

Damien Chartrain
Bastien Rocafull-Barraco
Axel Deteuf
Alban de La Houplière
Jules Berthier



NOTE D'INFORMATION

Les petits réacteurs modulaires (SMR) : à quoi ça sert et qui pour en fabriquer ?

Les SMR (pour « Small Modular Reactor ») sont des réacteurs nucléaires de plus petite taille et de plus faible puissance que les réacteurs classiques. Face à la restructuration du domaine énergétique et aux nombreux questionnements quant à la manière de produire de l'électricité, cette technologie fait naître un engouement grandissant.

Il existe de nombreux projets de SMR à travers le monde, à des stades d'avancement plus ou moins importants, utilisant des technologies très variées. Chaque consortium national engagé sur le sujet mise sur un large marché à l'export. En Russie, deux réacteurs SMR sont déjà en exploitation dans une centrale flottante, et un projet de SMR à terre a été lancé, avec une mise en exploitation prévue vers 2028. La Chine a très largement communiqué sur son projet qui entre en phase de production.

En France, les recherches sur le sujet ont commencé au début des années 2000 entre AREVA, EDF, Naval Group (DCNS à l'époque) et le CEA. Depuis que le gouvernement français a choisi d'investir dans cette technologie dans le cadre du plan France 2030, ces réacteurs suscitent une attention particulière du grand public. En effet, les SMR devraient permettre de profiter des avantages inhérents à la production d'électricité via l'énergie nucléaire (forte puissance, énergie bas carbone...) tout en étant moins coûteux à produire et exploiter, du fait de leur plus petite taille. Ils constituent une technologie très flexible.

La présente note d'information tentera de caractériser l'utilité de la mise en place de ce nouveau concept en faisant notamment quelques analogies avec les réacteurs nucléaires conventionnels. Elle traitera également des différents acteurs intéressés par la fabrication d'une telle technologie.

Utiliser l'énergie nucléaire de manière plus sûre

La fonction principale des SMR est d'utiliser l'énergie nucléaire afin de générer une forme d'énergie particulière, souvent électrique. En cela, ils se rapprochent des réacteurs nucléaires conventionnels. Ils présentent tous les avantages de la filière nucléaire actuelle (production d'électricité bas carbone en grande quantité, disponibilité, flexibilité de la puissance fournie, etc.) mais les caractéristiques propres aux SMR devraient pouvoir offrir des améliorations en termes de sûreté nucléaire, thème crucial de la filière. Il existe bien sûr différents modèles de SMR, comme on le verra plus loin, mais l'ossature des systèmes et leurs grands principes restent assez identiques.

Les dimensions d'un SMR sont réduites d'un facteur proche de 20 par rapport à un réacteur classique. En contrepartie, la puissance est également diminuée (la puissance d'un SMR varie généralement entre 20 MWe et 300 MWe). Dans de nombreux modèles, les SMR sont immergés dans l'eau. Ceci permet d'évacuer la puissance résiduelle bien plus rapidement qu'un réacteur classique notamment en cas d'arrêts ou d'incidents. Un autre aspect intéressant des SMR est que beaucoup de modèles proposent un changement notable dans le fonctionnement du circuit primaire : le cœur du réacteur et le GV sont superposés. Cela permet d'utiliser la convection naturelle (la densité de l'eau s'abaisse lorsque sa température augmente) pour faire circuler l'eau : l'eau circulant au sein du cœur se réchauffe puis monte et se refroidit au contact du générateur de vapeur. L'eau refroidie descend ensuite en direction du cœur. Le refroidissement se fait alors de manière passive : les problèmes qui engendrent une perte de refroidissement du cœur dans les réacteurs classiques (perte électrique, pompes non fonctionnelles, brèche dans un circuit, etc.) ne sont, dans une certaine mesure, plus à considérer dans cette configuration. Autrement dit, l'alimentation en eau du cœur est beaucoup moins dépendante de l'intégrité des différents systèmes composant le réacteur.

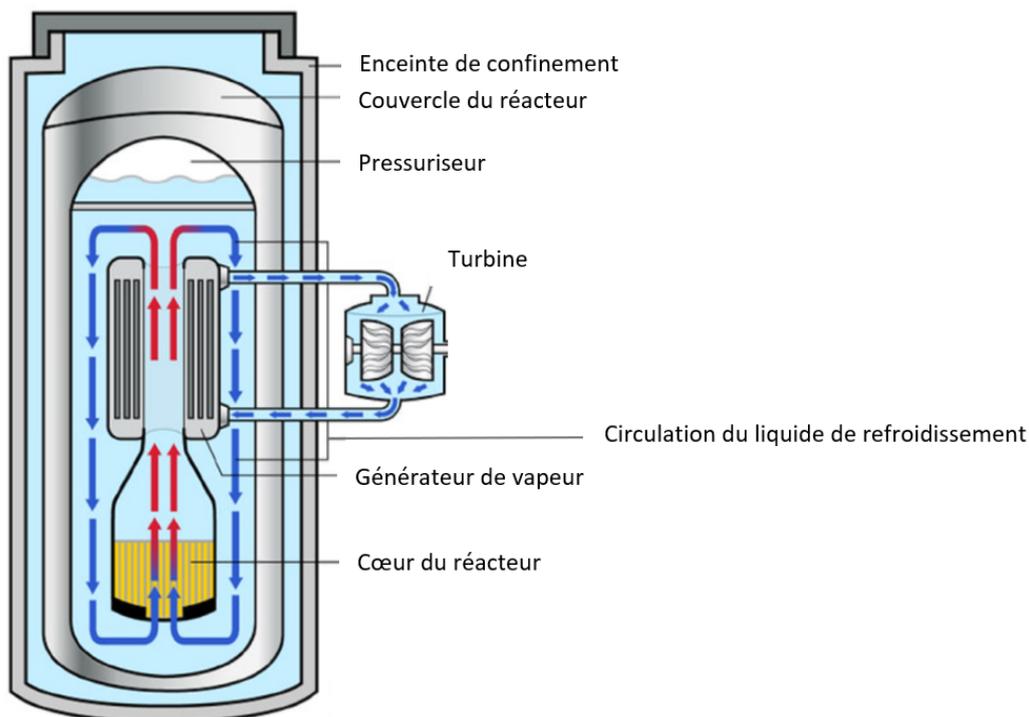


Figure 1 : La cuve d'un SMR (source : U.S. Government Accountability Office (légendes traduites en français)).

Pour résumer, le concept de SMR permet de réduire la probabilité d'incidents et d'accidents graves par rapport à un réacteur classique. On peut notamment citer : surchauffe du cœur, fonte de la cuve, réaction incontrôlée... Les aléas externes tels qu'une perte du réseau électrique ou un phénomène climatique extrême devraient avoir moins de conséquences. Une note d'information de l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire) du 7 octobre 2021 (voir bibliographie) conclut que : « [...] les SMR devraient pouvoir respecter des objectifs de sûreté plus exigeants que les réacteurs de forte puissance en termes de limitation des rejets en situation normale et accidentelle, y compris d'accident grave, et de fréquence de fusion du cœur ». À noter que la miniaturisation des SMR permet de mettre en jeu moins de matières radioactives, ce qui peut être vu comme un élément de sûreté supplémentaire. Néanmoins, comme déjà dit plus haut et indiqué dans le document de l'IRSN, il faut rester prudent sur les conclusions : de nombreux modèles différents existent et il faut attendre un stade de conception plus avancé pour pouvoir réellement conclure définitivement.

Une flexibilité dans de nombreux domaines

Par leur taille, les SMR présentent une flexibilité beaucoup plus importante que les réacteurs conventionnels et cela dans de nombreux domaines : construction, lieu d'implantation, modèle de réacteur, etc. C'est la profonde cause du développement des SMR et ce qui rend cette technologie très utile.

Le premier avantage de cette flexibilité, fortement mis en avant, concerne le processus de construction des SMR. En effet, les SMR doivent pouvoir permettre une construction modulaire : chaque centrale sera produite par l'assemblage de composants ou de « modules » préfabriqués en usine, chaque module ayant une fonction bien définie. Cela apporte une marge de manœuvre importante lors de la construction du SMR. Cette modularité devrait également permettre de faciliter les phases d'entretien majeur en permettant de remplacer un composant défaillant/obsolète plus rapidement et facilement. La standardisation de la production (mise en avant de processus de production, protocoles opératoires optimisés, etc.) et l'effet de série (produire en quantité) permettent de produire plus rapidement et surtout à un coût moins cher. Cela évite les investissements de départ très importants et des durées de chantier qui s'allongent, retardant d'autant le retour sur investissement.

Il existe également une « flexibilité d'implantation ». En effet, les SMR, par leur taille et leur puissance plus faible que les réacteurs classiques, peuvent s'implanter dans des lieux beaucoup plus variés que les réacteurs classiques. Par exemple, les SMR pourraient alimenter des sites isolés où les infrastructures et les réseaux électriques peu développés seraient tout de même suffisants pour supporter la puissance électrique produite par les SMR. Des pays qui ne maîtrisent pas la technologie nucléaire ou qui n'ont pas les infrastructures nécessaires pourraient alors accueillir les SMR. Ceci est accentué par la possibilité d'insérer des SMR dans des barges flottantes ou des navires. La Russie, seul pays à avoir un SMR en service, a placé deux SMR dans une barge flottante pour alimenter en électricité une région très isolée (Sibérie). D'autres pays entendent faire la même chose, notamment la Corée.

On constate enfin que les SMR s'adaptent très bien à de nombreux modèles et concepts de réacteurs différents. En effet, les projets de SMR en cours montrent qu'il existe une très grande variété dans les choix de conception. On prévoit d'utiliser des réacteurs relevant de la 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} génération avec de nombreuses technologies différentes : réacteur à sel fondu, REP, réacteur à eau bouillante, réacteur à neutrons rapides, etc. On a également une grande flexibilité au niveau de l'architecture des sites qui pourront associer plusieurs SMR côte à côte pour se rapprocher de la puissance d'un réacteur classique.

Voici un graphique résumant la grande variété de modèles :

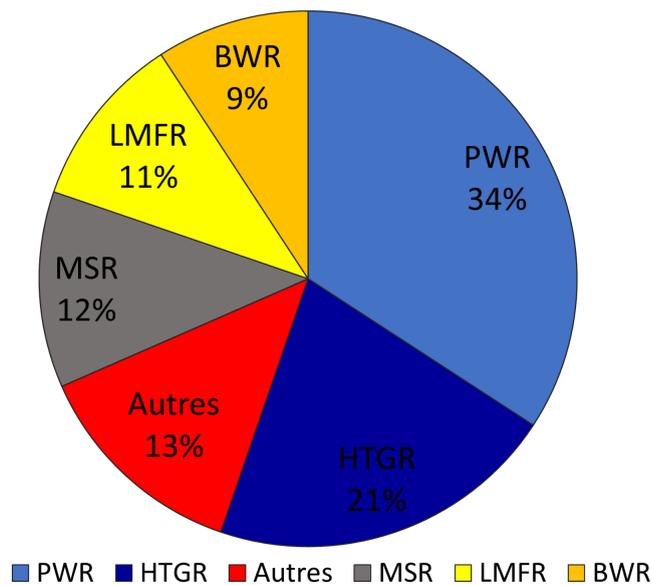


Figure 2 : Répartition des projets de SMR en fonction des types de technologies réacteurs utilisés (source des données du graphique : AIEA, date : 2020).

Légendes traduites : PWR : réacteur à eau pressurisée, BWR : réacteur à eau bouillante, HTGR : réacteur nucléaire à très haute température (ou parfois VHTR : réacteur nucléaire à haute température), LMFR : réacteur refroidi par du métal liquide, MSR : réacteur à sels fondus.

Des applications nombreuses en dehors de la production d'électricité

Dans le domaine de la production électrique, les SMR permettent de produire de l'électricité sans émettre de gaz à effet de serre, ce qui en fait une alternative très intéressante aux installations utilisant des ressources fossiles, sachant que leur taille, leur flexibilité et la possibilité dans certains cas de les déplacer rendent possible l'alimentation de sites très précis. Mais les usages des SMR sont loin de se limiter à la production d'énergie électrique et les applications listées ci-dessous sont d'ores et déjà envisagées :

Production d'hydrogène : elle est en essor de nos jours car l'hydrogène est vu comme une source d'énergie décarbonée très appréciable. Néanmoins, de nombreux processus industriels de production d'hydrogène rejettent des gaz à effet de serre en quantité importante. L'électrolyse de l'eau est vue comme une solution alternative car ce procédé utilise de l'énergie électrique. Les SMR permettraient dès lors de produire l'énergie suffisante à cette électrolyse.

Cogénération : une centrale électrique génère naturellement de l'énergie thermique tout en produisant de l'énergie électrique. Dans le cas d'une centrale nucléaire, c'est 70% de la puissance qui est produite en énergie thermique. Cette énergie sert habituellement à alimenter le chauffage des bâtiments, produire de l'eau chaude ou alimenter des sites industriels utilisant de la chaleur. Son exploitation a déjà été envisagée dans le cas des centrales classiques (effectif à Stockholm ou en Allemagne de l'est dans les années 60) mais s'est avérée peu rentable du fait des déperditions de chaleur dues au transport. La compacité des SMR et leur positionnement plus proche de zones d'habitation pourraient relancer l'intérêt de la cogénération.

Le dessalement de l'eau de mer : l'eau de mer chargée en chlorure de sodium peut être dessalée afin de produire de l'eau douce et être consommée. Il existe de nombreux processus pour y parvenir utilisant des transformations chimiques ou physiques qui demandent beaucoup d'énergie. Placer un réacteur modulaire à côté d'une station de dessalement est envisagé dans le futur.

Le développement des SMR : Une dynamique mondiale très importante

De nombreux pays s'intéressent au développement industriel de cette technologie. De nos jours, on dénombre environ 70 projets de SMR. Très souvent, il s'agit de pays possédant du nucléaire dans leur mix énergétique. L'enjeu pour ces pays est de pouvoir exporter leurs SMR dans des pays qui ne disposent pas à ce jour de la technologie nucléaire. La compacité, la modularité et surtout le coût plus abordable des SMR devrait faciliter leur commercialisation à l'export.

Les projets en cours proposent de très nombreux concepts et modèles de réacteurs relevant de la génération II, III et IV. Beaucoup de ces projets sont encore au stade théorique et expérimental mais certains acteurs affichent leur avance et une forte ambition. Ces acteurs, loin de repartir de la feuille blanche, se sont généralement inspirés des technologies qu'ils maîtrisaient, tant dans le nucléaire civil que la propulsion navale, ce qui explique l'hétérogénéité des concepts, représentative du parc actuel. Dans ce qui suit, on propose un tour d'horizon pour appréhender quels acteurs pourraient fabriquer des SMR dans un avenir proche.

MINI-RÉACTEURS LE TOUR DU MONDE DES PROJETS

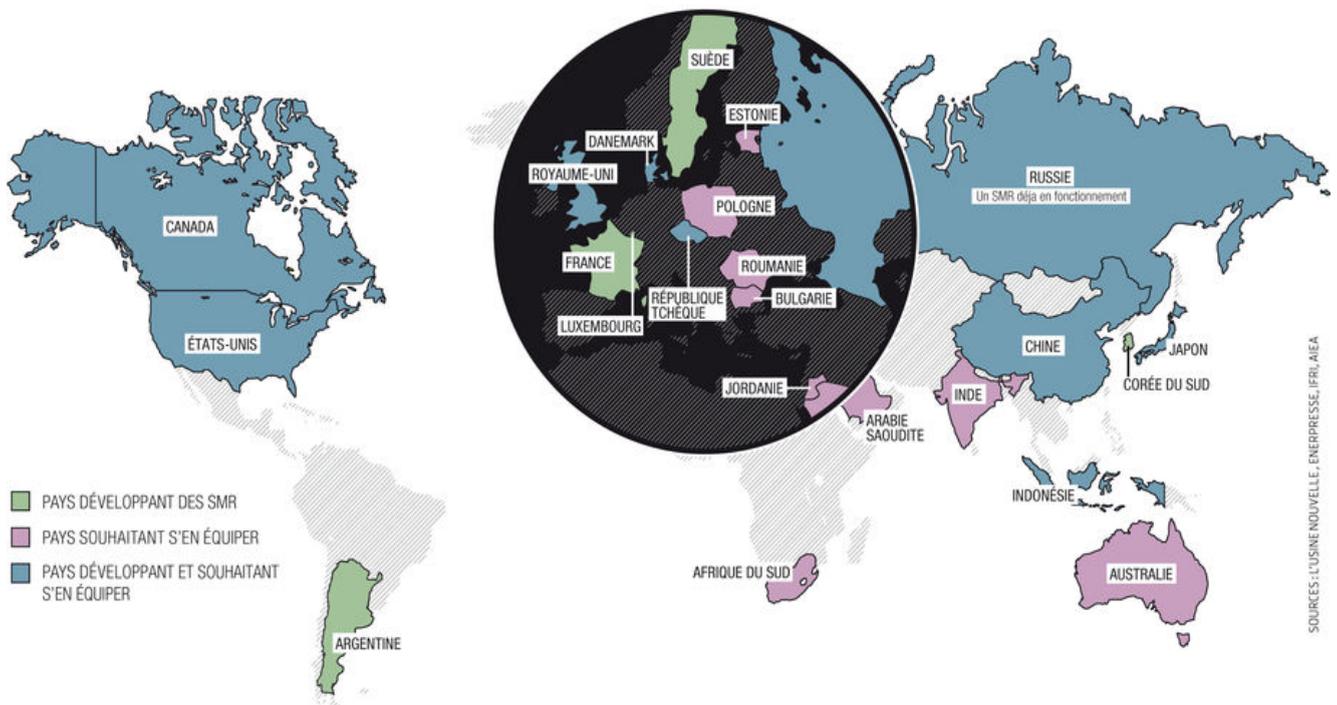


Figure 3 : Cartographie mondiale des pays s'intéressant à la technologie SMR en 2021
(source : L'Usine Nouvelle)

Les États-Unis sont très impliqués dans le domaine. La société privée NuScale propose un des projets SMR les plus avancés. Il s'agirait de mettre en place un ensemble de 12 SMR de 50 MWe. En août 2020, le design a été approuvé par la Commission de réglementation nucléaire des États-Unis. Une mise en service en 2030 est prévue. De manière générale, on observe une très forte dynamique au sein du pays : investissement massif du gouvernement, législation facilitant la mise en place des SMR, nombreuses start-up travaillant sur le sujet, etc. Les États-Unis seront probablement un des leaders mondiaux dans le domaine et devraient fabriquer de nombreux SMR. Des accords commerciaux d'exportations sont déjà signés.

La Chine s'est également fortement investie dans le domaine. On dénombre six projets de SMR dans le pays : cinq à eau pressurisée et un réacteur nucléaire à très haute température utilisant du gaz comme caloporteur et

parfois même du thorium comme combustible. Le pays souhaite diversifier l'utilisation des SMR et s'en servir pour des industries en plus de la production d'électricité.

La Russie montre également un fort intérêt pour la technologie. Elle est le seul pays à exploiter un SMR de nos jours. Deux SMR de 35 MWe chacun sont installés dans une barge flottante en Sibérie (d'autres pays comme la Chine voudraient reprendre ce principe de « SMR flottant et amovible »). Rosatom, principale société d'énergie nucléaire en Russie, souhaite développer un SMR de 55 MWe d'ici à 2025 afin notamment d'alimenter des sites industriels. La société travaille également sur un SMR de 350 MWe de type REP pour 2030.



Figure 4 : l'Akademik Lomonosov, centrale nucléaire flottante russe (source : Russia Beyond)

En Europe, une forte dynamique s'observe également. Le Royaume-Uni prévoit la construction de 16 SMR pour 2050. Pour 2030, l'entreprise Rolls-Royce veut développer avec l'aide de 9 sociétés britanniques un SMR de 235 MWe. En France, un groupement d'entreprises souhaite mettre au point un SMR de 170 MWe de type REP d'ici à 2035.

On peut citer d'autres pays s'impliquant dans le développement de SMR : Canada, Corée du Sud, Danemark, Suède, etc.

Des acteurs très variés

On constate que les entreprises actrices dans le domaine des SMR sont de natures très différentes. Il arrive souvent que plusieurs entités de natures différentes collaborent ou se rassemblent derrière un seul projet. On peut dégager trois types d'acteurs principaux : les instituts de recherches, les start-ups et enfin les grandes entreprises spécialisées dans la filière nucléaire.

Lors du développement de nouvelles technologies, les instituts de recherche sont toujours des acteurs primordiaux. De nos jours, la technologie nucléaire est bien maîtrisée, il existe de très nombreux modèles de réacteurs et les sous-marins nucléaires proposent des réacteurs de tailles très réduites, dont l'usage est cependant très différent de celui attendu d'un SMR. Cependant, la technologie SMR présente des nouveautés et des caractéristiques propres qui nécessitent des travaux de recherche. Parmi les nouveautés à étudier, il y a notamment l'élaboration de nouvelles normes d'exploitation et plus généralement la définition de référentiels techniques compatibles des différentes réglementations nationales afin de faciliter l'export, la mise en pratique

de la cogénération et l'association de plusieurs réacteurs. À noter que de nombreux SMR s'appuient sur des technologies nouvelles de types génération IV et que cela engage également des recherches.

On peut citer quelques centres de recherches nucléaires célèbres qui participent au développement des SMR : CEA, Institut Kourtchatov, ou encore Canadian Nuclear Laboratories.

En outre, on constate que de nombreuses start-up ou entreprises privées de taille réduite se lancent dans la technologie SMR. Souvent, ce type d'acteur engage toutes ses ressources sur un seul modèle de réacteur. Le développement se fait généralement autour d'une petite équipe composée de personnes très compétentes, innovantes et motivées. C'est le cas par exemple de NAAREA, start-up française qui travaille sur un SMR de très petite taille : le XSMR. On assiste parfois à des alliances entre de grandes industries et des start-up dans le cadre de certains projets ou lorsque les grandes entreprises souhaitent déléguer des tâches très précises. C'est le cas aux États-Unis ou des grandes entreprises comme Westinghouse ou General Electric s'associent avec des start-up parfois labellisées « Advanced Nuclear » (nucléaire avant-gardiste). Il est cependant probable que certaines start-ups n'arrivent pas au bout de leur développement de SMR.

Enfin, de grandes entreprises historiques spécialisées dans le nucléaire s'engagent dans le développement des SMR : EDF, Rosatom, Westinghouse, CGN, etc. Ils possèdent des ressources humaines et financières très conséquentes. Cela permet de mener des projets de grande ampleur. Ces entités s'associent parfois avec d'autres acteurs de natures différentes et apportent des ressources importantes (projet Nuward en France). Les ressources de ces grandes entreprises aideront sans doute à mener des projets à terme. C'est par exemple le cas en Russie où de nombreuses ressources ont été engagées par Rosatom pour la mise au point du seul SMR en service de nos jours : l'Akademik Lomonosov.

Zoom sur la France

Après un essor très important dans les années 80, stoppé par Tchernobyl puis relancé dans les années 2000 avec le lancement des projets EPR, le Nucléaire Civil Français a subi un nouveau coup d'arrêt en 2011 avec la catastrophe de Fukushima. L'opinion publique très clairement défavorable au nucléaire a conduit à la dévalorisation de la filière nucléaire. Cela a notamment conduit à stopper le projet ASTRID en 2019. Auparavant, on a assisté à l'arrêt de réacteurs expérimentaux comme Rapsodie, Phénix et Superphénix. Ce n'est qu'au prix d'une longue campagne de communication rétablissant les vertus du nucléaire, malgré un risque indéniable mais maîtrisé, que la France a pu, très récemment, réaffirmer un engagement fort et durable dans l'évolution de la filière notamment via les SMR. Le gouvernement a annoncé son souhait de développer la technologie SMR en débloquant 1 milliard d'euros pour celle-ci dans le cadre du plan « France 2030 ».

Dans cette dynamique, des entreprises françaises spécialisées dans l'énergie nucléaire se sont rassemblées, au début des années 2000, pour mettre au point un SMR de 170 MWe de type REP. Le CEA, EDF, Naval Group et TechnicAtome en sont les acteurs, pilotés par EDF. Le projet s'est peu à peu structuré, toujours sous la houlette d'EDF, pour devenir le projet Nuward™ en 2019. 50 millions d'euros ont été investis. Le but est de mettre en service le SMR d'ici à 2035. EDF envisage d'exporter très largement son SMR, mais les premiers modèles seront construits et installés en France, afin de faire de la France une vitrine pour cette nouvelle technologie.

Le projet sert également à développer de nouvelles innovations : chaudière nucléaire compacte, circuit primaire intégré dans la cuve et sûreté passive. En parallèle, le CEA étudie l'opportunité d'optimiser la conception de SMR pour assurer d'autres fonctions qu'une simple production d'électricité (évoqué plus haut).

Naval Group et TechnicAtome sont des experts de la propulsion nucléaire navale. À ce titre, ils conçoivent et exploitent déjà des réacteurs nucléaires compacts. Cependant, les cas d'usage du SMR étant très éloignés de la propulsion navale, les technologies ne sont pas transposables, ce qui les amène à beaucoup innover sur ce projet, avec l'aide du CEA, d'EDF, de Framatome et d'autres industriels français de la filière, fortement impliqués dès la conception. Le projet Nuward™ a donc bon espoir d'aboutir, mais le retard accusé par la France dans la technologie des SMR par rapport à d'autres pays ne devrait pas pouvoir se combler, ce qui pourrait le pénaliser dans ses objectifs à l'export.

Conclusion

Le nucléaire civil, après une longue période de disgrâce à l'échelle mondiale, a su démontrer son intérêt face aux enjeux du réchauffement climatique et de la décarbonisation. Les SMR ont achevé de convaincre les plus sceptiques par leurs promesses de sûreté et de flexibilité à un coût raisonnable, ce qui permet par ailleurs d'en envisager un usage dépassant la simple production électrique.

Toutes les grandes puissances nucléaires se sont lancées dans le développement des SMR mais elles sont talonnées par de nouveaux acteurs, d'initiatives privées.

Il est souhaitable et probable que plusieurs de ces projets aboutissent et cohabitent, malgré les nombreux verrous technologiques restants, permettant ainsi une transition énergétique rapide.

Bibliographie

[1] Agence internationale de l'énergie atomique - Advances in Small Modular Reactor Technology Developments - 2020 - https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf

[2] LA RADIOACTIVITE.COM - Réacteurs SMR - https://www.laradioactivite.com/site/pages/Reacteurs_SMR.htm

[3] L'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire - La sûreté des réacteurs modulaires de faible puissance (Small Modular Reactors) - 7 octobre 2021 - https://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Actualites/Documents/20211007_NI-SMR-102021.pdf

[4] Commissariat à l'Énergie Atomique - Les SMR - <https://www.cea.fr/Pages/domaines-recherche/energies/energie-nucleaire/reacteurs-nucleaires-futur.aspx?Type=Chapitre&numero=1>

[5] GALICHET Emmanuelle - Réacteurs nucléaires « SMR » : de quoi s'agit-il ? Sont-ils moins risqués ? – The Conversation, 2 décembre 2021 - <https://theconversation.com/reacteurs-nucleaires-smr-de-quoi-sagit-il-sont-ils-moins-risques-172089>

[6] BARBAUX Aurélie - Tout comprendre aux SMR, ces petits réacteurs nucléaires modulaires prisés par Emmanuel Macron - L'Usine nouvelle, 07 octobre 2021 - <https://www.usinenouvelle.com/editorial/reperes-tout-comprendre-aux-smr-ces-petits-reacteurs-nucleaires-modulaires-prises-par-emmanuel-macron.N1147777>

[7] BARBAUX Aurélie - La carte du monde des projets de mini-réacteurs nucléaires – L'Usine nouvelle, 11 Février 2021 - <https://www.usinenouvelle.com/article/la-carte-du-monde-des-projets-de-mini-reacteurs-nucleaires.N1057944>

[8] United States Government Accountability Office - Nuclear Reactors Status and challenges in development and deployment of new commercial concept - 2015 - <https://www.gao.gov/assets/gao-15-652.pdf>