



Les petits réacteurs modulaires: Les nombreuses évolutions insufflent un nouveau dynamisme

Tandis que les réacteurs à eau légère de la troisième génération, puissants et très fiables, sont en cours de construction, les scientifiques et ingénieurs du monde entier travaillent déjà au développement de nouveaux types de réacteurs. Ainsi, des réacteurs compacts et modulaires garantiront l'alimentation énergétique de demain, et des systèmes de la quatrième génération l'approvisionnement durable d'après-demain.

Peu connus du grand public, des systèmes de petits réacteurs sont utilisés quotidiennement depuis des décennies, notamment pour la propulsion navale à usage militaire et dans les brise-glaces, ou encore pour l'alimentation électrique dans les régions polaires reculées. Selon la définition de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) de l'ONU, un «petit» réacteur présente une puissance électrique inférieure à 300 MW. À titre comparatif, une tranche de la centrale de Beznau délivre 365 MW, et Leibstadt, la plus grande centrale de Suisse, a une puissance de 1220 MW. Dans sa dernière compilation, l'AIEA liste plus de 70 projets en cours actuellement, concernant des concepts différents¹. Elle intègre les microréacteurs d'une puissance de jusqu'à 10 mégawatts. Ces installations, mobiles pour la plupart, pourront remplacer, par exemple, les générateurs diesel.

Des concepts de réacteurs innovants

Les petits réacteurs en cours de développement représentent de nombreux systèmes différents

regroupés sous l'appellation «Small Modular Reactors» (SMR). Les SMR ne sont pas seulement des centrales traditionnelles bien plus petites. Ils se basent en partie sur des concepts innovants connus depuis plusieurs décennies mais pas encore éprouvés. Ils présentent de nombreux avantages:

- Leurs conceptions répondent généralement à des exigences de sûreté très élevées. La plupart des SMR proposés possèdent des dispositifs de sûreté intrinsèques dits passifs en raison de leurs propriétés physiques. En d'autres termes, en cas de défaillance, ces systèmes n'ont pas besoin de pompes ou de soupapes actionnées, et la sûreté de l'installation est garantie également sans apport d'énergie ni intervention humaine.
- Les SMR nécessitent une maintenance réduite et peuvent fournir de la chaleur et de l'électricité sans recharge de combustible pendant des années, voire des décennies. Il en résulte des coûts d'exploitation bas.

▲ Représentation du système de réacteur modulaire développé par l'entreprise américaine NuScale. Il s'agit du premier petit réacteur modulaire homologué aux États-Unis. Les SMR sont associés à des coûts de construction bas.

¹ «Advances in Small Modular Reactor Technology Developments – 2020 Edition» https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf

² Rosner R. & Goldberg S. (2011): *Small Modular Reactors – Key to Future Nuclear Power Generation in the U.S.*

³ Locatelli G., Bingham C. & Mancini M. (2014): *Small Modular Reactors: A Comprehensive Overview of their Economics*

⁴ Tomi J. Lindroos et al. (2019): *A techno-economic assessment of NuScale and DHR-400 reactors in a district heating and cooling grid.*

⁵ Konsta Värri & Sanna Syri (2019): *The Possible Role of Modular Nuclear Reactors in District Heating: Case Helsinki Region.*

- En raison de leur faible encombrement, ils peuvent être montés sous terre et à proximité immédiate des consommateurs, qu'il s'agisse de lotissements ou de sites industriels ayant des besoins importants en chaleur et électricité. Ils sont également adaptés aux régions possédant un réseau électrique peu développé et en tant que source énergétique pour les installations de désalinisation d'eau de mer ou pour l'approvisionnement électrique des îles.
- Ils nécessitent des capitaux d'investissement comparativement faibles pour la construction, ce qui facilite le financement et octroie de la flexibilité. Selon le besoin, ils peuvent faire l'objet d'extensions progressives, module par module.
- Contrairement aux grands systèmes de réacteurs qui nécessitent un montage sur place, les SMR peuvent être montés en usine sur une ligne de production, puis être acheminés par camion jusqu'au lieu d'utilisation, et être rapportés à la fin de l'exploitation.

Un nouvel engouement

Depuis quelques temps, les investisseurs manifestent à nouveau de l'intérêt pour les SMR destinés aux applications civiles. Leur développement est particulièrement encouragé en Argentine, au Canada, en Chine, aux États-Unis, en Grande-Bretagne et en Russie. Ainsi, la première centrale nucléaire flottante au monde possédant deux réacteurs à eau sous pression russes d'une puissance de 38 MW chacun est arrivée à sa destination, sur la côte nord de la Sibérie. De même, les travaux de construction d'un réacteur à haute température à lit de boulets sont quasiment terminés en Chine¹. Le prototype d'un petit réacteur à eau sous pression est également en construction en Argentine. La Chine comme l'Argentine souhaite proposer ces systèmes sur le marché mondial.

Aux États-Unis comme en Grande-Bretagne, le gouvernement encourage le développement des SMR en tant que «Clean Technology». Ainsi, NuScale Power a remis aux États-Unis une demande d'homologation d'un nouveau type de SMR. La procédure devrait être achevée fin 2020. La toute première centrale, composée de douze modules, sera construite sur le terrain du Laboratoire national de l'Idaho.

Dans les pays occidentaux, la procédure d'homologation dure généralement plusieurs années. Les SMR fondés sur les technologies éprouvées (p. ex. le réacteur de NuScale) sont les plus avantageux ici étant donné que les autorités possèdent déjà une longue expérience dans ce domaine. Il est également important qu'un système puisse au préalable faire l'objet d'une homologation de type afin qu'en cas d'ajout d'un module supplémentaire, il ne soit pas nécessaire de relancer la procédure d'autorisation dans son ensemble.

Démonstration de la rentabilité

La rentabilité des SMR destinés à une utilisation commerciale n'a pas encore été démontrée. Des études énergétiques^{2,3} menées aux États-Unis et en Europe indiquent que ces systèmes recèlent effectivement un potentiel de marché important, mais que les barrières à l'introduction doivent tout d'abord être levées. L'avantage des coûts de production en série joue à partir d'une certaine quantité de modules produits, et lorsque la courbe d'apprentissage est passée. Si ce point est atteint et les procédures d'autorisation sont efficaces, les SMR sont considérés comme concurrentiels.

Deux études finlandaises ont effectué un calcul détaillé en se basant sur l'approvisionnement en chaleur et en électricité de la ville d'Helsinki^{4,5}. Elles ont certes pointé du doigt les coûts élevés associés aux premières tranches construites, mais d'un autre côté, les SMR peuvent apporter une contribution importante pour l'approvisionnement en chaleur, car en raison de la production épuisée du bois et du potentiel limité de la géothermie, les alternatives pauvres en CO₂ sont limitées. Pour que les SMR puissent également être concurrentiels sur le marché de l'électricité, des procédures d'autorisation harmonisées et des aides d'État au démarrage de la production en série sont nécessaires.

En Europe, outre la Grande-Bretagne, la Bulgarie, l'Estonie, la Pologne, la République tchèque et la Roumanie s'intéressent tout particulièrement aux SMR. En Chine, les SMR permettront de remplacer le charbon pour l'approvisionnement en chaleur, et de réduire ainsi la pollution atmosphérique colossale. Avec un SMR en exploitation et deux autres en construction, la Chine possède les projets les plus avancés, avec la Russie (cf. carte du monde sur la page suivante).

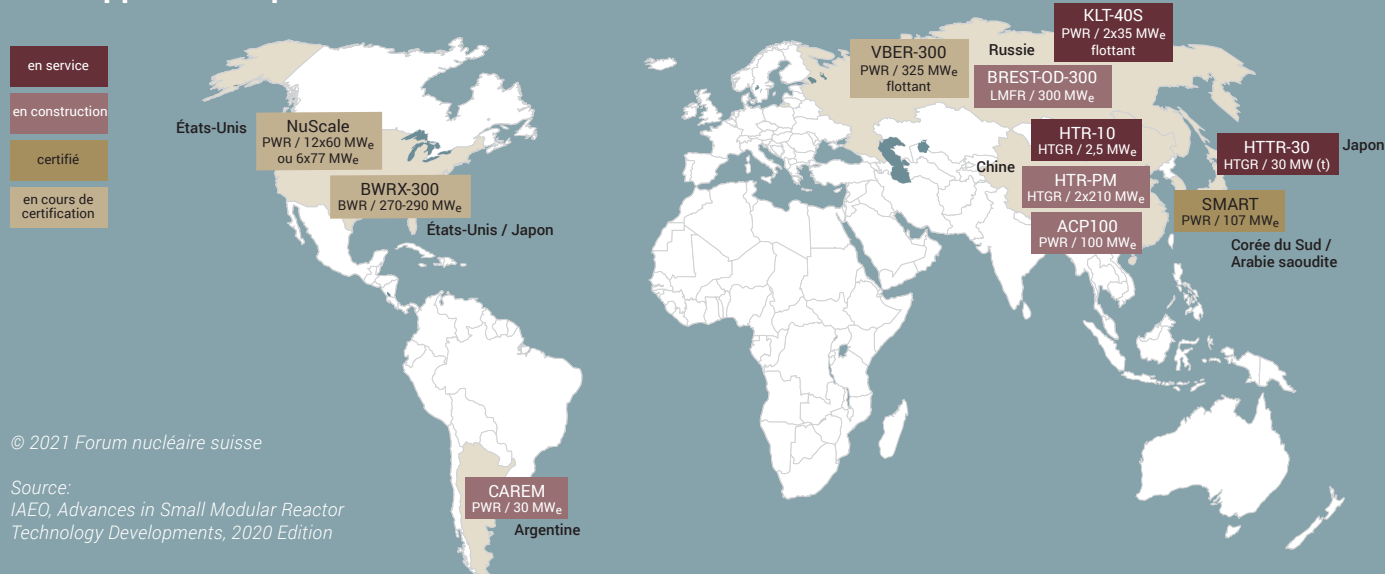
Premières homologations en Occident

Au Canada, aux États-Unis et en Grande-Bretagne, les gouvernements encouragent le développement des SMR en tant que «Clean technology». Ainsi, le SMR de NuScale a été homologué pour les États-Unis en 2020 (Design Certification Application, DCA). La première centrale, équipée de douze modules, doit être construite sur le terrain du Laboratoire national de l'Idaho. Dans les pays occidentaux,

▼ L'«Akademik Lomonosov», la première centrale nucléaire flottante au monde, en route vers la Sibérie orientale. La technologie de réacteur se base sur les brise-glaces nucléaires russes actuels. À ce jour, trois autres brise-glaces équipés de réacteurs de plus forte puissance sont en construction.



Les petits réacteurs modulaires (SMR) ayant atteint le stade de développement le plus avancé



© 2021 Forum nucléaire suisse

Source: IAEA, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2020 Edition*

la procédure d'homologation dure plusieurs années. Les SMR qui, comme le réacteur de NuScale, se basent sur des technologies éprouvées, représentent des avantages car les autorités bénéficient d'une longue d'expérience.

Par ailleurs, il est important qu'un système puisse faire l'objet d'une homologation de type, de sorte que lorsque d'autres modules sont ajoutés, il n'est pas nécessaire à chaque fois de recommencer toute la procédure d'autorisation.

Encouragement de SMR indigènes

Le ministère américain de l'Énergie encourage le développement de SMR indigènes dans le cadre de programmes tels que l'Advanced Reactor Demonstration Program (ARDP) ou le Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear (GAIN). Le gouvernement britannique fait de même, comme le montre, la «Net Zero Strategy» publiée en octobre 2021, qui prend en compte les SMR pour réaliser les objectifs climatiques. Avec son expérience dans la construction de réacteurs destinés aux bateaux à propulsion, l'entreprise Rolls Royce joue ici un rôle clé.

Canada: un plan d'action largement soutenu

Au Canada, les SMR sont amenés à jouer un rôle décisif dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre et ils offriront des emplois hautement qualifiés. Le gouvernement base ses convictions sur une feuille de route soigneusement rédigée et bénéficiant d'un large soutien.

La rédaction du document «Appel à l'action: Feuille de route des petits réacteurs modulaires»⁶ a rassemblé tous les groupes concernés et intéressés du pays dans le cadre d'une procédure de dix mois, afin qu'ils discutent du potentiel des SMR au Canada. Experts comme peuples indigènes des territoires du nord ont ainsi eu l'occasion de s'exprimer. Sur cette base, des recommandations concrètes sur la procédure ultérieure ont été formulées. Certaines possibilités sont présentées ci-dessous.

⁶ https://smrroadmap.ca/wpcontent/uploads/2018/11/SMRroadmap_EN_nov6_Web-1.pdf

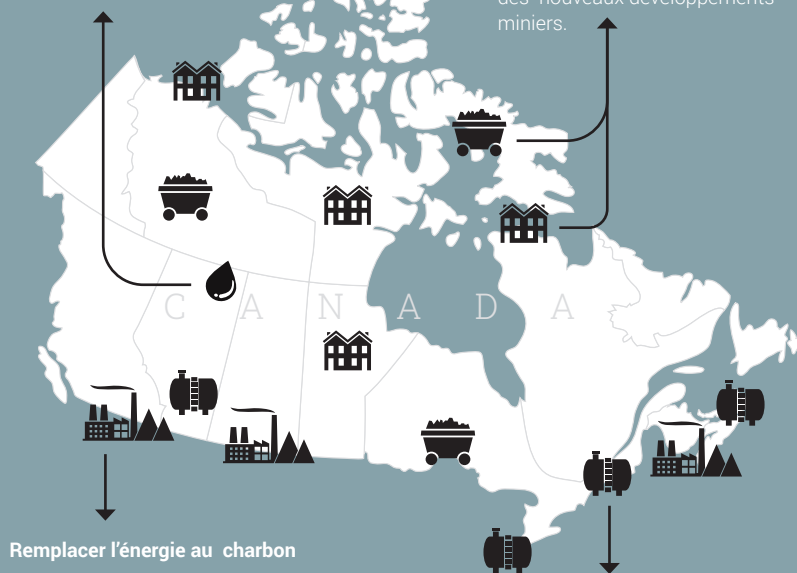
Applications potentielles des SMR au Canada

Sables bitumineux

- De la vapeur pour DGMV (drainage par gravité au moyen de vapeur) et de l'électricité afin de moderniser 96 installations
- Capacité moyenne de 210 MW_e pour les demandes en chaleur et en puissance
- Un remplacement de 5% par des SMR, entre 2030 et 2040, pourrait assurer une valeur annuelle comprise entre 350 et 450 mio. de dollars.

Communautés éloignées et mines

- 79 communautés éloignées au Canada avec des besoins énergétiques > 1 MW_e
- 24 mines hors réseau actuelles et potentielles
- Des SMR pour remplacer le diesel coûteux et l'huile de chauffage
- Les coûts élevés du diesel sont une barrière. Les SMR pourraient faciliter et permettre des nouveaux développements miniers.



Remplacer l'énergie au charbon

- 29 unités au Canada dans 17 installations d'une capacité moyenne de 343 MW_e
- Un remplacement de 10% par des SMR, entre 2030 et 2040, pourrait assurer une valeur annuelle de 469 mio. de dollars.

Vapeur à haute température pour l'industrie lourde

- 85 sites d'industrie lourde (p. ex. chimique, raffinage du pétrole) avec une capacité moyenne de 25 50 MW_e
- Un remplacement de 5% par des SMR, entre 2030 et 2040, pourrait assurer chaque année une valeur de 46 mio. de dollars.

Source: Feuille de route des petits réacteurs modulaires, 2018

Systèmes de petits réacteurs modulaires en cours de développement avancé (sélection)

HTR-PM, le réacteur chinois haute température à lit de boulets (prototype en construction)

Le High Temperature Gas-cooled Reactor – Pebble Bed Module (HTR-PM) est une évolution chinoise du réacteur à lit de boulets allemand et d'un réacteur d'essai construit à l'Université de Tsingua, Pékin. Dans ce réacteur refroidi au gaz hélium, les boulets de combustible de la taille d'un grain de sable sont entourés d'une couche de protection avant d'être contenus dans des billes de graphite de la taille d'une balle de tennis. En cas de défaillance du refroidissement, aucune fusion du cœur ne peut se produire. Ce réacteur innovateur est actuellement en construction à Shidao-Bay, en Chine. Puissance par module: 250 MW_{th} / 100 MW_e. Des défis techniques spécifiques: technologie des matériaux pour les températures très élevées (~1000°C); recyclage du combustible usé complexe.

www.chng.com.cn

Carem-25, réacteur à eau sous pression argentin (prototype en cours de construction)



Carem (Central Argentina de Elementos Modulares) reprend le développement d'un système de propulsion sous-marin abandonné entre-temps. Il s'agit d'un réacteur à eau sous pression dans lequel les générateurs de vapeur sont intégrés dans la cuve de pression enterrée. Il possède une sécurité passive. Le prototype Carem-25 est actuellement en construction à côté de la centrale nucléaire d'Atucha. L'objectif est ensuite de construire des versions plus puissantes pouvant atteindre 120 MW_e.

Puissance par module: 100 MW_{th} / 30 MW_e

www.cnea.gov.ar/carem

NuScale Power Module

Le NuScale Power Module développé par la compagnie américaine NuScale est un petit réacteur pouvant être transporté par la route. Il se base sur la technologie éprouvée des réacteurs à eau sous pression. Il possède une sécurité dite passive et intrinsèque. Jusqu'à douze modules peuvent être assemblés pour former une centrale nucléaire.

Puissance par module: 200 MW_{th} / 60 MW_e

Conception homologuée aux États-Unis. Parties intéressées au Canada, en Jordanie et en Roumanie.

www.nuscalepower.com

BWRX-300 de GE Hitachi Nuclear Energy

Le SMR développé par General Electric Hitachi est un petit réacteur à eau bouillante basé sur l'ESBWR, un système de réacteur avancé de la troisième génération d'une puissance de 1520 MWe, homologué aux États-Unis mais pas encore construit. Le BWRX-300 a été considérablement simplifié par rapport à l'ESBWR et utilise de nombreux composants éprouvés ainsi qu'une chaîne logistique

établie. Il possède une circulation naturelle et des systèmes de sécurité passifs.

Puissance par module: ~900 MW_{th} / 300 MW_e

En cours d'examen préalable au Canada. Des parties intéressées en Estonie et en Pologne.

<https://nuclear.gepower.com>

SMR-160 von Holtec



Le SMR-160 est proposé par l'équipementier nucléaire américain Holtec International. Il s'agit d'un réacteur compact à eau sous pression en partie souterrain doté d'un circuit de refroidissement primaire entraîné uniquement par la force de gravité et ne nécessitant ni pompe, ni vanne, ni alimentation énergétique externe pour le refroidissement de la chaleur résiduelle. Dans les régions arides, il peut également fonctionner avec un refroidissement par l'air.

Puissance par module: ~500 MW_{th} / 160 MW_e

Certification en cours au Canada. Projet avec six modules en Ukraine.

www.holtecinternational.com

ACP100 de CNNC (Linglong One)



Le type chinois ACP100 (Advanced Chinese Pressurized Water Reactor) est fondé sur la série des réacteurs à eau sous pression française. Tous les systèmes primaires tels que le pressuriseur et le générateur de vapeur sont intégrés dans la cuve de pression. Le système de refroidissement passif a été repris de l'AP1000 de Westinghouse et du type chinois avancé Hualong One. L'AIEA a étudié la conception de l'ACP100 et remis un avis favorable en 2016.

Puissance par module: 385 MW_{th} / 125 MW_e

Première tranche en construction à Changjiang, sur l'île d'Hainan. D'autres variantes de puissance et une version flottante sont également en projet.

www.cnncc.com.cn