

Maquette du Micro Modular Reactor, projet canadien de petit réacteur nucléaire de 4ème génération - Source MMR™.

Contexte économique et stratégie de déploiement des SMR

Pourquoi les petits réacteurs nucléaires connaissent-ils un regain d'intérêt dans le monde ? Les promesses économiques et aussi les nombreuses applications possibles dans différents domaines, en particulier dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique, expliquent la dynamique actuelle.

Joël Guidez

Conseiller scientifique au CEA

Introduction

Le marché des réacteurs nucléaires s'était progressivement orienté vers les réacteurs de forte puissance. Or il apparaît de plus en plus aujourd'hui que des réacteurs de plus petite puissance pourraient avoir un rôle complémentaire en

particulier dans le remplacement d'unités de production utilisant des énergies fossiles. De nombreuses études et constructions se déroulent en 2021, dans le monde sur ces Small Modular Reactors (SMR). Cet article tente de faire un bilan du contexte et des stratégies de déploiement.

L'évolution historique des réacteurs électrogènes

Un point incontournable est que le coût du kWh produit décroît quand on augmente la puissance des réacteurs. En effet, un grand nombre de coûts sont fixes et sont quasiment les mêmes entre un réacteur

de forte puissance et un réacteur de plus faible puissance : coût de site, coûts de conception, coûts des procédures d'autorisations administratives, coût de certification par l'autorité de sûreté, etc...

La construction est plus chère, mais les dimensions des réacteurs ne varient pas de manière linéaire avec la puissance. Par exemple, le diamètre de la cuve du réacteur pressuré européen EPR en cours de construction à Flamanville (5,5 m) n'est que 10% supérieur à celui du 1300 MW (5 m) pour une puissance 30% supérieure. L'analyse des plannings de construction ne montre pas de gains particuliers quand la puissance est plus faible. Enfin pour les coûts de fonctionnement, les équipes nécessaires au fonctionnement du réacteur n'augmentent pas proportionnellement à la puissance.

C'est pour l'ensemble de ces raisons que la puissance des réacteurs électrogènes a toujours historiquement augmenté. En France on est passé de 900 MWe à 1300 MWe puis à 1600 MWe. Aux USA, le projet de réacteur AP 600 est vite devenu un réacteur AP 1000.

Si on regarde les 31 réacteurs de génération III construits dans le monde, leur puissance varie entre 1000 et 1600 MWe. Dit autrement, il n'y a pas aujourd'hui, dans le catalogue des industriels, de propositions de réacteurs de plus faible puissance.

Analyse des « difficultés » de ces réacteurs de forte puissance

La construction de ces réacteurs demande un engagement financier initial important, couplé à un planning de construction assez long. Le retour sur investissement est donc long avec des intérêts intercalaires importants. De plus, pour des prototypes, des risques ou incertitudes existent avec des durées de planning de construction prolongées et des problèmes possibles durant le fonctionnement initial.

Si on analyse les plannings de construction des 34 réacteurs de 3^{ème} génération

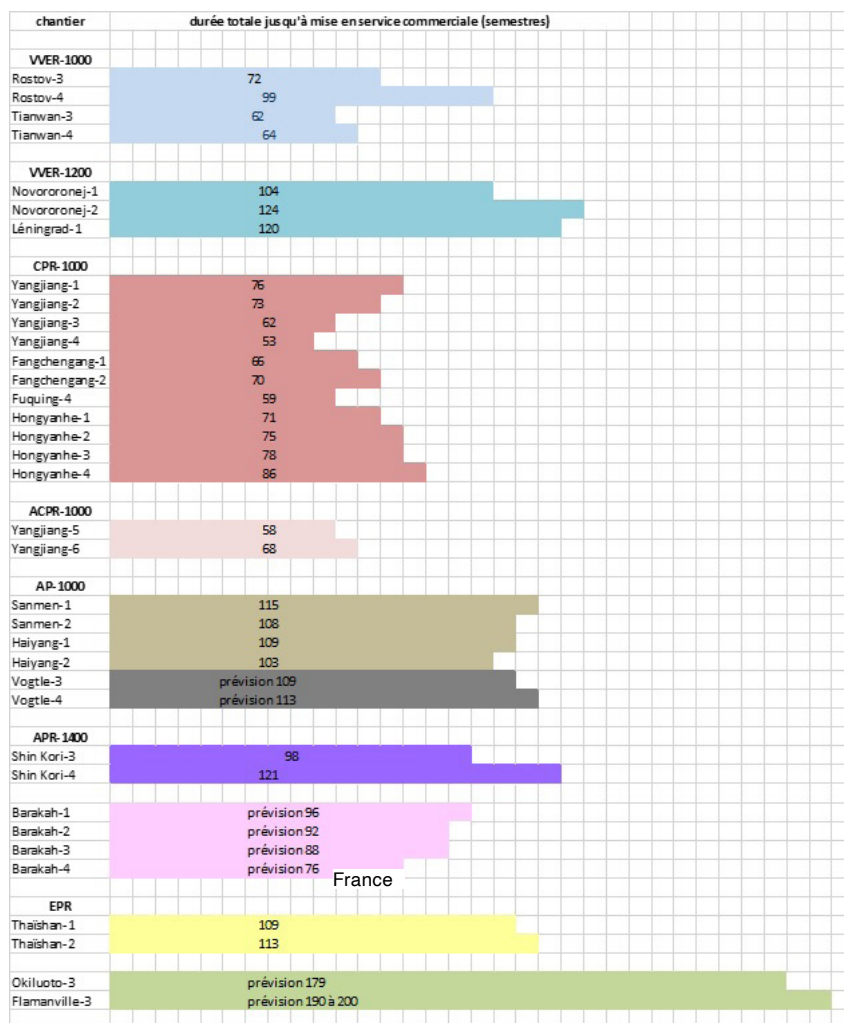


Figure 1 : Planning de construction des 36 réacteurs GEN III dans le monde.

(GEN III) aujourd'hui terminés (figure 1), on voit que ces durées sont de l'ordre de 110 mois pour tous les prototypes : AP 1000, EPR chinois, VVER 1200, APR 1400. En revanche, lorsqu'un effet de série se manifeste, et avec de bonnes pratiques de construction, les délais diminuent et sont de l'ordre de 70 mois.

Les chantiers APR 1400 construits aux émirats constituent un bon exemple. La durée de ces chantiers a profité de l'effet de série passant de 96 mois pour le premier Barakah 1, à 76 mois pour Barakah 4.

Si cet effet de série continue, la possibilité d'atteindre des délais de cinq ans apparaît réelle dans certains pays, c'est-à-dire aujourd'hui en Chine et en Russie (VVER 1000 et CPR 1000).

En fait, il est indispensable d'avoir une programmation de construction de plusieurs réacteurs, pour bénéficier d'un effet de série, avec diminution des durées de construction, amortissement de certains coûts fixes (coûts de conception, de certification, de site...) et intégration progressive d'améliorations pour fiabiliser le fonctionnement.

L'engagement financier important correspondant à ces programmes, est donc facilité dans des pays où une programmation énergétique est effectuée sur le long terme. A contrario, cet effet de série est difficile à obtenir dans des pays où cette programmation n'existe pas ce qui décourage investisseurs et industriels.

La France, avec ses deux EPR non achevés début 2021 et avec des plannings

●●● actuels supérieurs à 190 mois, montre un exemple de ce qu'il ne faut pas faire. L'histoire commence avec une rivalité EDF/AREVA qui conduit au lancement par AREVA d'un prototype EPR en Finlande alors qu'AREVA n'était pas historiquement architecte industriel. Puis EDF, rétabli dans ses prérogatives, se lance dans la construction de l'EPR de Flamanville alors que le tissu industriel des précédents réacteurs et la compétence correspondante ont grandement diminué. Pire, alors que la compétence de plusieurs milliers de personnes était retrouvée et permettait de basculer sur le chantier de Penly, celui-ci est annulé et on paiera des stages de reconversion à ces personnes qui venaient d'acquiescer la compétence. Quant aux industriels et fabricants qui s'étaient engagés dans l'aventure, aucune perspective industrielle n'existe aujourd'hui et ils sont aussi obligés de se reconvertir vers d'autres débouchés. L'ensemble est un gâchis qui aurait pu être évité avec une politique moins erratique. Les mêmes EPR ont été construits en 110 mois en Chine, ils fonctionnent actuellement et donnent satisfaction.

En conclusion les réacteurs électrogènes actuellement disponibles, sont des réacteurs de puissance supérieure à 1000 MWe qui nécessitent des investissements massifs et programmés pour bénéficier par effet de série d'une baisse progressive et significative des durées de construction et des coûts correspondants.

Pourquoi des SMR électrogènes ?

Avec la montée continue des puissances unitaires des réacteurs électrogènes, on arrive à une gamme de puissance disponible aujourd'hui sur le marché s'étageant entre 1000 et 1600 MWe.

Ces puissances ne correspondent pas aux besoins des zones isolées et non reliées au réseau comme notamment la Sibérie, l'Alaska ou le Canada. Ces zones isolées ont besoin de puissances plus faibles.

De nombreux pays ont des réseaux de faible puissance, où ni la demande, ni le

“ Avec la montée continue des puissances unitaires des réacteurs électrogènes, on arrive à une gamme de puissance disponible aujourd'hui sur le marché s'étageant entre 1000 et 1600 MWe. ”

réseau ne sont adaptés à ces fortes puissances. Par exemple l'Égypte a une puissance installée de 18 GW et le Nigeria de 13 GW. On voit qu'un seul EPR représenterait un ordre de grandeur de 10% de la puissance installée du pays. Par ailleurs les réseaux ne sont pas toujours adaptés au transport d'une telle puissance. Une offre de réacteurs de puissance plus faible serait mieux adaptée et offrirait un nouveau marché avec possibilité de remplacement progressif des centrales à flamme.

On notera également certaines positions de niches, comme les bases militaires américaines, demandeuses d'une énergie autonome locale.

Les pays avec de forts réseaux et de fortes puissances, comme l'Europe par exemple, présentent par contre, peu d'intérêt pour les SMR électrogènes, sauf si ceux-ci arri-

vaient à atteindre des coûts de production comparables aux gros réacteurs.

L'économie des SMR et leurs atouts potentiels.

Les SMR tablent sur trois facteurs pour avoir un coût de leur production compétitif : la modularité, l'effet de série et la simplification.

La modularité consiste pour une technologie donnée à définir un module dont la puissance semble optimisée. Cette optimisation s'effectue à partir de plusieurs paramètres, comme un niveau de puissance permettant certaines simplifications ou une fabrication plus aisée en usine. Par exemple en Chine, les études effectuées sur les HTR ont conduit à définir un module de 100 MWe qui a semblé optimal au concepteur en termes de sûreté pas-

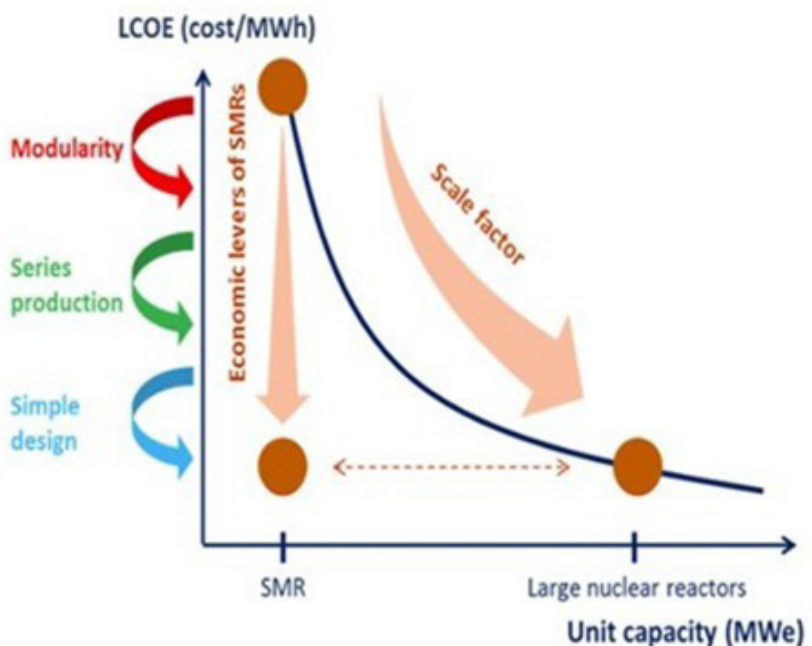


Figure 2 : Les trois facteurs permettant d'espérer une baisse des coûts du kWh produit par des SMR.

sive en cas d'accident de refroidissement. Avec des puissances supérieures, il aurait fallu ajouter des dispositions plus complexes.

Cet aspect modulaire permet alors de répondre avec souplesse à la demande locale du réseau, en proposant le nombre de modules adapté à ce réseau local. En Chine, deux modules HTR ont été construits et reliés à une turbine unique de 200 MWe. Le prochain projet est de six modules reliés à une turbine de 600 MWe.

Cette modularité permet alors d'espérer des gains à plusieurs niveaux. Tout d'abord la certification du produit est plus facile et ne s'effectue qu'une fois. Puis le retour d'expérience permet d'améliorer chaque fois le produit.

L'effet de série se déduit de ce choix initial. En effet, si plusieurs commandes sont effectuées, on a alors un grand nombre de modules à fabriquer. Un des facteurs de l'optimisation est la possibilité de fabrication en usine des composants principaux. Cette fabrication peut être lancée, voire anticipée, et permet des gains en coût, en qualité et en planning. Si on prend l'exemple du module américain de Nuscale, d'une puissance inférieure à

“ En Chine, deux modules HTR ont été construits et reliés à une turbine unique de 200 MWe. Le prochain projet est de six modules reliés à une turbine de 600 MWe. ”

100 MWe, le module principal, cuve et générateur de vapeur, peut être construit en usine et transporté par camion sur le site pour installation. Il apparaît donc que si plusieurs commandes sont lancées, la fabrication des modules peut s'effectuer en usine, à la chaîne, et sans effet de « stop and go ». Des anticipations peuvent aussi se faire. On peut alors espérer des gains sur les plannings de construction sur site.

Lors du choix initial de définition du module, un des paramètres de choix est une puissance permettant des simplifications propres à la technologie utilisée. Par exemple il est intéressant d'avoir une possibilité d'évacuation de la puissance résiduelle totalement passive, en cas d'arrêt intempestif du réacteur. Ceci ne peut se réaliser que sous un certain seuil de puissance. Ce choix permet une simplification de la certification du produit par les autorités de sûreté, ainsi qu'une meilleure acceptation sociale. Il permet également d'éviter

la complexification du système avec des dispositifs coûteux comme des dispositifs d'injection de secours.

L'ensemble de ces dispositions devraient permettre des gains en coût et en planning de construction, permettant de compenser au moins partiellement l'effet de taille.

Il faut ajouter à ce volet un aspect financier. Des réacteurs de forte puissance avec des chantiers longs entraînent le blocage de fortes sommes sur de longues périodes avant tout retour sur investissement. Ces durées de construction génèrent donc des intérêts intercalaires importants. Ces éléments ne facilitent pas le financement, en particulier dans les pays émergents ne possédant pas leur propre technique nucléaire. Les SMR veulent jouer sur les deux tableaux, à la fois en réduisant les délais, mais aussi en diminuant la somme initialement investie, grâce à la commande d'un petit réacteur de coût plus faible qu'un ré- ●●●



Figure 3 : Vue d'un module Nuscale sur camion, pour transport vers le site - Source SFEN/RGN.

●●● acteur de forte puissance. Même si, à la fin, le coût du kWh demeure plus important, l'investissement initial est plus facile à obtenir et avec un résultat espéré plus rapide.

Il faut cependant rappeler que tous ces points bénéfiques sont autant d'espoirs pour le futur dans le cas d'un bon déroulement industriel de la fabrication et des commandes. A court terme et pour les prototypes, il y aura, outre les coûts initiaux importants (certification, etc.), des surcoûts inhérents aux prototypes, des problèmes de mise au point, et des dérapages de planning. Seule une aide importante permettra de surpasser ces handicaps initiaux. Si nous reprenons l'exemple des HTR chinois, le retard sur le planning initial annoncé est déjà de cinq ans, et des problèmes de mise au point dans les premières années de fonctionnement sont certainement à prévoir.

En fait, et presque par définition, on ne connaît pas le prix de ces prototypes. Les prix et planning initiaux annoncés ont pour but d'attirer des investisseurs potentiels mais ne correspondent pas à une réalité industrielle. Par exemple le premier réajustement de coûts annoncé par Nuscale a fait fuir quelques investisseurs initiaux et a nécessité l'intervention du département américain de l'énergie (DOE) pour un premier financement complémentaire. De manière très simplifiée, le DOE assure aux investisseurs que le coût final du kWh sera celui du marché et qu'il compensera la différence.

En conclusion sur ce chapitre des coûts, la mise au point de modules de SMR correspond à une stratégie à long terme de développement industriel, y compris à l'ex-

port. A court terme les premiers modules ne seront pas compétitifs avec les prix du marché et nécessiteront des aides importantes avant de le devenir. En revanche des pistes existent permettant d'espérer que les surcoûts initiaux disparaîtront ou seront au moins minimisés.

Autres utilisations des SMR

Dans le domaine de la production d'électricité, les SMR sont en compétition avec les puissants réacteurs électrogènes du marché. Mais ils peuvent être utilisés dans de nombreux domaines où ils permettraient de supprimer l'utilisation d'énergies fossiles et les pollutions correspondantes.

Le domaine le plus connu, est la propulsion navale. Dans le domaine militaire, on trouve dans de nombreux pays des sous-marins et des porte-avions nucléaires. En Russie une flotte de brise-glaces est également équipée de chaufferies nucléaires et un marché existe pour les bateaux gros porteurs forts consommateurs de fuel.

Un domaine émergent est celui des réacteurs calogènes permettant de chauffer les villes sans produire de CO₂ et de poussières. Des réacteurs dédiés commencent, en particulier en Chine, à assurer ces fonctions. La Finlande et la Russie ont aussi des projets dans ce domaine.

Certains SMR comme les HTR, se placent dans le créneau de la fourniture de hautes températures, de l'ordre de 600 à 700°C, à usage industriel.

Et d'autres cibles peuvent être visées : spatial, désalinisation, micro-réacteurs, etc.

Les SMR, une porte vers les réacteurs de quatrième génération ?

Actuellement de nombreux pays travaillent sur les réacteurs de quatrième génération. Ceux-ci sont répertoriés dans le forum international des réacteurs de quatrième génération (GEN IV) avec six technologies : réacteurs rapides sodium, réacteurs au plomb, réacteurs rapides au gaz, réacteurs haute température /HTR, réacteurs à combustibles liquide (MSR), et réacteurs à eau super critique. Excepté pour les réacteurs rapides sodium qui ont déjà des réacteurs de puissances importantes, les autres technologies nécessiteraient des petits réacteurs prototypes qui seront de facto des SMR. Ces prototypes peuvent alors être considérés comme des modules SMR.

Dans ce domaine nous avons déjà cité les modules HTR chinois.

Les réacteurs à sels fondus (MSR) font l'objet de recherches approfondies en Chine où deux maquettes sont en cours de construction, aux USA avec un prototype annoncé à l'INL avec le consortium Southern/Terrapower (le MCRE) et en Russie où Rosatom a annoncé en 2019 la construction d'un prototype.

Dans ce domaine le DOE vient de rendre public fin décembre 2020 le financement des cinq maquettes suivantes (Tableau 1) :

Concept	Vendeur	Type	Quoi	Budget sur 7 ans	Part DOE
Hermes Reduced-Scale Test Reactor	Kairos Power	FHR	Réacteur expérimental	629 M\$	303 M\$
eVinci	Westinghouse	MMR	Qualification matériaux & caloducs	9,3 M\$	7,4 M\$
BANR	BWXT	MMR	Qualification - TRISO	106,6 M\$	85,3 M\$
Holtec-160	Holtec	SMR PWR	Conception de base	147,5 M\$	116 M\$
MCRE	Southern/Terrapower	MSR	Réacteur expérimental	113 M\$	90,4 M\$

En conclusion, et sans rentrer ici dans le détail de ces technologies innovantes, on voit que les SMR sont donc aussi un champ d'innovation pour les nouvelles technologies de quatrième génération.

Bilan rapide et non exhaustif des principaux SMR en projet ou en construction dans le monde

La stratégie particulière des USA

Westinghouse s'était lancé avec l'AP 1000 à la conquête du marché mondial. Avec ce réacteur disposant de systèmes passifs et d'une technique de construction modulaire innovante, Westinghouse annonçait des délais de construction de cinq ans et les prix correspondants. Ce fut un échec. Ce réacteur a eu des délais de construction en Chine identiques à ceux de l'EPR de 1600 MWe et des problèmes de fonctionnement liés aux pompes immergées. Aux Etats-Unis, les deux chantiers engagés ont pris de tels retards que le premier a été arrêté et le deuxième n'a pu se poursuivre et ne pourra se terminer qu'avec une aide massive du DOE. Le carnet de commande est vide et l'aventure a quasiment conduit Westinghouse à la faillite.

Ce traumatisme, joint aux besoins liés à la géographie des USA, les ont conduits à porter leurs efforts sur les SMR. Dans la



Figure 5 : Vue des deux HTR chinois de 100 MWe en cours de construction.

technologie réacteurs à eau, le projet Nuscale a été particulièrement supporté par le DOE. Ce module de puissance inférieure à 100 MWe est un petit réacteur à eau pressurisée surmonté d'un générateur de vapeur à plaques, transportable sur camion. L'ensemble est immergé dans une piscine et l'évacuation de puissance résiduelle s'effectue passivement par convection naturelle dans la piscine. C'est le projet SMR le plus avancé dans la certification par les autorités de sûreté (NRC) avec l'aide du DOE. Un site lui est réservé à l'INL et le DOE supporte actuellement les surcoûts du projet qui a des délais de construction et de mise en fonctionnement annoncés courts.

La stratégie russe

Dans le domaine des réacteurs à eau, et sur la base des réacteurs à eau de sous-marins ou de brise-glaces, les Russes ont démarré en 2020, un réacteur sur barge de 35 MWe pour alimenter une zone isolée en Sibérie. Cette barge, construite à Saint Pétersbourg, est le prototype d'installation capable d'alimenter des zones isolées en dehors des réseaux électriques de puissance. Ce projet est aussi l'image d'une stratégie d'implantation dans des zones du grand nord, qui avec le réchauffement climatique, s'ouvrent au transport maritime mondial.

Dans le domaine des réacteurs de quatrième génération et en dehors des réacteurs rapides au sodium, où ils disposent déjà de deux réacteurs de puissance de 600 et 800 MWe et du réacteur MSR déjà cité, est régulièrement évoqué un projet de réacteur au plomb de 300 MWe (BREST).

La stratégie chinoise

En Chine, le chauffage des villes s'effectue avec du charbon et la pollution de l'air y est devenue intolérable. Des réacteurs calogènes, reliés à des réseaux de chauffage, y sont actuellement à l'étude ou en construction pour aider à résoudre ces problèmes de pollution de l'air.



Figure 4 : Vue de la barge flottante de 35 MWe développée par Rosatom et mise en service en 2020.

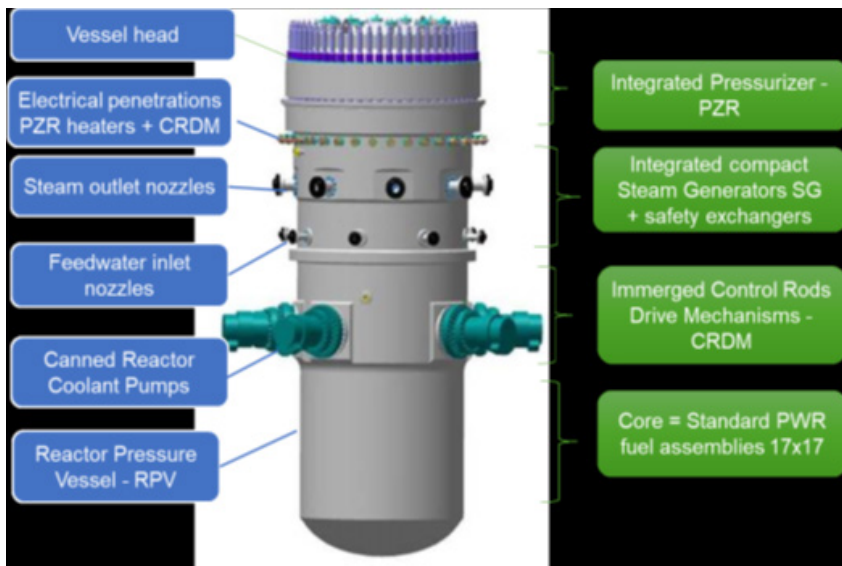


Figure 6 : Vue d'un module NUWARD.

“ Dans ce contexte d'intérêt mondial pour les SMR, un consortium Français (EDF, CEA, Technicatome et Naval Group) travaille sur un projet de module compact de 170 MWe, dénommé NUWARD. ”

●●● La Chine a aussi des zones isolées avec de faibles réseaux électriques où les SMR pourraient remplacer des réacteurs à flamme. Le module HTR en cours de construction est un exemple d'adaptation possible à ces réseaux.

Enfin dans le domaine des réacteurs de quatrième génération, la Chine est aussi très active avec la construction en cours, outre des HTR, d'un SMR de 600 MWe et de maquettes de MSR et FHR.

Ailleurs

Les pays anglo-saxons, Canada et Grande Bretagne, ont une politique très active de support à différentes start-up proposant des SMR pour le futur. Ceci conduit à un foisonnement de projets, mais très peu ont entamé les procédures de certification par les autorités de sûreté. D'autres pays européens, en particulier la Finlande, travaillent sur des projets de réacteurs calogènes.

La position de la France

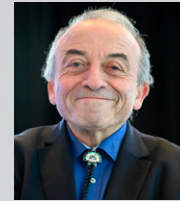
Dans ce contexte d'intérêt mondial pour les SMR, un consortium Français (EDF, CEA, Technicatome et Naval Group) travaille sur un projet de module compact de 170 MWe, dénommé NUWARD.

Ces modules pourraient être proposés couplés par deux et reliés à une seule turbine. C'est un produit essentiellement dédié à l'export pour permettre l'arrivée de réacteurs nucléaires électrogènes sur des marchés où ils sont actuellement absents, en remplacement de centrales à flamme ou de systèmes fonctionnant avec des énergies fossiles.

Quelques problèmes peu évoqués pour les SMR

Les SMR ont les mêmes problèmes que les réacteurs de puissance en termes de cycle du combustible, gestion des déchets, démantèlement, etc. Le fait

L'auteur



Joël Guidez, diplômé de l'Ecole Centrale de Paris, a fait sa carrière dans le domaine des réacteurs nucléaires en France et en Europe. Après avoir travaillé pour Superphénix, puis à Phénix, il a dirigé le laboratoire de thermo-hydraulique de Cadarache, puis le réacteur Osiris à Saclay. En 1997 il prend la responsabilité du réacteur européen : the High Flux Reactor aux Pays Bas. Il a dirigé la centrale nucléaire Phénix à Marcoule. Puis il sera directeur du soutien nucléaire industriel, à Saclay. Après une mission d'attaché nucléaire à l'Ambassade de France à Berlin, il rejoint Saclay auprès du directeur de la direction de l'énergie nucléaire du CEA, comme expert international.

Il est membre du comité opérationnel du cabinet du haut-commissaire, président d'honneur de la section ST7 SFEN, membre du comité de rédaction RGN, représentant de la France au RSWG du GIF, président du groupe consultatif français de sûreté (GCFS), responsable scientifique du segment GEN IV au CEA. Il a publié un livre sur le retour d'expérience de Phénix, et un deuxième sur les acquis techniques et scientifiques de Superphénix.

d'avoir plusieurs petits réacteurs au lieu d'un seul ne simplifie pas ces problèmes.

Lorsque ces SMR sont présentés comme des produits à l'export, les problèmes ci-dessus, en particulier le cycle du combustible et la gestion des déchets correspondants, demande une politique

au cas par cas. Il se posera en plus le problème de la protection physique et de la non-prolifération, dont l'analyse pourrait conduire à influencer sur les choix techniques finaux.

Conclusion

Les réacteurs électrogènes de forte puissance sont adaptés pour un réseau solide et une demande importante, et sont aujourd'hui les plus compétitifs en termes de coût du kWh produit. Le catalogue actuel des réacteurs industriellement disponibles est composé de réacteurs de puissance supérieure à 1000 MWe.

D'autre part, des SMR électrogènes de plus faible puissance seraient très utiles pour les zones isolées ou pour les réseaux de faible puissance. La solution modulaire est la seule permettant de répondre à ces demandes électrogènes à la fois variées et évolutives.

Le coût du kWh de cette production n'est pas connu actuellement, et devrait être a priori moins compétitif, que celui des réacteurs de puissance. Mais des

voies de progrès existent via l'effet de série, la fabrication en usine et la simplification. Le raccourcissement des délais de construction est possible pour les SMR, mais comme pour les réacteurs de forte puissance, il reste très lié à l'effet de série.

Les SMR ne sont pas seulement électrogènes et offrent des solutions adaptées à de nombreuses demandes spécifiques : réacteurs calogènes, propulsion nucléaire, spatial, etc. Les SMR constituent une ouverture intéressante vers d'autres utilisations du nucléaire et vers de nouvelles technologies. Ils permettent dans le domaine électrogène le remplacement progressif des centrales à flamme et dans d'autres domaines tels que le chauffage des villes, le transport maritime, la désalinisation, le remplacement de systèmes

utilisant de l'énergie fossile. C'est donc une des solutions techniques prometteuses pour tenter de lutter contre le réchauffement climatique et la pollution de l'air dans les villes et les zones industrielles.

Leur développement dans le domaine civil est confronté aux réalités du prix du marché de l'énergie. Dans ce contexte, et comme pour les énergies renouvelables, leur massification ne pourra s'effectuer qu'avec des aides au démarrage, permettant d'atteindre un régime industriel optimisé.

Enfin, il faut noter que les SMR peuvent être attractifs à l'export en proposant des produits plus simples, avec un engagement initial plus faible et avec un retour sur investissement plus rapide. ■

“ Le raccourcissement des délais de construction est possible pour les SMR, mais comme pour les réacteurs de forte puissance, il reste très lié à l'effet de série. ”

Résumé

L'effet de taille a conduit à augmenter peu à peu la puissance des réacteurs nucléaires ce qui diminue le coût du kW produit. Mais la conséquence en est que le catalogue actuel des réacteurs nucléaires ne propose que des réacteurs de puissance supérieure au GW. Or de nombreuses applications seraient possibles dans d'autres domaines avec des réacteurs plus petits. Pour les réacteurs électrogènes c'est la possibilité de fournir des régions isolées, ou des pays à faible réseau. Les SMR permettraient, de par leur conception modulaire, de fournir des puissances adaptées, avec des coûts d'investissement initiaux plus faibles et des retours sur investissement plus rapides, ce qui permettrait leur introduction dans des endroits où le nucléaire n'est pas actuellement utilisé. Par ailleurs, des utilisations sont spécifiques aux MSR : les brise-glaces russes, la propulsion maritime, les réacteurs calogènes chinois, la désalinisation, etc. Ces SMR sont en développement partout dans le monde, et on présente dans cet article leur stratégie de déploiement, en particulier pour le remplacement des énergies fossiles dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique. ■

Abstract

The size effect has led to increase gradually the power of nuclear reactors, which reduces the cost of kW produced. The consequence is that the current catalog of nuclear reactors only offers reactors with a power greater than one GW. However, many applications would be possible in other areas with smaller reactors. For power reactors, they give the possibility of supplying isolated regions, or countries with a weak grid. By virtue of their modular design, SMRs would make it possible to provide suitable powers, with lower initial investment costs and faster returns on investment, which would allow their introduction in places where nuclear power is not currently used. In addition, uses are specific to MSRs: Russian icebreakers, maritime propulsion, Chinese heat reactors, desalination, etc. These SMRs are in development all over the world, and this article presents their deployment strategy, in particular for the replacement of fossil fuels in the context of the fight against global warming. ■