



Les Réacteurs SMR (Small Modular Reactor)

JM Niezborala- Juin 2021

La tendance depuis le début de la production d'électricité par des centrales nucléaires a été de construire des installations de plus en plus puissantes : de quelques centaines de MWe à environ 1650MWe avec l'EPR. Cette stratégie a été retenue dans le contexte, les conditions économiques et les exigences de sûreté de la fin du XXème siècle pour minimiser le coût de production et le nombre de sites en exploitation.

Les technologies développées ont dû s'adapter ces dernières années compte tenu des exigences de sûreté qui se sont renforcées, notamment à la suite de l'accident de Fukushima, et ont conduit à des installations de plus en plus complexes, longues et coûteuses à construire, d'autant plus que le calendrier des besoins ne permettait pas de bénéficier d'un effet de série.

Simultanément, l'analyse du marché potentiel des centrales électronucléaires conduit à identifier des opportunités pour des unités de moindres puissances pouvant mieux s'intégrer dans le réseau électrique de pays moins demandeurs de puissance que la France, susceptibles aussi de pouvoir se substituer dans l'avenir à des centrales alimentées par des combustibles fossiles. Ajoutons le besoin de mise en cohérence avec une production renouvelable décentralisée par nature.

Les réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires (SMR : Small Modular Reactor en anglais) sont de plus en plus évoqués pour répondre à ces nouveaux besoins qui peuvent s'accommoder de puissances comprises entre 100 et 300MWe. Ils suscitent un intérêt croissant dans le monde.

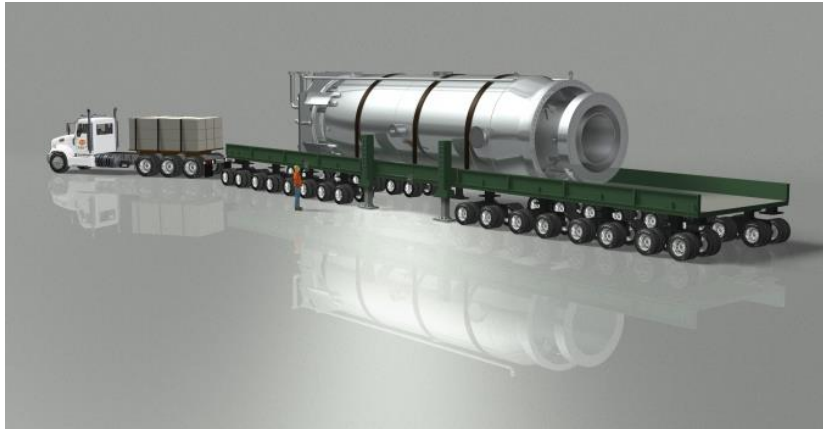
L'objectif de cet article est de présenter les caractéristiques essentielles et les avantages potentiel de cette technologie, ainsi que 2 exemples de projets en cours.

Les lecteurs qui voudraient aller plus loin dans l'exploration de ce domaine pourront consulter les 2 documents suivants qui ont servi de sources aux informations rassemblées ci-dessous
1- Revue Générale Nucléaire (RGN) de Janvier-Février 2021 qui rassemble plusieurs articles sur le sujet
2- L'article « Les petits réacteurs modulaires » publié par nos collègues de l'UARGA sur leur site en Février 2021 (http://uarga.org/nucleaire/reacteur_SMR.php)

Définition et objectifs

Un « SMR » désigne une famille de réacteurs nucléaires :

- Partiellement réalisés en usine sous forme de modules industrialisés transportables et directement installables sur le site ;



Transport module NuScale (Source RGN)

- d'une puissance unitaire inférieure à 300MWe
- associables pour fournir une gamme de puissance électrique adaptable à une demande évolutive ;
- utilisant la fission nucléaire

Les SMR visent à :

- abaisser significativement le poids du financement de l'électronucléaire en volume et en délai (part des intérêts intercalaires dans le financement) ;
- substituer à l'effet d'échelle recherché pour les grandes centrales, l'effet de série industrielle résultant de la réalisation en usine de modules identiques, abaissant les coûts et facilitant la maîtrise de la qualité ;
- ouvrir de nouveaux marchés de fourniture d'électricité décarbonée aux sites isolés et aux petits réseaux de distribution électrique qui ne peuvent supporter le raccordement de réacteurs de forte puissance ;
- remplacer des centrales de moyenne puissance utilisant des combustibles fossiles, gaz ou charbon;
- développer un suivi de charge plus fin en soutien de sources intermittentes (éolien, solaire) ;
- fournir de la chaleur, éventuellement en cogénération, adaptée en température au dessalement, au chauffage urbain, au raffinage des hydrocarbures, à la production d'hydrogène, etc.

Fonctionnement

Le terme « SMR » renvoie à un ensemble de technologies de réacteurs très différentes, avec des applications variées. Les SMR sont principalement construits autour d'un module principal constituant la chaudière nucléaire (du combustible au générateur de vapeur à haute température)

Cette géométrie permet d'accéder à une « sécurité passive » limitant les conséquences d'une perte de refroidissement.

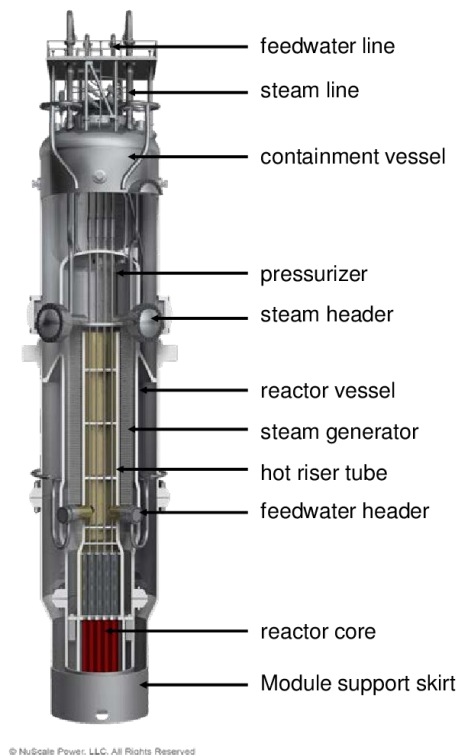


Schéma module NuScale

Sûreté

La plupart des SMR sont intégrés dans des enveloppes cylindriques verticales (typiquement 20 m de haut sur 5 m de diamètre), à la base desquelles est placé le cœur combustible, ce qui rend possible la circulation par convection des fluides caloporteurs de manière totalement passive, ne dépendant pas de dispositifs de pompage mécanique nécessitant de la maintenance et susceptible de défaillance. Lors d'un arrêt, cette structure permet une évacuation passive de la puissance résiduelle (par convection naturelle).

Outre qu'elle permettrait de simplifier la conception des systèmes de sûreté, cette caractéristique a été récemment citée par le Président de l'ASN devant la commission des affaires économiques du Sénat, comme un avantage déterminant de l'option SMR puisqu'elle permettrait d'écartier le risque de fusion du cœur et donc les risques de rejets radioactifs dans l'environnement.

La modularité des SMR permet la production en usine de sous-ensembles complets et leur certification après un contrôle qualité minutieux avant autorisation de mise en place puis en service par les autorités de sûreté gouvernementales. Ce processus présente des garanties supérieures à celles que peuvent donner les réalisations actuelles « sur site » des réacteurs électrogènes.

Sécurité

Grâce à leur taille réduite, leur autonomie et leur résilience, les SMR intégrés peuvent être protégés contre les agressions humaines et les catastrophes naturelles susceptibles d'affecter leur site :

- soit par enterrement dans des fosses terrestres profondes ;
- soit par immersion dans des « piscines », lacs ou mers (concept Flexblue de Naval Group (ex DCNS) abandonné) qui assurent ainsi leur sûreté en cas d'accident nucléaire.

Chiffres clés

Selon l'OCDE/AEN, le marché potentiel des SMR est de 20 GW à l'horizon 2035 et peut représenter en 2040, 10% du marché du nucléaire.

Au sein de la filière, un certain consensus se dégage autour de 4 000 € de coût total de construction du kilowatt électrique (kWe), ce qui placerait les SMR, en matière de coûts, entre le charbon et les centrales de III^e génération actuelles. Cette estimation optimiste se base toutefois sur l'installation de 20GWe d'ici à 2035, avec un effet de série s'exerçant à un niveau de production de 70 à 100 SMR par an à la fin de la période.

Le coût de production du MWh se situerait aux alentours de 120€ contre 80€ envisagé pour la future génération d'EPR (EPR2).

Une grande diversité de projets

De 1950 à 1989, près de 1000 réacteurs nucléaires développés pour la propulsion des sous-marins et des porte-avions ont été intégrés dans des navires de guerre avec un degré extrême de confinement et de sécurité. Aujourd'hui, environ 250 navires à propulsion nucléaire (y compris quelques brises-glace russes), de puissances comprises entre 50 et 350 MW, sont en opération.

Dans les années 2010, les initiatives se sont multipliées pour faire converger les acquis des filières refroidies à l'eau, héritières de la propulsion navale avec les orientations préconisées par le GIF (Generation IV International Forum), ce qui a ouvert le champ à des recherches très diversifiées aujourd'hui.

Le tableau suivant classe les différentes recherches par température de cœur, fluide de refroidissement et applications hors production d'électricité.

| Température cœur SMR | Fluide de refroidissement | de Filière | Applications SMR (hors électricité) | Nombre de projets de SMR à fin 2018 : 54 |
|----------------------|---------------------------|--|--|--|
| 100-200°C | Eau bouillante | BWR | Chauffage urbain (cogénération) | 2 |
| 200-400°C | Eau pressurisée lourde | PWR parfois qualifié de « i-PWR » (module intégré) | Désalinisation Électronucléaire (II ^e et III ^e génération) | 24 |
| | Eau lourde | HWR | | |

| | | | | | |
|-------------------|--|--------------------|------------------|---|---|
| 400-550°C | Métal liquide, sodium, eau supercritique | SFR LFR SCWR | (fast) (fast) | Pâte à papier Raffinage hydrocarbures Fabrication méthanol | 7 |
| 550-700°C | Sels fondus | MSR MSFR | | Production hydrogène par reformage du méthane | 9 |
| 700-1 000°C | Refroidissement gaz | GCR GFR | | Production hydrogène par dissociation thermique Gaz de houille | 9 |
| > 1 000°C VHTR | Hélium | VHTR | | Métallurgie Production hydrogène | 3 |

Ce tableau fait apparaître des recherches sur :

- des filières fonctionnant à différents niveaux de température en fonction des productions envisagées, l'électricité étant aujourd'hui produite, pour l'essentiel, par la filière à eau (PWR ou BWR) ;
- la fission par neutrons rapides dans les trois filières les plus chaudes (400 °C à plus de 1 000 °C) avec potentiellement des taux de déchets réduits, un combustible fertile et des cycles de combustibles très longs (jusqu'à 9 ans) ;
- des filières visant à produire de l'hydrogène par reformage du méthane dès 500°C (sels fondus) ou par dissociation thermique (hélium).

Acteurs majeurs

Sur plus de 70 projets de SMR identifiés en 2020 par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), seulement 3 sont « opérationnels », en Sibérie (SMR installé sur barge flottante, Akademik Lomonosov), en Inde et en Chine et 5 autres sont en construction.

Plus de 80% de ces réacteurs sont encore en développement ou au stade des laboratoires de recherche et sous l'étroit contrôle des États, tant pour leur financement le plus souvent grâce à des fonds publics, que pour la mise à disposition du combustible, elle-même strictement régulée par des réglementations anti-prolifération.

Par pays, les États-Unis et la Russie sont les principaux acteurs des SMR avec chacun 18 projets, loin devant le Japon (4), la Chine (4) et l'Europe (3 dont 1 en France développé par le CEA, EDF, TECHNICATOME et Naval Group : le projet NUWARD)).

Le projet NuScale

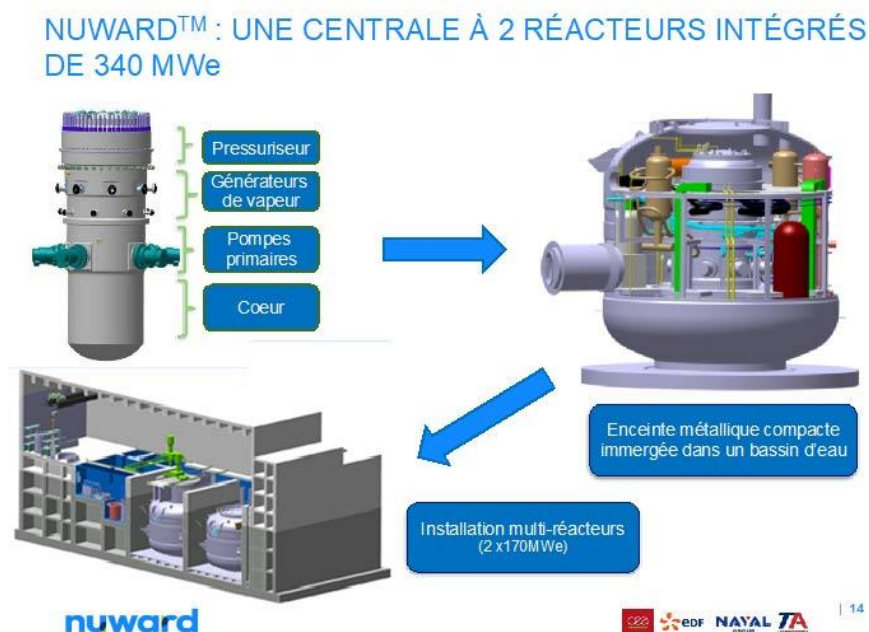
Le projet de SMR de la société américaine NuScale (l'un des plus avancés à l'heure actuelle) bénéficie du soutien du DOE (Department Of Energie) et de l'entreprise Fluor. Il prévoit d'installer une première centrale nucléaire constituée de 12 modules de 77 MWe sur le site de Idaho National Laboratory qui est un site nucléaire du DOE établi de longue date et bénéficiant de nombreux avantages permettant de minimiser les coûts et les délais. Selon le calendrier initial, les travaux devaient commencer en 2023 et le premier module pouvait entrer en service en 2026 (2027 pour l'ensemble de la centrale). A la fin du mois d'Aout 2020, NuScale a obtenu l'approbation de son design par la Commission de Réglementation Nucléaire des Etats-Unis (NRC), ce qui ouvre théoriquement la voie à une construction et une exploitation commerciale pour Utah Associated Municipal Power Systems (UAMPS qui est une association de 35 communes futures clientes de la centrale).

Depuis il semble que les délais seront prolongés de 3 ans, et que le coût prévisionnel a sensiblement augmenté : aux alentours de 3 milliards de dollars.

Pour l'instant ce projet reste le plus avancé aux Etats-Unis, le seul à avoir reçu la certification par la NRC.

Le projet NuWard

NUWARD est une centrale nucléaire de 340 MW dotée de deux réacteurs SMR de 170 MWe chacun, implantés dans un même îlot nucléaire. En termes de sûreté, il répond aux exigences dites post-Fukushima (GENIII+) : sa conception, permet de maintenir en situation accidentelle le refroidissement du cœur et du combustible entreposé, même en l'absence d'alimentation électrique. Ainsi des systèmes passifs permettent d'évacuer la puissance résiduelle d'un réacteur à l'arrêt pendant plusieurs jours, sans avoir recours à aucun moyen externe de secours, en eau ou en électricité. L'ensemble du circuit primaire se trouve en effet dans la cuve (d'une taille équivalente à celle de la cuve d'un réacteur de 900 MW).



Une enceinte métallique contenant ce réacteur est elle-même immergée dans un bassin d'eau. Ce dernier pourrait alors servir de source d'eau froide ultime en situation accidentelle.

La chaudière intégrée permet la suppression des boucles primaires et l'élimination de l'accident hypothétique de type « grosse brèche », aussi appelé accident de perte de réfrigérant primaire (APRP). Le piquage le plus important sur la cuve est celui du RCV1 de 30mm de diamètre. De plus, l'intégration des circuits de sauvegarde permet d'éviter, en situation accidentelle, la circulation en dehors de l'enceinte de confinement d'un fluide contaminé.

Des générateurs de vapeur à plaques intégrés dans la cuve rendent le SMR plus compact

Pour l'aspect modulaire, le développement de NUWARD s'appuie notamment sur les méthodes et compétences de Naval Group. En effet l'industrie navale en particulier – mais aussi ferroviaire et aéronautique – a développé un important savoir-faire sur les questions de modularité. Les modules se répartissent en trois familles. Il y a les composants dits nucléaires standards comme la cuve du réacteur et son enceinte qui seront transportés par des convois exceptionnels et assemblés sur le site. La deuxième famille est celle des modules à l'intérieur de l'enceinte de confinement, répartis autour de la cuve. Ces modules seront fabriqués, assemblés et testés en usine afin d'être montés ensuite lors de la phase de construction. Enfin, la troisième famille regroupe les modules hors enceinte qui pourront aussi être testés en usine et feront l'objet d'un transport standard.).

Le bâtiment de l'îlot nucléaire pourrait être semi-enterré afin de faciliter la protection de la centrale contre les agressions externes.

Le projet est aujourd'hui en cours d'Avant-projet sommaire (APS), jusqu'en 2022 et doit se terminer avec le dépôt d'un dossier d'options de sûreté auprès de l'ASN. Suivront ensuite les phases de basic design et detailed design, pour permettre un premier béton du démonstrateur à l'horizon 2030.

Enfin, la question d'une alliance à l'international se pose pour le projet français. C'est dans ce cadre qu'EDF, le CEA et l'américain Westinghouse ont signé un accord de coopération en septembre 2019. Les discussions se poursuivent pour préciser les modalités du partenariat.

Le SMR NUWARD est soutenu par le plan de relance du gouvernement français présenté le 3 septembre 2020. Pour rappel, c'est au total 470 millions d'euros sur deux ans qui seront alloués au nucléaire pour préserver les compétences de la filière et soutenir la recherche avec une enveloppe de 50 millions d'euros versée au développement d'un SMR.