

Damien Chartrain
Bastien Rocafull-Barraco
Alban de La Houplière
Axel Deteuf
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 des 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. De nombreuses exportations sont attendues. En Russie, deux réacteurs SMR sont déjà en exploitation. En France, ces réacteurs suscitent une attention particulière depuis que le gouvernement français a choisi d'investir dans cette technologie dans le cadre du plan France 2030. Les SMR devraient à la fois profiter des avantages inhérents à la production d'électricité via l'énergie nucléaire et en même temps mettre en avant de nouveaux atouts. Elle constitue une technologie très flexible.

La présente note d'information tentera de caractériser l'utilité et l'intérêt 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 environ réduites d'un facteur 20 par rapport à un réacteur classique. En outre, la puissance est également diminuée (la puissance d'un SMR varie généralement entre 20 MWe et 300 MWe) et 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. Dans la plupart des modèles, 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.

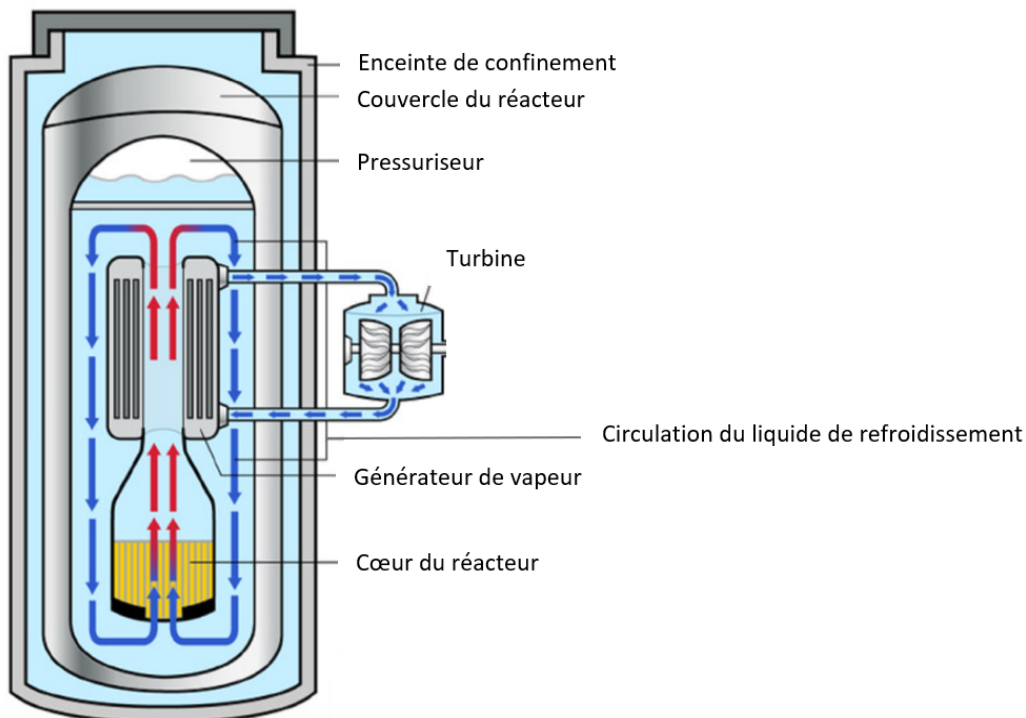


Figure 1 : La cuve d'un SMR (source : U.S. Government Accountability Office (légendes traduites en français)).

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.

Tout d'abord, ce qui est fortement mis en avant, c'est la flexibilité dans le processus de construction des SMR. En effet, les SMR permettent une construction modulaire : le système se résume à 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 d'un SMR, notamment lorsqu'on veut remplacer un composant qui se trouve être défaillant, on a la possibilité de le faire 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.

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 Chine.

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 et la puissance du réacteur. Il y a la possibilité d'empiler plusieurs SMR côte à côte pour se rapprocher de la puissance d'un réacteur classique.

Voici un graphique résumant la grande variété de modèles :

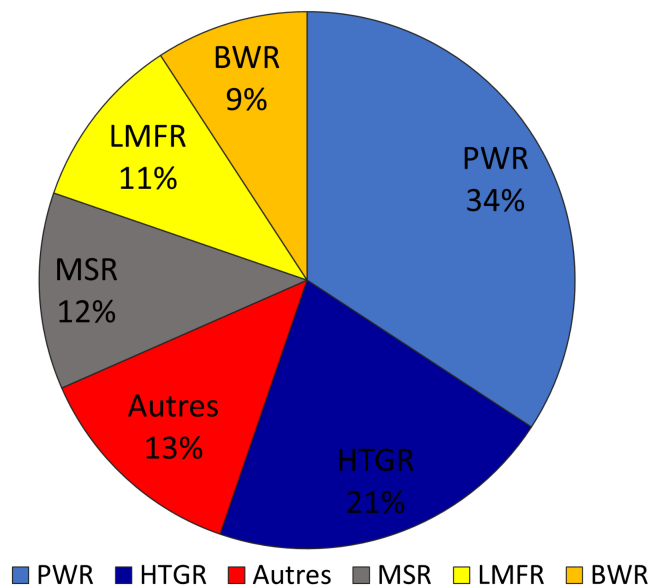


Figure 2 : Répartition des projets de SMR en fonction des types de technologies réacteurs utilisés (source des données du graphique : AIEA, date : 2020).

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

La grande utilité des SMR provient du fait qu'ils peuvent être utilisés à d'autres fins que la production d'énergie électrique. Souvent, il s'agirait de remplacer des installations utilisant des ressources fossiles. Les SMR produisent de l'électricité et de la chaleur sans émettre de gaz à effet de serre. Leur taille, leur flexibilité et la possibilité dans certains cas de les déplacer rendent possible l'alimentation de sites très précis. Ils constituent dès lors une alternative très intéressante. On liste ci-dessous une liste non exhaustive des applications possibles.

Production d'hydrogène : elle est en essor de nos jours car l'hydrogène est vu comme une source d'énergie alternative. 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 seraient dès lors une source d'énergie très intéressante.

Cogénération : une centrale électrique peut être utilisée pour produire à la fois de l'énergie électrique et de l'énergie thermique. En effet, la production d'électricité au sein de centrale génère une grande quantité d'énergie thermique qui peut être utilisée. Les SMR se prêteraient bien à cette application. On pourrait notamment alimenter le chauffage des bâtiments, produire de l'eau chaude ou alimenter des sites industriels utilisant de la chaleur.

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. Comme vu plus haut, l'intérêt est que des pays n'ayant pas de technologie nucléaire pourraient en profiter car les SMR sont facilement exportables et c'est bien ce que compte faire de nombreux acteurs.

Les idées en cours proposent de très nombreux concepts et modèles de réacteurs relevant de la génération II, III et IV. Beaucoup de projets en sont encore au stade théorique et expérimental mais certains acteurs affichent une avance et une forte ambition. 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

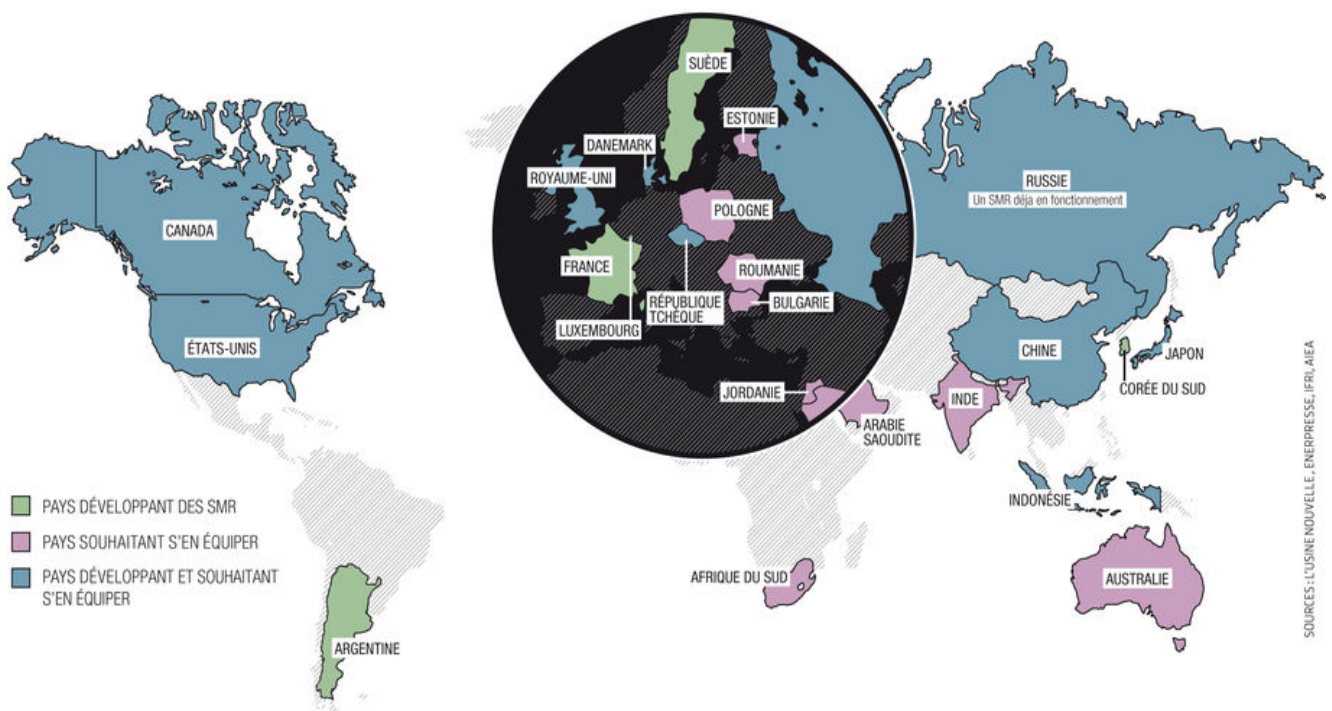


Figure 3 : Cartographie mondiale des pays s'intéressant à la technologie SMR en 2021 (source : L'Usine Nouvelle)

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. 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, la mise en pratique de la cogénération et l'empilement 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 : Institut Kourtchatov, CEA, 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 très précis. 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

Depuis quelques années, la France ne semble pas entièrement s'engager dans le développement de la filière nucléaire. En effet, en 2019 le projet ASTRID fut stoppé. Auparavant, on a assisté à l'arrêt de réacteurs expérimentaux comme Rapsodie, Phénix et Superphénix. Ce n'est que très récemment que la France a semblé vouloir 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 pour mettre au point un SMR de 170 MWe de type REP. Le CEA, EDF, Naval Group et TechnicAtome en sont les acteurs. C'est EDF qui pilote le projet français. Il a débuté en 2019 et se nomme Nuward. 50 millions d'euros ont été investis. Le but est de mettre en service le SMR d'ici à 2035. Il est initialement conçu pour l'export mais des modèles pourraient être construits en France. Le projet sert également à développer de nouvelles innovations : chaudière nucléaire compacte, circuit primaire intégré dans la cuve et sûreté passive. En plus de ce projet, le CEA mène d'importantes recherches dans le but de mieux appréhender la conception de SMR pouvant assurer d'autres fonctions qu'une simple production d'électricité (évoqué plus haut).

Bien que Naval Group et TechnicAtome travaillent dans le domaine de la propulsion nucléaire navale et ont une grande expérience en matière de réacteurs nucléaires compacts, la technologie SMR présente des spécificités propres qui ne permettent pas de passer facilement du domaine de la défense à celui de la production électronucléaire civile. Il est clair que l'appui de ces deux sociétés devrait fortement aider à la mise au point du projet Nuward, mais le retard accusé par la France dans la technologie des SMR par rapport à d'autres pays ne devrait pas pouvoir se combler.

Conclusion

Les SMR s'inscrivent dans le long processus continu d'améliorations des technologies utilisant l'énergie nucléaire à des fins civiles. L'utilité de cette technologie est de pouvoir profiter des avantages des réacteurs nucléaires classiques tout en proposant des perfectionnements et des nouveautés : les SMR améliorent la sûreté, ont une construction plus flexible, s'implantent de manière plus souple et peuvent être utilisés à d'autres fins que la production d'électricité. Face à ce constat, de nombreux pays souhaitent depuis quelques années développer cette filière de réacteurs miniaturisés. Souvent, il s'agit de pays de renommée internationale dans le domaine de l'énergie nucléaire. Néanmoins la dynamique s'étend à d'autres acteurs et on voit émerger de nombreuses organisations telles que des start-up, des instituts de recherches et des grandes entreprises de la filière nucléaire qui entendent mener à bien des projets très prometteurs. On devrait logiquement assister à la mise en service de nombreux SMR dans quelques années. Il faut toutefois rester prudent sur les conclusions de cette étude et attendre un développement plus important de cette technologie pour pouvoir confirmer tous les avantages potentiels.

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>