

# Feuille d'information

Novembre 2019

## Les futurs systèmes de réacteurs

### Les nombreuses évolutions insufflent un nouveau dynamisme

Tandis que les réacteurs à eau légère de la troisième génération, puissants et très fiables, sont actuellement 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. A 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.

#### Des concepts de réacteurs innovants

Les petits réacteurs actuellement 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.
- 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 ins-



Photo: NuScale Power

La technique nucléaire de demain: simulateur de la salle de commande du système de réacteur modulaire de l'entreprise américaine NuScale. Ce système, axé sur des coûts de construction faibles, est sur le point d'être homologué aux États-Unis.

tallations 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 Chine<sup>1</sup>. Le prototype d'un petit réacteur à eau sous pression est également en construction en Argentine. La Chine comme l'Argentine souhaitent 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.

### Preuve de rentabilité

La rentabilité des SMR destinés à une utilisation commerciale n'a pas encore été démontrée. Des études énergétiques<sup>2,3</sup> 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<sup>4,5</sup>. 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 CO<sub>2</sub> 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, l'Estonie, la Pologne, la République tchèque, et la Roumanie manifestent de l'intérêt pour le SMR. En Chine, les SMR permettront de remplacer le charbon pour l'approvisionnement en chaleur, et de réduire ainsi la pollution atmosphérique colossale.

<sup>1</sup> Pour plus amples informations sur ce réacteur voir la feuille d'information du Forum nucléaire suisse: «Des réacteurs innovants qui utilisent des sphères de combustible». [www.forumnucleaire.ch](http://www.forumnucleaire.ch), liens «Faits et chiffres», «Feuilles d'information»

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

<sup>3</sup> Locatelli G., Bingham C. & Mancini M. (2014): Small Modular Reactors: A Comprehensive Overview of their Economics and Strategic Aspects.

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

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

Photo: Rosatom



L'«Akademik Lomonosov», la première centrale nucléaire flottante au monde, en route vers la Sibérie orientale. La technique de réacteur est issue des brise-glaces russes à propulsion nucléaire actuels. Trois autres brise-glaces équipés de réacteurs plus puissants sont en construction.

## 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<sub>th</sub> / 100 MW<sub>e</sub>

Des défis techniques spécifiques: technologie des matériaux pour les températures très élevées (~1000°C); recyclage du combustible usé complexe.

[www.chng.com.cn](http://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 et sera mis en exploitation en 2020. L'objectif est ensuite de construire des versions plus puissantes pouvant atteindre 120 MW<sub>e</sub>.

Puissance par module: 100 MW<sub>th</sub> / 30 MW<sub>e</sub>

[www.cnea.gov.ar/carem](http://www.cnea.gov.ar/carem)



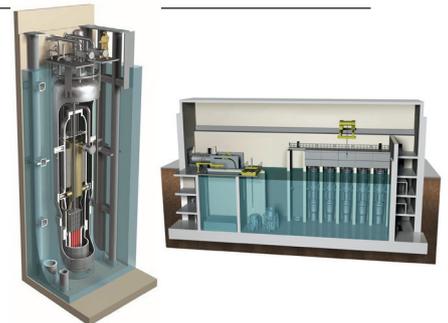
### IPWR de NuScale

L'Integral Pressurized Water Reactor (IPWR) a été développé par la société américaine NuScale Power Inc. à l'Oregon State University. Le NuScale Power Module™ individuel est un petit réacteur pouvant être transporté par la route. Il se base sur la technologie éprouvée des réacteurs à eau sous pression. Le générateur de vapeur se trouve à l'intérieur de la cuve du réacteur. Les installations peuvent être équipées de jusqu'à douze modules (720 MW<sub>e</sub>) par enceinte de confinement, celles-ci se trouvant dans un bâtiment de sécurité souterrain commun et rempli d'eau.

Puissance par module: 200 MW<sub>th</sub> / 60 MW<sub>e</sub>

Certification en cours aux États-Unis. Parties intéressées au Canada, en Jordanie, en Roumanie, en République tchèque et aux États-Unis.

[www.nuscalepower.com](http://www.nuscalepower.com)



### SMR-160 de 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<sub>th</sub> / 160 MW<sub>e</sub>

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

[www.holteciinternational.com](http://www.holteciinternational.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 MW<sub>e</sub>, 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<sub>th</sub> / 300 MW<sub>e</sub>

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

<https://nuclear.gewater.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<sub>th</sub> / 125 MW<sub>e</sub>

Première construction prévue à Changjiang, sur l'île d'Hainan. Lancement du chantier fin 2019. D'autres variantes de puissance et une version flottante sont également en projet.

[www.cnncc.com.cn](http://www.cnncc.com.cn)



## Quatrième génération: les systèmes du futur

Les chercheurs du monde entier travaillent déjà sur les réacteurs de la quatrième génération destinés à la seconde moitié du 21<sup>e</sup> siècle. En combinaison avec les énergies renouvelables, ceux-ci joueront un rôle majeur dans l'exploitation durable des ressources pour les générations à venir.

Sur l'initiative des États-Unis, neuf pays se sont réunis en 2000 pour créer le «Generation IV International Forum» (GIF) qui regroupe désormais 13 pays et Euratom, dont la Suisse. L'objectif est de développer d'ici 2040 de nouveaux réacteurs et cycles de combustibles permettant de réduire drastiquement la consommation des ressources, la quantité de déchets radioactifs et les possibilités de détournement pour la fabrication d'armes nucléaires.

Le GIF a sélectionné les six systèmes de réacteurs suivants en vue de leur développement:

- **Molten Salt Reactor (MSR):** réacteur rapide à sels fondus; le combustible et le fluide caloporteur sont composés d'une fonte de fluorure d'uranium. Un MSR expérimental était en exploitation aux États-Unis dans les années 1960.
- **Gas-cooled Fast Reactor (GFR):** réacteur rapide à caloporteur gaz; développement des réacteurs britanniques Magnox et AGR.

- **Lead-cooled Fast Reactor (LFR):** réacteur rapide à caloporteur plomb; développement de petits réacteurs existants destinés à la propulsion navale
- **Sodium-cooled Fast Reactor (SFR):** réacteur rapide à caloporteur sodium; développement de systèmes de réacteurs éprouvés depuis des décennies
- **Supercritical Water-cooled Reactor (SCWR):** réacteur à eau supercritique; développement des réacteurs à eau bouillante actuels
- **Very High Temperature Reactor (VHTR):** développement des réacteurs à haute température actuels tels que les réacteurs modulaires à lit de boulets

Tous ces systèmes de réacteurs ont en commun des exigences élevées en matière de technologie des matériaux. Le SFR et le VHTR sont actuellement les systèmes prioritaires.

### Programme de recherche de l'UE

En 2007, l'UE a lancé la «Sustainable Nuclear Fission Technology Platform». Les thèmes de recherche concernent notamment la construction d'un réacteur rapide à caloporteur sodium («Astrid»), d'un réacteur rapide à caloporteur plomb («Alfred»), ainsi que d'un réacteur rapide haute température à caloporteur gaz («Allegro»). De plus, un réacteur de recherche multidisciplinaire («Myrrha») sera construit à Mol, en Belgique. Il proposera des solutions innovantes en matière de traitement des déchets radioactifs ou de développement de systèmes de réacteurs avancés, et un accélérateur externe sera utilisé (ADS, Accelerator Driven System).

### La technologie d'après-demain

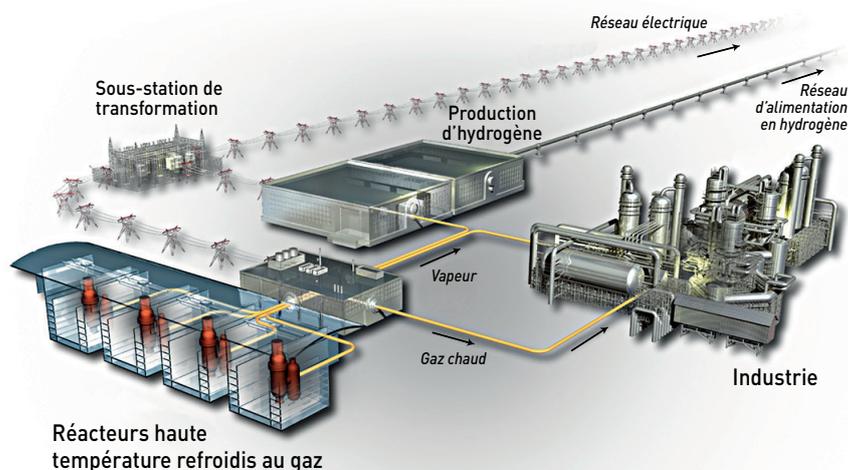
Tous ces projets concernent des installations de démonstration dont la rentabilité n'a pas encore été attestée. En dehors du cadre du GIF, la Russie a mis en service en 2016 un réacteur rapide refroidi au sodium d'une puissance électrique de 800 mégawatts.

La Chine et l'Inde souhaitent elles aussi recourir à l'avenir aux réacteurs rapides. Le projet français «Astrid» a quant à lui été suspendu en 2019, le recyclage intégral du combustible n'étant pas pertinent au regard des prix actuellement bas de l'uranium naturel.

Informations concernant le «Generation IV International Forum» sous: <https://www.gen-4.org>

Informations concernant la «Sustainable Nuclear Fission Technology Platform» de l'UE sous: [www.snetp.eu](http://www.snetp.eu)

Forum nucléaire suisse  
Frohburgstrasse 20  
4600 Olten  
Téléphone 031 560 36 50  
info@forumnucleaire.ch  
[www.forumnucleaire.ch](http://www.forumnucleaire.ch)



Projet américain pour la quatrième génération: réacteurs à haute température refroidis au gaz pour la production simultanée d'électricité, d'hydrogène et de chaleur pour l'industrie ([www.ngnpalliance.org](http://www.ngnpalliance.org))

Source: Idaho National Laboratory