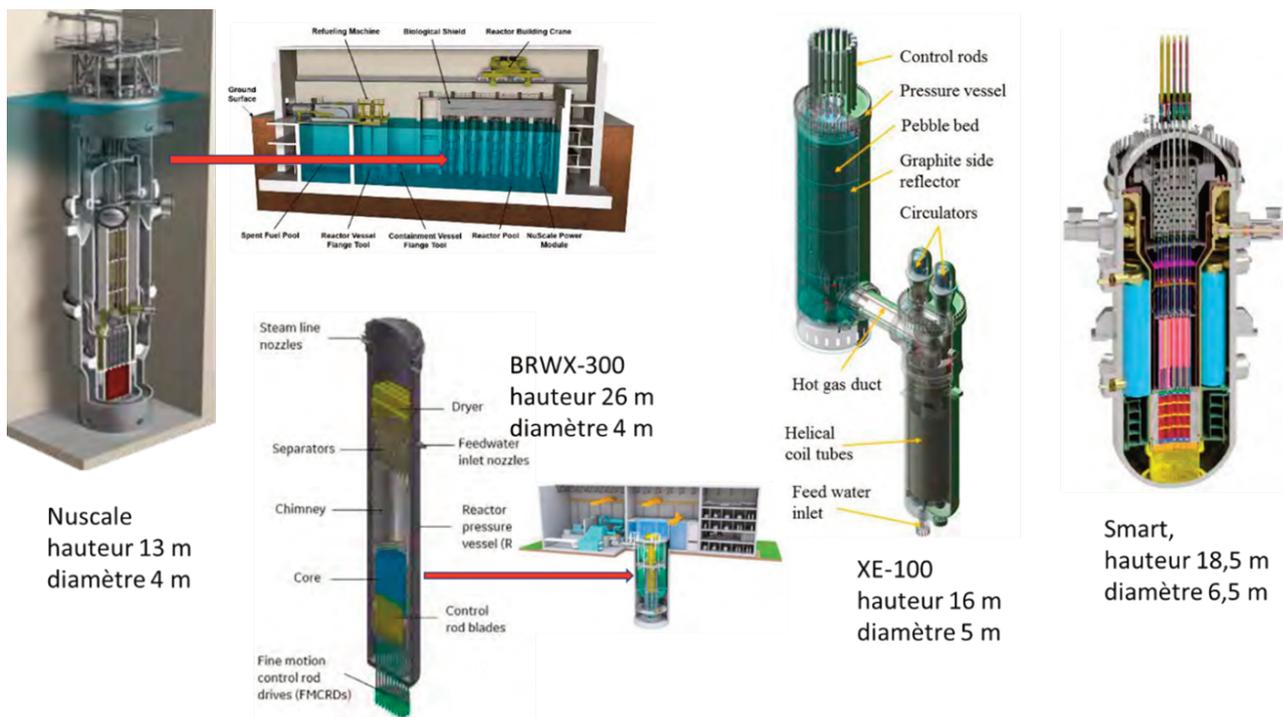


Figure 1 – Images par ordinateur des SMR les plus avancés vers la commercialisation, Smart, Nuscale, BWR-300 et Xe-100 (d'après SMR-Handbook 2020-AIEA)

### 3 - Avantages des SMR

Les avantages des SMR découlent de leur petite taille liée à leur puissance limitée. En dessous de quelques MWe, ils auraient vocation à être implantés hors réseaux ; jusqu'à 200 MWe, ils seraient dédiés à des sites industriels pour fournir électricité ou chaleur et, au-delà, ils seraient destinés à soutenir la demande d'électricité à partir des réseaux. Outre leurs avantages économiques faciles à comprendre, les SMR peuvent être implantés au plus près des usages (production de chaleur ou d'électricité pour mini-réseaux électriques, utilisation comme réducteur de déchets à vie longue s'ils sont à neutrons rapides). Leur impact sur l'environnement en exploitation ou en situation incidentelle, proportionnel à leur puissance, peut faciliter leur acceptation sociale. Les SMR les plus puissants (300 MWe) pourraient se substituer aux nombreuses centrales à charbon arrivant en fin de vie et le couplage de plusieurs SMR permettrait de fournir localement davantage d'énergie.

## 4 - Problèmes scientifiques et technologiques restant à résoudre

Bien que chaque projet de SMR appelle de la R&D spécifique, il est possible de faire émerger des verrous partagés par tous les SMR dans certains domaines.

Concevoir des SMR/AMR demande des études préalables de concept numérique utilisant des codes de calculs pour obtenir les caractéristiques neutroniques et hydrodynamiques des réacteurs. Les bases de données fondamentales ne sont pas toutes connues et l'acquisition des données manquantes relèvent de la recherche fondamentale. Aller vers les petites tailles nécessite une augmentation de l'enrichissement en  $^{235}\text{U}$  de l'uranium ou une densification du combustible uranium (métal, carbure, nitrure) ou les deux ou encore d'aller vers l'utilisation du plutonium civil.

Construire des SMR/AMR nécessite la qualification expérimentale des composants et les plateformes existantes ne peuvent pas couvrir tous les besoins : il faut soit les compléter soit en construire de nouvelles. Sinon, il faudra nécessairement faire appel à des collaborations extérieures, ouvrant le risque d'une perte de maîtrise ou de propriété industrielle, ce qui, dans le cas des innovations nucléaires, n'est pas sans implication en matière de sécurité et de rentabilité financière. C'est particulièrement vrai dans le cas de la qualification du combustible nucléaire spécifique qui nécessite des irradiations en réacteur.

La fabrication des combustibles solides (pastilles classiques, microsphères Triso ou autres) relève de la recherche fondamentale pour trouver les meilleures microstructures des matériaux et leur mise en forme. L'expérimentation est d'autant plus difficile qu'on s'écarte du combustible traditionnel en utilisant de l'uranium enrichi à plus de 5 % ou des composés mixtes d'uranium et de plutonium ou d'autres éléments. Le retour d'expérience sur les composés autres que les oxydes est faible en France.

Pour tous les SMR se pose la question de la gestion du combustible usé. S'il est retraité, il faut probablement adapter les procédés actuels et cela relève à la fois de la recherche fondamentale et du génie chimique. En cas de stockage direct, il faut s'assurer des modalités d'acceptation d'un stockage géologique nécessitant l'évaluation de sa tenue dans le milieu géologique choisi.

Le cas des MSR est particulier car tout est à inventer dans les domaines cités ci-dessus. C'est notamment le cas du traitement du combustible de sels fondus, par fractions ou en continu, pour assurer le fonctionnement des réacteurs. Cela nécessite d'intégrer aux réacteurs des installations de génie chimique, ce qui n'a jamais été fait. Une attention toute particulière devra donc porter sur les problèmes de sûreté de coexistence d'une installation chimique et d'une installation nucléaire.

D'une façon générale démontrer la sûreté des SMR/AMR pour certification demande le respect de réglementations nationales et internationales qui doivent être harmonisées pour ouvrir le marché. Cela ne peut se faire qu'au vu des caractéristiques des projets, ce qui suppose d'avoir des projets bien documentés.

## 5 - Cas de la France et des études en cours

En France, le développement des SMR se structure autour de SMR à neutrons thermiques de type REP et de SMR à neutrons rapides de type RNR. Le soutien aux SMR est inscrit dans le Plan France relance (de 2020) qui alloue 470 millions euros à la filière nucléaire et le plan France

2030 (de 2021) qui alloue 1 milliard d'euros au SMR pour soutenir d'ici 2035 l'innovation de rupture dans la filière nucléaire.

Le réseau électrique français accepte les réacteurs nucléaires de puissance et la stratégie de renouvellement du parc de REP passe par la construction d'EPR (1,6 GWe). Il n'y a pas de nécessité évidente de raccorder au réseau des SMR type REP de 300 MWe alimentés avec du combustible UOX classique et c'est pourquoi ces SMR sont essentiellement destinés à l'exportation, à condition, néanmoins, de pouvoir rendre compte d'une réalisation sur le territoire national. En revanche, un marché d'AMR et MMR électrogènes et/ou calogènes de puissances variées est possible dans le futur.

Le soutien aux SMR vise aussi à accompagner un changement de stratégie pour poursuivre les recherches sur les réacteurs à neutrons rapides. En effet, la meilleure façon d'assurer une indépendance électronucléaire nationale est le développement des RNR-Na (Gen IV), repoussé à une date indéterminée, probablement au siècle prochain. L'abandon d'Astrid en 2019 a malheureusement été le signe d'un abandon de cette perspective à plus courte échéance. Les projets de SMR à neutrons rapides sont actuellement les seuls permettant de maintenir une activité de recherche dans le domaine des RNR. Ils ne sont cependant pas à la hauteur de l'ambition du projet Astrid dont le CPE a déploré l'arrêt.

Les études en cours en France concernent le SMR Nuward et plusieurs SMR/AMR qui se partagent à égalité le soutien du Plan France 2030. Le soutien à Nuward est acquis. Le soutien aux SMR/AMR innovants permettant de « fermer le cycle du combustible et de produire moins de déchets » a été annoncé par le gouvernement et un appel d'offres a été lancé à hauteur de 500 millions d'euros<sup>11</sup>.

### **5.1 - Projets portés par les industriels du nucléaire.**

EDF et le CEA, Naval Groupe, Technicatome et Tractabel ont lancé le projet Nuward en 2019 doté d'un « International Nuward Advisory Board - INAB ». Il s'agit de construire deux SMR Gen III couplés de 170 MWe. Chaque réacteur est à neutrons thermiques (UO<sub>2</sub>, Uenrichi à 5 %, modérateur et caloporteur à eau sous pression sans bore) enfermé dans une enceinte métallique, tout à la fois avec ses échangeurs de température à plaques assurant production de vapeur et sûreté passive et avec ses barres de contrôle. Les SMR seront immergés dans une piscine assurant une réserve d'eau. Nuward doit entrer en « Avant-Projet Détaillé » (APD) vers 2025 et démarrer en 2035, le premier béton étant prévu pour 2030. Il a bénéficié de 50 millions euros du Plan France relance lors de la phase « Avant-Projet Sommaire » (APS) et sera financé par 500 millions d'euros par le Plan France 2030. En juin 2022, EDF a annoncé que Nuward ferait l'objet d'une pré-évaluation menée par l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) en collaboration avec les autorités de sûreté tchèque et finlandaise. Cette revue permettra d'améliorer la capacité de Nuward à anticiper les défis des processus de certification internationaux ainsi que les besoins du futur marché. Nuward sera un réacteur très compact : cette caractéristique unique conduit à introduire des innovations sur les échangeurs à plaques, les barres de contrôle immergées et l'absence de bore dans l'eau qui assure sur les REP une réserve de réactivité. Ces technologies ne sont pas encore disponibles (TRL faible).

---

<sup>11</sup> : <https://www.gouvernement.fr/france-de-2030-ouverture-de-l-appel-a-projets-reacteurs-nucleaires-innovants>

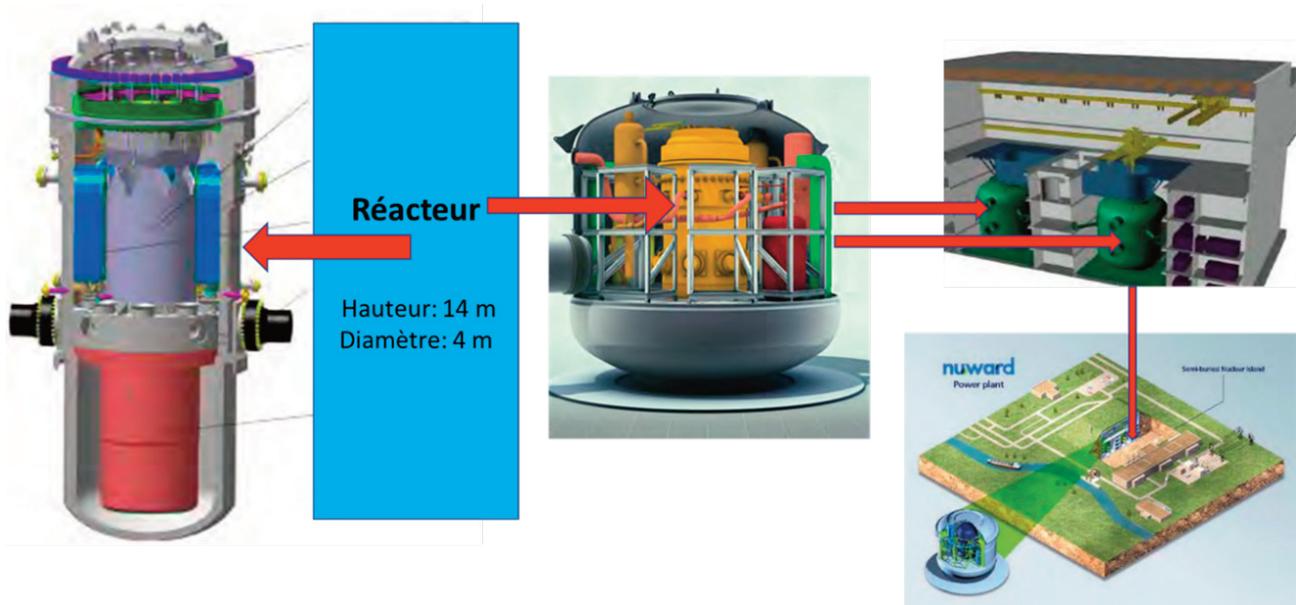


Figure 2 – Images par ordinateur du réacteur Nuward, de l'enceinte dans laquelle il est sera mis avec ses annexes et de la centrale à deux réacteurs immergés (d'après SMR-Handbook 2020- AIEA)

Le CEA pilote le projet IDNES (*Innovative Decarbonized Nuclear Energy*) qui vise le couplage de SMR calogènes (100 MWth) à des installations par exemple de production d'hydrogène (400 MWth). L'objectif de l'étude est pour l'instant d'apporter des éléments de faisabilité technico économique. Les réacteurs ne sont pas définis à ce jour. L'horizon de l'étude est de dix à quinze ans. IDNES s'insère dans le projet Européen Tandem (*Small Modular Reactor for a European safe and Decarbonized Energy Mix*).

Le CEA étudie deux SMR à neutrons rapides RNR-Na de 150 MWe, iso-générateurs en plutonium, Anaïs et Atrium, développés en parallèle. Le premier s'appuie sur les acquis des RNR-Na Gen III jusqu'au concept ASTRID. L'étude vise la réduction des coûts d'investissement dans la logique AMR et une valorisation de la chaleur dans des procédés non électrogènes. Le second vise une élimination de la possibilité de fusion du cœur en combinant un ensemble d'innovations envisagées pour les RNR-Na Gen IV : cœur particulier et évacuation de la puissance résiduelle par la cuve. Le CEA envisage, pour Atrium, une cuve de 9 mètres de diamètre et 13 m de hauteur ce qui donne une idée de la taille d'un SMR de cette puissance. Ces réacteurs sont au niveau de l'esquisse. Ces projets du CEA sont dans la ligne de la Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE, 2020-2028) qui définit, à la suite de l'arrêt du projet Astrid, la R&D sur les RNR comme devant « renforcer et maintenir les compétences sur la physique des RNR et des procédés du cycle associé en s'appuyant sur la simulation numérique et un programme expérimental ciblé ».

Le CNRS a conduit pendant plus de dix ans des recherches sur un réacteur de puissance (1,4 GWe) à neutrons rapides et à combustible liquide qui a d'ailleurs été retenu comme un des 6 concepts de réacteur Gen IV, le MSFR (*Molten Salt Fast Reactor*). Le CPE en a examiné les caractéristiques dans son rapport de 2021<sup>12</sup>. La déclinaison de ces études se fera en convertisseur d'actinides. En effet, la stratégie française concernant les RNR de puissance est de déploiement de

<sup>12</sup>: Cf. référence 2

RNR-Na, comme indiqué ci-dessus. Le projet de petit réacteur s'articule autour de la conception d'Aramis (*Advanced Reactor for actinides Management in Salt*) soutenu par un programme de recherche, ISAC (*Innovative System for Actinides Conversion*). Le projet est porté par Orano avec l'appui du CEA, EDF, Framatome et des équipes du CNRS.

Aramis serait un AMR de 300 MWth, alimenté par des combustibles liquides, mélanges de sels NaCl, MgCl<sub>2</sub>, PuCl<sub>3</sub>, AmCl<sub>3</sub>, UCl<sub>3</sub> à 800°C, le Cl étant enrichi en <sup>37</sup>Cl à 99 % pour éviter la création de <sup>36</sup>Cl (isotope radioactif à vie longue) à partir de <sup>35</sup>Cl. Plutonium et américium seraient séparés de divers combustibles usés de réacteurs à neutrons thermiques. Cela suppose que le procédé de séparation du Plutonium et de l'américium passe du laboratoire à un niveau industriel. Le fonctionnement de Aramis nécessiterait un traitement en continu pour éliminer les produits de fission volatils par un procédé en ligne et les non volatils par un procédé hors ligne. On prévoit l'incinération du Plutonium à isotopie dégradée et de l'américium. Le CEA travaille sur le concept d'une maquette pour 2025. Orano s'oriente vers les sels fondus chlorures (au lieu des fluorures) car ils sont mieux adaptés pour obtenir un spectre de neutrons rapides, solubiliser le plutonium et sont compatibles avec les installations de La Hague. En effet, il est prévu de traiter le sel, c'est-à-dire d'enlever les produits de fission non volatils, par une voie aqueuse après dissolution des chlorures et récupérer <sup>37</sup>Cl. Ainsi régénéré le combustible peut être réintroduit dans le réacteur.

Ce projet s'inscrit dans une perspective de la poursuite du retraitement des combustibles usés. Toutefois, Orano reconnaît un retour d'expérience inexistant et un TRL proche de 2.

Les études du programme ISAC portent sur la synthèse des acquis sur les MSR et l'identification des points durs (chimie, corrosion, matériaux), l'évaluation technique de l'intégration des MSR dans la feuille de route de la stratégie électronucléaire. La R&D est orientée sur les propriétés thermodynamiques des mélanges de sels et de la chimie des actinides et produits de fission dans ces milieux.

En juin 2021, la *European SMRs Partnership Initiative* a été lancée à l'échelle européenne, et la France y participe activement. Elle a pour but de développer des synergies dans le secteur nucléaire en associant les compétences européennes et de renforcer la recherche et les développements industriels sur les SMR. Il s'agit d'aller éventuellement vers le développement d'un modèle unique européen pour maximiser l'effet de série et harmoniser les règles de sécurité, d'optimiser les mécanismes de financement, optimiser la chaîne de ressources pour assurer production/maintenance de ces réacteurs, développer de façon concertée les compétences. Actuellement, plusieurs modèles sont étudiés dans le cadre de cette initiative européenne et ce sont tous des réacteurs de type REP à l'exemple de Nuward.

En résumé :

- Nuward est le SMR porté par les industriels de la filière nucléaire française (notamment EDF) et bénéficie à la fois du retour d'expérience de la filière électronucléaire actuelle, d'un fort soutien financier, des installations de R&D et des ateliers pilotes de cette filière. Tous les atouts sont réunis pour permettre la construction d'un prototype annoncée pour 2035.
- Le CEA étudie, dans une perspective de long terme, deux concepts de SMR à neutrons rapides bénéficiant du retour d'expérience des RNR-Na et de la R&D conduite dans le projet Astrid. Cette étude devrait définir le RNR-Na de puissance du prochain siècle et permettre au CEA de maintenir la compétence de la France sur les réacteurs à neutrons

rapides. Pour l'instant, le CEA en est à des esquisses.

- Le CEA étudie, dans une perspective d'une quinzaine d'années, des SMR destinés aux usages décentralisés de l'électricité et de la chaleur. Il dispose des compétences et des infrastructures pour conduire la R&D nécessaire. L'avancement des projets dépendra des moyens investis.
- Enfin, Orano porte un projet original de SMR alimenté avec un combustible liquide de chlorures fondus incorporant de la matière fissile issue du retraitement des combustibles usés des réacteurs de puissance. Son objectif est de contribuer à la réduction des déchets radioactifs de haute activité à vie longue. Il n'existe qu'un retour d'expérience historique sur ces réacteurs. La R&D à conduire est considérable.

## 5.2 - Projets portés par des start-ups

La start-up Naarea (pour *Nano Abundant Affordable Resourceful Energy For All*) a de grandes ambitions, comme son nom en témoigne. Son projet vise l'association de modules de MMR. Le MMR de base, xSMR (*extra Small Modular Reactor*), de quelques dizaines de MWe serait un MSR associé à un cycle thermodynamique à CO<sub>2</sub> supercritique. Naarea vise à long terme un fonctionnement avec un cycle Th/<sup>233</sup>U mais envisage de commencer avec un combustible au plutonium.

Les études initiales de Naarea portaient sur un combustible fluorure d'uranium enrichi à près de 20% avec l'ajout de fluorure de plutonium et d'actinides mineurs issu des REP actuels. Le tout devait être solubilisé dans du fluorure de lithium enrichi en <sup>7</sup>F, pour éviter la formation de tritium. Des couvertures fertiles en thorium devaient assurer le passage progressif au cycle thorium. Les réacteurs devaient être fabriqués en usine, livrés sur place pour un fonctionnement de quelques années (~1 TWh d'électricité) puis rapportés en usine pour retraitement en étant remplacés sur place par d'autres réacteurs. Naarea pensait la pyrochimie pour l'étape principale de retraitement qui consiste à extraire 99 à 99,9% des actinides afin de les remettre dans un sel neuf selon un procédé pyrochimique industriel qui reste à inventer d'autant plus qu'il fallait récupérer le lithium enrichi. Les produits de fission devaient être vitrifiés selon les procédés connus à la Hague et le fluor recyclé. Devant les difficultés de toute nature, notamment concernant la corrosion du réacteur par le fluor et la solubilité des fluorures d'actinides et de produits de fission que présentait ce projet, Naarea s'est convertie aux sels chlorures enrichis en <sup>37</sup>Cl qui permettent d'envisager un réacteur à neutrons rapides et un traitement des sels compatible avec les installations de la Hague, qui pourraient fournir aussi le plutonium. Le parcours de Naarea illustre bien le fait que les MSR posent beaucoup de problèmes, que les choix de concepts définitifs sont longs à établir et que les start-up doivent se rapprocher des industriels du nucléaire.

Aujourd'hui, Naarea s'attache à la mise en place d'un jumeau numérique (définition neutronique et thermique du concept qui doit être sûr, surrégénérateur, pilotable à distance c'est-à-dire sans opérateur sur place et déployable à grande échelle) et prévoit de livrer un prototype en 2030, même si le calendrier semble difficile à tenir.

Le projet de la Start-Up Jimmy Energie est un AMR/MMR calogène à haute température 750°C, de 10 à 20 MWth (UO<sub>2</sub>/Triso en assemblage prismatique graphite, Uenrichi à 5 %, modérateur graphite, caloporteur hélium sous 50 bars) avec transport de chaleur par CO<sub>2</sub> à 600°C entre deux échangeurs. Il existe dans le monde quelques réacteurs de même type mais plus puissants. Jimmy prévoit un prototype en 2026.

Deux autres start-ups multinationales incluent la France : d'une part Newcleo (France Royaume-Uni et Italie) qui vise dans une quinzaine d'années un prototype de MMR 30 MWe puis un SMR de 200 MWe à neutrons rapides à caloporteur plomb et, d'autre part, Transmutex (France et Suisse) qui vise un mini ADS (*Accelerator Driven System*) avec un SMR de 100 MWe sous-critique dérivé du réacteur russe SVBR75/100 afin de transmuter des actinides.

En résumé, c'est la première fois que des Start-Ups portent des projets ambitieux concernant l'énergie nucléaire. Il est cependant trop tôt pour savoir si elles iront au-delà de l'effet d'annonce, limitées par les moyens expérimentaux dont elles devront disposer pour la qualification des composants et procédés.

## Conclusion

La lutte contre le changement climatique a récemment renforcé la prise de conscience des atouts de l'énergie nucléaire pour décarboner l'énergie. A cet égard, la Commission Européenne vient de confirmer la place de l'énergie nucléaire dans la taxonomie verte en tant qu'énergie de transition.

De nombreux États dans le monde souhaitent développer des SMR de technologies diverses et de puissance électrique inférieure à 300 MWe ou de puissance thermique inférieures à 300 MWth. Les projets se multiplient mais leur avancement est inégal. Pour les mener à terme, il est nécessaire de poursuivre une R&D et des développements technologiques conséquents car passer des réacteurs actuels aux SMR est une rupture majeure dans le concept de l'utilisation de l'énergie nucléaire en dehors des centrales nucléaires de puissance. Il ne s'agit pas d'une simple réduction d'échelle et toutes les étapes de la chaîne des actions et des valeurs associées à la construction d'un réacteur puis de celles associées à la gestion des combustibles usés et des déchets sont à reconsidérer.

La compétition pour un marché ouvert à l'expansion de l'énergie nucléaire à côté de l'électronucléaire de puissance a commencé.

La France s'est lancée avec retard dans la compétition mondiale : à côté de la construction de 6 EPR, annoncée par le président E. Macron, réélu en 2022, elle s'engage à soutenir en parallèle le développement des SMR sous diverses formes (plan France relance et plan France 2030). Elle concentre ses efforts sur le SMR Nuward, réacteur électrogène, qui repose sur un concept classique à neutrons thermiques et donc sur un bon retour d'expérience. Un prototype peut être prêt vers 2035. Elle étudie aussi des SMR à neutrons rapides valorisant les acquis de la France dans ce domaine. Elle se lance aussi, dans les SMR calogènes pour diverses applications industrielles au plus près des besoins. Enfin, elle s'investit dans les réacteurs à combustibles liquides, un nouveau type de réacteur ouvrant la possibilité de mieux valoriser l'uranium.

## Remerciements

Les auteurs remercient Juliette ROCHET pour la lecture attentive et la mise en forme du texte.

# Rédacteurs et composition du CPE

## Les rédacteurs

- Robert GUILLAUMONT
- Marc FONTECAVE
- Jean-Claude DUPLESSY
- Sébastien CANDEL

Les redacteurs sont membres du Comité de Prospective en énergie de l'Académie des sciences

## Le Comité de Prospective en énergie de l'Académie des sciences

Président : Marc FONTECAVE

### Composition

Roger BALIAN

Sébastien BALIBAR

Yves BRÉCHET

Catherine BRÉCHIGNAC

Édouard BRÉZIN

Sébastien CANDEL

Catherine CÉSARSKY

Bruno CHAUDRET

Vincent COURTILOT

Ghislain de MARSILY

Robert DAUTRAY

Jean-Claude DUPLESSY

Marc FONTECAVE

Robert GUILLAUMONT

Pierre JOLIOT

Guy LAVAL

Olivier PIRONNEAU

Thierry POINSOT

Michel POUCHARD

Daniel ROUAN

Didier ROUX

Patrice SIMON

Jean-Marie TARASCON

Bernard TISSOT

Jean WEISSENBACH

Francis-André WOLLMAN

# Personnes auditionnées

## **Bernard SALHA**

Directeur Technique Groupe & Directeur de la R&D chez EDF

## **Jean-Michel RUGGIERI**

Chef du programme SMR à la Direction des Energies du CEA

## **Paul GAUTHE**

Chef de Projet R4G/ESQVE du CEA

## Pour aller plus loin : quelques ressources scientifiques sur les SMR

- Ressource de la *World Nuclear Association* : <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>
- Ressource de l'AIEA : [https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_Book\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf)
- Ressource de l'OCDE : [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_57979/small-modular-reactors-challenges-and-opportunities?details=true](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_57979/small-modular-reactors-challenges-and-opportunities?details=true)
- Webinars de *Gen IV International forum* 2016-2022 : [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_82831/webinars](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_82831/webinars)
- **Series 68** (à venir) China's multi- purpose SMR-ACP 100 design and project progress, D. Song, Nuclear Power Institute of China, 31 august 2022, **Series 66**, Nuclear wastes management strategy for molten salt reactors systems, J. Vienna and B. Riley PNNL, USA, 15 June 2022 , **Series 55**, Evaluating changing paradigms across the nuclear industry, J. Melon, Carnegie Mellon university, USA, 27 July 2021, **Series 46**, Global potential for small and micro reactor systems to provide electricity access, A. Schweikert, Colorado school of mines, USA, 28 October 2020, **Series 43** Overview of small modular reactor technology development, F. Reistsma, IAEA, Austria, 29 July 2020, **Series 39**, Microreactors: a technology option for accelerated innovation, D.Rao, H. Trelle, Los Alamos National Laboratory , USA and Y.Arafat, Idaho National Laboratory, USA, 26 March 2020. Les Series de 2016-2019 ne concernent pas les SMR.

## AMR

Pour *Advanced Modular Reactors* ou **Réacteur modulaire avancé**. Il s'agit de réacteurs SMR (voir ci-dessous) intégrant les principes des filières de 4<sup>e</sup> génération.

## EPR

Pour *Evolutionary pressurised reactor*, réacteur nucléaire de 3<sup>e</sup> génération de la filière des réacteurs à eau pressurisée (REP, voir ci-dessous). De conception française, il est opérationnel en Chine (deux unités), en Finlande (une unité) et en construction dans d'autres pays (France et Angleterre).

## Gen I à IV

**Génération** (ou filières) de réacteurs nucléaires : allant de 1 à 4, elles se distinguent par les technologies qu'elles exploitent, et surtout par l'amélioration croissante de leur sûreté vis-à-vis d'aléas extérieurs. A l'heure actuelle, encore au stade de la recherche ou du prototype industriel, les réacteurs de 4<sup>e</sup> génération (ou « réacteurs du futur ») ont vocation à succéder aux réacteurs de 3<sup>e</sup> génération, qui sont actuellement en déploiement. La majorité des réacteurs en fonctionnement sont encore de 2<sup>e</sup> génération.

## HTR

Pour *High Temperature Reactor*, réacteurs à haute température.

## MMR

Pour *Modular Microreactors*, des SMR/AMR d'une très faible puissance (de l'ordre du MWe).

## MSR

Pour *Molten Salt Reactors* ou **Réacteur nucléaire à sels fondus (RSF)**. Concept de réacteur nucléaire dans lequel le combustible nucléaire se présente sous forme liquide, dissous dans un ou plusieurs sels fondus.

## REP

Pour **Réacteur à eau pressurisée**. Actuellement, il s'agit de la filière de réacteurs nucléaires RNT (voir ci-dessous) la plus courante dans le monde, à la fois pour des réacteurs en exploitation, en construction et en projet (réacteurs de 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> générations).

## RNR

Pour **Réacteurs à neutrons rapides**. Au sein de ces réacteurs, (en absence de modérateur) les neutrons rapides fissionnent tous les isotopes des éléments lourds. Il n'existe que quelques unités de cette filière.

## RNR-Na

Pour **Réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium liquide**. Modèle de RNR actuellement le plus mature.

## RNT

Pour **Réacteurs à neutrons thermiques**. Au sein de ces réacteurs, les neutrons rapides sont ralentis par un modérateur et ne fissionnent que certains isotopes des éléments lourds. Cette filière est actuellement dominante à travers le monde.

## SMR

Pour *Small modular reactors* ou **Réacteurs nucléaires modulaires**. Leur puissance est inférieure à 300 MWe. De ce fait, leur sûreté est passive, leurs composants peuvent être construits et testés en usine, et ils peuvent être couplés.

## xSMR

Pour *Extra Small Modular Reactor*.

**Juliette ROCHET**

Responsable des comités, avis et rapports de l'Académie des sciences.

**Florent GOZO**

Adjoint pour les comités et rapports.

